

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO DA PARAÍBA
CAMPUS JOÃO PESSOA
DIRETORIA DE ENSINO SUPERIOR
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VICTOR ASLAN FREIRE MENEZES

**ESTUDO COMPARATIVO DAS CONFIGURAÇÕES DE ATERRAMENTO COM
POUCAS HASTES**

**João Pessoa – PB
2025**

VICTOR ASLAN FREIRE MENEZES

**ESTUDO COMPARATIVO DAS CONFIGURAÇÕES DE ATERRAMENTO COM
POUCAS HASTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao componente curricular “Projeto de Conclusão de Curso”, do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal da Paraíba – Campus João Pessoa (IFPB), como requisito avaliativo do referido componente curricular e necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador: Álvaro de Medeiros Maciel, Dr.

**JOÃO PESSOA – PB
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

M543e Menezes, Victor Aslan Freire.

Estudo comparativo das configurações de aterramento com poucas hastes / Victor Aslan Freire Menezes. – 2025.

68 f. : il.

TCC (Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Controle e Processos Industriais / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro de Medeiros Maciel.

1. Aterramento elétrico. 2. Haste de aterramento. 3. Resistividade do solo. 4. Método Wernner. I. Título.


CDU 621.316.9(043)

VICTOR ASLAN FREIRE MENEZES


**ESTUDO COMPARATIVO DAS CONFIGURAÇÕES DE ATERRAMENTO COM
POUCAS HASTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao componente curricular “Projeto de Conclusão de Curso”, do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal da Paraíba – Campus João Pessoa (IFPB), como requisito avaliativo do referido componente curricular e necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.


Trabalho Aprovado em 03 / 12 / 2025 pela banca examinadora

Documento assinado digitalmente
 **FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA**
Data: 06/01/2026 09:13:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Franklin Martins Pereira Pamplona, Dr.
Examinador, IFPB

Documento assinado digitalmente
 **JOSE ARTUR ALVES DIAS**
Data: 06/01/2026 11:40:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Artur Alves Dias, Dr.
Examinador, IFPB

Documento assinado digitalmente
 **ALVARO DE MEDEIROS MACIEL**
Data: 05/01/2026 16:13:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Álvaro de Medeiros Maciel, Dr.
Orientador, IFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por me conceder forças e sabedoria em cada etapa desta caminhada, aos meus pais, Valmir de Almeida Menezes e Iris Freire Menezes, pelo amor, apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim e à minha noiva, Marcelly Beatriz Dantas Fonseca, por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, oferecendo incentivo e compreensão.

*“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui,
nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis,
a próxima tentativa pode ser a vitoriosa”.*
— Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela oportunidade ingressar no curso de Engenharia Elétrica e apesar das dificuldades encontradas, o Senhor sempre permitiu que fosse possível alcançar os meus objetivos, durante os meus anos de estudos.

Em segundo lugar, agradeço aos meus pais, Valmir e Iris, por todo suporte e esforço que fizeram por mim, pelas motivações e palavras de sabedoria, é com orgulho que demonstro a minha gratidão e minha irmã Thamiris e meu Cunhado Cássio que me incentivaram nos momentos difíceis.

Também agradeço a minha companheira Marcelly Beatriz, pelo cuidado, apoio, incentivo, por sempre me fazer sorrir e principalmente por torna a vida mais leve, que contribuiu muito para a realização deste projeto. E também a toda a sua família, principalmente, minha sogra, Marcela Dantas, e meu cunhado, Guilherme Gabriel.

Aos amigos Igor Santos, Igor Barros, Thomas Gustavo, Gabriele Stefanie, Rhayssa Vitorino, Geniwalber Pontes, Thalyta Geovanna, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período do curso.

Ao professor Álvaro, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade, além de ter me dado todo apoio necessário para finalização de uma importante etapa da minha vida.

Aos amigos de curso, Sávio Murillo, Rafael Chaves, Matheus Alexsander, Andressa Nascimento, que convivi durante todo o percurso dessa formação e pelas trocas de experiências e de ajuda, além do apoio.

Aos professores e aos colegas de curso, com quem convivi intensamente durante anos de cursos, pelas trocas de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando.

E por fim, à instituição de ensino IFPB – Instituto Federal da Paraíba, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação e por tudo o que eu aprendi ao longo dos anos de curso.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa de sistemas de aterramento formados por hastes em diferentes quantidades e arranjos geométricos, com o objetivo de avaliar seu desempenho em termos de resistência elétrica e eficácia na dissipação de correntes de falha para o solo. Foram estudadas cinco configurações: haste individual, duas hastes em linha, três hastes em linha, três hastes em triângulo e quatro hastes em quadrado. A pesquisa tem como base a necessidade de compreender como o número de hastes e o arranjo geométrico influenciam diretamente o desempenho dos sistemas de aterramento, especialmente em solos de resistividade elevada. A metodologia empregada contemplou cálculos teóricos fundamentados em fórmulas consolidadas na literatura técnica, além de medições práticas realizadas com o terrômetro ETCR 3000B. Para tanto, foi aplicado o método de Wenner, procedimento amplamente utilizado para determinar a resistividade elétrica do solo. As medições foram realizadas no campo de futebol do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), o que permitiu obter dados reais e representativos das condições locais do terreno. Os resultados obtidos evidenciaram que o aumento no número de hastes, aliado à adoção de arranjos geométricos fechados, proporciona uma redução significativa na resistência de aterramento, além de favorecer uma distribuição mais uniforme do potencial ao redor da malha. Observa-se que, entre as configurações analisadas, as formações simétricas, como o quadrado, apresentaram melhor desempenho, sobretudo em condições de solo menos favoráveis. Conclui-se que a configuração das hastes exerce papel determinante no desempenho do sistema de aterramento, sendo recomendável a utilização de múltiplas hastes dispostas em arranjos simétricos sempre que possível. Esse estudo contribui para o aprimoramento de projetos de aterramento em instalações elétricas de baixa e média complexidade, fornecendo subsídios técnicos e econômicos que auxiliam na tomada de decisão e garantem maior segurança operacional.

PALAVRAS CHAVES: Haste de Aterramento; Resistividade do Solo, Método Wenner.

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis of grounding systems consisting of rods in different quantities and geometric arrangements, aiming to evaluate their performance in terms of electrical resistance and effectiveness in dissipating fault currents to the ground. Five configurations were studied: single rod, two rods in a line, three rods in a line, three rods in a triangle, and four rods in a square. The research is based on the need to understand how the number of rods and the geometric arrangement directly influence the performance of grounding systems, especially in high-resistivity soils. The methodology employed included theoretical calculations based on formulas established in the technical literature, as well as practical measurements performed with the ETCR 3000B ground tester. The Wenner method, a widely used procedure for determining soil electrical resistivity, was applied. The measurements were taken on the soccer field of the Instituto Federal da Paraíba (IFPB), which allowed for obtaining real and representative data of local ground conditions. The results showed that increasing the number of rods, combined with the adoption of closed geometric arrangements, significantly reduces grounding resistance and promotes a more uniform distribution of potential around the grid. Among the configurations analyzed, symmetrical formations, such as squares, performed best, especially in less favorable soil conditions. It is concluded that the rod configuration plays a decisive role in the performance of the grounding system, and it is recommended to use multiple rods arranged in symmetrical arrangements whenever possible. This study contributes to the improvement of grounding designs in low- and medium-complexity electrical installations, providing technical and economic insights that aid decision-making and ensure greater operational safety.

KEYWORDS: Grounding Rod; Soil Resistivity; Wenner Method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Constituição de um sistema de aterramento.....	20
FIGURA 2 – Haste simples e hastes rosqueada de aço-cobreado.....	27
FIGURA 3 – Alguns tipos de disposições das hastes analisadas.....	28
FIGURA 4 – Tensão de passo.....	32
FIGURA 5 – Tensão de toque.....	33
FIGURA 6 – Campo de futebol do IFPB – Campus João Pessoa.....	37
FIGURA 7 – Estratificação do solo.....	38
FIGURA 8 – Duas camadas de estratificação do solo.....	38
FIGURA 9 – Esquema da disposição das hastes usado no método de Wenner.....	39
FIGURA 10 – Croquis das linhas de medições.....	42
FIGURA 11 – Método da queda de potencial.....	42
FIGURA 12 – Terrômetro ETCR 3000B.....	43
FIGURA 13 – Haste usada neste estudo.....	44
FIGURA 14 – Realização da medição da resistividade do solo.....	45
FIGURA 15 – Haste cravada no solo (haste simples).....	47
FIGURA 16 – Haste alinhadas.....	47
FIGURA 17 – Parâmetros das mútuas entre as hastes h e m.....	48
FIGURA 18 – Formato das hastes em triângulo.....	50
FIGURA 19 – Formato das hastes em quadrado.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Resistividade x Umidade percentual em solo.....	24
GRÁFICO 2 – Resistividade x Temperatura.....	25
GRÁFICO 3 – Choques elétricos (de 2020 até 2024).....	31
GRÁFICO 4 – Curva do K x Espaçamento para a configuração triangular.....	51
GRÁFICO 5 – Curva do K x Espaçamento para a configuração quadrada.....	52
GRÁFICO 6 – Resistividade média do solo.....	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Constituição de um sistema de aterramento.....	22
TABELA 2 – Resistividade usuais de algumas regiões do Brasil.....	23
TABELA 3 – Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.....	23
TABELA 4 – Concentração de sais na resistividade de um solo.....	25
TABELA 5 – Influencia das correntes elétricas no corpo humano.....	29
TABELA 6 – Limites de corrente elétrica suportada pelos seres humanos.....	30
TABELA 7 – Área do terreno e o número mínimo de linhas na medição.....	41
TABELA 8 – Resultado da medição de campo – método Wenner.....	54
TABELA 9 – Média aritmética da medição.....	55
TABELA 10 – Desvio Padrão.....	55
TABELA 11 – Nova média aritmética da medição.....	56
TABELA 12 – Resistividade do solo – medição.....	57
TABELA 13 – Resistência das hastes analisadas.....	58
TABELA 14 – Resistência da haste simples.....	59
TABELA 15 – Resistência de 2 haste alinhadas.....	60
TABELA 16 – Resistência de 3 haste alinhadas.....	60
TABELA 17 – Resistência da haste em triângulo.....	61
TABELA 18 – Resistência da haste em quadrado.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFPB: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

ABRACOPEL: Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade

ETU: Especificação Técnica Unificada

STD: Strandars

EPIs: Equipamentos de Proteção Individual

Eq.: Equação

LISTA DE SÍMBOLOS

R_t – Resistência elétrica

ρ – Resistividade do solo

m^2 – Metro ao quadrado (Unidade de medida da área)

m – Metro (Unidade de medida do comprimento e/ou largura)

Ω – Ohms (Unidade de medida da Resistência)

$\Omega.m$ – Ohms metro (Unidade de medida de resistividade)

Kg – Quilograma (Unidade de medida do peso)

$^{\circ}C$ – Celsius (Unidade de medida da temperatura)

% – Porcentagem

” – Polegadas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	14
1.2	RELEVÂNCIA DO FENÔMENO DE ESTUDO.....	15
1.3	CENÁRIO DO PROBLEMA DE PESQUISA: UMA SÍNTESE.....	17
1.4	PROBLEMA DE PESQUISA.....	17
1.5	HIPÓTESE DA PESQUISA.....	17
1.6	OBJETIVOS	18
1.6.1	Objetivos Geral.....	18
1.6.2	Objetivos Específicos.....	18
1.7	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	CONCEITOS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO.....	19
2.2	RESISTIVIDADE DO SOLO.....	21
2.2.1	Tipo de solo.....	22
2.2.2	Grau de umidade do solo.....	23
2.2.3	Temperatura do solo.....	24
2.2.4	Índice de sais dissolvidos no solo.....	25
2.2.5	Compacidade do solo.....	26
2.2.5	Granulometria do solo.....	26
2.3	HASTES DE ATERRAMENTO E SUAS CONFIGURAÇÕES.....	26
2.3.1	Características das Hastes.....	27
2.3.2	Análise das Configurações de Aterramento.....	28
2.4	NÍVEIS DE SEGURANÇA.....	29
2.4.1	Tensão de passo.....	31
2.4.2	Tensão de toque.....	32
2.5	NORMAS APLICÁVEIS.....	34
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	36
3.1.1	Quanto à classificação.....	36
3.1.2	Quanto à abordagem.....	36
3.1.3	Quanto à tipologia da pesquisa.....	36

3.2	LOCAL DAS MEDIÇÕES.....	37
3.3	MÉTODO DE MEDIÇÃO.....	38
3.3.1	Método de Wenner.....	39
3.3.2	Método de Queda de Potencial.....	42
3.4	PROCEDIMENTOS EM CAMPO.....	43
3.5	CONFIGURAÇÕES DAS HASTES E FÓRMULAS APLICADAS.....	46
3.5.1	Haste simples.....	46
3.5.2	Hastes alinhadas.....	47
3.5.3	Hastes em triângulo.....	50
3.5.4	Haste em quadrado.....	51
3.6	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DOS DADOS.....	53
4	RESULTADOS.....	54
4.1	MEDIÇÃO DE CAMPO.....	54
4.2	CÁLCULO DA RESISTIVIDADE DO SOLO.....	56
4.3	RESISTÊNCIAS DAS HASTES ANALISADAS.....	58
4.4	VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO, COMPRIMENTO E DIÂMETRO DAS HASTES.....	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
6	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O sistema de aterramento é um dos principais componentes da segurança elétrica, cuja finalidade é proteger as pessoas contra os perigos dos choques elétricos e assegurar a integridade dos equipamentos. De forma objetiva, pode ser definido como a ligação de partes condutoras de uma instalação elétrica à terra, com o intuito de escoar correntes de falha para o solo, garantindo segurança operacional e prevenindo danos. De acordo com a NBR 5410:2004, o aterramento é fundamental para a proteção contra choques elétricos, sobretensões e para o correto funcionamento dos dispositivos de proteção (ABNT, 2020)

Historicamente, o desenvolvimento dos sistemas de aterramento passou por diversas etapas, impulsionado por cientistas que buscaram compreender os fenômenos elétricos. Michael Faraday, por exemplo, demonstrou experimentalmente que objetos carregados podem ser descarregados ao serem conectados ao solo, o que fundamenta o princípio do aterramento (Faraday, 1821). Outro nome de destaque é do físico e matemático William Thomson, conhecido como Lord Kelvin, que identificou a redução da resistência elétrica do solo com o aumento da profundidade dos eletrodos (Thomson, 1862). As contribuições desses cientistas e de muitos outros, fundamentaram o reconhecimento da importância da dissipação controlada de correntes para a prevenção de acidentes.

A partir desses avanços, normas e regulamentações técnicas foram elaboradas como objetivo de padronizar métodos e garantir a segurança das pessoas e nas instalações. Em qualquer sistema de energia elétrica, o projeto de proteção deve incluir um sistema de aterramento corretamente dimensionado e implantado, cuja eficiência depende diretamente de fatores como a resistividade do solo, a profundidade e o diâmetro dos eletrodos, além da disposição geométrica e da quantidade de hastes empregadas (Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 2013).

Diante disso, este trabalho concentra-se na análise experimental e comparativa de como a quantidade de hastes e diferentes configurações, especificamente no solo do campus do IFPB em João Pessoa. O objetivo é verificar como a variação geométrica das hastes impacta a resistência de terra, que otimizem a segurança e o desempenho do sistema elétrico conforme as normas técnicas vigentes. Tais elementos também impactam diretamente a uniformidade do

potencial elétrico no solo, de modo afetar as condições de segurança de pessoas próximas às instalações.

Destacam-se, nesse contexto, regulamentações como a Norma Regulamentadora nº 10 (Brasil, 2019), que define requisitos mínimos para a prevenção de riscos elétricos; a NBR 5419 (ABNT, 2015), que aborda proteção de estruturas contra descargas atmosféricas; a NBR 15751 (ABNT, 2013), que estabelece critérios de segurança para o dimensionamento de eletrodos de aterramento em sistemas elétricos; a NBR 13571 (ABNT, 1996), que especifica métodos de ensaio para os componentes dos sistemas de aterramento temporário, como hastes, cabos, grampos e conectores. Outras normas complementares também orientam o projeto e a operação segura dos sistemas de aterramento.

1.2 RELEVÂNCIA DO FENÔMENO DE ESTUDO

No Brasil, índices elevados de acidentes elétricos são, frequentemente, atribuídos à presença de sistemas de aterramento inefficientes ou inadequadamente projetados. De acordo com o Relatório Anual de Acidentes Elétricos da Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade – ABRACOPEL (2025), ocorreram 759 mortes por choques elétricos e 31 por descargas atmosféricas no ano de 2024. Esses incidentes produzem impactos significativos na saúde pública, a economia e a infraestrutura do país. Historicamente, a inserção da eletricidade no cotidiano brasileiro ocorreu sem o devido acompanhamento técnico adequado nas etapas de implementação das infraestruturas, o que gerou uma cultura de improvisação e negligência frente às normas técnicas vigentes.

A ausência de fiscalização efetiva e diretrizes práticas específicas para diferentes regiões dificulta a padronização e compromete a segurança dos projetos elétricos. Em termos econômicos, sistemas mal dimensionados elevam o risco de acidentes e geram prejuízos financeiros tanto para empresas quanto para consumidores. Nesse sentido, normas técnicas como a NBR 5410 (ABNT, 2020) e a NBR 5419 (ABNT, 2015) são fundamentais para orientar aplicações de boas práticas, embora sua aplicação ainda enfrente obstáculos em diversas regiões do país.

O interesse pelo tema originou-se durante uma experiência na disciplina de Projeto de Subestações, a partir da realização de um experimento prático de medição da resistividade do solo pelo método de Wenner. Os dados coletados levaram ao questionamento sobre qual configuração de hastes proporcionaria melhor desempenho para o tipo de solo analisado. Essa

inquietação motivou o desejo de aprofundar o estudo sobre as hastes, e sua influência na resistência do sistema de aterramento e sobre como diferentes arranjos geométricos podem otimizar essa resposta. A análise comparativa entre resultados teóricos e experimentais permitiu identificar, de forma fundamentada, a configuração mais eficiente, reforçando a relevância da pesquisa.

A escolha deste tema relaciona-se em consonância com a formação acadêmica e às perspectivas profissionais, pois está alinhada especialmente na área de projetos e infraestrutura elétricas. O domínio técnico sobre segurança e eficiência dos sistemas elétricos é um diferencial competitivo que amplia a capacidade de atuação em projetos integrados, alinhados às exigências normativas e técnicas. Assim, o estudo contribui para a qualificação profissional e para a tomada de decisões técnicas, econômicas e gerenciais fundamentadas.

No âmbito profissional, observa-se que alguns técnicos ainda adotam critérios empíricos para definição de sistemas de aterramento, sem considerar fatores técnicos essenciais como a resistividade do solo, a quantidade disponível de hastes e a configuração geometria mais eficiente para a dissipação da corrente elétrica. Essa realidade é agravada pela escassez de estudos comparativos que avaliem diferentes configurações de malhas em função da variação do solo e da limitação do número de hastes evidencia uma lacuna significativa, especialmente em regiões geograficamente diversificadas. Dessa forma, a pesquisa contribui não apenas para a qualificação profissional, mas também para decisões técnicas, econômicas e gerenciais mais fundamentadas, tornando-me um profissional mais capacitado e diferenciado na área elétrica.

Além disso, a pesquisa preenche uma lacuna teórica e prática ao analisar diferentes configurações de malhas de aterramento com a variação das quantidades de hastes e geometrias, de forma a consolidar as exigências normativas aplicáveis a projetos dessa natureza. A ausência ou inadequação de aterramento é responsável por muitos acidentes elétricos com vítimas, principalmente em instalações residenciais (VISACRO, 2002), o que evidencia a importância dos sistemas de aterramento.

Por fim, destaca-se a relevância social deste estudo, visto que sistemas de aterramento corretamente dimensionados reduzem o risco de choques elétricos, danos a equipamentos, prejuízos financeiros e acidentes fatais. A pesquisa contribui para uma cultura preventiva pautada na responsabilidade técnica e valorização da vida. Em termos econômicos, promove o uso racional de materiais e recursos que evitem riscos. Sob a perspectiva política e cultural, incentiva o cumprimento das normas técnicas vigentes, na qual fortalece a ética e a segurança dos profissionais da área elétrica e na gestão de infraestruturas elétricas.

1.3 CENÁRIO DO PROBLEMA DE PESQUISA: UMA SÍNTESE

Um dos fatores determinantes para o desempenho de um sistema de aterramento é a resistividade elétrica do solo, fortemente influenciada pelo tipo de solo, teor de umidade, temperatura, compactação e pressão, concentração e composição química dos sais dissolvidos na água retida (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Todavia, além dessas características naturais, aspectos construtivos — como a quantidade de hastes e as diferentes configurações geométricas de instalação — exercem papel relevante na redução da resistência de aterramento.

Embora normas técnicas como a ABNT NBR 5410 (2020), ABNT NBR 5419 (2015), ABNT NBR 15751 (2010) e a regulamentação NR-10 (2019) estabeleçam diretrizes para a execução de sistemas de aterramento, ainda são escassos os estudos comparativos que avaliem de forma sistemática a influência de variáveis específicas, como a quantidade de hastes e suas configurações geométricas, sobre a resistência final do sistema.

Diante desse contexto, a investigação dessa questão permitirá propor soluções mais eficientes, alinhadas às exigências normativas, e contribuir para o aprimoramento das práticas de engenharia elétrica, a segurança das instalações, a preservação da vida humana e a otimização de recursos na execução de projetos.

Assim, a relevância desta pesquisa justifica-se por sua contribuição técnica e prática, ao oferecer subsídios para o aprimoramento dos métodos de projeto de aterramentos, conforme com as normas vigentes e com fortalecimento em uma cultura de prevenção e segurança no setor elétrico brasileiro.

1.4 PROBLEMA DE PESQUISA

Como a quantidade e as configurações geométricas das hastes influenciam a resistência de aterramento em sistemas elétricos?

1.5 HIPÓTESE DA PESQUISA

A otimização da resistência de aterramento depende principalmente da quantidade e das configurações geométricas das hastes, com influência adicional do tipo de solo.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo Geral

Analisar diferentes configurações de malhas de aterramento, com ênfase na quantidade e disposição das hastes, visando identificar a solução mais eficiente para a redução da resistência de aterramento.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Modelar diferentes configurações de malhas de aterramento com variações no número e disposição das hastes.
- Investigar os fundamentos teóricos do aterramento elétrico e suas aplicações
- Comparar o desempenho das malhas com base na quantidade e na disposição das hastes de aterramento.
- Identificar a configuração de hastes que proporciona a menor resistência de aterramento, considerando a quantidade disponível.

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos:

- Capítulo 2: Realiza-se a revisão bibliográfica acerca dos vários temas abordados no trabalho e apresentar os principais conceitos;
- Capítulo 3: São apresentados os materiais e métodos utilizados na realização de medições essenciais ao escopo do trabalho;
- Capítulo 4: São expostos e analisados os resultados obtidos a partir das medições realizadas;
- Capítulo 5: Apresentação das principais conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos e aspectos técnicos relevantes aos equipamentos e materiais empregados em sistemas de aterramento, que visam fornecer embasamento para a compreensão e análise do estudo das hastes de aterramento com diferentes configurações e quantidades.

2.1 CONCEITOS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

Para que um sistema elétrico atue com um desempenho seguro e que garanta segurança é fundamental entender o conceito de aterramento elétrico. Segundo Visacro Filho (2002, p.11), o aterramento elétrico “consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo”. O aterramento fornece caminhos de dispersão para correntes de falhas e descargas atmosféricas, a fim de estabilizar o potencial. Dessa forma, garante a operação segura do sistema de energia, dos equipamentos e dos operadores. A inexistência do sistema de aterramento pode colocar a vida das pessoas em risco.

Além disso, o aterramento é utilizado em diversos setores, desde residências até instalações industriais. No setor residencial, o sistema de aterramento desempenha papel essencial na proteção dos moradores contra choques elétricos, além de assegurar a integridade e o funcionamento adequado dos equipamentos eletroeletrônicos. Essa proteção é diretamente relacionada à escolha correta das hastes, que indica a eficácia do sistema varia conforme a configuração adotada, o que conecta diretamente ao presente estudo sobre diferentes quantidades e disposições de hastes.

No âmbito comercial, a instalação desse sistema é fundamental para garantir a segurança dos funcionários e clientes, bem como a preservar a integridade dos equipamentos e sistemas elétricos. Em estabelecimentos como hospitais, shopping centers e escritórios, que concentram um elevado fluxo de pessoas e equipamentos sensíveis, a correta implementação do sistema de aterramento torna-se indispensável.

No setor industrial, a aplicação do sistema de aterramento assume relevância ainda maior. Em ambientes que operam com maquinários de grande porte, sistemas de alta potência e que apresentam riscos de explosão, a segurança elétrica é uma prioridade. Nesse contexto, observa-se convergência entre autores e normas: todos enfatizam que a escolha da quantidade e configuração das hastes impacta diretamente na redução de riscos, na qual reforça que o

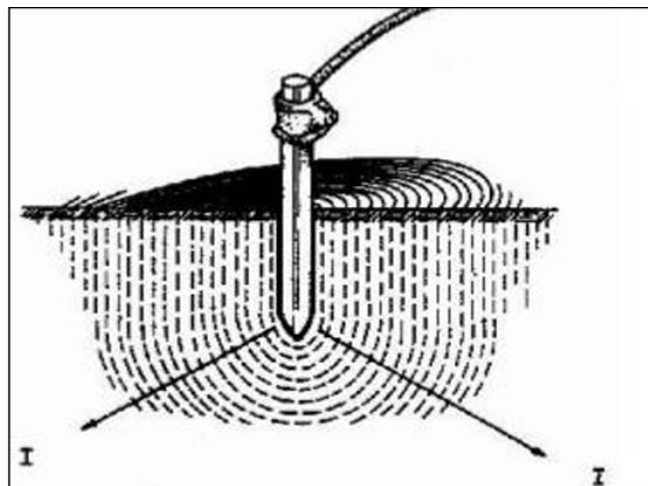
estudo das diferentes disposições é essencial para garantir proteção a trabalhadores e equipamentos. A adoção de um sistema de aterramento adequado contribui para a proteção dos trabalhadores contra choques elétricos e para a redução do risco de incêndio ocasionados por correntes de falta.

Para Geraldo Kinderman e Jorge Campagnolo (1995, p.7), os principais objetivos do aterramento são:

- Garantir que a resistência do aterramento seja suficientemente baixa, de forma que permita a dissipação eficaz das correntes de falta, para prevenir sobrecargas e falhas nas instalações elétricas;
- Controlar os níveis de tensão gerados pelas correntes de falta, para assegurar que os valores fiquem seguros para o corpo humano, de modo a não causar fibrilação cardíaca;
- Oferecer uma rota segura e eficiente para as descargas atmosféricas, na qual protege as estruturas e os equipamentos;
- Dispersar cargas elétricas estáticas acumuladas nas partes metálicas dos equipamentos, para evitar choques e possíveis riscos de ignição em ambientes sensíveis;
- Melhorar a eficiência dos equipamentos de proteção, como disjuntores e fusíveis, na qual possam detectar e interromper rapidamente falhas que envolva contato com o solo.

O sistema de aterramento é composto por basicamente por conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos, eletrodos de aterramento e aterra que envolve os eletrodos, de acordo com a Figura 1.

Figura 1: Constituição de um sistema de aterramento



Fonte: Visacro (2002)

Para Visacro Filho (2002, p.24), a resistência de aterramento “é diretamente proporcional à resistividade do solo (ρ) em que os eletrodos estão colocados. A constante de proporcionalidade K expressa apenas os efeitos geométricos (dimensão e forma) dos eletrodos”. O valor da R_t pode ser calculado com a constante de proporcionalidade através da Equação (1).

$$R_t = K \cdot \rho \quad (1)$$

2.2 RESISTIVIDADE DO SOLO

A resistividade de um material é uma característica que define o valor de sua oposição à passagem da corrente elétrica, tal propriedade varia de acordo com o material. Para Visacro Filho (2002, p.25) define “a resistividade do solo (ρ), como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta L de 1 m, área das faces A de 1m^2), preenchido com este solo”. A resistividade elétrica do solo é calculada com a Equação (2):

$$\rho = R \cdot \frac{L}{A} \quad (2)$$

Sendo:

ρ – Resistividade do solo, em $[\Omega \cdot \text{m}]$;

R – Resistência elétrica, em $[\Omega]$;

A – Área da face da cuba, em $[\text{m}^2]$;

L – Comprimento lateral da cuba, em $[\text{m}]$.

É muito importante conhecer as características do solo, pois ela varia de acordo com a localização geográfica e com outros fatores relacionados ao solo. Esse parâmetro garante a eficiência do aterramento, já que define o caminho de dissipação da corrente elétrica. Neste estudo, o conhecimento da resistividade do solo é o ponto de partida para avaliar o desempenho das diferentes configurações e quantidades de hastes influenciam a eficiência do aterramento, pois com ele foi possível realizar o experimentos de medir a resistividade no campus do IFPB com o metodo de Wenner.

Existem parâmetros que influenciam na resistividade do solo. Para Kindermann e Campagnolo (1995) a resistividade do solo depende de alguns fatores e varia de acordo com a composição do solo. Alguns fatores são:

- a) Tipo de solo;
- b) Grau de umidade do solo;
- c) Temperatura do solo;
- d) Índice de sais dissolvidos no solo;
- e) Compacidade do solo;
- f) Granulometria do solo.

A seguir, cada um desses fatores será detalhado, na qual destaca como eles influenciam a resistividade e como se conectam ao objetivo central desta pesquisa: compreender a eficácia de diferentes configurações de hastes de aterramento.

2.2.1 Tipo de solo

Os valores de resistividade para os solos são bastante distintos devido à grande variedade de solos existentes. Os tipos de solo não são claramente definidos, dessa forma, não é possível atribuir um valor específico de resistividade. Contudo é possível caracterizar uma faixa de valores para os diferentes tipos de solo, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solos

Meio Físico	Faixa de Resistividades ($\Omega.m$)
Água do Mar	~ 0,3
Água de Rio	~ 30
Água Destilada	300
Alagadiço, Limo, Húmus, Lama	< 150
Argila	300 - 5000
Calcário	500 - 5000
Areia	1000 - 8000
Granito e Basalto Fraturados	500 - 10000
Granito e Basalto Íntegros	> 10000

Fonte: NBR 7117 (2020)

Os valores de resistividade do solo no Brasil são mais elevados em comparação com outros países, por exemplo, Alemanha. Além disso, o Brasil tem valores típicos de cada região,

como apresenta a Tabela 2. Vale ressaltar que esses são valores de referência, mas que em locais específicos, pode ser diferentes da media regional e, pariculamente, em locais mais próximos ao litoral, os valores são menores (VISACRO, 2002).

Tabela 2: Resistividade usuais de algumas regiões do Brasil

Região	Valores típicos de resistividade do solo ($\Omega.m$)
Minas Gerais	2.450
São Paulo	700
Paraná	200 - 1.000
Mato Grosso	500 - 2.000
Pernambuco	100 - 2.000

Fonte: Visacro (2002)

Com base na literatura de Visacro (2002), espera-se que o solo de João Pessoa (IFPB), por ser uma região litorânea, apresente valores de resistividade mais baixos, mas os resultados das medições em campo podem revelar variações inesperadas devido à umidade local. Assim, compreender a relação entre resistividade e tipo de solo é indispensável para avaliar as diferentes configurações testadas nesta pesquisa.

2.2.2 Grau de umidade do solo

A condutividade do solo é afetada pela quantidade de água contida nela, na qual o aumento da umidade resulta na diminuição da resistividade do solo. A quantidade de água depende vários fatores, como clima, existência de lençóis subterrâneos, época do ano, dentre outros. Na Tabela 3, mostrar a variação da resistividade de um solo arenoso, com o aumento da umidade observa-se que a resistividade diminui.

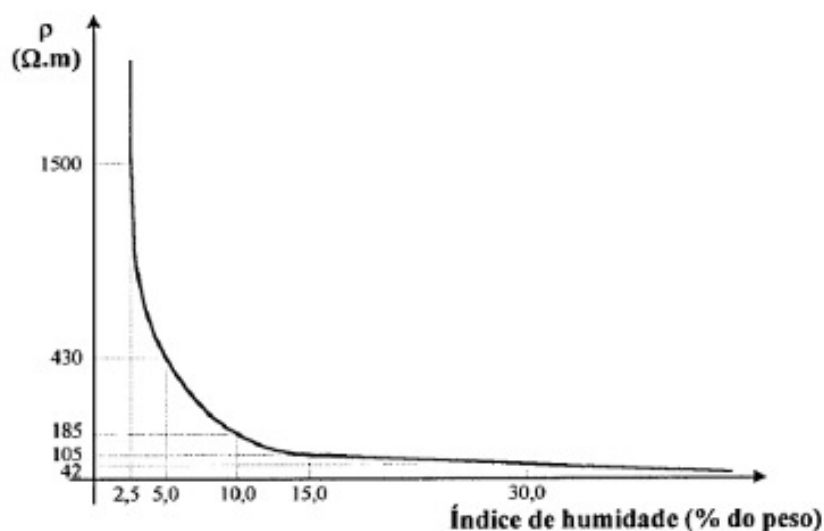
Tabela 3: Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade

Umidade (%)	Resistividade [$\Omega.m$]
0,0	10000000
2,5	1500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: Adaptado de Kindermann; Campagnolo (1995)

Segundo Visacro (2002, p.28), “a resistividade diminui sensivelmente com o aumento da quantidade de água diluída no solo para variações do índice de 0 a 18%. A partir daí, a variação da umidade afeta pouco a resistividade.” No Gráfico 1, ilustra a relação entre a resistividade e a umidade do solo, dessa forma, consolida o pensamento Visacro.

Gráfico 1: Resistividade x Umidade percentual em solo



Fonte: Adaptado de Visacro (2002)

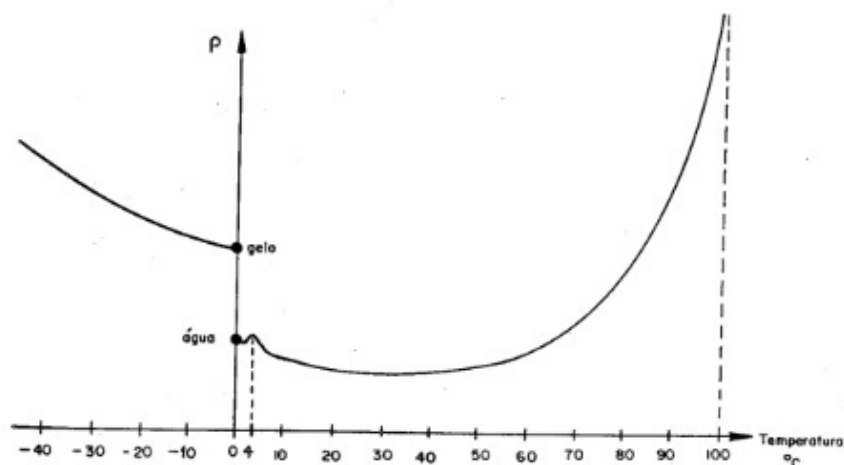
No contexto deste estudo, considerar a umidade é essencial, pois o desempenho das hastes no IFPB pode variar ao longo do ano. Avaliar a influência da umidade permite compreender melhor os resultados obtidos da resistividade.

2.2.3 Temperatura do solo

A influência da temperatura pode ser analisada entre dois aspectos distintos. Primeiro quando a temperatura eleva, há evaporação, a umidade do solo diminui, na qual deixa o solo mais seco, conseqüentemente aumenta a resistividade do solo. Por outro lado, se a temperatura baixar drasticamente para inferiores a 0 °C, a água irá transformar em gelo, aumenta significativamente a resistividade do solo. Como demonstra o gráfico 2.

Considerar a temperatura é fundamental, pois os resultados obtidos com as hastes no IFPB devem ser interpretados à luz das condições climáticas locais, que reforçam a necessidade de compreender esse fator.

Gráfico 2: Resistividade x Temperatura



Fonte: Kindermann; Campagnolo (1995)

2.2.4 Índice de sais dissolvidos no solo

A resistividade da água é determinada pelos sais nela dissolvidos, devido à condução eletrolítica, como a resistividade do solo depende da quantidade de água retida, conclui-se que essa resistividade é influenciada tanto pela quantidade quanto pelo tipo de sais dissolvidos presentes na água contida no solo (VISACRO, 2002). De acordo com a Tabela 4, pode observar a influência dos sais na resistividade.

Tabela 4: Concentração de sais na resistividade de um solo

<i>Sal adicionado (% em peso)</i>	<i>Resistividade [Ω.m] Solo arenoso</i>
0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

Fonte: Visacro (2002)

Compreender a influência dos sais é relevante, pois determinadas regiões podem apresentar características químicas específicas que afetam diretamente a eficiência das hastes de aterramento.

2.2.5 Compacidade do solo

Segundo Visacro (2002), um solo mais compacto apresenta uma resistividade menor, que foi proporcionado pela maior continuidade física. Um aumento da pressão sobre o solo geralmente aumenta a compacidade deste, há uma diminuição na resistividade. Recomenda-se a espera de um certo tempo para medição da resistência de terra após a instalação de um aterramento elétrico, pois o solo demora um certo tempo para se acomodar e melhorar sua compactação.

Compreender a compacidade é importante para analisar o desempenho das hastes, que podem variar em função do tempo e da acomodação do solo após a instalação.

2.2.6 Granulometria do solo

A presença de uma granulometria mais grossa tende a aumentar a resistividade do solo, uma vez que reduz sua capacidade de retenção de água, seja pelo escoamento para camadas mais profundas, seja pela maior suscetibilidade à evaporação. Além disso, a continuidade física do solo é prejudicada, pois o menor contato entre os grãos compromete a continuidade elétrica, resultando em uma menor condutividade elétrica do meio (VISACRO, 2002).

Esse fator conecta-se ao objetivo desta pesquisa porque solos mais arenosos, comuns em várias regiões do Brasil, podem demandar maior número ou diferentes configurações de hastes para atingir um valor adequado de resistência de aterramento.

2.3 HASTES DE ATERRAMENTO E SUAS CONFIGURAÇÕES

As hastes de aterramento constituem um dos elementos mais utilizados nos sistemas de aterramento, com a principal função dissipar correntes elétricas indesejadas para o solo, assegura a proteção de pessoas e equipamentos. De acordo com Kindermann e Campagnolo (1995, p. 190), o emprego de hastes verticais no aterramento “é importante para o bom desempenho do escoamento das correntes de surtos. Além de baixar a resistência de terra, a ponta da haste ajuda a manter os potenciais perigosos no fundo do solo”. Neste estudo, compreender as hastes e suas características são fundamentais, uma vez que elas representam a base na investigação de diferentes configurações e quantidades de hastes.

2.3.1 Características das Hastes

Embora qualquer eletrodo vertical possa ser utilizado, de modo que o metal não sofra corrosão e que tenha resistência mecânica suficiente para ser cravado no solo, no Brasil utiliza-se quase que exclusivamente as hastes de aço cobreado (MOREIRA; LEITE, 1996). Pela norma NBR – 13571 (1996, p.2) a haste de aço-cobreadas é um “eletrodo de aterramento constituído por uma barra cilíndrica rígida de aço-cobreado por eletrodeposição”. Vale ressaltar que existem outros tipos de condutores que podem ser utilizados.

A NBR – 13571 fixa os requisitos e características mínimas para as hastes, onde o seu comprimento pode variar de 1,5 a 4,0m, contudo, as de 2,5m são as mais utilizadas, pois diminuem o risco de atingirem dutos subterrâneos em sua instalação. Além disso, tem que ter uma qualidade na qual suporta condições elétricas, mecânicas e químicas (resistência a corrosão). As hastes de aço-cobreado podem ser simples ou rosqueadas, como mostra a Figura 2, a diferença entre elas é que nas extremidades possuem rosca que possibilita o prolongamento do eletrodo.

Figura 2: Haste simples e hastes rosqueada de aço-cobreado



Fonte: Adaptado de ETU – 150.1 (2024)

Neste estudo, o foco não recai sobre o material das hastes, e sim na análise das distintas configurações e quantidades delas. Ainda assim, conhecer as propriedades do tipo principal de haste continua sendo essencial para assegurar condições de ensaio homogêneas e resultados confiáveis. A literatura clássica descreve os diferentes tipos e materiais das hastes; entretanto, pesquisas recentes indicam que a distribuição geométrica e o arranjo das hastes influenciam mais a eficiência do aterramento do que o próprio material empregado (LI et al., 2025). Isso reforça a importância de avaliar diferentes configurações e quantidades de hastes, conectando teoria e prática no presente estudo.

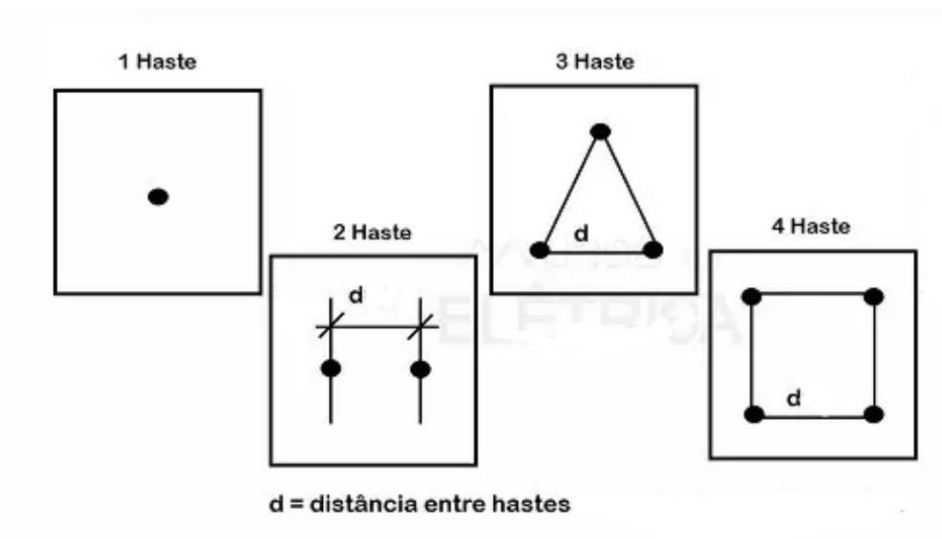
2.3.2 Análise das Configurações de Aterramento

Existem várias maneiras de realizar um aterramento, que vai de uma simples haste a mais complicadas configurações, basicamente, o eletrodo utilizado pode ser qualquer corpo metálico enterrado no solo. Contudo, deve ser um bom condutor de eletricidade, o material deve sofrer pouca ação de corrosão e inerte a ações de ácidos e sais dissolvidos no solo. Além de depender do sistema envolvido, das características do local e do custo. Para Kinderman e Campagnolo (1995, p.13), as principais maneiras são:

- a) Uma simples haste cravada no solo;
- b) Hastes alinhadas (em serie, 2, 3 ou mais)
- c) Hastes em triângulo;
- d) Hastes em Quadrado;
- e) Hastes em círculos;
- f) Placas de material condutor enterradas no solo;
- g) Fios ou cabos enterrados no solo.

Neste estudo, aplicaremos diferentes distribuições no solo do IFPB para avaliar a eficiência de cada configuração, serão analisadas as seguintes configurações: haste simples, duas hastes alinhadas, 3 hastes alinhadas, hastes em triângulo e hastes em quadrado, como apresentada na Figura 3.

Figura 3: Alguns tipos de disposições das hastes analisadas



Fonte: Adaptado de Henrique Mattede (2016)

2.4 NÍVEIS DE SEGURANÇA

Um aterramento bem elaborado deve preservar a integridade das pessoas, principalmente em relação aos limites dos potenciais de toque e de passo (FLEURY; GUEDES, 2015). Além disso, é fundamental obter um valor baixo de resistência para dispor um caminho de baixa impedância para uma corrente de falta ou descarga atmosférica.

No interior da malha de aterramento, os valores do potencial devem permanecer dentro de limites aceitáveis, tanto para os equipamentos como para as pessoas. Dessa forma, caso partes do corpo humano são submetidos a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, que pode resultar em diversos efeitos para o indivíduo, diversas situações, condições de risco (VISACRO, 2002).

A corrente elétrica que passa através do corpo causa uma reação no organismo, conhecido como choque elétrico. E seus efeitos, podem variar, dependendo da intensidade da corrente elétrica no corpo, do tempo de duração, do percurso, da umidade da pele, da resistência do corpo humano, pode até causar morte (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). A seguir na Tabela 5, apresenta os efeitos das correntes elétricas no corpo humano, sem levar em consideração o tempo de duração do choque.

Tabela 5: Influência das correntes elétricas no corpo humano

Corrente Elétrica (mA)		Reação Fisiológica	Consequências	Salvamento	Resultado mais Provável
CA	CC				
<25	<80	1mA: Sensação de formigamento 5 a 15mA: Contrações musculares 15 a 20mA: Contração violenta e impossibilidade de soltar eletrodo. Problemas respiratórios	Próximo a 25mA pode haver asfixia e morte aparente	Respiração artificial	Restabelecimento
25 a 80	80 a 300	Sensação insuportável Contração muscular violenta Asfixia	Morte Aparente	Respiração artificial	Restabelecimento
>80	>300	Asfixia imediata Fibriação ventricular Alterações musculares Queimaduras	Morte Aparente	Respiração artificial Massagem cardíaca	Se levado ao Hospital e feita desfibrilação: Restabelecimento
Correntes da ordem de Amperes		Queimaduras Necrose dos tecidos Asfixia imediata Fibriação ventricular	Morte Aparente Dependendo da extensão: sequelas e morte	Respiração artificial Massagem cardíaca Tratamento hospitalar	Recuperação difícil Atrofia muscular Morte

Fonte: Kindermann; Campagnolo (1995)

Na norma NBR – 15751, existe uma expressão, Equação 3, que possibilita calcular a máxima corrente elétrica suportada por uma pessoa de 50 kg, de modo que não ocorra a fibrilação durante o tempo submetido ao choque, para um choque de curta duração.

$$I_{choque} = \frac{k}{\sqrt{t}} \quad [\text{A}]. \quad (3)$$

Onde:

- *Ichoque* – Corrente elétrica (em Ampères) passando pelo corpo humano, limite para não causar fibrilação.
- *k* – É uma constante relacionada à energia de choque elétrico tolerada por percentual da população com uma determinada massa corpórea. Em IEEE-80 (2000) são apresentados alguns valores padrões, tais como, $k = 0,116$ (para pessoas com 50 kg) e $k = 0,157$ (para pessoas com 70 kg).
- *t* – Tempo (em segundos) da duração do choque ($0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$).

Além disso, a NBR – 15751 também estimular o limite máximo de corrente de choque que seres humanos consegue suporta de longa duração, como apresentada na Tabela 6.

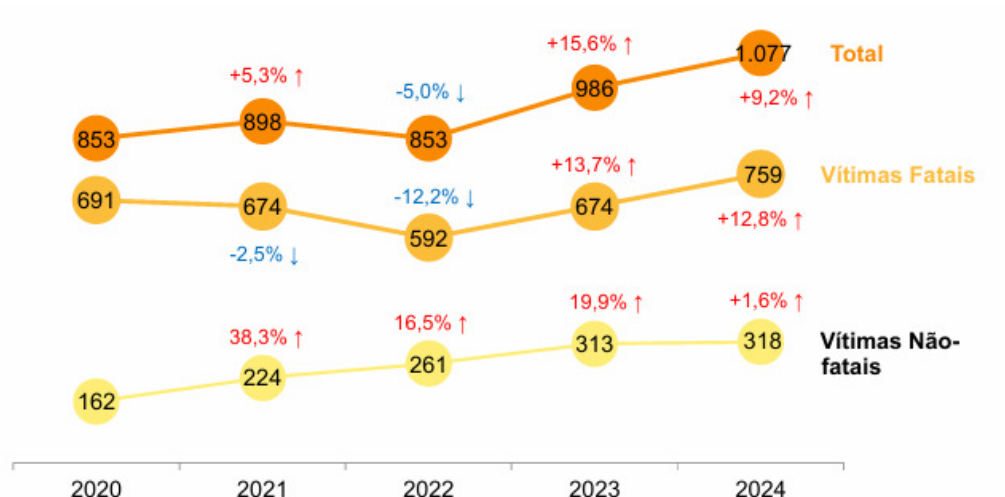
Tabela 6: Limites de corrente elétrica suportada pelos seres humanos

Corrente Limite de Largar de Longa Duração		
Porcentagem da População que Suporta	Homens	Mulheres
99,50%	9 mA	6 mA
50%	16 mA	10,6 mA

Fonte: Adaptado de NBR 15751 (2013)

De acordo com o Relatório Anual de Acidentes Elétricos da Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade – ABRACOPEL (2024), mostra pela Gráfico 3, que houve um aumento no número de acidentes e de mortes por choque elétrico. Em relação ao ano de 2023, teve um incremento de 12,8% em casos fatais e de 9,2% de casos, a falta de análise prévia de riscos, na qual está evidente na Norma Regulamentadora Nº 10 (NR-10) e também na NBR 16384 (ABNT, 2020), que trata de Segurança em Eletricidade – Recomendações e orientações para trabalho seguro em eletricidade, essa ausência prévia potencializa os acidentes.

Gráfico 3: Choques elétricos (de 2020 até 2024)



Fonte:ABRACOPEL (2025)

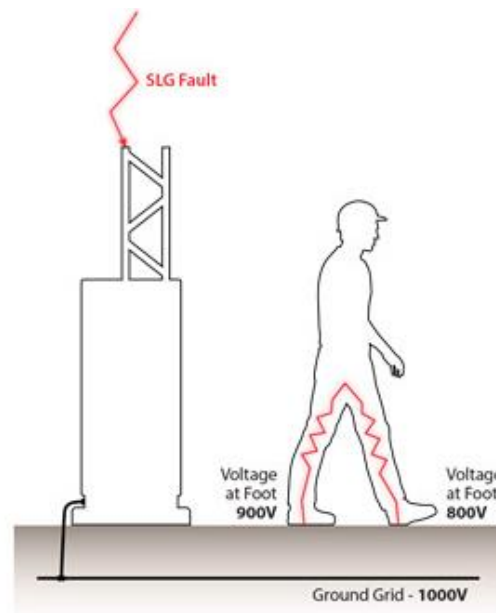
A finalidade principal de um sistema de aterramento otimizado é garantir que as tensões de passo e de toque permaneçam abaixo dos limites de segurança, com que reduza o risco de acidentes elétricos fatais. Isso conecta a teoria diretamente à prática, uma vez que esses limites definem o sucesso ou falha de qualquer projeto de aterramento.

2.4.1 Tensão de passo

Conforme a NBR – 15751 (2013,p.3), a tensão de passo é a “diferença entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1 m”. Dessa forma, significa que, apesar do corpo não teve contato com algum objeto energizado no momento do curto-circuito, por meio dos seus membros inferiores, possa existir diferença de potencial entre seus pés no momento da passagem da corrente elétrica para o solo.

Na Figura 4, ilustra como funciona a tensão de passo, na qual, pode acontecer com uma simples passo. Em situações de risco de falta elétrica à terra, recomenda-se que os indivíduos se desloquem com os pés juntos ou por meio de pequenos saltos, de forma a minimizar os efeitos da tensão de passo – medida preventiva amplamente adotada em conformidade com as orientações da NR-10 e de manuais técnicos complementares (Brasil, 2019).

Figura 4: Tensão de passo



Fonte: Adaptado de David Lewis (2022)

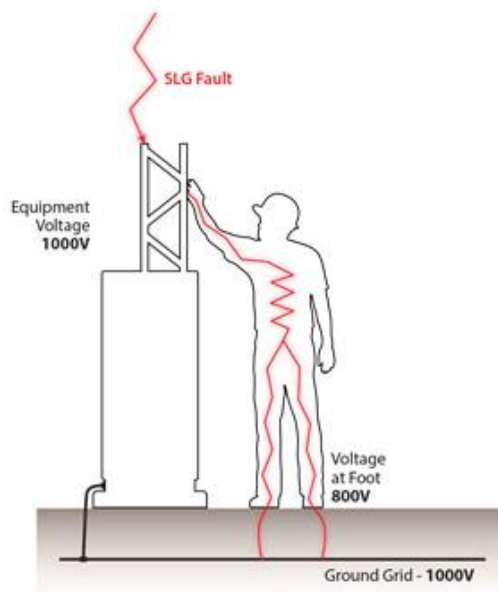
A análise da tensão de passo mostra que, mesmo sem contato direto com estruturas energizadas, o corpo humano pode ser atravessado por correntes perigosas. Isso evidencia a importância de projetar sistemas de aterramento que mantenham a tensão de passo abaixo dos limites normativos.

2.4.2 Tensão de toque

Conforme a NBR – 15751 (2013,p.3), a tensão de toque é “diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa”. Dessa forma, quando uma pessoa toca em um componente energizado, na qual estar aterrado, ela pode estar exposta a uma diferença de tensão entre o objeto e o solo. Na Figura 5, ilustra como funciona a tensão de toque.

Para minimizar os riscos decorrentes da tensão de toque, recomenda-se que as pessoas evitem o contato simultâneo com estruturas metálicas energizadas e o solo, mantenham isolamento adequado por meio do uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), e que as instalações elétricas contem com sistemas eficientes de aterramento e proteção, conforme previsto nas normas técnicas aplicáveis (NBR 5419-3,2015) .

Figura 5: Tensão de toque



Fonte: Adaptado de David Lewis (2022)

A tensão de toque representa um dos maiores riscos em instalações elétricas, pois ocorre durante a interação direta do indivíduo com componentes condutores. A eficácia do sistema de aterramento é, portanto, decisiva para que esse risco permaneça dentro de limites aceitáveis.

Assim, após compreender os conceitos de tensões de passo e toque, associada à sua relação direta com a segurança das pessoas, torna-se essencial analisar as normas técnicas aplicáveis. Tais normas constituem o principal referencial para a definição de parâmetros objetivos que orientam a avaliação prática deste estudo, voltado à comparação de diferentes configurações e quantidades de hastes de aterramento. Importa destacar que os limites aceitáveis de tensões de passo e de toque não são definidos de forma arbitrária, mas resultam de estudos consolidados sobre a interação entre corrente elétrica e corpo humano, bem como da análise dos riscos envolvidos.

Nesse sentido, normas nacionais e internacionais, como a NBR 15751:2013, a NBR 5419, a IEEE Std. 80 e entre outras, estabelecem metodologias de cálculo, critérios de segurança e valores de referência para a corrente suportável pelo organismo humano, constituindo, assim, instrumentos essenciais para a elaboração de projetos de aterramento seguros e tecnicamente fundamentados.

2.5 NORMAS APLICÁVEIS

A segurança em instalações elétricas é garantida mediante o cumprimento de um conjunto de normas técnicas e regulamentadoras que definem critérios, procedimentos e requisitos mínimos para a execução segura de atividades relacionadas à eletricidade. Essas normas abrangem desde a concepção do projeto até a operação e manutenção dos sistemas elétricos, com foco na proteção dos trabalhadores e da integridade dos equipamentos. Neste estudo, compreender o papel de cada conjunto normativo é fundamental, pois a análise das configurações de aterramento exige não apenas o conhecimento técnico, mas também a observância dos limites legais e de segurança estabelecidos.

A NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, estabelecida pelo Ministério do Trabalho e Emprego, regulamenta as condições mínimas para a prevenção de riscos elétricos, com aplicação em todas as fases de geração, transmissão, distribuição e uso da energia elétrica. Conforme o disposto na norma, é obrigatória a implementação de medidas preventivas, como a desenergização, o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e a capacitação dos trabalhadores envolvidos diretamente ou indiretamente com eletricidade (BRASIL, 2004).

A NBR 15751:2013, por sua vez, especifica os critérios de segurança para o dimensionamento de eletrodos de aterramento em sistemas elétricos, de modo assegurar os níveis de tensão de toque e de passo estejam dentro dos limites seguros para o corpo humano. Essa norma é fundamental para a elaboração de projetos elétricos que envolvam aterramento, pois garante a integridade física das pessoas e a proteção dos equipamentos (ABNT, 2013).

Entre as normas técnicas, destaca-se a NBR 5419, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que trata da proteção contra descargas atmosféricas. Essa norma define os requisitos para o projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção contra raios, incluindo o sistema de aterramento e o sistema de proteção contra sobretensões transitórias. A adoção dessa norma reduz os riscos de danos estruturais e de choques elétricos causados por descargas atmosféricas (ABNT, 2015).

A norma IEEE Std 80, publicada pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), fornece diretrizes detalhadas para o projeto de sistemas de aterramento em subestações. Essa norma internacional é amplamente utilizada no Brasil como referência técnica para o cálculo da resistência de aterramento, definição da malha de terra e avaliação dos riscos de

tensão de toque e de passo. O documento contribui diretamente para a mitigação de riscos elétricos graves em instalações de média e alta tensão (IEEE, 2013).

A NBR 13571 aborda as especificações e métodos de ensaio para os componentes dos sistemas de aterramento temporário, como hastes, cabos, grampos e conectores. Essa norma é essencial para a segurança de trabalhadores que atuam em redes elétricas desenergizadas, na qual garante que os equipamentos utilizados ofereçam resistência mecânica e elétrica adequadas, conforme as exigências da aplicação (ABNT, 1996).

A NBR 7117-1:2020, por sua vez, estabelece as diretrizes para a avaliação da conformidade de materiais utilizados em aterramentos elétricos permanentes, com foco na resistência à corrosão, condutividade elétrica e durabilidade dos materiais metálicos empregados. Essa norma é crucial para assegurar a eficiência a longo prazo dos sistemas de aterramento, especialmente em ambientes agressivos, como regiões litorâneas ou industriais (ABNT, 2020).

A integração dessas normas garante um ambiente de trabalho mais seguro, com foco na minimização dos riscos de acidentes elétricos e assegurar a conformidade legal e técnica das instalações. A correta aplicação dessas diretrizes é um dever do empregador e dos profissionais envolvidos no projeto e execução dos serviços elétricos.

Além disso, garante a construção de um referencial técnico consistente para este estudo, que permite não apenas avaliar a eficiência das diferentes configurações e quantidades de hastes, mas também assegurar que tais soluções respeitem os limites de segurança e desempenho exigidos. Dessa forma, a fundamentação normativa se conecta diretamente ao problema de pesquisa, pois fornece o alicerce para a análise comparativa e para a justificativa das escolhas metodológicas.

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os procedimentos adotados para o desenvolvimento do estudo, como a delimitação do terreno na qual foi realizado as medições. Descreve a metodologia utilizada para a medição da resistência de aterramento e resistividade do solo, de forma a garantir a confiabilidade dos dados coletados. Além disso, são detalhadas as diferentes configurações de hastes de aterramento analisadas, com destaque nas variações geométricas e quantitativas. E também serão apresentadas as fórmulas aplicadas para os cálculos teóricos. Assim, a metodologia constitui base estruturante para a análise dos resultados e para a verificação da hipótese central deste trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

3.1.1 Quanto à classificação

A presente pesquisa é de caráter aplicada, uma vez que busca propor soluções práticas para a redução da resistência de aterramento em sistemas elétricos, considerando diferentes configurações geométricas de hastes. Além disso, apresenta caráter exploratório e descritivo, pois procura analisar como as variações no número e disposição das hastes influenciam a eficiência do aterramento.

3.1.2 Quanto à abordagem

O estudo adota uma abordagem quali-quantitativa, combinando uma análise numérica e interpretação crítica. A análise quantitativa envolve o cálculo da resistência de aterramento de diferentes malhas, considerando variações no número de hastes. A análise qualitativa considera a interpretação de normas técnicas, literatura científica e relatórios técnicos, permitindo compreender a aplicabilidade dos resultados e a conformidade com padrões de segurança.

3.1.3 Quanto à tipologia da pesquisa

A pesquisa apresenta caráter bibliográfico e experimental. A parte bibliográfica baseia-se em livros, artigos científicos recentes (2018-2025) e normas técnicas, como NBR 5410, NBR

7117, NBR 13571, IEEE-80 e NR-10, para fundamentar teoricamente os conceitos de aterramento elétrico, resistividade do solo, tipos de hastes e segurança elétrica. A parte experimental consiste em cálculos das resistências de aterramento, variando a configuração das malhas (linear, triangular, quadrada) e o número de hastes.

3.2 LOCAL DAS MEDIÇÕES

A seguir na Figura 6 ilustra o local onde foi realizado a estratificação do solo e as medições (localizado no campo de futebol do Instituto Federal da Paraíba– Campus João Pessoa). Foi escolhido essa área devido à possui espaço suficiente para construir as configurações das hastes.

Figura 6: Campo de futebol do IFPB – Campus João Pessoa



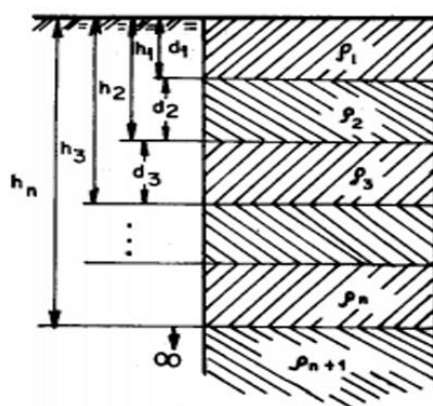
Fonte: Elaboração própria (2025)

Não foi possível determinar diretamente os parâmetros do solo que influenciam a resistividade, como grau de umidade, temperatura e índice de sais dissolvidos. Para viabilizar a análise das hastes de aterramento, adotou-se um cenário representativo: o solo é considerado predominantemente arenoso, com temperatura média de 25 °C e umidade aproximada de 20%, levando em conta que a área de estudo corresponde a um campo de futebol irrigado semanalmente. Essa definição permite estabelecer condições controladas para as medições de resistência de aterramento, garantindo que os resultados obtidos possam ser comparados entre diferentes configurações e quantidades de hastes, mantendo coerência com os objetivos do estudo.

3.3 MÉTODO DE MEDIÇÃO

A determinação da resistividade do solo é através do estudo da estratificação do solo, visto que, em sua grande maioria, os solos não são homogêneos, e sim formados por diversas camadas de resistividades e espessuras diferentes. Geralmente, as camadas são aproximadamente horizontais e paralelas a superfície do solo, há diversas resistividades aparentes para cada camada estratificada, como mostra a Figura 7.

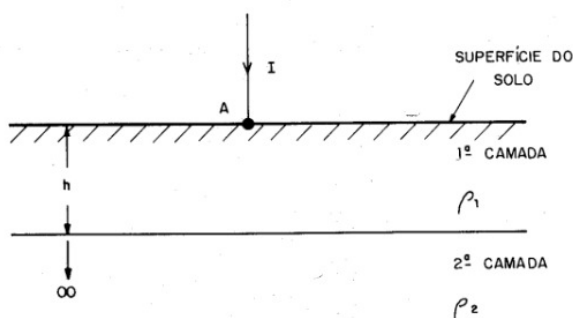
Figura 7: Estratificação do solo



Fonte: Kindermann; Campagnolo (1995)

O levantamento dos valores da resistividade do solo é feito através de medições em campo. Segundo Carlos Moreira e Mário Leite (1996, p.16), existem “dois métodos principais para a medição de resistividade aparente fins de aterramento, o método de Wenner, muito utilizado no Brasil, e o método de Schlumberger, mais utilizado nos Estados Unidos”. Esses dois métodos possibilitam encontrar a resistividade do solo da primeira e segunda camada, bem como demonstra a Figura 8.

Figura 8: Duas camadas de estratificação do solo



Fonte: Kindermann; Campagnolo (1995)

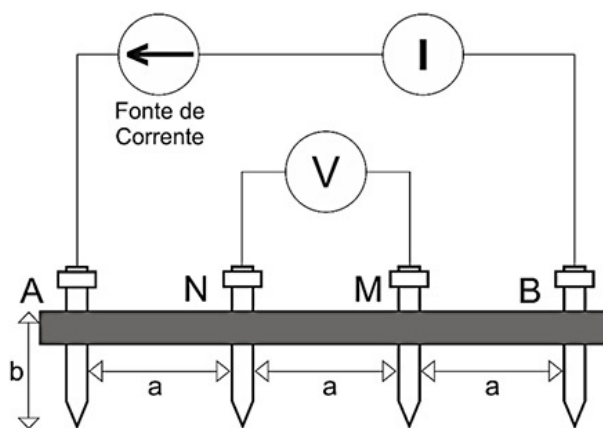
Entre os diversos métodos para realização da medição da resistividade do solo, o mais utilizado é o Método de Wenner, por sua ampla utilização e confiabilidade nos resultados obtidos. Em virtude de sua aplicabilidade consolidada e de sua relevância técnica, o Método de Wenner foi adotado na presente pesquisa para a medição da resistividade do solo, o que garante, assim, a padronização do procedimento e a comparabilidade dos resultados.

Outro método relevante é o da Queda de Potencial, amplamente utilizado para determinar a resistência de aterramento da malha. Embora não tenha sido possível realizar a medição em campo, aplicou-se o método de forma teórica por meio de sua expressão matemática. Essa abordagem mostrou-se pertinente, uma vez que o presente estudo tem como foco a análise das hastes de aterramento, na qual considera diferentes configurações e quantidades, de modo a compreender sua influência na resistência do sistema.

3.3.1 Método de Wenner

A implementação desse método, criado pelo físico norte-americano Frank Wenner em 1915, consiste em cravar quatro hastes cilíndricas no solo com a mesma altura (b) igualmente espaçadas por uma distância (a) e em uma linha reta, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Esquema da disposição das hastes usado no método de Wenner



Fonte: (Filipe Santana, 2021)

Uma corrente elétrica I é injetada no ponto A, primeira haste, e coletada no ponto B, última haste. Esta corrente, passa pelo solo entre os pontos A e B, produz uma diferença de potencial nos pontos N e M, que ao ser dividida pela corrente injetada, fornece um valor de resistência R (Visacro, 2002). Com o valor de R estabelecido, calcula-se a resistividade elétrica do Solo a partir da Equação 4, conforme a ABNT NBR 7117 (2020).

$$\rho = \left(\frac{4\pi * R * a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \right) \quad (4)$$

Onde:

R: Resistência medida em Ω - valor indicado no medidor;

a: Distância entre eletrodos adjacentes em m;

b: Profundidade de cravação em m;

ρ : resistividade em $\Omega.m$.

Frank Wenner mostrou que existe uma relação linear entre a resistência medida e o valor da resistividade do solo (Visacro, 2002), expressa pela Equação 5:

$$\rho = K.R \quad (5)$$

O valor da constante K depende da geometria empregada nas medições. Seu valor é dado pela Equação (6):

$$K = \left(\frac{4\pi * a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \right) \quad (6)$$

O valor do denominador da Equação 6, varia entre 1 e 2. De acordo com Visacro (2002, p.86), “dependendo da relação entre a profundidade das hastes e do espaçamento. Isso implica simplificações na formulação:”

- Se a profundidade (b) for muito grande comparada com o espaçamento (a), o denominador se aproxima da unidade, resulta na Equação 7:

$$\rho \cong 4\pi a R \quad (7)$$

- Se a profundidade (b) for pequena comparada com o espaçamento (a), o denominador se aproxima de 2, resulta na Equação 8:

$$\rho \cong 2\pi aR \quad (8)$$

Na sua formulação, Wenner considera o solo homogêneo. Assim, a resistividade do solo que corresponde ao produto entre o valor R medido pela aplicação do método (para cada espaçamento “a”) e o fator geométrico K será constante. Entretanto, raramente tem se solos realmente homogêneos (VISACRO, 2002).

Para obter a resistividade do solo em uma determinada região é necessário efetuar vários grupos de medições sucessivas, com espaçamentos (a) diferentes. Dessa forma, serão obtidos valores de resistividade distintos para cada valor de (a) utilizado. A norma NBR 7117-1 (2020) recomenda a utilização de espaçamentos de 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 metros, com a preocupação de manter as hastes sempre alinhadas.

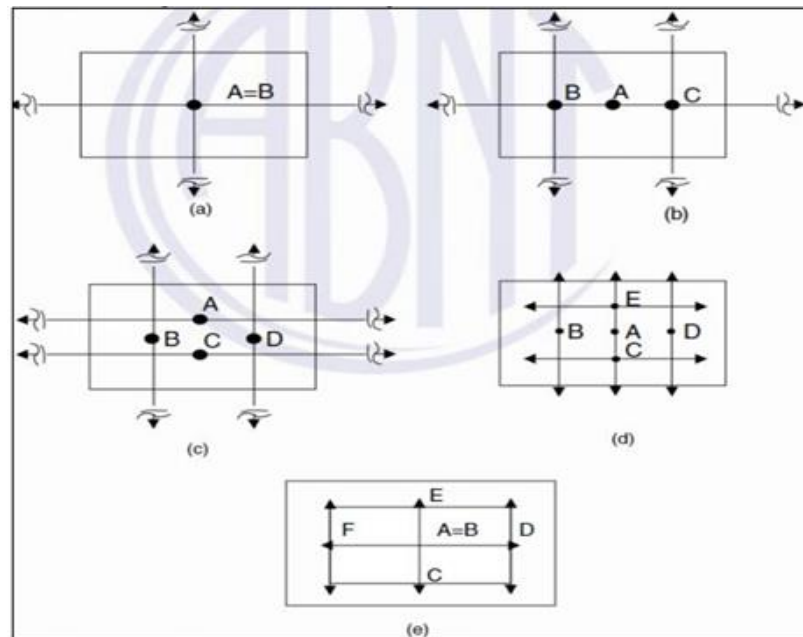
Além disso, a quantidade de linhas em função da área do local estabelecida pela norma NBR 7117-1 (2020) é apresentada na Tabela 7. Os croquis das linhas de medições de acordo com a quantidade estabelecida na referida norma estão apresentados na Figura 10.

Tabela 7: Área do terreno e o número mínimo de linhas na medição

Área do terreno M²	Número mínimo de linhas de medição	Croquis para linhas de medição
$S \leq 1000$	2	Figura 10-a
$1000 < S \leq 2000$	3	Figura 10-b
$2000 < S \leq 5000$	4	Figura 10-c
$5000 < S \leq 10000$	5	Figura 10-d
$10000 < S \leq 20000$	6	Figura 10-e
Nota: Para medições em áreas acima de 20000 m², recomenda-se dividir o terreno remanescente em áreas de até 10 000 m², acrescentando-se linhas de medição equivalentes às descritas nesta tabela. Assim, para uma área de 25 000 m², executam-se $6 + 4 = 10$ linhas de medição.		

Fonte: Adaptado de NBR 7117-1 (2020)

Figura 10: Croquis das linhas de medições

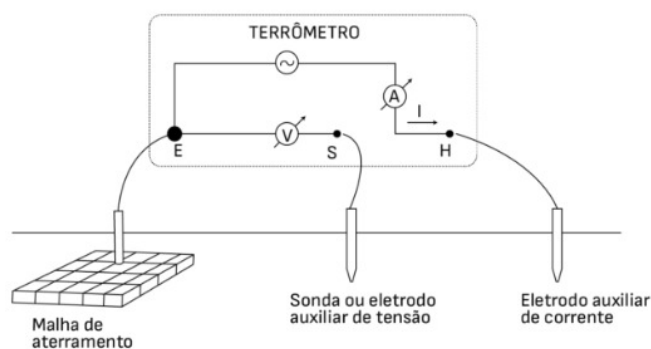


Fonte: Adaptado de NBR 7117-1 (2020)

3.3.2 Método de Queda de Potencial

A norma ABNT NBR 15749 (2009) intitulada “medição de resistência de aterramento e de potencial na superfície do solo em sistemas de aterramento”, contempla vários métodos de medição, dentre eles o método da Queda de Potencial, que consiste em circular uma corrente através da malha de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre a malha de aterramento e o terra de referência ou eletrodo auxiliar de potencial (ABNT, 2009), conforme na Figura 11.

Figura 11: Método da queda de potencial



Fonte: Adaptado de NBR 15749 (2009)

O processo baseia-se no estabelecimento de uma diferença de potencial entre o sistema de aterramento (ponto E), o eletrodo de potencial ou sonda de tensão (ponto S) e o eletrodo auxiliar de corrente (ponto H). Dessa forma, gera-se uma corrente no sistema e, a partir da variação da posição da haste de prova, torna-se possível determinar o valor da resistência do solo, que se relaciona diretamente com a queda de potencial medida (VISACRO, 2002).

O equipamento utilizado nesse método denomina-se terrômetro, para a correta execução do ensaio, é necessário estabelecer uma distância adequada entre os eletrodos auxiliares. Recomenda-se, portanto, que a sonda de potencial seja posicionada a aproximadamente 62% da distância total em relação ao eletrodo de corrente (ABNT, 2009), que assegura maior confiabilidade e precisão nos resultados obtidos.

3.4 PROCEDIMENTOS EM CAMPO

Para realizar as medições de resistência de aterramento, é necessário utilizar um equipamento adequado. Nesta pesquisa, foi empregado o terrômetro ETCR 3000B (Figura 12), que permite medições em configurações de 4 pólos, 3 pólos e 2 pólos simples. O equipamento acompanha fios de teste padrão e hastes de aterramento auxiliares, com que garante a precisão e confiabilidade dos dados obtidos, essenciais para a análise das diferentes configurações e quantidades de hastes estudadas.

Figura 12: Terrômetro ETCR 3000B



Fonte: Manualslib (2022)

Para as medições, foi aplicado o método de 4 fios, que permite eliminar a influência da resistência de contato, geralmente causada por sujeira ou oxidação entre o corpo de aterramento medido, hastes auxiliares, cliques de teste e a interface de entrada do medidor (Manualslib, 2022). Este método é mais preciso que as medições de 3 e 2 fios. Além disso, o método de Wenner, utilizado neste estudo para determinar a resistividade do solo, requer obrigatoriamente a configuração de 4 polos, na qual serve de suporte confiável para a análise comparativa das diferentes configurações de aterramento propostas neste estudo.

Embora a literatura recomende a utilização de hastes de 2,5 m, para este estudo não foi possível empregar hastes dessa dimensão. Dessa forma, optou-se por utilizar hastes de aproximadamente 65 cm, disponíveis no Campus do IFPB, conforme ilustrado na Figura 13. Essa adaptação foi necessária devido à limitação de recursos, mas não comprometeu a realização do estudo, uma vez que o objetivo central é a comparação entre as configurações e quantidades de hastes. Dessa forma, apesar da redução no comprimento, os resultados obtidos permanecem relevantes para avaliar a eficiência relativa dos diferentes arranjos.

Figura 13: Haste usada neste estudo



Fonte: Elaboração própria (2025)

Apesar de não ter sido possível determinar com precisão a área total do local de medição, adotou-se que esta se encontra entre 2.000 e 5.000 m². Com essa estimativa, tornou-se necessário o uso de, no mínimo, quatro linhas de medição, o que possibilitou a elaboração do croqui apresentado na Figura 10-c, que representa as quatro direções (A, B, C e D). Foram utilizados espaçamentos progressivos de 1, 2, 4, 8 e 16 metros. As medições realizadas foram adaptadas de acordo com os recursos disponíveis no Campus, porém respeitaram as orientações da norma NBR 7117-1 (2020), na qual manteve a confiabilidade dos resultados obtidos.

Na Figura 14 é apresentada a medição da resistência do solo pelo método de Wenner, no qual foram realizadas cinco leituras correspondentes aos diferentes espaçamentos entre as hastes em cada direção estabelecida. Esse procedimento foi repetido para as demais linhas de medição, resultando em um total de 20 leituras referentes à resistência do solo. Em todas as medições, a profundidade das hastes auxiliares foi de 30 cm, atendendo à condição estabelecida pela norma de que a profundidade deve ser menor ou igual a 10% do espaçamento entre as hastes. Esse cuidado metodológico garante maior confiabilidade aos resultados, além de fornecer dados consistentes para a análise comparativa das configurações de aterramento propostas nesta pesquisa.

Figura 14: Realização da medição da resistividade do solo



Fonte: Elaboração própria (2025)

Sabe-se que a realização das medições requer determinados cuidados, não apenas relacionados ao manuseio adequado dos equipamentos, mas também quanto às condições das hastes e, sobretudo, à segurança do ambiente. É necessário garantir que não haja riscos para as pessoas ao redor, animais ou demais interferências externas, seguindo ainda as orientações estabelecidas pelas normas técnicas aplicáveis. Dessa forma, os principais cuidados adotados durante o processo de medição foram:

- As hastes bem alinhadas;
- As hastes igualmente espaçadas;
- As hastes cravadas no solo a uma mesma profundidade;
- Não foi permitido que animais e pessoas estranhas se aproximassem do local;
- Utilizado calçado e calça para execução das medições;

3.5 CONFIGURAÇÕES DAS HASTES E FÓRMULAS APLICADAS

Nesta pesquisa, foram analisadas diferentes configurações de hastes de aterramento, a fim de avaliar a influência de sua disposição geométrica e quantitativa na resistência de aterramento. As configurações adotadas foram:

- Haste simples;
- Duas hastes alinhadas;
- Três hastes alinhadas;
- Hastes dispostas em triângulo;
- Hastes dispostas em quadrado.

A escolha dessas geometrias justifica-se por sua relevância prática e aplicabilidade em projetos de sistemas de aterramento. A haste simples representa a solução mais elementar e de baixo custo, porém limitada em eficiência. As disposições lineares (duas e três hastes alinhadas) permitem avaliar o comportamento da resistência quando se adicionam eletrodos de forma sequencial. Já as configurações em triângulo e quadrado possibilitam comparar os efeitos de arranjos mais distribuídos espacialmente, que tendem a melhorar a dissipação da corrente elétrica no solo. Dessa forma, a análise comparativa entre esses arranjos permite verificar a eficiência relativa de cada configuração em função das condições do solo estudado.

3.5.1 Haste simples

A resistência elétrica de uma haste cravada verticalmente em um solo homogêneo de acordo como ilustra a Figura 15, pode ser determinada pela Equação 9 (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

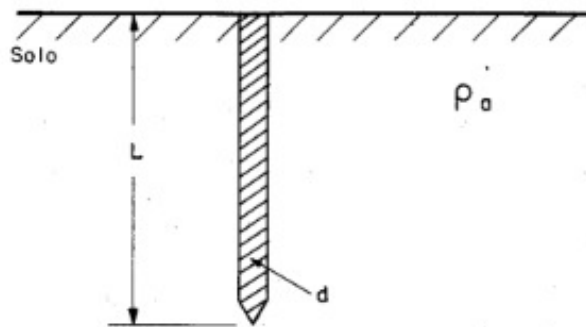
$R \rightarrow$ resistência da haste (Ω)

$\rho \rightarrow$ Resistividade elétrica do solo [$\Omega.m$];

$L \rightarrow$ Comprimento da haste [m];

$d \rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à área da seção transversal da haste [m].

Figura 15: Haste cravada no solo (haste simples)



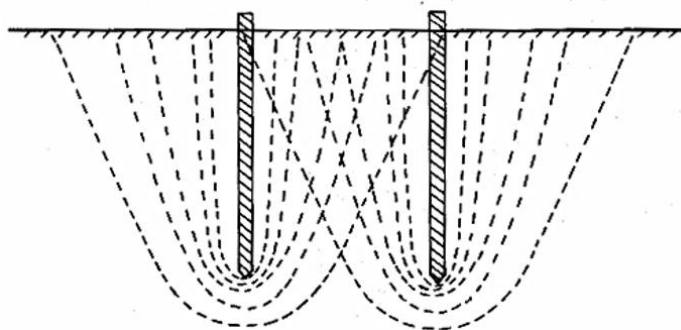
Fonte: Kindermann; Campagnolo (1995)

A haste simples constitui a solução mais básica para aterramento, com destaque na sua facilidade de instalação e baixo custo. No entanto, apresenta limitações significativas, uma vez que a resistência de aterramento obtida depende quase exclusivamente da resistividade do solo. Em solos com alta resistividade, a haste simples sozinha não é capaz de atender aos requisitos de segurança, sendo necessário instalar múltiplas hastes interligadas para reduzir a resistência e garantir a proteção adequada de pessoas e equipamentos.

3.5.2 Hastes alinhadas

Para o cálculo da resistência equivalente de hastes alinhadas, deve levar em consideração o acréscimo da resistência ocasionado pela interferência entre as hastes (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Também pode ser conhecida como resistência mútua, caso as hastes estejam com uma distância entre elas grande, o efeito mútuo é desprezível. Conforme ilustra a Figura 16.

Figura 16: Haste alinhadas



Fonte: Adaptado de Kindermann; Campagnolo (1995)

Para as hastes alinhadas é preciso calcular a resistência elétrica de cada haste alinhada, utiliza-se a Equação 10 (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

$$R_h = R_{hh} + \sum_{(m=1 \quad m \neq h)}^n (R_{hm}) \quad (10)$$

Sendo:

R_h → Resistência apresentada pela haste “h” inserida no conjunto, considerando as interferências das outras hastes;

R_{hh} → Resistência individual de cada haste sem a presença de outras hastes, dada pela Equação 9;

n → Número de hastes paralelas.

R_{hm} → Acréscimo de resistência na haste “h” devido a interferência mútua da haste “m”, dada pela Equação 11;

e_{hm} → Espaçamento entre a haste “h” e a haste “m” em metros;

L → Comprimento da haste.

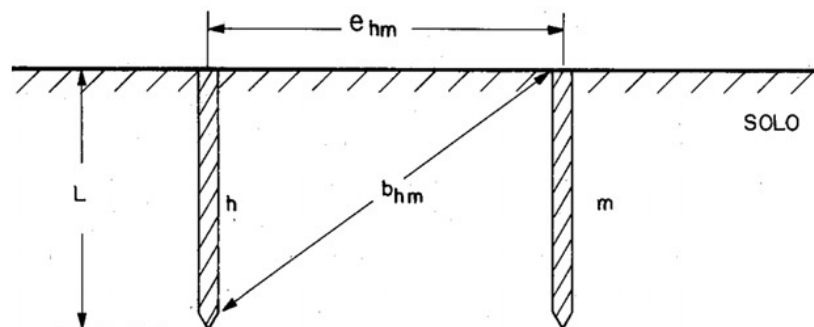
$$R_{hm} = \frac{p_a}{4\pi L} * \ln \left[\frac{(b_{hm}+L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm}-L)^2} \right] \quad (11)$$

b_{hm} → É obtido pela Equação 12, a seguir:

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} \quad (12)$$

A representação de b_{hm} está na Figura 17.

Figura 17: Parâmetros das mútuas entre as hastes h e m



Fonte: Kindermann; Campagnolo (1995)

Realiza-se os cálculos para todas as hastes em conjunto (alinhadas), com o auxílio da Equação 10, obtém os valores de resistência para cada haste.

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} \dots R_{1n}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} \dots R_{2n}$$

$$R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} \dots R_{nn}$$

Assim que obtido as resistências individuais para cada haste, com os acréscimos das interferências, é realizado o cálculo do equivalente das hastes interligadas, que será a resultante do paralelo entre elas, utiliza a Equação 12.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (12)$$

Para facilitar os cálculos foi criado um índice de aproveitamento ou índice de redução (K), segundo Kinderman e Campagnolo (1995, p.70), “é definido como a relação entre a resistência equivalente do conjunto (R_{eq}) do conjunto e a resistência individual de cada haste (R_{1haste}), sem a presença de outras hastes”, assim como ilustra a Equação 13.

$$K = \frac{R_{eq}}{R_{1haste}} \quad (13)$$

Logo, a resistência equivalente do conjunto de hastes alinhadas é reduzida em K vezes o valor de um sistema com apenas uma haste. Para facilitar encontrar o valor de R_{eq} os valores de K são obtidos através de curvas, essas curvas dependem do diâmetro da haste, do comprimento e do espaçamento. Dessa forma, isola-se R_{eq} , temos a Equação 14.

$$R_{eq} = K * R_{1haste} \quad (14)$$

Visacro (2002) apresenta um método aprimorado para o cálculo da resistência de aterramento, no qual não é necessário utilizar o valor do índice de aproveitamento (k) nas expressões matemáticas. Dessa forma, obtém-se a Equação 15, que simplifica os cálculos e facilita a aplicação prática em diferentes configurações de hastes.

$$R_a = \frac{1 * \rho}{n * 2 * \pi * L} * \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{L}{s} * \ln(0,6553 * n) \right] \quad (15)$$

Sendo:

R → resistência da haste (Ω)

$\rho \rightarrow$ Resistividade elétrica do solo [$\Omega.m$];

$L \rightarrow$ Comprimento da haste [m];

$d \rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à área da seção transversal da haste [m];

$s \rightarrow$ Espaçamentos entre as hastes alinhadas [m].

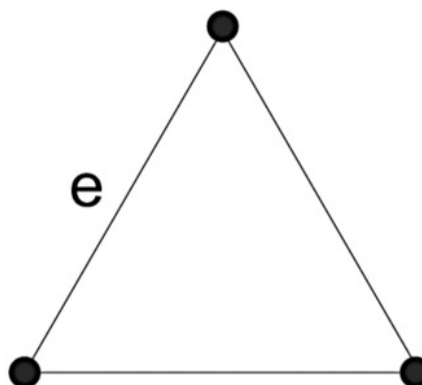
As hastes alinhadas apresentam a vantagem de possibilitar a redução da resistência de aterramento de forma relativamente simples, uma vez que é possível acrescentar sucessivamente novas hastes ao arranjo. No entanto, esse método possui limitações práticas, sendo recomendado o uso de até seis hastes, pois, acima desse número, a solução torna-se economicamente inviável.

Neste estudo, serão analisadas apenas configurações com duas e três hastes alinhadas, de modo a avaliar o efeito do aumento gradual de hastes na resistência. Além disso, apesar de sua praticidade, os arranjos lineares mostram-se menos eficientes quando comparados às configurações geométricas, como triângulos ou quadrados, que favorecem uma melhor dissipação da corrente elétrica no solo.

3.5.3 Hastes em triângulo

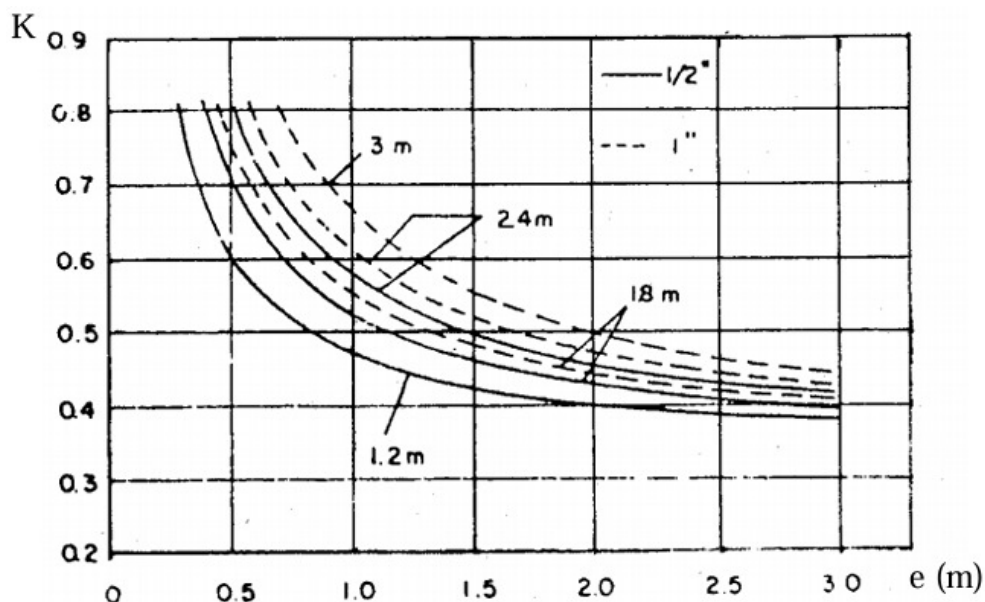
O dimensionamento das hastes em triângulo ilustrado na Figura 18. Para esse sistema, segue as recomendações de Kinderman e Campagnolo (1995), aplica-se a Equação 14, em que o valor do coeficiente de aproveitamento (K) deve ser determinado por meio das curvas de referência, conforme apresentado no Gráfico 4.

Figura 18: Formato das hastes em triângulo



Fonte: (Filipe Santana, 2021)

Gráfico 4: Curva do K x Espaçamento para a configuração triangular



Fonte: Kindermann; Campagnolo (1995)

Para esse tipo de sistema, Visacro (2002) também elaborou uma expressão matemática que não precisa utilizar o valor do índice de aproveitamento (k). A Equação 16 simplifica os cálculos e facilita a aplicação prática das hastes em triangular. Com

$$R_T = \frac{1}{3} * \left\{ \frac{\rho}{2\pi L} * \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right] + 2L * s \right\} \quad (16)$$

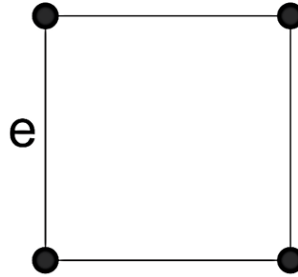
As hastes dispostas em formato de triângulo oferecem uma maior eficiência na redução da resistência de aterramento em comparação às hastes alinhadas. Essa configuração permite distribuir a corrente de forma mais uniforme no solo, na qual favorece um caminho de menor impedância. No presente estudo, será observado o efeito da disposição triangular com três hastes na redução da resistência e com foco na comparação direta com os demais arranjos analisados.

3.5.4 Haste em quadrado

O dimensionamento de um sistema de aterramento composto por quatro hastes dispostas em quadrado, ilustrado na Figura 19, segue a Equação 14, de forma similar ao arranjo triangular.

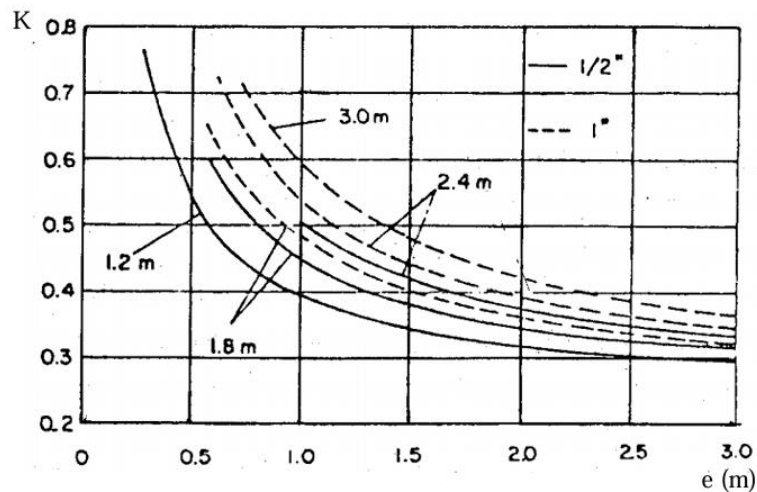
O valor de coeficiente de aproveitamento (K) é obtido através curvas de referência, conforme apresentado no Gráfico 5.

Figura 19: Formato das hastes em quadrado



Fonte: (Filipe Santana, 2021)

Gráfico 5: Curva do K x Espaçamento para a configuração quadrada



Fonte: Kindermann; Campagnolo (1995)

A Equação 17 (J. M. Nahman, 1996) apresenta uma expressão matemática que não requer a utilização do valor do coeficiente de aproveitamento (K). Diferentemente das demais configurações, neste caso é necessário calcular a área (A) do arranjo, enquanto (N) representa o número de reticulados idênticos. Por exemplo, um sistema com quatro hastes corresponde a um único quadrado, logo $N = 1$.

$$R_Q = 0,13 * \left(\frac{\rho}{\sqrt{A}}\right) * \left(1 - \frac{2L}{3\sqrt{A}}\right) \log_{10} \left(\frac{2400\sqrt{A}}{N}\right) \quad (17)$$

A disposição de hastes em formato de quadrado apresentam ainda melhor desempenho na dissipação de corrente elétrica, devido à maior cobertura da área de aterramento e à redução dos potenciais locais. Nesta pesquisa, será analisada a configuração quadrada com quatro

hastes, com foco na comparação entre hastes simples, alinhadas e triangulares. Assim contribuirá para compreender a eficiência de diferentes arranjos em função do número e da disposição das hastes, conectando diretamente à finalidade do estudo de investigar diferentes configurações e quantidades.

3.6 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DOS DADOS

Nesta pesquisa, o propósito central é comparar os valores de resistência elétrica obtidos em diferentes disposições de hastes de aterramento. Essa comparação será realizada por meio da aplicação de expressões matemáticas, fórmulas alternativas desenvolvidas para simplificar o cálculo. Na qual apresenta parâmetros técnicos consolidados para a estimativa do desempenho de sistemas de aterramento em diferentes configurações.

Após a coleta dos dados de medição, procede-se à análise dos resultados com o objetivo de verificar sua validade. Para isso, calcula-se inicialmente a média aritmética dos valores de resistência obtidos, seguida do desvio-padrão em relação à média de cada conjunto de medições. Caso o valor do desvio seja inferior a 50%, os resultados são considerados aceitáveis; caso o desvio seja superior, recomenda-se realizar uma nova medição na mesma região. Persistindo a inconsistência, deve-se considerar o local como uma área independente, sendo, portanto, desprezados os valores (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Em seguida, para os valores aceitos, aplica-se a Equação 4, a fim de determinar a resistividade do solo correspondente a cada medição. A partir desses resultados, calcula-se a média aritmética, na qual permiti assim obter o valor representativo da resistividade do solo para cada espaçamento avaliado.

Após determinar o valor da resistividade do solo, este será utilizado para calcular a resistência de cada disposição de hastes, considerando variações apenas no espaçamento entre as hastes, comprimento e no diâmetro do círculo equivalente à área da seção transversal. Dessa forma, é possível analisar de maneira sistemática como a quantidade e a configuração geométrica das hastes influenciam a resistência do sistema de aterramento.

Esse procedimento permite testar a hipótese de que a otimização da resistência de aterramento depende predominantemente do número e do arranjo geométrico das hastes, com influência adicional das características do solo.

4 RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos a partir da execução dos procedimentos metodológicos descritos na Seção 3, com o objetivo de analisar o desempenho das diferentes disposições de hastes de aterramento e avaliar a influência de suas configurações geométricas e quantidade sobre a resistência do sistema.

4.1 MEDIÇÃO DE CAMPO

Com o terrômetro ETCR 3000B, realizou-se a medição da resistividade do solo por meio do método de Wenner. Conforme já mencionado, foram realizadas cinco leituras correspondentes aos diferentes espaçamentos entre as hastes (1, 2, 4, 8 e 16 metros) para cada uma das quatro direções estabelecidas (A, B, C e D) conforme o croqui apresentado na Figura 10-c, com profundidade de 30 cm para a haste de prova. Os valores obtidos encontram-se apresentados na Tabela 8, a qual consolida os resultados medidos em campo.

Tabela 8: Resultado da medição de campo – método Wenner

Medição do Solo - Resistência (Ω)					
Direção		A	B	C	D
Medição	Espaçamento (M)	-	-	-	-
1ª	1	49,04	54,80	214,30	72,15
2ª	2	17,36	18,16	18,95	28,27
3ª	4	10,24	6,36	9,09	4,88
4ª	8	3,96	3,42	3,29	1,95
5ª	16	1,30	1,32	1,35	1,35

Fonte: Elaboração própria (2025)

Observa-se que, na direção C, para o espaçamento de 1 metro, foi registrado um valor significativamente mais elevado em comparação às demais medições. No entanto, para avaliar a validade desse resultado, faz-se necessária a verificação estatística por meio do desvio-padrão, calculado em conjunto com a média aritmética dos valores obtidos. A expressão utilizada para o cálculo do desvio-padrão encontra-se apresentada na Equação 18.

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} \cdot 100 \geq 50\% \quad (18)$$

Os valores das médias aritméticas obtidas para cada espaçamento, apresentados na Tabela 9, demonstram uma variação significativa à medida que a distância entre as hastes aumenta.

Tabela 9: Média aritmética da medição

Espaçamento	Média
1	97,57
2	20,69
4	7,64
8	3,16
16	1,33

Fonte: Elaboração própria (2025)

Após a aplicação da Equação 18, foi possível identificar, conforme apresentado na Tabela 10, quais medições ultrapassaram o limite de 50%. Constatou-se que a medição realizada na direção C, para o espaçamento de 1 metro, apresentou um valor significativamente acima do aceitável. Nesse caso, procedeu-se à realização de uma nova medição no mesmo ponto, entretanto, o resultado permaneceu inconsistente. Diante disso, optou-se por considerar esse ponto como uma área independente, conforme as recomendações de Kindermann e Campagnolo (1995), logo o valor foi desconsiderado tanto na média aritmética quanto nos cálculos subsequentes, de modo a preservar a confiabilidade da análise.

Tabela 10: Desvio Padrão

Desvio Padrão				
Esp./Dir.	A	B	C	D
1	49,74	43,84	119,63	26,05
2	16,07	12,21	8,39	36,67
4	33,99	16,78	18,94	36,15
8	25,52	8,40	4,28	38,19
16	2,26	0,75	1,50	1,50

Fonte: Elaboração própria (2025)

Considerando a exclusão da área independente, procedeu-se ao cálculo de uma nova média, apresentada na Tabela 11. Verifica-se que, para o espaçamento de 1 metro, o valor encontrado foi de 58,66 Ω , enquanto para o espaçamento de 2 metros reduziu para 20,69 Ω .

Nos espaçamentos seguintes, observa-se a continuidade da tendência decrescente, com 7,64 Ω para 4 metros, 3,16 Ω para 8 metros e, por fim, 1,33 Ω para 16 metros. Esses resultados demonstram o comportamento esperado segundo o método de Wenner, no qual a resistência tende a diminuir à medida que aumenta o afastamento entre os eletrodos, o que confirma, assim, a consistência e coerência dos dados experimentais obtidos.

Tabela 11: Nova média aritmética da medição

Espaçamento	Média
1	58,66
2	20,69
4	7,64
8	3,16
16	1,33

Fonte: Elaboração própria (2025)

4.2 CÁLCULO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Após a determinação dos valores aceitáveis, aplica-se a Equação 4 com o objetivo de calcular a resistividade do solo correspondente a cada medição realizada. Considerando que a haste utilizada em campo possui profundidade de 30 cm, este mesmo valor será adotado na expressão, que garante consistência e comparabilidade nos dados obtidos.

Dessa forma, os valores obtidos refletem de maneira confiável as condições reais do solo, que permite analisar comparativamente os diferentes pontos de medição e com suporte na avaliação quantitativa necessária para o dimensionamento seguro do sistema de aterramento. Esta abordagem segue a metodologia experimental adotada no presente trabalho, caracterizando-se como estudo de campo com coleta e análise de dados quantitativos.

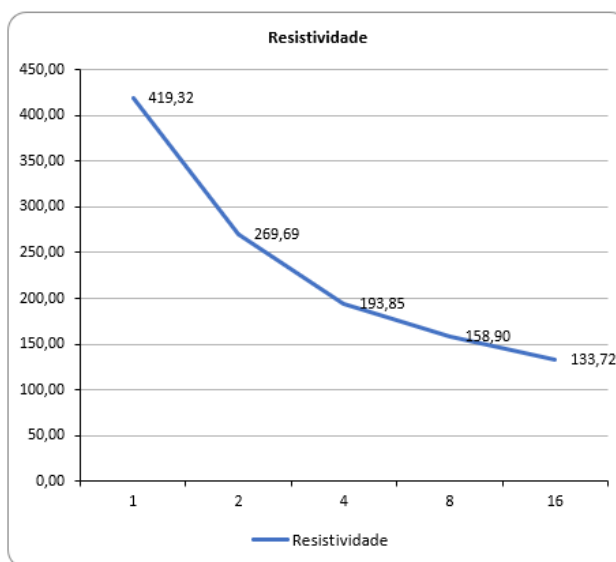
Na Tabela 12 são apresentados os valores da resistividade do solo obtidos em cada ponto de medição. Após a determinação de todos os valores individuais, procede-se ao cálculo da média da resistividade, que será posteriormente representada no Gráfico 6. Essa etapa é fundamental, pois a utilização da média possibilita reduzir a influência de variações pontuais nas medições, proporcionando uma análise mais consistente e representativa das condições do solo no local do estudo (NBR 7117-1, 2020; IEEE Std 81, 2012).

Tabela 12: Resistividade do solo – medição

RESISTÊNCIAS				
Esp./Dir.	A	B	C	D
1	350,53	391,70	1531,79	515,72
2	226,33	236,77	247,06	368,58
4	259,74	161,32	230,57	123,78
8	199,44	172,24	165,70	98,21
16	130,70	132,72	135,73	135,73

Fonte: Elaboração própria (2025)

Gráfico 6: Resistividade média do solo



Fonte: Elaboração própria (2025)

A redução da resistividade nos pontos subsequentes indica melhores condições de condução elétrica, o que é um aspecto positivo para o desempenho de sistemas de aterramento, pois possibilita maior eficiência na dispersão da corrente elétrica. A análise do gráfico reforça, portanto, a importância de medições em múltiplos pontos para garantir resultados mais confiáveis e representativos das condições reais do solo (NBR 7117-1, 2020; IEEE Std 81, 2012).

Em seguida, a resistividade média do solo será utilizada para o cálculo da resistência elétrica em diferentes disposições de hastes, considerando variações no espaçamento e no diâmetro. O objetivo dessa etapa é realizar uma análise comparativa, de modo a avaliar como a quantidade de hastes e suas configurações geométricas influenciam a resistência do sistema de aterramento.

4.3 RESISTÊNCIAS DAS HASTES ANALISADAS

Para a análise das resistências das hastes, será necessário adotar condições ideais de cálculo, desconsiderando, inicialmente, os efeitos da resistência mútua entre elas. Considerando que esta etapa do estudo possui caráter teórico-experimental, adotar-se-á, por conveniência metodológica, o comprimento da haste de 1 m e o diâmetro de 5/8", com espaçamento inicial de 1 m entre as hastes. Esses parâmetros foram definidos de forma a simplificar a modelagem matemática e permitir comparações mais claras entre diferentes configurações geométricas e quantidades de hastes, sem prejuízo à validade da análise.

Com base nas condições ideais previamente estabelecidas, e a partir da aplicação das Equações 9, 15, 16 e 17, foi possível calcular a resistência equivalente das diferentes configurações de hastes. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 13, que sintetiza os valores de resistência para cada arranjo geométrico analisado.

Tabela 13: Resistividade do solo

Configuração	Resistência (Ω)
Haste simples	302,27
2 hastes alinhadas	183,29
3 hastes alinhadas	131,21
Hastes em triângulo	116,84
Hastes em quadrado	61,42

Fonte: Elaboração própria (2025)

Observa-se que a resistência de uma haste simples foi de 302,27 Ω , serve como referência inicial de comparação. À medida que novas hastes são adicionadas e dispostas em diferentes geometrias, verifica-se uma redução significativa nos valores de resistência.

No arranjo com 2 hastes alinhadas, a resistência diminui para 183,29 Ω , representando uma queda expressiva em relação à haste isolada. Esse efeito é ainda mais evidente no caso de 3 hastes alinhadas, cujo valor de resistência atinge 131,21 Ω .

Quando dispostas em configurações geométricas fechadas, como o triângulo (116,84 Ω) e o quadrado (61,42 Ω), a redução é ainda mais acentuada. O arranjo em quadrado apresenta o menor valor de resistência dentre as configurações analisadas, na qual evidencia a eficiência

dessa topologia em distribuir melhor as linhas de corrente no solo e, conseqüentemente, reduzir a resistência do sistema de aterramento.

Dessa forma, esses resultados confirmam que a quantidade de hastes e, principalmente, a geometria adotada exercem influência direta no desempenho do aterramento, sendo as configurações em malha (triângulo e quadrado) mais eficientes em comparação às hastes alinhadas. A geometria em quadrado mostrou-se mais eficiente por favorecer uma melhor distribuição da corrente elétrica no solo, reduzindo o acoplamento entre hastes e maximizando a área de contato.

4.4 VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO, COMPRIMENTO E DIÂMETRO DAS HASTES

As características geométricas das hastes, como comprimento, diâmetro e espaçamento, influenciam diretamente no valor final da resistência de aterramento. Nesse contexto, as Tabelas 14, 15, 16, 17 e 18 apresentam os resultados obtidos por meio das expressões matemáticas aplicadas para cada topologia em estudo (haste simples, hastes alinhadas, triângulo e quadrado), com variações no comprimento, diâmetro e espaçamento das hastes. O propósito dessa etapa é realizar uma análise comparativa acerca de como esses parâmetros interferem na resistência do sistema.

É importante ressaltar que a resistividade do solo utilizada nos cálculos foi ajustada de acordo com a média apresentada no Gráfico 6, de modo a representar as condições reais do terreno. Essa adequação permite que os resultados obtidos reflitam com maior precisão o comportamento prático do sistema de aterramento em diferentes configurações geométricas.

Tabela 14: Resistência da haste simples

Resistência da haste simples									
Diâmetro das hastes	Espaçamento entre as hastes								
	2m			3m			4m		
	Comprimento das hastes								
	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3
1/2"	176,51	100,65	83,71	151,69	86,50	71,94	126,87,	72,34	60,17
5/8"	168,53	96,66	80,52	144,83	83,07	69,20	121,14	69,78	57,87
3/4"	162,00	93,40	77,91	139,22	80,26	66,95	116,45	67,13	56,00

Fonte: Elaboração própria (2025)

Observa-se, na Tabela 14, que o fator determinante para o desempenho da haste simples é o aumento do comprimento da haste, na qual promoveu uma redução expressiva na resistência

de aterramento. Isso ocorre porque a ampliação da superfície de contato com o solo possibilita uma dissipação mais eficiente da corrente elétrica. Por outro lado, o diâmetro exerceu influência menos significativa, reforçando a predominância do comprimento da haste.

Tabela 15: Resistência de 2 haste alinhadas

Resistência de 2 hastes alinhadas									
Diâmetro das hastes	Espaçamento entre as hastes								
	2m			3m			4m		
	Comprimento das hastes								
	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3
1/2"	103,07	57,73	47,78	87,88	49,26	40,78	73,21	41,06	33,99
5/8"	99,07	55,74	46,18	84,45	47,55	39,41	70,34	39,63	32,85
3/4"	95,81	54,10	44,88	81,65	46,15	38,29	68,00	38,45	31,91

Fonte: Elaboração própria (2025)

Os resultados apresentado na Tabela 15, indicam que a utilização de duas hastes alinhadas reduz a resistência de aterramento em comparação à haste simples, evidenciando o benefício da associação de eletrodos. Contudo, nota-se que o efeito do espaçamento entre as hastes é determinante: quanto maior a distância, menor o acoplamento elétrico entre elas, resultando em resistências mais baixas e maior eficiência do sistema.

Tabela 16: Resistência de 3 haste alinhadas

Resistência de 3 hastes alinhadas									
Diâmetro das hastes	Espaçamento entre as hastes								
	2m			3m			4m		
	Comprimento das hastes								
	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3
1/2"	71,13	39,69	32,82	59,97	33,53	27,74	49,67	27,81	23,01
5/8"	68,47	38,36	31,75	57,68	32,39	26,83	47,76	26,85	22,24
3/4"	66,29	37,28	30,88	55,82	31,46	26,08	46,20	26,07	21,62

Fonte: Elaboração própria (2025)

A configuração com três hastes alinhadas, indicada na Tabela 16, apresenta resistências ainda menores em relação às duas hastes, pode confirma que o aumento do número de eletrodos contribui para o desempenho do aterramento. Entretanto, verifica-se que a proximidade excessiva entre as hastes compromete a eficiência, devido ao maior acoplamento, reforçando a importância do espaçamento adequado no projeto.

Tabela 17: Resistência da haste em triângulo

Resistência das hastes em triângulo									
Diâmetro das hastes	Espaçamento entre as hastes								
	2m			3m			4m		
	Comprimento das hastes								
	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3
1/2"	68,70	40,88	35,21	60,06	37,18	32,82	51,43	33,48	30,43
5/8"	66,04	39,55	34,14	57,78	36,04	31,90	49,51	32,52	29,66
3/4"	63,86	38,46	33,27	55,91	35,10	31,16	47,95	31,74	29,04

Fonte: Elaboração própria (2025)

Na geometria em triângulo, observa-se, na Tabela 17, uma performance superior em relação às hastes alinhadas com o comprimento de 1,2m e o espaçamento de 2 m. Entretanto, quando associadas as hastes mais longas e mais espaçadas, as hastes alinhadas com 3 apresentam uma menor resistência. Observa-se que o aumento do espaçamento influencia de forma negativa, fazendo com que os valores de resistências aueemntem.

Tabela 18: Resistência da haste em quadrado

Resistência das hastes em quadrado									
Diâmetro das hastes	Espaçamento entre as hastes								
	2m			3m			4m		
	Comprimento das hastes								
	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3	1,2	2,4	3
1/2"	38,72	12,90	0	28,41	18,07	12,91	20,07	15,05	12,84
5/8"	38,72	12,90	0	28,41	18,07	12,91	20,07	15,05	12,84
3/4"	38,72	12,90	0	28,41	18,07	12,91	20,07	15,05	12,84

Fonte: Elaboração própria (2025)

Os resultados da configuração em quadrado, apresentado na Tabela 18, indicam os menores valores de resistência entre todas as geometrias analisadas. Nota-se que para diferentes diâmetros, os valores exercem pouca influência, com isso o fator determinante torna-se ser o comprimento e o espaçamento.

Entretanto, para o espaçamento de 2 m, foram obtidos valores nulos (destacados em vermelho), os quais indicam situações impraticáveis do ponto de vista do cálculo. Isso pode ocorrer quando o espaçamento entre as hastes é insuficiente, o que torna impossível determinar a resistência equivalente de forma confiável.

Apesar disso, de forma geral, o arranjo em quadrado se mostra altamente eficiente, uma vez que promove melhor distribuição da corrente elétrica no solo, confirmando sua

superioridade em relação as demais configurações. Portanto, o mais recomendado em projetos que exigem elevada confiabilidade e segurança elétrica.

Os resultados dessa comparação evidenciam que o aumento do comprimento da haste promove uma redução significativa na resistência, uma vez que amplia a superfície de contato com o solo e, conseqüentemente, a dispersão da corrente elétrica. O aumento do diâmetro, embora contribua para a redução da resistência, exerce efeito menos expressivo quando comparado ao comprimento.

Outro fator de destaque é o espaçamento entre as hastes: maiores distâncias reduzem o acoplamento elétrico entre os eletrodos, o que permite que cada haste contribua de forma mais eficiente para a dissipação da corrente.

No que diz respeito às configurações geométricas, observa-se que arranjos em malha, como triângulo e quadrado, apresentam melhor desempenho em relação às hastes alinhadas, pois favorecem uma maior distribuição espacial da corrente elétrica no solo. Entre elas, a geometria em quadrado se destaca, obtendo os menores valores de resistência, especialmente quando associada a hastes mais longas e com maior espaçamento.

Esses resultados reforçam que tanto a quantidade de hastes quanto sua disposição geométrica devem ser criteriosamente avaliadas em projetos de sistemas de aterramento, de forma a otimizar o desempenho e atender aos requisitos normativos (IEEE Std 80, 2013; NBR 7117-1, 2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou a influência da quantidade e das diferentes configurações geométricas de hastes de aterramento na resistência de um sistema elétrico, tendo como base o solo do campus do IFPB em João Pessoa. O estudo revisitou o problema de pesquisa, que questionava como a quantidade de hastes e suas diferentes configurações geométricas impactam a resistência de aterramento. A pesquisa alcançou seu objetivo geral de analisar essas diferentes configurações para identificar a solução mais eficiente na redução da resistência de aterramento.

Ao longo da pesquisa, os objetivos específicos foram cumpridos, que investiga os fundamentos teóricos do aterramento elétrico, modela e compara o desempenho das malhas de acordo com a quantidade e disposição das hastes. Os resultados da pesquisa confirmaram a hipótese de que a otimização da resistência de aterramento está diretamente ligada à quantidade e à configuração geométrica das hastes. Os experimentos realizados demonstraram que a adição de hastes, especialmente em arranjos triangulares e quadrados, reduz a resistência do sistema de forma mais eficiente do que o simples acréscimo de hastes em linha.

A pesquisa também reforçou a relevância da conscientização sobre a segurança elétrica no Brasil, evidenciada pelos alarmantes índices de acidentes e mortes por choque elétrico, conforme dados da ABRACOPEL. O estudo demonstrou que a otimização do aterramento, com a escolha da configuração correta, é um fator crucial para a redução das tensões de passo e de toque, na qual garante a proteção de pessoas e equipamentos.

Apesar de a pesquisa ter alcançado seus objetivos, algumas limitações devem ser consideradas. O estudo foi conduzido em um único tipo de solo e em um período específico, o que pode não refletir as variações de umidade e temperatura ao longo de um ano. Assim, a replicação do experimento em diferentes épocas e locais seria fundamental para validar os resultados em outras condições.

Para estudos futuros, sugere-se aprofundar a investigação sobre a influência da resistividade do solo em outras regiões do país, considerando a diversidade climática e geológica. Outro ponto de interesse seria analisar outras distribuições das hastes, como circunferência e em formato de cruz, para avaliar a eficiência de malhas mais complexas. A inclusão de uma análise de custo-benefício para cada configuração também enriqueceria a pesquisa, oferecendo um guia mais completo para profissionais da área. E também a realização do método queda de potencial para comparar com os valores obtidos das expressões matemáticas.

Em síntese, este trabalho oferece uma contribuição valiosa para a área de engenharia elétrica, ao fornecer dados práticos e teóricos que podem auxiliar técnicos e engenheiros na tomada de decisões mais seguras e eficientes no projeto de sistemas de aterramento. A pesquisa reforça a necessidade de se afastar de critérios empíricos e de basear os projetos em análises técnicas rigorosas, promovendo assim uma cultura de segurança e excelência no setor elétrico brasileiro.

6 REFERÊNCIAS

ABRACOPEL. **Relatório Anual de Acidentes de Origem Elétrica**. Disponível em: <https://www.abracopel.org>. Acesso em: 05 ago. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13571: **Componentes para sistemas de aterramento temporário**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13571-3: **Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 3: Danos físicos à estrutura e perigos à vida**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15749: **Medição de resistência na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15751: **Aterramento elétrico – Requisitos de segurança**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16384: **Segurança em eletricidade — Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: **Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419-1: **Proteção contra descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419-3: **Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 3: Danos físicos à estrutura e perigos à vida**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117-1: **parâmetros do solo para projeto de aterramentos elétricos – parte 1: medição da resistividade e modelagem geoeletrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-10: segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Brasília, DF: MTE, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br>. Acesso em: 10 ago. 2025.

DALZIEL, Charles Francis. **The Effects of Electric Shock on Man**. Washington, D.C.: U.S. Atomic Energy Commission, Office of Health and Safety, 1956. (Series: Safety and fire protection technical bulletin; no. 7).

DIAS, André Dantas. **Malhas de aterramento em subestações energizadas: medições e análises**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2011. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/bitstream/riufcg/9368/3/ANDR%c3%89%20DANTAS%20DIAS%20-%20DISSERTA%c3%87%c3%83O%20PPGEE%202011.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2025.

ELAT. GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. **História da eletricidade atmosférica**. 2019. Disponível em: <http://antigo.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/eletricidade.atmosferica/historia.php#>. Acesso em: 13 ago. 2025.

EMPRESA DE TECNOLOGIA ELETRÔNICA ETCR. **ETCR 3000B: testador de resistividade do solo de resistência à terra**. [S. l.]: Manuais Lib. Disponível em: <https://www.manuaislib.com/manual/2556899/Etcr-3000b.html>. Acesso em: 18 jul. 2025.

ENERGISA. **ETU-150.1 - Haste de aterramento de aço cobreado e acessórios**. 2024. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/sites/energisa/files/media/documents/2025-02/ETU-150.1%20-%20Haste%20de%20aterramento%20de%20a%c3%a7o%20cobreado%20e%20acess%c3%b3rios.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

FARADAY, M. **Experimental Researches in Electricity**. London: Royal Institution, 1821.

FARADAY, M. On Some New Electro-Magnetical Motions, And On The Theory Of Magnetism. **Quarterly Journal Of Science**, 1821.

IEEE. **IEEE Std 80: Guide for Safety in AC Substation Grounding**. New York: IEEE, 2013.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Std 142-2007 – IEEE Green Book)**. New York: IEEE, 2007.

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

KÖCHE, José Carlos. **Fundamentos de metodologia científica**. 22. ed. Petrópolis: Vozes, 2003.

LEITE, C.M.; PEREIRA FILHO, M.L. **Técnicas de aterramentos elétricos: cálculos, projetos e softwares para aterramentos elétricos**. 4. ed. São Paulo: [s. n.], 1996.

LEWIS, David. **Projeto de aterramento de subestação: reduzindo os riscos de tensão de passo e toque**. 11 set. 2022. Disponível em: <https://www.electricalsafetypub.com/features/substation-grounding-design-reducing-step-and-touch-voltage-hazards/>. Acesso em: 28 jul. 2025.

LI, X.; WANG, Y.; ZHANG, H.; et al. Performance Optimization of Grounding System for Multi-Voltage Electrical Installation. **Applied Sciences**, Basel, v. 15, n. 15, p. 8600, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/15/8600>. Acesso em: 17 ago. 2025.

MATTEDE, Henrique. **Hastes de aterramento, características e aplicações**. 2016. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/hastes-de-aterramento-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em: 16 ago. 2025.

MORAIS, Filipe Santana de. **Análise comparativa teórico-experimental entre as principais topologias utilizadas em aterramentos elétricos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Goiás, Itumbiara, GO, 2021. Disponível em:
<https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/632/1/TCC%20Engenharia%20El%C3%A9trica%20Itumbiara%202021%20-%20Filipe%20Santana%20de%20Morais.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2025.

NAHMAN, J. M.; DJORDJEVIC, V. B. Resistência ao aterramento de eletrodos combinados de hastes múltiplas de grade. In: **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 3, p. 1337-1342, 1996.

PIANELI, Maicon Henrique. **A importância da instalação do aterramento temporário em serviços de manutenção em redes de distribuição**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, PR, 2025. Disponível em:
<https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/36740/1/Instalacaoateramentoredesdistribuicao.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2025.

POPPER, Karl. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix, 1977.

REVISTA IBERO-AMERICANA DE HUMANIDADES, CIÊNCIAS E EDUCAÇÃO. Aterramento elétrico, uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**. São Paulo, v. 9, n. 5, maio. 2023. ISSN - 2675 – 3375.

RIBEIRO, Ronan Moreira. **Estudo da resistividade do solo e dimensionamento de malha de aterramento**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, MG, 2023. Disponível em:
https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5439/1/MONOGRAFIA_EstudoResistividadeSolo.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

SILVA, Rodney Joedson Santos da. **Tratamento do solo adequação de aterramento com haste pontual**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Bahia, Paulo Afonso, BA, 2019. Disponível em: <https://portal.ifba.edu.br/paulo-afonso/cursos.paf/nivel-superior/engenharia-eletrica/TCC-EE/ano-2019/tcc-rodney-joedson-santos-da-silva.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2025.

THOMSON, W. On the Age of the Earth. **Transactions of the Geological Society of Glasgow**, 1889.

VISACRO FILHO, Silvério. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega de trabalho de conclusão de curso

Assunto:	Entrega de trabalho de conclusão de curso
Assinado por:	Victor Aslan
Tipo do Documento:	Requerimento
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Victor Aslan Freire Menezes, ALUNO (20182610042) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 06/01/2026 20:04:45.

Este documento foi armazenado no SUAP em 06/01/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1723118

Código de Autenticação: 82e04dfda4

