



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ERIKC JOSÉ FERREIRA SANTOS

**Avaliação comparativa da resistividade do solo em projetos de
aterrramento: análise de terrômetro e resistivímetro em SEV e seus efeitos
sobre parâmetros de segurança via Software XGSLab**

Uberlândia

2026

ERIKC JOSÉ FERREIRA SANTOS

Avaliação comparativa da resistividade do solo em projetos de aterramento: análise de terrômetro e resistivímetro em SEV e seus efeitos sobre parâmetros de segurança via Software XGSLab

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende

Uberlândia

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S237 Santos, Erikc José Ferreira, 1999-
2026 Avaliação comparativa da resistividade do solo em projetos de
aterramento: análise de terrômetro e resistivímetro em SEV e seus
efeitos sobre parâmetros de segurança via Software XGSLab
[recurso eletrônico] / Erikc José Ferreira Santos. - 2026.

Orientador: Paulo Henrique Oliveira Rezende.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.103>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Rezende, Paulo Henrique Oliveira,
1987-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-
graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ERIKC JOSÉ FERREIRA SANTOS

Avaliação comparativa da resistividade do solo em projetos de aterramento: análise de terrômetro e resistivímetro em SEV e seus efeitos sobre parâmetros de segurança via Software XGSLab

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Uberlândia, 06 de Fevereiro de 2026

Banca Examinadora:

Paulo Henrique Oliveria Rezende – Prof. Dr.
(Orientador – UFU)

Gustavo Brito de Lima – Prof. Dr.
(Examinador – UFU)

Afonso Bernardino de Almeida Júnior – Prof. Dr.
(Examinador – IFTM)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP
38400-902

Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - cobel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 816, PPGEELT				
Data:	Seis de fevereiro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	7:00	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	12412EEL002				
Nome do Discente:	Erikc José Ferreira Santos				
Título do Trabalho:	Avaliação comparativa da resistividade do solo em projetos de aterramento: análise de terrômetro e resistivímetro em SEV e seus efeitos sobre parâmetros de segurança via Software XGSLab				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Paulo Henrique Oliveira Rezende. Título do projeto: Alocação Otimizada de Reatores Saturados Cabeça de Série em Redes de Distribuição Multirriamais para Regulação da Tensão. Agência financiadora: Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia – Coelba (“NEOENERGIA COELBA”). Número do processo na agência financiadora: 23117.006858/2023-71. Vigência do projeto: 21/06/2023 a 20/07/2026.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Gustavo Brito de Lima (UFU), Afonso Bernardino de Almeida Júnior (IFTM)
e Paulo Henrique Oliveira Rezende, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/02/2026, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Afonso Bernardino de Almeida Junior, Usuário Externo**, em 06/02/2026, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Brito de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/02/2026, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?
acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **7028972** e o código CRC **FCC36841**.

*“Dedico aos meus pais, Rosa e Reginaldo,
que sempre me ensinaram o valor do esforço,
da honestidade e da perseverança.
Tudo o que conquisto tem um pouco de vocês.”*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela saúde, força e sabedoria concedidas ao longo desta jornada. Foi essa presença constante que me sustentou nos momentos mais desafiadores e me guiou com fé e perseverança até a conclusão desta etapa.

Aos meus pais, Rosa e Reginaldo, expresso minha mais profunda gratidão. Obrigado por nunca desistirem de acreditar em mim e por estarem sempre presentes nos momentos de maior dificuldade. O amor, o apoio incondicional e os conselhos de vocês foram a base firme sobre a qual pude construir cada passo desta trajetória.

À minha namorada, Jordana, agradeço pelo carinho, paciência e compreensão ao longo destes anos. Obrigado por compartilhar comigo as alegrias, aliviar os dias difíceis e ser uma presença constante de incentivo e afeto.

Aos meus colegas de laboratório, deixo meu sincero agradecimento pela convivência, pelo apoio diário e pelas contribuições que tornaram esta caminhada mais leve e produtiva. Cada troca, ajuda e conversa fez diferença na construção deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Paulo Henrique, registro minha profunda gratidão pela orientação, pela confiança depositada em mim e pelas contribuições decisivas para o desenvolvimento desta pesquisa. Sua experiência, disponibilidade e incentivo foram essenciais para o amadurecimento deste trabalho.

Ao professor Ivan Nunes, agradeço sinceramente pelos ensinamentos que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional. Ainda que não tenha participado diretamente deste estudo, suas orientações e conselhos tiveram grande impacto na forma como evoluí ao longo da minha formação.

À Aupus Energia, em especial ao seu diretor Diego Santana, registro meu agradecimento pela disponibilização do resistivímetro utilizado neste estudo. O apoio institucional e a cessão do equipamento foram fundamentais para a realização das medições e para o desenvolvimento experimental desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos os demais amigos e colegas que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para que eu chegassem até aqui. Cada palavra de apoio, gesto de amizade e demonstração de confiança teve enorme significado nesta jornada. Meu muito obrigado a todos.

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*
- Albert Einstein

RESUMO

A resistividade do solo é um dos principais parâmetros no projeto e na avaliação de sistemas de aterramento, influenciando diretamente a resistência de aterramento e os níveis de tensão de toque e de passo. Nesse contexto, a correta caracterização elétrica do solo é fundamental para garantir a segurança de pessoas e equipamentos. Este trabalho apresenta uma investigação comparativa entre medições de resistividade do solo realizadas com terrômetro e resistivímetro, analisando as diferenças entre os resultados obtidos e seus impactos no dimensionamento de sistemas de aterramento.

Foram realizadas medições experimentais em cinco locais distintos, utilizando o método de Wenner, com diferentes espaçamentos entre eletrodos. Os resultados indicaram que o terrômetro tende a fornecer valores de resistividade inferiores aos obtidos com o resistivímetro, sendo esse comportamento mais acentuado para maiores espaçamentos entre eletrodos. Observou-se que, para espaçamentos superiores a 16 m, o terrômetro apresenta perda significativa de confiabilidade, com erros da ordem de 30%.

A partir dos dados experimentais, foram realizadas análises computacionais no software XGSLab, aplicadas a sistemas reais de aterramento de uma usina fotovoltaica, de um hospital e de uma subestação de energia elétrica. As simulações demonstraram que, em solos de baixa resistividade, as variações nos valores medidos exercem menor influência sobre a resistência final de aterramento, enquanto em solos de alta resistividade essas diferenças resultam em variações expressivas na resistência de aterramento e nos níveis de tensão de toque e de passo.

Os resultados evidenciaram ainda que o uso de valores de resistividade obtidos com terrômetro tende a subestimar a resistência de aterramento e as tensões de toque e de passo, podendo conduzir ao subdimensionamento dos sistemas e a uma avaliação excessivamente otimista das condições de segurança. Conclui-se que o terrômetro é mais indicado para medições de pequeno porte e espaçamentos reduzidos, enquanto o resistivímetro se mostra mais adequado para estudos que demandam maior precisão e profundidade de investigação.

Palavras-chave: Resistividade do solo; Sistema de aterramento; Terrômetro; Resistivímetro; Tensão de toque e passo.

ABSTRACT

Soil resistivity is one of the main parameters in the design and evaluation of grounding systems, as it directly influences grounding resistance and touch and step voltage levels. In this context, an accurate electrical characterization of the soil is essential to ensure the safety of people and equipment. This work presents a comparative investigation between soil resistivity measurements performed using an earth tester and a resistivity meter, analyzing the differences between the obtained results and their impacts on the design of grounding systems.

Measurements were carried out at five different locations using the Wenner method with various electrode spacings. The results indicated that the earth tester tends to provide lower resistivity values than those obtained with the resistivity meter, with this behavior becoming more pronounced as the electrode spacing increases. It was observed that, for spacings greater than 16 m, the earth tester shows a significant loss of reliability, with errors on the order of 30%.

Based on the experimental data, computational analyses were performed using the XGSLab software and applied to real grounding systems of a photovoltaic power plant, a hospital, and an electrical substation. The simulations results indicates, in low-resistivity soils, variations in the measured values have a smaller influence on the final grounding resistance, whereas in high-resistivity soils these differences result in significant variations in grounding resistance and touch and step voltage levels.

The results also demonstrated that the use of resistivity values obtained with the earth tester seems to underestimate grounding resistance and touch and step voltages, which may lead to undersizing of grounding systems and an overly optimistic assessment of safety conditions. It is concluded that the earth tester is more suitable for small-scale measurements and reduced electrode spacings, while the resistivity meter is more appropriate for studies that require higher accuracy and greater depth of investigation.

Keywords: Soil resistivity; Grounding system; Earth tester; Resistivity meter; Touch e step voltages.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tensão de passo de uma descarga atmosférica	32
Figura 2: Potencial de toque.....	33
Figura 3: Haste simples cravada no solo.....	35
Figura 4: Quatro hastes alinhadas cravadas no solo.....	35
Figura 5: Hastes cravadas nos vértices de um triângulo equilátero.....	35
Figura 6: Hastes cravadas nos vértices de um quadrado.....	36
Figura 7: Hastes cravadas em uma circunferência.....	36
Figura 8: Placa condutora enterrada no solo.....	36
Figura 9: Fio condutor estendido em uma vala.....	37
Figura 10: Hastes compondo uma cruz.....	37
Figura 11: Malha de terra.....	38
Figura 12: Distribuição aproximada das linhas de corrente e equipotenciais no solo.....	43
Figura 13: Distribuição do campo elétrico no solo para uma haste de 2,5m em solo homogêneo ($I = 3000A$). Simulação no software XGSLab.	44
Figura 14: Equipotenciais no solo para eletrodo tipo haste.....	45
Figura 15: Efeito da estratificação do solo no perfil de potencial da superfície.....	46
Figura 16: Esquema das quatro hastes usadas no método de Wenner.....	53
Figura 17: Arranjo de Schlumberger.....	55
Figura 18: Terrômetro MTD-2000e utilizado nas medições em campo.....	58
Figura 19: Resistivímetro X6XTAL 500 utilizado nos ensaios.....	59
Figura 20: Estacas utilizadas nos ensaios de resistividade.....	60
Figura 21: Cabos de conexão e bateria auxiliar do resistivímetro utilizados nos ensaios de resistividade.....	60
Figura 22: Osciloscópio Fluke 190-104 utilizado no experimento.....	62
Figura 23: Formas de onda de tensão (cor laranja) e corrente (cor azul) obtidas com o terrômetro.	63
Figura 24: Formas de onda de tensão (cor vermelha) e corrente (cor azul) obtidas com o resistivímetro.	64
Figura 25: Localização das áreas de estudos no município de Terezópolis de Goiás, GO.....	66
Figura 26: Direções das linhas de medições executadas.	67

Figura 27: Cravação e cabo conectado à estaca.	68
Figura 28: Gráfico das resistividades aparentes médias (medida).	72
Figura 29: Curva em vermelho obtida do modelo do solo da Tabela 9 ajustada aos pontos referentes aos dados medidos em campo (escala log-log) com o resistivímetro e curva preta o perfil real do solo, destacando assim a diferença do modelo medido e do real.	78
Figura 30: Curva em vermelho obtida do modelo do solo da Tabela 9 ajustada aos pontos referentes aos dados medidos em campo (escala log-log) com o terrômetro e curva preta o perfil real do solo, destacando assim a diferença do modelo medido e do real.	79
Figura 31: Sistema de aterramento do complexo solar parametrizado no software XGSLab..	85
Figura 32: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar para a resistividade com o terrômetro no local A.	86
Figura 33: Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança para a resistividade com o terrômetro no local A.	86
Figura 34: Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local A.	87
Figura 35: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar para a resistividade com o resistivímetro no local A.	87
Figura 36: Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança para a resistividade com o resistivímetro no local A.	88
Figura 37: Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local A.	88
Figura 38: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar para a resistividade com o terrômetro no local D.	89
Figura 39: Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança para a resistividade com o terrômetro no local D.	89
Figura 40: Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local D.	90
Figura 41: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar para a resistividade com o resistivímetro no local D.	90
Figura 42: Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança para a resistividade com o resistivímetro no local D.	91
Figura 43: Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local D.	91
Figura 44: Sistema de aterramento do hospital parametrizado no software XGSLab.	94
Figura 45: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema do hospital para a resistividade com o terrômetro no local A.	95
Figura 46: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área do hospital para a resistividade com o terrômetro no local A.	95

Figura 47: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área do hospital para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local A	96
Figura 49: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área do hospital para a resistividade com o resistivímetro no local A.....	97
Figura 50: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área do hospital para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local A	97
Figura 51: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema do hospital para a resistividade com o terrômetro no local D.	98
Figura 52: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área do hospital para a resistividade com o terrômetro no local D.....	98
Figura 53: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área do hospital para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local D.	99
Figura 54: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema do hospital para a resistividade com o resistivímetro no local D.	99
Figura 55: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área do hospital para a resistividade com o resistivímetro no local D.	100
Figura 56: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área do hospital para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local D.....	100
Figura 57: Sistema de aterramento da SE Trindade parametrizado no software XGSLab. ...	103
Figura 58: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema da subestação Trindade para a resistividade com o terrômetro no local A.	104
Figura 59: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área da subestação Trindade para a resistividade com o terrômetro no local A.....	104
Figura 60: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área da subestação Trindade para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local A.....	105
Figura 61: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema da subestação Trindade para a resistividade com o resistivímetro no local A.	105
Figura 62: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área da subestação Trindade para a resistividade com o resistivímetro no local A.....	106
Figura 63: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área da subestação Trindade para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local A.....	106
Figura 64: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema da subestação Trindade para a resistividade com o terrômetro no local D.	107
Figura 65: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área da subestação Trindade para a resistividade com o terrômetro no local D.....	107
Figura 66: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área da subestação Trindade para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local D.....	108
Figura 67: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema da subestação Trindade para a resistividade com o resistivímetro no local D.	108

Figura 68: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área da subestação Trindade para a resistividade com o resistivímetro no local D.....	109
Figura 69: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área da subestação Trindade para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local D.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas de resistividade típicas de materiais que compõem o solo.....	49
Tabela 2: Relação (V/I) após o cálculo do sP com a tensão medida no Resistivímetro.....	70
Tabela 3: Relação (V/I) lida no Terrômetro.....	70
Tabela 4: Resistividades aparentes para o resistivímetro.	71
Tabela 5: Resistividades aparentes para o terrômetro.	71
Tabela 6: Logaritmos das resistividades aparentes para verificação de valores extremos para o resistivímetro.	73
Tabela 7: Logaritmos das resistividades aparentes para verificação de valores extremos para o terrômetro.	73
Tabela 8: Resultados de resistividade aparente média para cada local de medição e com seus devidos erros entre os instrumentos de medição.	75
Tabela 9: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local A.	76
Tabela 10: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local B.	77
Tabela 11: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local C.	77
Tabela 12: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local D.	77
Tabela 13: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local E.....	78
Tabela 14:Tabela resumo com todos resultados, para todos os cenários e instalações analisados.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DC	Direct Current
Hz	Hertz
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IT	Isolado-Terra
Kg	Quilo
m	Metros
m	mini
NBR	Norma Brasileira
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SEVs	Sondagem elétrica verticais
SP	Potencial espontâneo
TN-C	Terra-Neutro-Comum
TN-C-S	Terra-Neutro-Comum-Separado
TN-S	Terra-Neutro-Separado
TT	Terra-Terra
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V	Volt
W	Watt
Ω	Ohm
ΔV	Diferença de potenciais

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	20
1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO	22
1.2.1 IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO NA SEGURANÇA ELÉTRICA	22
1.2.2 IMPACTO DA RESISTIVIDADE DO SOLO NAS MEDIÇÕES	23
1.2.3 LIMITAÇÕES DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	24
1.2.4 CONSEQUÊNCIAS DE ERROS DE MEDIÇÃO	25
1.2.5 CONTRIBUIÇÕES POTENCIAIS DO ESTUDO	25
1.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	26
1.4 OBJETIVOS	27
1.4.1 OBJETIVO GERAL	27
1.4.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	27
1.5 JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA E PRÁTICA	27
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E NORMAS APLICÁVEIS	29
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ATERRAMENTO	30
2.1.1 DEFINIÇÃO DE ATERRAMENTO	30
2.1.2 TENSÕES ASSOCIADAS AO ATERRAMENTO	31
2.1.3 ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO	34
2.1.4 TIPOS DE ARRANJOS	35
2.1.5 TIPOS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO	38
2.1.6 CRITÉRIOS TÉCNICOS E NORMATIVOS	40
2.2 DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES E POTENCIAIS NO SOLO	41
2.3 ALTERAÇÕES PRODUZIDAS NA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES E POTENCIAIS NO SOLO PELO EMPREGO DE OUTROS TIPOS DE ELETRODOS E PELA NÃO-HOMOGENEIDADE DO SOLO	44
2.4 CORRENTES TELÚRICAS	46
2.5 RESISTIVIDADE DO SOLO	47
2.5.1 DEFINIÇÃO DE RESISTIVIDADE	47
2.5.2 IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA	48
2.5.3 VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDADE PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO	48
2.6 INSTRUMENTOS UTILIZADOS EM ENSAIOS DE RESISTIVIDADE	49
2.6.1 TERRÔMETRO	49
2.6.2 RESISTIVÍMETRO	51
2.7 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE	53
2.7.1 WENNER	53
2.7.2 SCHLUMBERGER	54
2.7.3 COMPARAÇÃO GERAL ENTRE OS DOIS MÉTODOS	55

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
---------------------------------	-----------

<u>RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS INSTRUMENTOS</u>	57
--	-----------

3.1 DESCRIÇÃO GERAL DA ABORDAGEM	57
3.2 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADOS	58
3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS EQUIPAMENTOS	60
3.4 CENÁRIOS DE MEDIÇÃO	65
3.5 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO	65
3.6 DETALHAMENTO DO CÁLCULO DE RESISTIVIDADE APARENTE	68
3.7 INVERSÃO DA CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE (ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO)	76
3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79

<u>ANÁLISES COMPUTACIONAIS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS REAIS</u>	82
---	-----------

4.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE	82
4.2 SOFTWARE UTILIZADO – XGSLAB	83
4.3 SISTEMA DE ATERRAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA	84
4.3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	84
4.3.2 ANÁLISE DAS VARIAÇÕES DE RESISTIVIDADE	85
4.4 SISTEMA DE ATERRAMENTO DO HOSPITAL	93
4.4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	93
4.4.2 ANÁLISE DAS VARIAÇÕES DE RESISTIVIDADE	94
4.5 SISTEMA DE ATERRAMENDO DA SUBESTAÇÃO	102
4.5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	102
4.5.2 ANÁLISE DAS VARIAÇÕES DE RESISTIVIDADE	103
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110

<u>CONCLUSÕES GERAIS</u>	113
---------------------------------	------------

<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	118
--	------------

<u>ANEXOS</u>	122
----------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

No mundo contemporâneo, a eletricidade tornou-se indispensável para a vida cotidiana, sustentando desde atividades básicas em residências até processos altamente complexos em indústrias e centros de tecnologia. A crescente dependência de sistemas elétricos, aliada ao avanço da automação e à expansão das redes de distribuição, torna a segurança elétrica um fator crucial não apenas para a proteção de vidas humanas, mas também para a continuidade operacional de serviços essenciais. Nesse cenário, os sistemas de aterramento assumem um papel estratégico, pois permitem que falhas inevitáveis, como curtos-circuitos e descargas atmosféricas, sejam controladas de forma segura e eficaz.

Historicamente, o conceito de aterramento passou por diferentes etapas de evolução, impulsionadas pelas contribuições de cientistas e inventores que moldaram a compreensão da eletricidade. Os primeiros registros datam do experimento de Benjamin Franklin, em 1752, ao demonstrar que os raios eram uma forma de eletricidade, sugerindo que a instalação de sistemas de aterramento poderia proteger edificações contra descargas atmosféricas. Posteriormente, no século XIX, com a expansão das telecomunicações, Samuel Morse e Karl August Steiheil aplicaram o solo como caminho de retorno para linhas telegráficas, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade das transmissões. Pesquisadores como Michael Faraday, Lord Kelvin e Oliver Heaviside contribuíram para consolidar o entendimento sobre condução elétrica, resistência do solo e a utilização da chamada “terra artificial” como recurso para dissipação de correntes indesejadas. Já no final do século XIX, Nikola Tesla avançou ao propor sistemas de eletrodos enterrados em rede, melhorando a eficiência e segurança dos circuitos elétricos. Esses avanços históricos pavimentaram o caminho para o reconhecimento do aterramento como prática de segurança essencial, oficializado em normas e códigos elétricos a partir da década de 1930 [1].

Na atualidade, com o crescimento das fontes alternativas de energia, especialmente a energia solar fotovoltaica, a necessidade de sistemas de aterramento confiáveis torna-se ainda mais evidente. Usinas solares, devido à sua grande extensão física e elevada capacidade instalada, demandam projetos de aterramento capazes de assegurar tanto a segurança das

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

estruturas quanto a continuidade da operação em condições adversas. No entanto, ainda são escassos os estudos nacionais dedicados a esse tema, o que frequentemente leva à utilização de referências internacionais. Essa lacuna reforça a importância de compreender os fatores que influenciam diretamente o desempenho de sistemas de aterramento em diferentes cenários, como a resistividade do solo, o arranjo da instalação e os níveis de corrente de falta, de modo a garantir não apenas a eficácia técnica, mas também a viabilidade econômica dos empreendimentos [2].

O aterramento elétrico, portanto, constitui um dos pilares fundamentais da segurança em sistemas elétricos, sendo essencial para a proteção de pessoas, animais e equipamentos contra choques elétricos. Seu principal objetivo é estabelecer uma conexão direta e confiável entre o sistema elétrico e a terra, permitindo a dissipação segura da corrente em situações de falha. Esse mecanismo de proteção é aplicado em diferentes escalas, desde residências e estabelecimentos comerciais até instalações industriais de grande porte, incluindo usinas de geração de energia. No Brasil, a obrigatoriedade do aterramento é respaldada por normas técnicas específicas, como a NBR 5410, que estabelece critérios de projeto, instalação e manutenção em baixa tensão [3].

Da prática, tem-se que um aterramento inadequado resulta em um tempo de parada (interrupção) desnecessário dos processos que dependam da energia elétrica, aumentando ainda o risco da ocorrência de falhas nos equipamentos. Sem um sistema de aterramento eficaz, também existe o risco de erros nas medições das variáveis do processo e de operação dos instrumentos, problemas de distorção harmônica, problemas relacionados ao fator de potência e uma série de outras possíveis complicações [4].

Dos apontamentos encontrados, sabe-se que todo ano há um prejuízo de bilhões de dólares devido a incêndios causados por problemas elétricos nas instalações dos usuários finais da energia elétrica. Isso sem contar os custos dos litígios relacionados e a perda de produtividade individual e empresarial. No contexto da Qualidade da Energia Elétrica (QEE), as principais causas dos problemas estão relacionadas com sistemas inapropriados de aterramento ou neutro e devido à compatibilidade (ou melhor, incompatibilidade) eletromagnética [4].

Vale lembrar também que a mitigação ou amenização dos transitórios impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e dos transitórios oscilatórios, causados por chaveamentos, é diretamente ou indiretamente dependente do sistema de aterramento. Neste sentido, é função do sistema de aterramento drenar diretamente as correntes de descargas atmosféricas e, indiretamente, drenar também as correntes provenientes dos transitórios, provocadas por chaveamentos ou distúrbios na rede de energia [4].

Um sistema de aterramento bem projetado consiste em uma estrutura intencionalmente concebida para assegurar uma ligação segura e duradoura entre sistemas físicos, sejam eles elétricos, eletrônicos ou corpos metálicos expostos, e o solo. Além da proteção de pessoas e equipamentos, o aterramento garante a continuidade de operação de sistemas críticos, prevenindo interrupções e danos causados por descargas elétricas, falhas de isolamento ou curtos-circuitos. Seus elementos fundamentais incluem a conexão elétrica, que assegura a integridade da ligação ao solo; os eletrodos de aterramento, responsáveis por dissipar a corrente elétrica na terra; e a equipotencialização, que uniformiza o potencial elétrico entre diferentes partes metálicas, evitando diferenças de tensão perigosas[3].

Para que um Sistema de Energia Elétrica funcione de forma confiável, mantenha a continuidade do serviço e garanta a eficácia dos mecanismos de proteção, o aterramento deve receber atenção cuidadosa. O aterramento adequado também é crucial para manter os níveis de segurança e prevenir riscos elétricos. Para atingir isso, projetos de aterramento especializados devem ser desenvolvidos, levando em consideração todos os dados relevantes e condições potenciais que o sistema pode enfrentar [5].

1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

1.2.1 Importância dos sistemas de aterramento na segurança elétrica

A segurança elétrica depende diretamente da existência de sistemas de proteção eficazes, entre os quais o aterramento ocupa papel central. Um sistema de aterramento bem projetado e executado tem a função de proteger pessoas, equipamentos e estruturas contra os danos ocasionados por falhas elétricas, descargas atmosféricas e correntes de fuga. Por essa razão, é considerado um dos principais elementos de segurança em instalações elétricas, tendo evoluído ao longo dos anos para acompanhar as crescentes demandas tecnológicas e os requisitos de confiabilidade dos sistemas modernos [6].

Além de sua função essencial na proteção da vida humana, o aterramento também exerce impacto direto no setor industrial e econômico. Ele contribui para evitar prejuízos materiais e operacionais decorrentes de falhas que poderiam comprometer equipamentos sensíveis, ocasionar interrupções em processos produtivos ou, em situações mais graves, provocar incêndios de grandes proporções. Em ambientes industriais, onde circulam elevadas correntes e são comuns arcos elétricos, a presença de um sistema de aterramento eficiente é indispensável para mitigar riscos e preservar tanto a integridade das instalações quanto a continuidade da operação[7].

Nesse sentido, a relevância do aterramento ultrapassa o aspecto técnico, assumindo também um caráter social e econômico. Sua principal finalidade permanece a proteção à vida, evitando que pessoas e animais sejam expostos a potenciais elétricos perigosos, mas seus benefícios estendem-se à preservação de equipamentos, à redução de custos com manutenção corretiva e à garantia de confiabilidade de sistemas elétricos em diferentes escalas de aplicação.

1.2.2 Impacto da resistividade do solo nas medições

O solo tem uma estrutura heterogênea com resistividade que varia no tempo e no espaço vertical e horizontalmente [8]. A seguir são considerados os principais parâmetros que influenciam no valor da resistividade de um solo.

- **Tipo de solo:** Os valores de resistividade para os solos são bastante distintos devido a grande variedade de solos existentes. A variação de resistividade de um local para outro é devido à formação geológica dos solos, já a variação em um mesmo local é devido à profundidade das camadas estratificadas do solo.[9]
- **Umidade do solo:** A umidade é responsável por alterar a resistividade do solo. Uma porcentagem maior de umidade faz com que os sais presentes no solo se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem de corrente iônica. Dessa forma, um determinado tipo de solo, com diferente concentração de umidade, apresenta uma grande variação na sua resistividade [10].
- **Temperatura do solo:** Para a interpretação do efeito da temperatura na resistividade do solo são considerados dois aspectos: o aumento significativo da temperatura do solo implica no aumento da evaporação do mesmo, tornando o terreno mais seco, e consequentemente, com uma maior resistividade. Por outro lado, se a temperatura do solo baixar drasticamente para valores inferiores a zero, a água irá transformar em gelo, aumentando significativamente o valor da resistividade do solo [10].
- **Granulometria do solo:** A influência de uma granulometria maior tende a aumentar a resistividade, visto que afeta a capacidade de retenção de água através do escoamento para camadas mais profundas ou pela evaporação. Também é afetada a continuidade física do solo, através do menor contato existente entre os grãos, a continuidade elétrica é menor [9].
- **Compacidade do solo:** Um solo mais compacto apresenta um valor de resistividade menor proporcionado pela maior continuidade física [11]. Um aumento da pressão sobre o solo geralmente aumenta a compacidade deste, diminuindo sua resistividade. Recomenda-se a espera de um certo tempo para

medição da resistência de terra após a instalação de um aterramento elétrico. O solo demora um certo tempo para se acomodar e melhorar sua compactação [9].

- **Concentração e tipos de sais dissolvidos na água:** Sabendo-se que a resistividade da água é governada pelos sais dissolvidos (condução eletrolítica) e como a resistividade do solo depende da quantidade de água retida, conclui-se que a resistividade do solo é influenciada pela quantidade e pelos tipos de sais dissolvidos na água retida no mesmo [11].

Diante desses fatores, percebe-se que a resistividade do solo é um parâmetro altamente variável e dependente de condições ambientais, geológicas e físico-químicas. Essa variabilidade torna-se um desafio para o engenheiro projetista, uma vez que pequenas alterações nas características do terreno podem resultar em diferenças significativas nos resultados obtidos em campo. Consequentemente, erros nas medições ou interpretações equivocadas podem levar a projetos de aterramento super ou subdimensionados, comprometendo tanto a segurança elétrica quanto a viabilidade econômica da instalação. Assim, a correta avaliação da resistividade, associada ao uso de métodos normatizados de ensaio e à consideração das particularidades locais, é fundamental para garantir sistemas de aterramento eficientes, confiáveis e alinhados às exigências de segurança das normas técnicas.

1.2.3 Limitações dos instrumentos de medição

A precisão das medições de resistividade do solo e da resistência de aterramento depende diretamente das características e limitações dos equipamentos utilizados. A escolha inadequada de um instrumento, desconsiderando suas restrições operacionais, pode comprometer a confiabilidade dos resultados e, consequentemente, a eficácia do sistema de aterramento projetado.

O terrômetro digital MTD-2000e, por exemplo, permite medir tanto a resistência de aterramento quanto a resistividade do solo, além de detectar tensões espúrias causadas por correntes parasitas presentes no terreno. Suas principais aplicações incluem a verificação da resistência de aterramento em edificações residenciais, industriais, hospitalares, instalações de pária-raios, antenas e subestações. Com um amplo intervalo de medição, que varia de $0,01 \Omega$ até $2 k\Omega$, o equipamento possibilita ensaios confiáveis em diferentes tipos de solo, inclusive aqueles com resistividade muito elevada [12].

Entretanto, alguns equipamentos possuem apenas uma ou poucas entradas de medição, exigindo a comutação manual entre diferentes pares de eletrodos. Isso implica maior tempo para execução das campanhas de levantamento e a necessidade de operadores qualificados para garantir a consistência das leituras [13].

Diante dessas limitações, a comparação entre terrômetro e resistivímetro torna-se fundamental. Essa análise permite identificar cenários em que cada instrumento apresenta menor confiabilidade, como em solos de alta resistividade ou em áreas urbanas com espaço restrito, e estabelecer critérios adequados para sua aplicação prática. Compreender essas restrições é essencial para que os projetos de aterramento sejam não apenas seguros, mas também economicamente viáveis.

1.2.4 Consequências de erros de medição

Divergências nas medições de resistividade do solo podem resultar em erros significativos no dimensionamento das malhas de aterramento, ocasionando tanto o superdimensionamento, que gera custos desnecessários, quanto o subdimensionamento, que compromete a segurança do sistema. Solos de alta resistividade, interferências externas e a escolha inadequada de métodos de ensaio são fatores que contribuem para tais discrepâncias. A ABNT NBR 15749 estabelece alternativas, como a utilização de métodos complementares de injeção de alta corrente e medições síncronas, visando aumentar a confiabilidade e reduzir os riscos de erro. Além disso, estudos geoelétricos, normatizados pela NBR 7117, permitem identificar corretamente as características estratigráficas do solo, minimizando divergências que poderiam impactar diretamente o projeto e a eficiência do aterramento [14].

É igualmente ressaltada a necessidade de empregar métodos computacionais precisos e realistas, garantindo a qualidade das informações coletadas em campo, sobretudo em relação à resistividade elétrica do solo e ao levantamento de interferências das instalações estudadas. A negligência nesse processo pode resultar em graves falhas de projeto, afetando o dimensionamento de sistemas de aterramento, dispositivos de mitigação e proteção, além de equipamentos de localização de faltas, expondo pessoas a riscos de eletrocussão e causando danos ao patrimônio [15].

Portanto, a precisão na medição da resistividade do solo é essencial não apenas para a eficácia técnica do sistema de aterramento, mas também para assegurar a segurança de pessoas e a viabilidade econômica do projeto, justificando a atenção especial a métodos, instrumentos e procedimentos utilizados na etapa de levantamento de campo.

1.2.5 Contribuições potenciais do estudo

O presente estudo apresenta contribuições relevantes para a área de sistemas de aterramento ao realizar uma análise comparativa entre os métodos de medição utilizando terrômetro e resistivímetro. Essa abordagem possibilita identificar as limitações práticas e operacionais de cada equipamento, especialmente no que se refere à profundidade de

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

investigação, à distância entre eletrodos e à confiabilidade dos resultados em diferentes condições de solo.

Do ponto de vista técnico, espera-se que os resultados permitam fornecer subsídios para a escolha mais adequada do equipamento em função das necessidades do projeto, seja em levantamentos preliminares, seja em estudos mais aprofundados de caracterização do solo. Além disso, o trabalho contribui para esclarecer possíveis discrepâncias observadas em campo, auxiliando projetistas, concessionárias de energia e empresas de engenharia a compreenderem melhor as condições em que cada instrumento se mostra mais eficaz.

Sob a ótica científica, a pesquisa amplia a discussão sobre a aplicabilidade das metodologias de medição da resistividade do solo, servindo como base para estudos posteriores que busquem aprimorar técnicas de avaliação e normatização. Já na esfera prática, o estudo pode apoiar profissionais na tomada de decisão, garantindo maior confiabilidade nos projetos de aterramento e, consequentemente, maior segurança elétrica e desempenho dos sistemas.

1.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

A resistividade do solo é um parâmetro fundamental para o adequado dimensionamento de sistemas de aterramento elétrico. Ela influencia diretamente a eficiência na dissipação de correntes de falta, de descargas atmosféricas e na proteção de pessoas e equipamentos contra choques elétricos. Contudo, a obtenção desse parâmetro depende de ensaios de campo que utilizam equipamentos e metodologias distintas, os quais podem apresentar limitações práticas e diferenças nos resultados.

Nesse contexto, dois instrumentos comumente empregados são o terrômetro e o resistivímetro. Embora ambos tenham como finalidade a medição da resistividade do solo, cada equipamento se baseia em configurações de ensaio específicas, com particularidades quanto à distância entre eletrodos, sensibilidade às condições do terreno, profundidade efetiva de investigação e complexidade operacional. Essa diversidade de abordagens pode conduzir a valores divergentes de resistividade para um mesmo local, comprometendo a padronização das medições e a confiabilidade no dimensionamento dos sistemas de aterramento.

Assim, o problema central desta pesquisa reside em compreender as diferenças entre os resultados de sondagem elétrica vertical (SEVs) obtidos a partir do uso do terrômetro e do resistivímetro, analisando suas limitações, potencialidades e a influência na caracterização elétrica do solo. A ausência de consenso ou de estudos comparativos sistemáticos sobre o desempenho desses equipamentos torna necessária uma investigação detalhada, que permita orientar engenheiros e profissionais da área quanto à escolha do método mais adequado em diferentes contextos de aplicação.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar e comparar os resultados obtidos a partir de medições de resistividade do solo realizadas com terrômetro e resistivímetro, de modo a avaliar a confiabilidade, as possíveis divergências e as implicações práticas da utilização de cada equipamento em estudos de sistemas de aterramento.

1.4.2 Objetivo específicos

Para alcançar o objetivo geral, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Investigar os fundamentos teóricos e operacionais dos ensaios de resistividade do solo utilizando terrômetro e resistivímetro.
- Realizar medições experimentais de resistividade do solo com ambos os equipamentos em diferentes condições de campo.
- Comparar os resultados obtidos, identificando convergências, divergências e possíveis fontes de erro associadas a cada instrumento.
- Avaliar, por meio de análises computacionais em sistemas reais de aterramento, o impacto das diferenças nos valores de resistividade do solo obtidos com cada instrumento de medição.
- Propor recomendações sobre a escolha do equipamento mais adequado em diferentes cenários de aplicação.

1.5 JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA E PRÁTICA

A determinação da resistividade elétrica do solo é um aspecto fundamental para o projeto de sistemas de aterramento em instalações elétricas. Valores inadequados dessa grandeza podem comprometer a eficiência dos sistemas de proteção, aumentando os riscos de choques elétricos, danos a equipamentos e falhas operacionais. Nesse contexto, a precisão na medição da resistividade do solo torna-se um requisito indispensável para a confiabilidade dos estudos e dimensionamentos.

Sob a perspectiva científica, o presente estudo contribui ao analisar comparativamente os resultados obtidos por meio de dois instrumentos comumente empregados: o terrômetro e o resistivímetro. Embora ambos os equipamentos tenham sido amplamente utilizados em diferentes aplicações, ainda se observam lacunas quanto à uniformidade metodológica, à consistência dos resultados e às possíveis diferenças entre os métodos em distintos tipos de solo. A análise sistemática e crítica desses aspectos fornece subsídios para a melhoria das

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

metodologias experimentais e para a consolidação de práticas mais confiáveis no campo da engenharia elétrica.

No âmbito prático, os resultados desta pesquisa podem oferecer suporte direto a engenheiros, projetistas e concessionárias de energia elétrica, fornecendo orientações quanto à escolha mais adequada do instrumento de medição para cada situação. Dessa forma, espera-se não apenas otimizar o tempo e os recursos empregados em campo, mas também elevar o nível de confiabilidade das medições, refletindo-se em projetos de aterramento mais seguros e eficientes.

Em síntese, a pesquisa se justifica tanto pelo seu potencial de avanço científico no entendimento das técnicas de medição de resistividade do solo, quanto pela sua aplicabilidade prática na melhoria de procedimentos utilizados rotineiramente por profissionais da área.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, estruturados de forma a conduzir o leitor desde a contextualização do problema até a análise comparativa entre os instrumentos de medição e as conclusões obtidas.

No Capítulo 1 são apresentados a contextualização do tema, a relevância do estudo, a definição do problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos, bem como a justificativa científica e prática.

O Capítulo 2 reúne os fundamentos teóricos necessários para a compreensão do trabalho, abordando conceitos de aterramento elétrico, resistividade do solo, métodos de ensaio, além da descrição dos equipamentos utilizados nos testes.

O Capítulo 3 descreve a metodologia aplicada, descreve os resultados das medições e faz uma análise comparativa dos instrumentos utilizados nos ensaios.

O Capítulo 4 desenvolve análises computacionais, demonstrando como as diferenças nas medições entre os instrumentos impactam diretamente no dimensionamento e na análise de um sistema de aterramento.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições e recomendações práticas, além de sugerir direções para trabalhos futuros relacionados à temática.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E NORMAS APLICÁVEIS

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos e normativos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho, fornecendo a base conceitual necessária para a compreensão dos fenômenos envolvidos nos sistemas de aterramento e na caracterização elétrica do solo. Inicialmente, são discutidos os conceitos de resistividade do solo e os principais fatores físico-químicos que influenciam essa grandeza, destacando-se a importância da representação do terreno por meio de modelos estratificados para uma descrição mais fiel de suas propriedades elétricas.

A adequada compreensão desses parâmetros é essencial para garantir que os modelos matemáticos, as simulações computacionais e os cálculos empregados nas etapas subsequentes sejam capazes de reproduzir, com a precisão requerida, as condições reais observadas em campo. Nesse contexto, o capítulo também aborda a distribuição de correntes e potenciais no solo, bem como os efeitos da não homogeneidade e da presença de correntes telúricas, aspectos que impactam diretamente a confiabilidade das medições de resistividade.

Adicionalmente, são apresentados os princípios da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), com ênfase nos arranjos de Wenner e Schlumberger, estabelecendo o embasamento teórico para a obtenção da resistividade aparente do solo. São ainda discutidos os instrumentos empregados nesses ensaios, ressaltando suas características operacionais e limitações. Por fim, o capítulo contempla os critérios de segurança aplicáveis aos projetos de aterramento, com destaque para as tensões de passo e de toque, conforme preconizado pelas normas técnicas vigentes.

Essa fundamentação teórica constitui o suporte necessário para a análise comparativa entre o terrômetro e o resistivímetro, bem como para a avaliação dos impactos das diferenças de medição nos parâmetros de segurança obtidos por meio de simulações no software XGSLab, as quais serão desenvolvidas nos capítulos subsequentes.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ATERRAMENTO

Esta seção apresenta os conceitos fundamentais de aterramento elétrico necessários para a compreensão das etapas metodológicas e das análises comparativas desenvolvidas ao longo deste trabalho. Em termos gerais, o aterramento estabelece uma referência de potencial e provê um caminho de baixa impedância para a circulação de correntes de falta e de descargas atmosféricas, contribuindo simultaneamente para a proteção de pessoas, a integridade de equipamentos e a continuidade operacional das instalações. Assim, são introduzidas as principais grandezas associadas à segurança com destaque para tensões de toque e de passo e para a elevação do potencial de terra, bem como os elementos típicos que compõem sistemas de aterramento (eletrodos, condutores, conexões e arranjos geométricos). Por fim, são discutidos os tipos de sistemas e os critérios técnicos e normativos de projeto, estabelecendo a base conceitual que sustentará a comparação entre medições de resistividade do solo via SEV realizadas com terrômetros e resistivímetros e a avaliação do impacto dessas diferenças em estudos de caso modelados no software XGSLab.

2.1.1 Definição de aterramento

De acordo com a IEEE Std 80 [16], o termo aterramento é definido como uma conexão condutora, intencional ou acidental, por meio da qual um circuito ou equipamento elétrico é ligado à terra, ou a um corpo condutor de grande extensão que possa desempenhar essa função. Essa definição evidencia que o aterramento tem como finalidade estabelecer uma referência elétrica estável e proporcionar um caminho de baixa impedância para a circulação de correntes de falta ou descargas atmosféricas, assegurando a proteção de pessoas, equipamentos e instalações.

Complementando essa visão, Charles Dalziel desenvolveu estudos pioneiros sobre os efeitos da corrente elétrica no corpo humano, estabelecendo limites de segurança amplamente utilizados até hoje. Segundo suas conclusões, 99,5% das pessoas com peso superior a 50 kg são capazes de suportar, sem ocorrência de fibrilação ventricular, a corrente elétrica definida pela expressão (1), desde que o tempo de exposição seja limitado. Esse tempo é determinado pela atuação dos dispositivos de proteção do sistema, como relés, que interrompem a corrente de falta após um período característico de sua curva de operação. Assim, a expressão (1) é utilizada para calcular o limite permitível e aceitável de corrente que pode atravessar o corpo durante a exposição às tensões de passo ou de toque, garantindo que os sistemas de aterramento sejam

projetados não apenas para a eficiência elétrica, mas também para a segurança fisiológica dos usuários [10].

$$I_{choque} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

Sendo:

$$0,03\text{s} \leq t \leq 3\text{s}$$

t = Tempo [S] da duração do choque

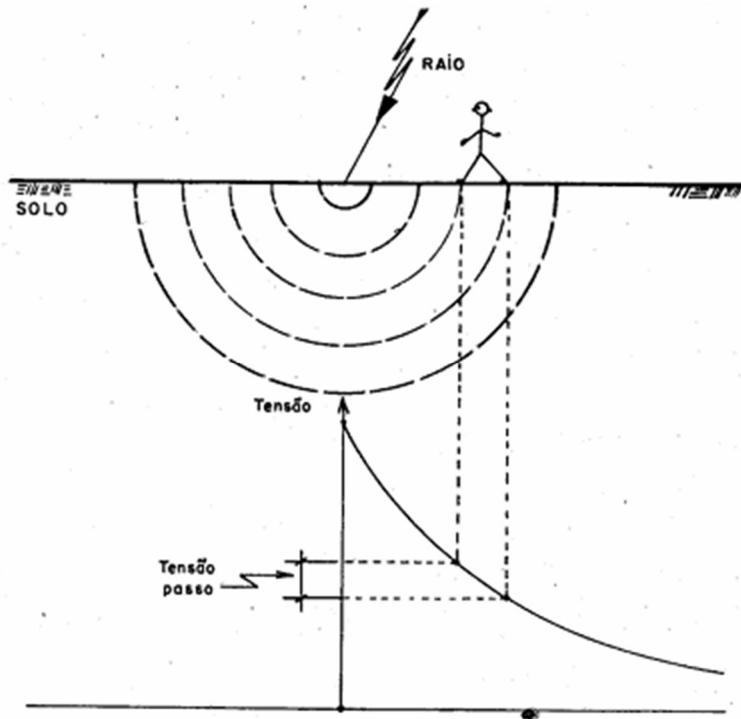
I_{choque} = Corrente [A] pelo corpo humano, limite para não causar fibrilação

2.1.2 Tensões associadas ao aterrramento

Tensão de passo: A tensão de passo é definida como a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância média de um passo humano, usualmente considerada como 1,0 m [17]. Em termos práticos, essa tensão ocorre quando os pés de uma pessoa estão apoiados em regiões do solo com potenciais distintos, fazendo com que a corrente elétrica circule através do corpo. A intensidade dessa corrente dependerá não apenas da diferença de potencial presente, mas também da resistência elétrica do corpo humano e das condições de contato com o solo.

Segundo [10], a tensão de passo manifesta-se quando os pés estão posicionados sobre linhas equipotenciais diferentes, formadas na superfície do solo em decorrência do escoamento de correntes de curto-circuito. Caso ambos os pés estejam apoiados exatamente sobre a mesma linha equipotencial, não haverá diferença de potencial entre eles e, consequentemente, não ocorrerá a tensão de passo. No entanto, em situações reais, como na incidência de um raio, é comum que os pontos de contato estejam submetidos a potenciais distintos. A Figura 1 ilustra a distribuição de potenciais no solo devido à descarga atmosférica, destacando a formação do potencial de passo.

Figura 1: Tensão de passo de uma descarga atmosférica.



Fonte: [10].

A definição clássica estabelece, portanto, que a tensão de passo corresponde à diferença de potencial entre dois pontos do solo, distanciados de 1 m, em decorrência da passagem de corrente elétrica pela terra. Esse valor pode ser expresso matematicamente por [10]:

$$v_{passo} = (R_{ch} + 2R_c) \cdot I_{choque} \quad (2)$$

Onde v_{passo} representa a tensão de passo, R_{ch} a resistência do corpo humano considerada 1.000Ω , R_c a resistência de contato e I_{choque} a corrente de choque pelo corpo humano.

O potencial de passo máximo tolerável é limitado pela maior corrente que pode atravessar o corpo humano sem causar efeitos fisiológicos graves, como a fibrilação ventricular. Esse limite é determinado pela seguinte expressão [10]:

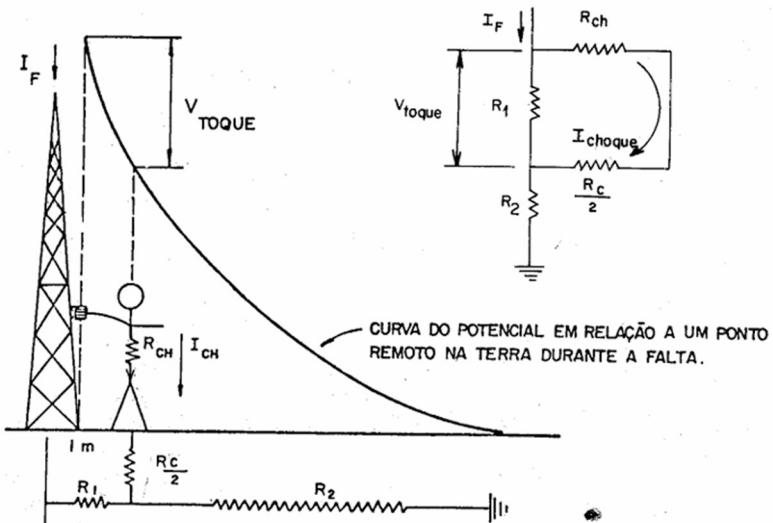
$$v_{passo\ máx} = \frac{116 + 0,696\rho s}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

Em que $v_{passo\ máx}$ será a tensão de passo máxima, $0,696\rho s$ a resistividade superficial do solo e \sqrt{t} o tempo de falta suportado pela a pessoa.

Tensão de toque: A tensão de toque é definida como a diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo localizado a uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa. Por convenção, essa distância é considerada igual a 1,0 m [17]. Esse fenômeno ocorre quando uma pessoa estabelece contato simultâneo com uma parte metálica conectada ao sistema de aterramento e o solo adjacente, de modo que a corrente elétrica pode circular através do corpo pelo trajeto mão-pé.

De acordo com [10], durante um período de defeito, o potencial máximo gerado por um aterramento não deve resultar em uma corrente de choque superior ao limite definido por Dalziel, que estabelece critérios fisiológicos para evitar a ocorrência de fibrilação ventricular. A Figura 2 ilustra o modelo de análise da tensão de toque.

Figura 2: Potencial de toque.



Fonte: [10].

O potencial de toque pode ser expresso pela equação abaixo [10]:

$$v_{toque} = (1000 + 1,5\rho s)I_{choque} \quad (4)$$

Onde v_{toque} é a tensão de toque, ρs a resistividade superficial do solo e I_{choque} a corrente de choque pelo corpo humano.

O potencial de toque máximo permitível é estabelecido como aquele que, ao ser aplicado entre a mão e o pé, não produz uma corrente superior à corrente limite definida por Dalziel. Assim, a expressão do limite é dada por [10]:

$$v_{toque\ máx} = \frac{116 + 0,174\rho s}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

Em que $v_{toque\ máx}$ será a tensão de toque máxima, $0,174\rho s$ a resistividade superficial do solo e \sqrt{t} o tempo de falta suportado pela a pessoa.

2.1.3 Elementos constituintes de um sistema de aterramento

A eficiência de um sistema de aterramento depende diretamente da qualidade e da durabilidade dos materiais empregados em sua constituição. Nesse sentido, a ABNT NBR 16254 apresenta uma ampla classificação dos elementos utilizados, definindo requisitos técnicos e ensaios para assegurar o desempenho adequado durante a vida útil da instalação [18]. Os principais componentes são os condutores, as conexões e os eletrodos de aterramento, cada um com funções específicas dentro do sistema.

Os condutores são responsáveis pela ligação elétrica entre os diferentes pontos da instalação e o eletrodo de aterramento. Podem ser constituídos por diferentes materiais e formatos, a depender da aplicação e da resistência à corrosão requerida. Entre os mais comuns estão o condutor de cobre, formado por fios ou cabos de cobre de elevada condutividade; o condutor de aço revestido com cobre, disponível em perfis cilíndricos sólidos, trançados ou em fitas, que combina resistência mecânica e boa condutividade; e o condutor de aço zinkado, também em perfis cilíndricos ou chatos, bastante empregado em situações de menor exigência elétrica, mas com necessidade de resistência mecânica. De acordo com a norma, todos os condutores devem atender a critérios elétricos e mecânicos que garantam a continuidade da ligação durante a vida útil projetada do sistema [19].

As conexões representam outro elemento essencial, pois asseguram a integridade elétrica e mecânica entre condutores e eletrodos. Podem ser executadas de diferentes formas, a depender da necessidade de permanência e do nível de esforço mecânico esperado. A conexão exotérmica, por exemplo, utiliza o processo de aluminotermia, resultando em uma ligação molecular permanente, sem porosidade, e com resistência elétrica não superior a 10% da do próprio condutor conectado. Já a conexão mecânica de pressão emprega conectores de bronze com parafusos ou grampos, sendo indicada para aplicações de menor criticidade. Outra alternativa é a conexão por compressão, feita por meio de elementos de cobre de alta pureza submetidos a compressão hidráulica, garantindo vedação contra umidade e elevada confiabilidade elétrica. Independentemente do tipo, as conexões permanentes devem manter sua integridade elétrica e mecânica ao longo de toda a vida útil do sistema [19].

Por fim, os eletrodos de aterramento são os elementos que asseguram o contato elétrico com o solo, promovendo a dissipação das correntes de defeito, de retorno ou de descargas

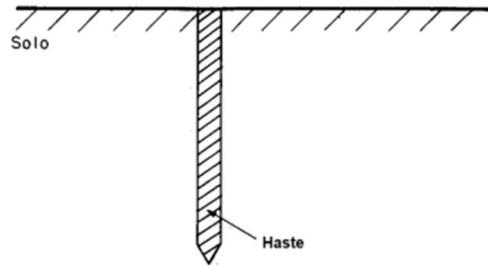
atmosféricas. A norma distingue diferentes tipos, como o eletrodo natural, formado por elementos metálicos já presentes na instalação, como ferragens de fundações, que apesar de não terem sido projetados originalmente para essa finalidade, podem funcionar como caminho eficiente de dispersão; as hastes de aterramento, geralmente fabricadas em aço revestido de cobre ou zincadas por imersão a quente, instaladas verticalmente no solo; e as malhas de aterramento, constituídas por condutores nus interligados e enterrados, utilizadas principalmente em instalações de grande porte, como subestações, por garantirem baixos valores de resistência e melhor controle das tensões de passo e toque [19].

2.1.4 Tipos de arranjos

Os sistemas de aterramento podem ser implementados a partir de diferentes arranjos, projetados para assegurar uma conexão eficaz com o solo [10]. Os principais tipos são:

- Uma simples haste cravada no solo, como no exemplo na Figura 3;

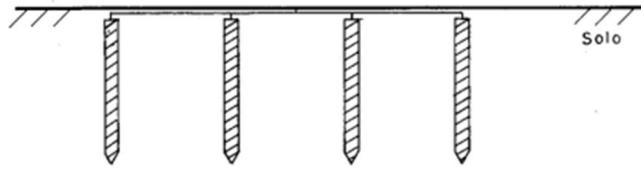
Figura 3: Haste simples cravada no solo.



Fonte: [15].

- Hastes alinhadas, conforme exemplo da Figura 4;

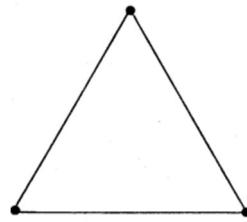
Figura 4: Quatro hastes alinhadas cravadas no solo.



Fonte: [15].

- Hastes em triângulo, de acordo com o exemplo da Figura 5;

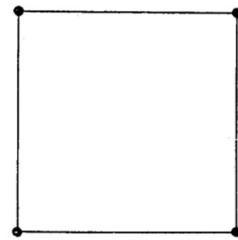
Figura 5: Hastes cravadas nos vértices de um triângulo equilátero



Fonte: [15].

- Hastes em quadrado, conforme exemplo da Figura 6;

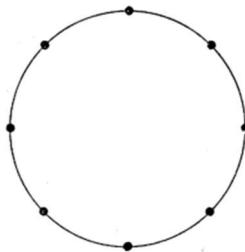
Figura 6: Hastes cravadas nos vértices de um quadrado.



Fonte: [15].

- Hastes em círculo, vide exemplo da Figura 7;

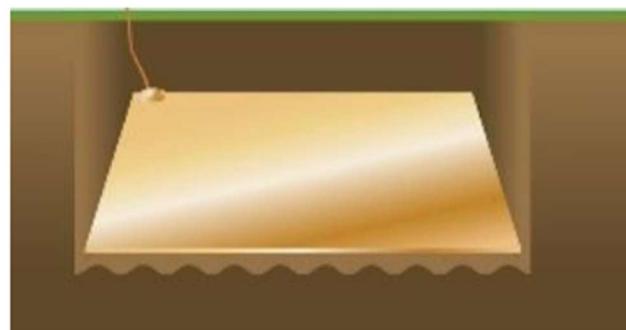
Figura 7: Hastes cravadas em uma circunferência.



Fonte: [15].

- Placas condutoras enterradas no solo, conforme exemplo da Figura 8;

Figura 8: Placa condutora enterrada no solo.



Fonte: [15].

- Cabos ou fios estendido em vala comum, vide exemplo da Figura 9;

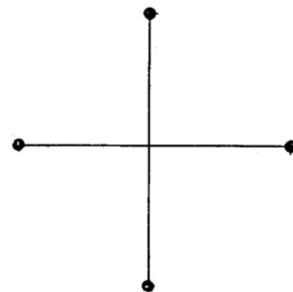
Figura 9: Fio condutor estendido em uma vala.



Fonte: [15].

- Cabos ou fios enterrados em cruz ou em estrela, vide exemplo da Figura 10;

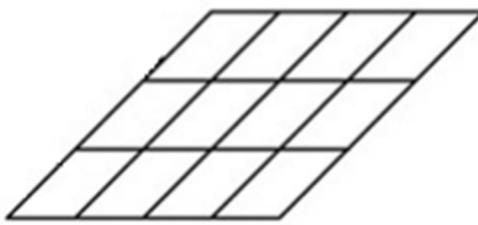
Figura 10: Hastes compondo uma cruz.



Fonte: [15].

- Cabos ou fios enterrados em quadriculados, formando uma malha de terra, conforme exemplo da Figura 11.

Figura 11: Malha de terra.



Fonte: [15].

A escolha do tipo de aterramento a ser empregado depende de fatores como a relevância da instalação, as condições do local e o custo de implantação. Entre os arranjos apresentados, a malha de terra se destaca como o mais eficiente, uma vez que proporciona maior área de contato com o solo e, consequentemente, melhor capacidade de dissipação de correntes [10].

2.1.5 Tipos de sistemas de aterramento

Os sistemas de aterramento em instalações elétricas de baixa tensão são classificados de acordo com a forma como o neutro da fonte e as massas metálicas expostas são conectados ao solo. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão [20], essa classificação abrange os esquemas TT, TN (com suas variações) e IT, cada um com características específicas, vantagens e limitações próprias.

No esquema TT, o neutro da fonte (geralmente o ponto central da estrela do transformador em baixa tensão) é conectado diretamente à terra, enquanto as partes metálicas expostas da instalação são ligadas a um eletrodo de terra independente, localizado no próprio consumidor. Nesse caso, o percurso de uma corrente de falta fase-massa inclui a passagem pela terra, o que, devido ao elevado valor da resistência do solo, limita significativamente a corrente de defeito. Essa característica faz com que, muitas vezes, a corrente seja insuficiente para acionar dispositivos de proteção convencionais, como disjuntores ou fusíveis. Por essa razão, esse esquema depende do uso de dispositivos diferenciais residuais (DRs) para garantir a proteção contra choques elétricos [21].

O esquema TN também prevê o aterramento direto do neutro da fonte, mas, diferentemente do TT, as massas metálicas expostas das instalações são ligadas a esse mesmo ponto de aterramento por meio de condutores metálicos. Essa configuração resulta em um caminho de baixa impedância para as correntes de falta, permitindo que atinjam valores elevados, suficientes para serem detectados e interrompidos rapidamente por dispositivos de proteção convencionais. O esquema TN pode ser subdividido em três variações [21]:

- TN-S: apresenta cinco condutores distintos (três fases, neutro e condutor de proteção – PE). Nesse arranjo, todas as massas são solidárias ao condutor de proteção, garantindo equipotencialização e reduzindo os riscos de tensões de

toque. Uma das principais vantagens do TN-S é a separação entre o condutor de proteção e o neutro, o que confere maior imunidade a interferências e harmônicas. É o sistema preferencial em instalações de maior criticidade e com cabos enterrados [21].

- TN-C: utiliza o mesmo condutor para desempenhar simultaneamente as funções de neutro e proteção, denominado PEN. Apesar de reduzir custos de instalação, esse esquema apresenta riscos, pois as massas podem ficar submetidas a potenciais diferentes devido ao desequilíbrio de cargas e à circulação de correntes harmônicas. Além disso, não é permitido em condutores de seção inferior a 10 mm² de cobre ou 16 mm² de alumínio, nem em equipamentos móveis [21].
- TN-C-S: combina características dos dois anteriores. Inicialmente, a rede é configurada como TN-C e, em determinado ponto, o condutor PEN é separado em neutro (N) e proteção (PE), passando a funcionar como TN-S. Esse arranjo é bastante comum no Brasil, em que as distribuidoras de energia utilizam TN-C até a entrada do consumidor, e a instalação interna segue como TN-S por razões de segurança e funcionalidade [21].

Já o esquema IT diferencia-se por utilizar uma impedância de elevado valor (tipicamente entre 1 000 e 2 000 Ω) entre o neutro da fonte e a terra. Essa configuração limita a corrente de falta a valores reduzidos, de modo que uma primeira falha fase-terra não provoca o desligamento imediato do sistema, garantindo continuidade de operação. Embora essa corrente seja geralmente inofensiva para pessoas, a instalação permanece em condição de falta, exigindo dispositivos de monitoramento permanente da isolação para evitar a degradação dos componentes. Entre as principais vantagens desse sistema estão a continuidade de serviço em processos críticos, a limitação da corrente de curto-circuito e a redução de interferências harmônicas. Entretanto, sua aplicação é restrita a situações específicas, como salas cirúrgicas, processos industriais sensíveis e sistemas onde a interrupção imediata não é aceitável. A principal desvantagem está na complexidade para localizar a primeira falha e no risco elevado quando ocorre uma segunda falha [21].

Dessa forma, a escolha do tipo de sistema de aterramento deve considerar fatores como a natureza da instalação, a resistividade do solo, o nível de confiabilidade exigido e os dispositivos de proteção disponíveis. Cada esquema apresenta vantagens e limitações, e o cumprimento das normas técnicas é essencial para garantir a segurança elétrica e a continuidade de serviço.

2.1.6 Critérios técnicos e normativos

No âmbito internacional, destacam-se os guias publicados pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). A IEEE Std 80 [16] estabelece diretrizes para o projeto de sistemas de aterramento em subestações elétricas, com ênfase na análise de tensões de passo e de toque, parâmetros fundamentais para a segurança dos operadores em situações de falta à terra. Já a IEEE Std 81 [22] trata dos procedimentos de medição de resistividade elétrica do solo e da resistência de aterramento, apresentando métodos consagrados como os arranjos de Wenner e Schlumberger, amplamente empregados em estudos geoelétricos e projetos de aterramento. Essas referências são reconhecidas mundialmente e utilizadas como base em projetos de alta complexidade, em especial quando há necessidade de prospecção detalhada de solos com heterogeneidade significativa.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) disponibiliza um conjunto robusto de documentos normativos que complementam e adaptam as recomendações internacionais à realidade nacional. A NBR 7117-1 [8] define procedimentos para a determinação da resistividade elétrica do solo, incluindo orientações sobre sondagens geoelétricas e técnicas de campo. A NBR 15751 [23] trata especificamente dos sistemas de aterramento de subestações, enquanto a NBR 15749 [17] apresenta medições de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.

Outros documentos normativos têm caráter mais específico. A NBR 16254-1 [19] aborda os materiais para sistemas de aterramento, e a NBR 16527 [24] reúne diretrizes voltadas à aterramento de sistemas de distribuição. Já a NBR 5410 [20], aplicável a instalações de baixa tensão, define critérios gerais para projeto, execução e manutenção. Complementarmente, a série NBR 5419 (partes 1 a 4) [25], que trata da proteção de estruturas contra descargas atmosféricas (SPDA), dedica-se ao aterramento como elemento essencial para a dissipação segura das correntes de raio.

Apesar de diferenças nos enfoques, as normas convergem em pontos centrais. Todas reforçam a necessidade de medições preliminares de resistividade do solo antes da concepção do sistema de aterramento, a importância da equipotencialização e da continuidade elétrica, além de estabelecerem limites de segurança para tensões de passo e de toque.

Assim, observa-se que o cumprimento dos critérios técnicos e normativos não se limita a atender a requisitos formais, mas constitui uma condição indispensável para a segurança operacional e jurídica dos empreendimentos. Projetos que negligenciam essas diretrizes podem resultar em riscos elevados de choque elétrico, falhas em sistemas de proteção e prejuízos econômicos significativos. Dessa forma, a conjugação das normas nacionais e internacionais confere maior confiabilidade aos sistemas projetados, permitindo que sejam adaptados tanto às

condições específicas do solo brasileiro quanto às melhores práticas reconhecidas mundialmente.

2.2 DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES E POTENCIAIS NO SOLO

A correta medição da resistividade do solo exige não apenas a utilização de instrumentos adequados, mas também a compreensão dos fenômenos físicos que regem a circulação da corrente elétrica no meio terrestre. O desconhecimento das propriedades dessa grandeza pode conduzir a interpretações equivocadas dos resultados obtidos, especialmente por se tratar de uma grandeza de natureza complexa e influenciada por múltiplos fatores ambientais e geométricos [11].

Diferentemente dos condutores metálicos, cuja trajetória da corrente é linear e previsível, o solo apresenta comportamento não uniforme e uma geometria de condução bastante complexa. Quando uma corrente elétrica é injetada no solo, ela não se propaga em um único sentido, mas se dispersa radialmente em todas as direções, de acordo com as características elétricas e estruturais do meio. Essa dispersão ocorre porque o solo, ao ser considerado como um condutor, possui resistividade distribuída espacialmente, o que faz com que as linhas de corrente se desviam e se concentrem conforme as diferenças locais de potencial [11].

Em um modelo simplificado, pode-se considerar o estabelecimento de uma diferença de potencial entre dois eletrodos hemisféricos enterrados em um solo homogêneo, dispostos a uma distância “d” significativamente maior que seus raios “r” ($d \geq 10r$). Preferencialmente a fonte de tensão empregada deve ser alternada, de forma a minimizar os efeitos galvânicos na superfície dos eletrodos, uma vez que tais efeitos podem introduzir distorções nos resultados das medições [11].

Quando a corrente “I” é injetada no solo por um dos eletrodos (denominado eletrodo A), ela se espalha radialmente, reduzindo gradualmente sua densidade à medida que se afasta do ponto de injeção. Esse comportamento é caracterizado pela densidade de corrente “J”, que, a uma distância “x” do centro do eletrodo, pode ser expressa por [11]:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (6)$$

O campo elétrico no solo está diretamente relacionado à resistividade do meio, segundo a relação:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad (\vec{J} = \sigma \vec{E}) \quad (7)$$

Dessa forma, a intensidade do campo elétrico e, consequentemente, a diferença de potencial entre dois pontos, dependem da distância em relação ao eletrodo e das propriedades elétricas do solo. Para determinar a diferença de potencial entre a superfície do eletrodo e um ponto afastado “x”, integra-se o campo elétrico radial entre esses dois pontos, obtendo-se [11]:

$$V_{r_{eletrodo}} - V_{r_x} = - \int_{r_x}^{r_{eletrodo}} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Logo:

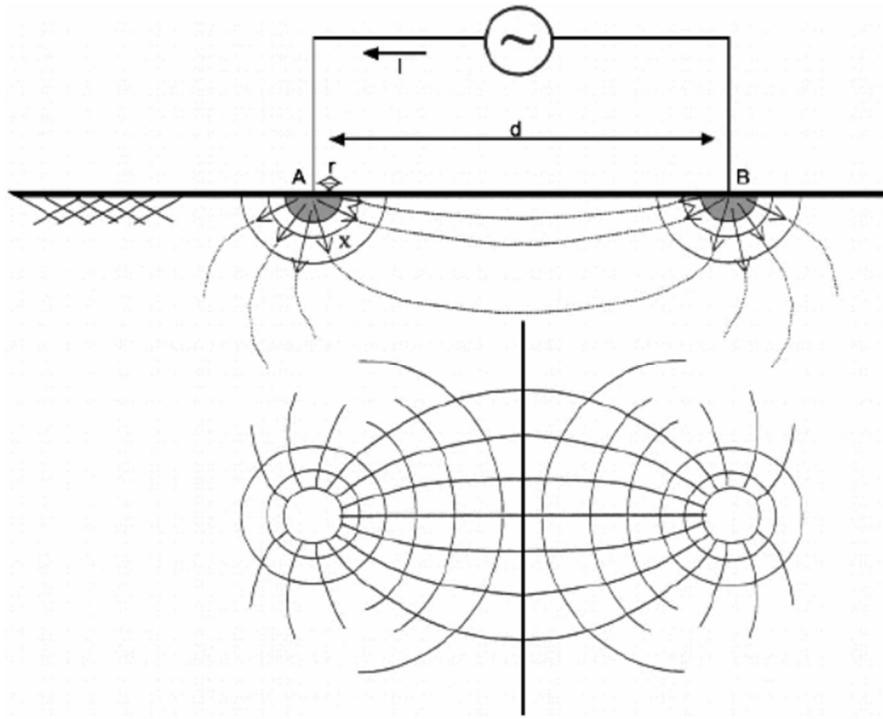
$$V_{r_{eletrodo}} - V_{r_x} = \frac{\rho}{2\pi} I \left(\frac{l}{r_{eletrodo}} - \frac{l}{r_x} \right) \quad (8)$$

Esse modelo mostra que o potencial decai de forma inversamente proporcional à distância em relação ao eletrodo, resultando em um campo elétrico cuja intensidade é máxima nas proximidades do ponto de injeção e tende a zero à medida que se aproxima do chamado “terra remoto”, região considerada de potencial nulo [11].

Em termos físicos, isso significa que, próximo ao eletrodo, o gradiente de potencial é acentuado, e a corrente se concentra em um pequeno volume de solo, enquanto nas regiões mais afastadas a corrente se distribui de maneira mais uniforme [11]. Essa distribuição radial é essencial para compreender o comportamento das medições realizadas com arranjos de quatro pontas (como Wenner e Schlumberger), pois define a forma como o campo de potencial se estabelece entre os eletrodos de corrente e de potencial.

A Figura 12 ilustra esquematicamente o fluxo das linhas de corrente e das linhas equipotenciais em um solo, evidenciando o padrão radial da dispersão de corrente entre dois eletrodos de medição [11].

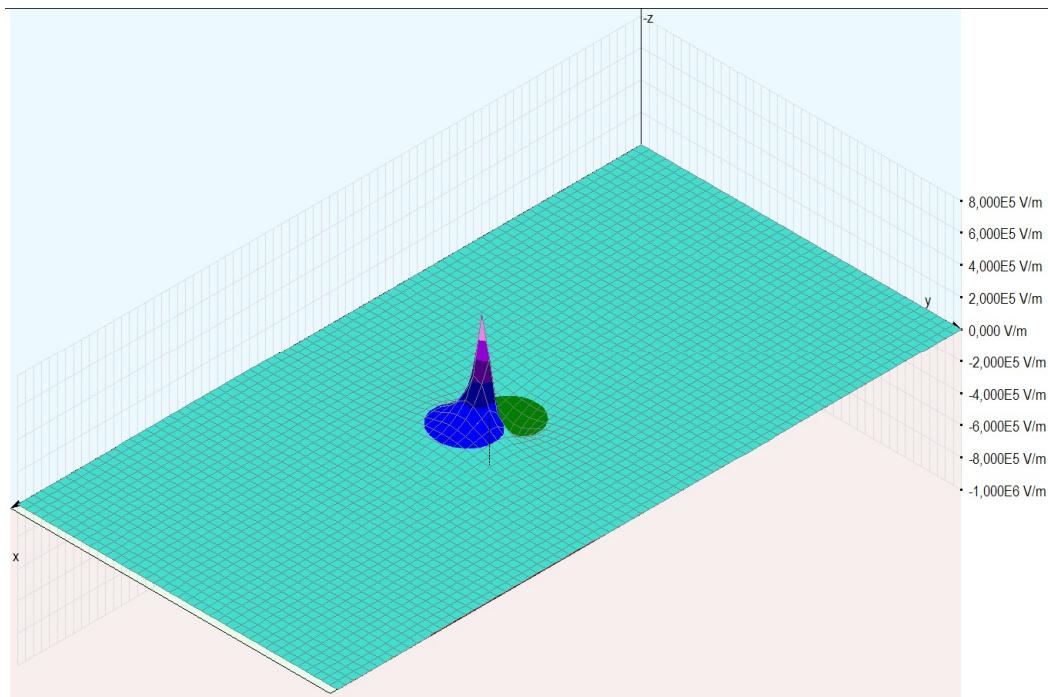
Figura 12: Distribuição aproximada das linhas de corrente e equipotenciais no solo.



Fonte:[11].

A Figura 13 apresenta, por meio de simulação realizada no software XGSLab, a distribuição do campo elétrico em um solo homogêneo com resistividade de $1500 \Omega\cdot m$, considerando uma haste vertical de 2,5 m e uma corrente de falta de 3000 A. Observa-se uma maior concentração do campo elétrico nas proximidades do eletrodo, com os tons lilás e roxo representando as regiões de maior densidade de campo, onde ocorre o gradiente mais acentuado de potencial. À medida que a distância radial em relação à haste aumenta, nota-se uma redução progressiva da intensidade do campo elétrico, comportamento que confirma o modelo teórico de dispersão radial de corrente em solos homogêneos.

Figura 13: Distribuição do campo elétrico no solo para uma haste de 2,5m em solo homogêneo ($I = 3000A$). Simulação no software XGSLab.



Fonte: Autor.

2.3 ALTERAÇÕES PRODUZIDAS NA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES E POTENCIAIS NO SOLO PELO EMPREGO DE OUTROS TIPOS DE ELETRODOS E PELA NÃO-HOMOGENEIDADE DO SOLO

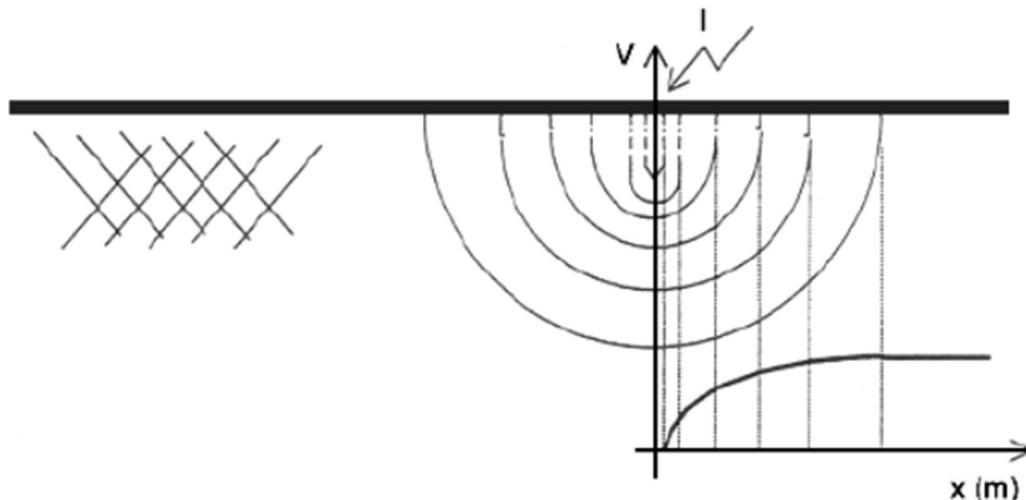
A distribuição de correntes e potenciais no solo é diretamente influenciada pela forma geométrica e pelas dimensões dos eletrodos empregados no sistema de aterramento. Embora o modelo clássico considere eletrodos hemisféricos em um solo homogêneo para fins de simplificação, na prática, os eletrodos podem assumir diversos formatos, como hastes verticais, malhas retangulares, fios enterrados ou hastes múltiplas interconectadas, modificando significativamente o comportamento do campo elétrico na região próxima à sua superfície [11].

Quando são utilizados eletrodos de formato distinto, as linhas de corrente e as superfícies equipotenciais sofrem distorções locais. A corrente elétrica, conforme os princípios eletrostáticos, é sempre ortogonal às superfícies equipotenciais. Assim, a geometria dessas superfícies tende a seguir o contorno físico do eletrodo, tornando-se progressivamente mais abaulada à medida que se afastam dele. Em distâncias suficientemente grandes, entretanto, as diferenças geométricas se tornam irrelevantes, e a distribuição de corrente e potencial no solo passa a se comportar de modo semelhante ao caso de eletrodos hemisféricos [11].

Essa aproximação é válida mesmo para arranjos mais complexos, como malhas de aterramento compostas por vários eletrodos, desde que suas dimensões sejam pequenas em relação à distância de observação (geralmente até quatro vezes menores). Na Figura 14,

observa-se o comportamento das linhas de corrente e superfícies equipotenciais ao redor de um eletrodo do tipo haste vertical. Nota-se que, nas proximidades do eletrodo, as linhas se adensam e o campo elétrico apresenta maior intensidade, refletindo o aumento local da densidade de corrente. À medida que o afastamento aumenta, o campo se torna mais difuso, e as equipotenciais tendem a se tornar hemisféricas [11].

Figura 14: Equipotenciais no solo para eletrodo tipo haste.

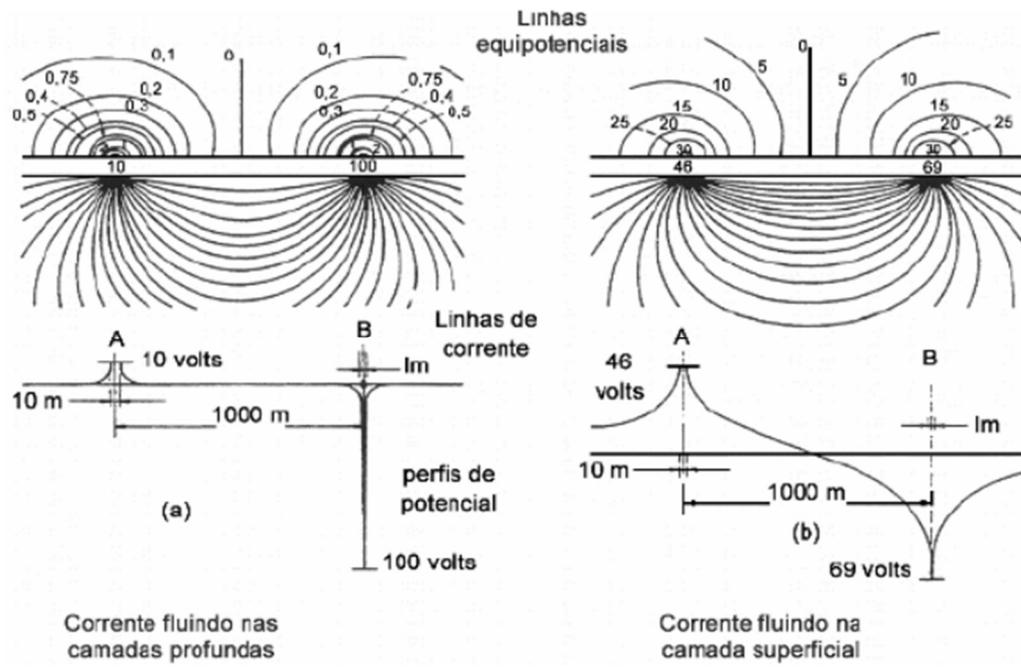


Fonte:[11].

Além da geometria dos eletrodos, as características do solo exercem papel fundamental na distribuição de corrente elétrica. A não-homogeneidade do solo, resultante de variações naturais em sua composição, umidade, compactação e conteúdo mineral, provoca distorções expressivas nas trajetórias das linhas de corrente e nos gradientes de potencial. A presença de camadas com resistividades diferentes ou de corpos condutores enterrados, como tubulações metálicas, cabos ou estruturas de fundação, altera o caminho da corrente, concentrando-a em regiões mais condutivas e desviando-a das áreas de maior resistividade.

Essa influência é ilustrada na Figura 15, que apresenta o comportamento das linhas de corrente, superfícies equipotenciais e o perfil de potencial na superfície do solo, quando uma diferença de potencial é aplicada entre dois eletrodos (A e B) hemisféricos de diâmetros diferentes (10 m e 1 m), enterrados a uma distância de 1.000 m. A figura demonstra que, na presença de camadas de resistividades distintas, ocorre uma concentração de corrente na camada superficial, o que modifica completamente a distribuição de potencial na superfície do solo. Observa-se, nesse caso, que o patamar de potencial praticamente desaparece, tornando difícil distinguir as regiões de influência de cada eletrodo[11].

Figura 15: Efeito da estratificação do solo no perfil de potencial da superfície.



Fonte:[11].

Essas heterogeneidades impactam de forma direta o valor da resistência de aterramento e, consequentemente, a precisão das medições realizadas em campo. Em solos estratificados ou com objetos condutores enterrados, a corrente tende a seguir trajetórias preferenciais, resultando em leituras que podem não representar fielmente o comportamento elétrico global do terreno. Dessa forma, o conhecimento prévio da composição e estrutura do solo é essencial para a correta interpretação dos resultados de medições de resistividade e para o dimensionamento de sistemas de aterramento com maior confiabilidade.

2.4 CORRENTES TELÚRICAS

As correntes telúricas consistem nas correntes elétricas naturais que fluem através da crosta terrestre e dos oceanos, resultantes de fenômenos geofísicos e interações eletromagnéticas entre o campo geomagnético terrestre e a ionosfera. Essas correntes podem também incluir componentes de origem geodinâmica, ou seja, fluxos elétricos que se presume circulem no núcleo da Terra, sendo responsáveis pela geração do campo geomagnético permanente. Embora o estudo das correntes de origem profunda não seja o foco deste trabalho, as correntes superficiais, conhecidas como correntes telúricas, exercem papel relevante em medições elétricas realizadas em campo [26].

Historicamente, o termo correntes de Terra era utilizado para designar as tensões medidas entre dois eletrodos aterrados a certa distância entre si. Com o avanço das pesquisas,

observou-se que as correntes também fluem através da água do mar, estabelecendo um acoplamento entre regiões continentais e oceânicas. Assim, o termo correntes telúricas passou a ser empregado de forma mais ampla, abrangendo tanto as correntes que circulam na Terra sólida quanto as que fluem nos mares e oceanos [26].

Durante ensaios elétricos em campo, especialmente em medições de resistividade do solo e resistência de aterramento, a presença das correntes telúricas pode provocar erros significativos. Isso ocorre porque a corrente natural de Terra apresenta múltiplos componentes de frequência, podendo interferir diretamente na corrente de ensaio injetada pelo instrumento de medição. Quando há uma relação harmônica específica entre a frequência da corrente telúrica e a frequência de operação do medidor de resistência, o valor indicado pelo equipamento oscila entre faixas distintas, resultando em leituras incorretas [27].

Devido a essa sensibilidade, a norma IEEE Std 81-2012 recomenda que a resistência de aterramento seja medida utilizando corrente alternada ou corrente reversível periodicamente, minimizando a influência de tensões galvânicas e de correntes contínuas provenientes de proteção catódica ou de correntes telúricas. Além disso, o uso de frequências de ensaio diferentes da frequência da rede elétrica e de suas harmônicas contribui para reduzir a interferência de correntes parasitas e melhorar a confiabilidade da medição [22].

Em síntese, as correntes telúricas representam uma das principais fontes de interferência natural nas medições elétricas realizadas em solo. Sua compreensão e mitigação são essenciais para a obtenção de resultados confiáveis e, portanto, justificam a análise comparativa entre diferentes instrumentos de medição, como o terrômetro e o resistivímetro.

2.5 RESISTIVIDADE DO SOLO

2.5.1 Definição de resistividade

A resistividade do solo é uma propriedade intrínseca que descreve sua capacidade em resistir à passagem de corrente elétrica. Em outras palavras, trata-se de uma medida da oposição que o solo oferece ao fluxo de eletricidade, sendo influenciada por fatores como composição, umidade, porosidade e presença de minerais condutores. Essa grandeza é expressa em ohm-metros ($\Omega \cdot m$) e pode variar amplamente conforme as características locais do terreno [28].

A condução elétrica no solo ocorre, principalmente, pela presença de íons dissolvidos na umidade presente entre os grãos. Dessa forma, solos mais úmidos tendem a apresentar maior condutividade elétrica, enquanto solos secos ou ricos em minerais não condutores exibem valores mais elevados de resistividade [28].

Além disso, é importante destacar que existem diversos métodos de medição da resistividade do solo, como Wenner, Schlumberger, entre outros. Os valores obtidos em cada caso podem variar de acordo com o arranjo dos eletrodos e a profundidade investigada, de modo que o cálculo da resistividade efetiva dependerá do método adotado durante a medição.

2.5.2 Importância da caracterização geoelétrica

A caracterização geoelétrica, realizada por meio da determinação da resistividade do solo, é fundamental para diferentes áreas do conhecimento e aplicações práticas. Essa propriedade influencia diretamente a eficiência de sistemas de aterramento, além de ter impacto em estudos geotécnicos, hidrogeológicos, ambientais, agrícolas e geofísicos [28].

No contexto da engenharia elétrica, compreender a resistividade do solo é essencial para o dimensionamento de sistemas de aterramento, garantindo a segurança de pessoas, equipamentos e estruturas contra descargas elétricas. Na engenharia civil e geotecnia, fornece informações relevantes sobre a composição e a capacidade de suporte do terreno, auxiliando na prevenção de problemas estruturais [28].

Em aplicações hidrogeológicas, a variação da resistividade possibilita a detecção de água subterrânea, enquanto em estudos ambientais contribui para o monitoramento da contaminação do solo e da migração de poluentes. Já na agricultura, a resistividade do solo é utilizada como parâmetro para avaliar fertilidade e umidade, otimizando práticas como irrigação e escolha de culturas [28].

Por fim, em pesquisas científicas e geofísicas, a caracterização geoelétrica permite mapear estruturas subsuperficiais, identificar recursos minerais e compreender processos geológicos. Dessa forma, a medição da resistividade do solo se mostra uma ferramenta multidisciplinar, indispensável para o planejamento, execução e monitoramento de projetos em diferentes áreas [28].

2.5.3 Valores típicos de resistividade para diferentes tipos de solo

Os valores de resistividade do solo podem variar significativamente em função de fatores como composição granulométrica, teor de umidade, porosidade e presença de sais minerais dissolvidos. Em termos práticos, solos úmidos e argilosos apresentam resistividade mais baixa, enquanto solos secos, arenosos ou rochosos tendem a exibir resistividade mais elevada [29].

A ABNT NBR 7117-1 [8] apresenta valores típicos de resistividade elétrica para diferentes tipos de solo, os quais servem como referência inicial em estudos e projetos de sistemas de aterramento. Além disso, a norma classifica os solos conforme a faixa de resistividade em que se enquadram [8]:

- Solo de baixa resistividade – $\rho < 250 \Omega \cdot m$;
- Solo de média resistividade – $250 \Omega \cdot m < \rho < 1\,000 \Omega \cdot m$;
- Solo de alta resistividade – $\rho > 1\,000 \Omega \cdot m$.

A Tabela 1 apresenta exemplos de valores de resistividade típicos para diferentes tipos de solos, conforme indicados na NBR 7117-1 [8].

Tabela 1: Faixas de resistividade típicas de materiais que compõem o solo.

Meio físico	Faixa de resistividade ($\Omega \cdot m$)
Água do mar	$\sim 0,3$
Água do rio	~ 30
Água destilada	300
Alagadiço, limi, húmus, lama	< 150
Argila	300 - 5000
Calcário	500 - 5000
Areia	1000 - 8000
Granito e basalto fraturados	500 - 10000
Granito e basalto íntegros	> 10000

Fonte: Adaptado de [8].

2.6 INSTRUMENTOS UTILIZADOS EM ENSAIOS DE RESISTIVIDADE

2.6.1 Terrômetro

O terrômetro é um instrumento desenvolvido especificamente para a medição da resistência de aterramentos de pequeno porte, estando em conformidade com os requisitos da norma IEC 61557-5. Quando equipado com quatro terminais (dois destinados à circulação de corrente e dois à medição de potencial), esse equipamento pode ser utilizado também na realização de sondagens elétricas verticais (SEV), empregando os arranjos de Schlumberger e Wenner, amplamente utilizados em estudos de resistividade do solo [8].

Seu princípio de funcionamento baseia-se na injeção de correntes alternadas de baixa potência, normalmente inferior a 1 W, o que garante a segurança do operador e a conformidade com normas de proteção. Nesse contexto, a tensão aplicada aos eletrodos de corrente é limitada a 50 V, enquanto a corrente de curto-círcuito é restrita a aproximadamente 7 mA, evitando riscos durante a execução dos ensaios. Essas características, embora proporcionem maior segurança, também impõem limitações práticas: a utilização do terrômetro é recomendada em

áreas com dimensões reduzidas, tipicamente com uma diagonal máxima de 200 m, e em solos cuja resistividade não ultrapasse 10.000 $\Omega \cdot \text{m}$ [8].

Outra particularidade importante é que, por operarem com corrente alternada e potência reduzida, os terrômetros apresentam volume e peso menores quando comparados aos resistivímetros, tornando-os mais portáteis e práticos para ensaios de campo. No entanto, essa simplicidade tem reflexo na precisão em determinadas condições. Observa-se, por exemplo, que a partir de aproximadamente 100 m de afastamento entre os eletrodos de corrente, ocorre uma diminuição significativa da relação sinal-ruído. Essa redução leva a um aumento dos erros de medição. Esse comportamento evidencia que, embora o terrômetro seja eficiente em aplicações de menor porte, sua utilização em áreas extensas ou em solos de alta resistividade pode comprometer a confiabilidade dos resultados obtidos [8].

Para a realização das medições de resistividade elétrica do solo nessa dissertação, empregou-se o terrômetro digital de quatro terminais da marca Megabrás, modelo MTD-2000e. Este equipamento está em conformidade com os requisitos estabelecidos no Anexo B.1 da norma ABNT NBR 7117-1:2021, sendo amplamente reconhecido no setor elétrico por sua precisão e confiabilidade em ensaios de resistência de aterramento e resistividade do solo, inclusive em ambientes com interferências eletromagnéticas. Seu certificado de calibração pode ser verificado no Anexo A.

O MTD-2000e opera com corrente alternada de alta frequência (1470 Hz), o que permite minimizar os efeitos da polarização eletroquímica e reduzir a influência de ruídos provenientes da rede elétrica (60 Hz), garantindo assim maior estabilidade nas leituras.

As principais especificações técnicas do equipamento estão resumidas a seguir:

- Tipo de medição: Resistência de aterramento (terra-terra) e resistividade do solo pelo método de Wenner;
- Escalas de medição:
 - Resistência: 0–20 Ω ; 0–200 Ω ; 0–2000 Ω
 - Tensão de interferência: 0–200 V
- Exatidão:
 - Resistência: $\pm 2\%$ do valor lido $\pm 1\%$ do fundo de escala
 - Tensão: $\pm 2\%$ do valor lido $\pm 1\%$ do fundo de escala
- Resolução de leitura:
 - 0,01 Ω para baixas resistências
 - 0,1 V para medições de tensão
- Frequência da corrente de medição: 1470 Hz
- Corrente de saída: inferior a 15 mA (pico a pico)

- Potência de saída: inferior a 0,5 W
- Sistema de proteção: Alerta de sobretensão, verificação automática das conexões e estado da bateria
- Verificação do estado da bateria: Indicador luminoso com sistema de autodiagnóstico
- Faixa de temperatura de operação: -10°C a $+50^{\circ}\text{C}$
- Faixa de temperatura de armazenamento: -25°C a $+65^{\circ}\text{C}$
- Umidade relativa admissível: até 95% UR (sem condensação)
- Alimentação: Bateria recarregável interna (autonomia para operação em campo)
- Normas atendidas: ABNT NBR 15751, NBR 5410, IEC 61557 e IEC 61010-1 (segurança elétrica)

2.6.2 Resistivímetro

O resistivímetro é um equipamento projetado para medições geoelétricas mais robustas, operando tipicamente com corrente contínua ou em regimes de baixa frequência (VLF), geralmente abaixo de 15 Hz ou até mesmo em sub-hertz (quase DC). Essa característica operacional permite que a corrente penetre mais profundamente no solo em comparação à corrente alternada, evitando o chamado efeito pelicular e possibilitando a prospecção de camadas geológicas mais profundas [8].

Diferentemente do terrômetro, o resistivímetro não está sujeito às restrições de segurança estabelecidas pela IEC 61557-5, o que possibilita sua utilização com potências mais elevadas. Em condições usuais, esses equipamentos podem operar com potências superiores a 100 W, aplicar tensões entre eletrodos de corrente de até 1.000 V e injetar correntes da ordem de 5 A. Essa maior capacidade de injeção resulta em medições de potenciais diferenciais (ΔV) mais elevados, aumentando significativamente a relação sinal-ruído. Consequentemente, os resistivímetros se destacam por proporcionar leituras mais precisas, especialmente em solos de alta resistividade ou em medições que demandam grandes afastamentos entre os eletrodos de corrente [8].

Além da maior potência, muitos resistivímetros oferecem funcionalidades adicionais que aumentam o controle da qualidade das medições. Alguns modelos, por exemplo, disponibilizam informações detalhadas sobre a corrente injetada e o potencial medido durante a execução dos ensaios, permitindo verificar em tempo real se a corrente aplicada é suficiente para garantir resultados confiáveis. Outro recurso avançado encontrado em certos modelos é a medição do potencial espontâneo (SP), realizada antes da injeção de corrente. Esse valor deve

ser inferior ao potencial medido durante o ensaio, sendo posteriormente descontado do resultado, o que fornece uma estimativa mais precisa da resistividade do solo [8].

Esse tipo de monitoramento auxilia no controle da qualidade dos dados e possibilita a adoção de medidas corretivas em campo, como a relocação dos eletrodos de corrente ou a adição de soluções salinas nos pontos de cravamento, de forma a melhorar a condução elétrica com o solo. Essa flexibilidade operacional e a disponibilidade de informações adicionais diferenciam os resistivímetros dos terrômetros, uma vez que estes últimos geralmente não fornecem tais recursos, ficando mais limitados em termos de precisão e confiabilidade em cenários desafiadores [8].

Para a finalidade deste trabalho, foi empregado um Resistivímetro digital de quatro bornes, com capacidade de injeção de corrente de até 500 mA e tensão de 750Vcc, modelo X6xtal 500 da marca Auto Energia (O certificado de calibração pode ser verificado no Anexo B). Este equipamento é indicado pelo Anexo B da norma NBR7117-1:2020 [8] como alternativa ao terrômetro convencional, devido à sua capacidade de trabalhar com corrente contínua e apresentar uma potência significativamente superior (cerca de 100 vezes maior do que o terrômetro), o que viabiliza a medição de potenciais mais elevados. Isso resulta em uma melhor relação sinal/ruído e, portanto, medições de maior precisão, especialmente em solos com resistividade mais alta ou em configurações de eletrodos de corrente mais amplas. Nesse sentido, as principais especificações técnicas são:

- Precisão de Leitura > 98%
- Resolução 0,01 para valores mV e mA;
- Taxa de amostragem Média True-Rms de 60 ciclos/segundo
- Escala automática de medidas em sPmV, mV e mA
- Congelamento (Hold) nos displays mV e mA
- Tempo de estabilização de leituras menor que 4 segundos
- Proteção de inversão de polaridade da bateria
- Mudança de escala automática de medidas em sPmV, mV e mA
- Tensão de Entrada CC 12V, bateria externa recomendada não inclusa => 45A;
- Tensão de saída CC ~ 760V;
- Corrente Máxima de saída ~ 500mA;
- Sistema de descarga resistiva de 4 segundos após pulso aplicado;
- Gerador controlado a Cristal com frequencia de saída CC 0.6 Hz;
- Contador binário/2 sub-frequencias distribuídas para somatória de saídas (Power);

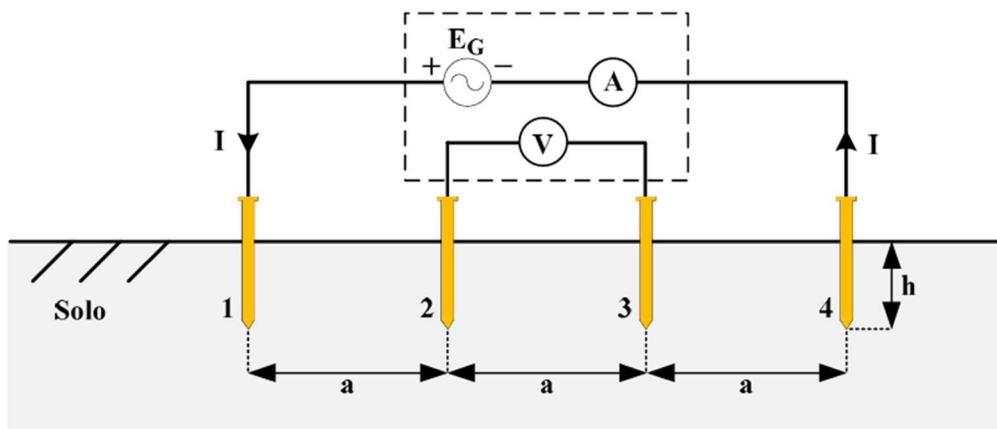
- Filtro Indutivo/Capacitivo e ripple 4700uF;
- Proteção inversão de polaridade entrada de energia;
- Estabilizador Integrado de tensão de entrada 12Vcc;
- Leitor de mV e Injeção de mA uProcessados;
- Faixa de temperatura -40°C a 70°C.
- Peso - 9,6Kg

2.7 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE

2.7.1 Wenner

O método de Wenner foi desenvolvido pelo físico norte-americano Frank Wenner, em 1915. Ele consiste em cravar quatro hastes cilíndricas no solo, alinhadas em linha reta, igualmente espaçadas por uma distância “a” e a uma mesma profundidade “h”. A finalidade é determinar a resistividade elétrica das diferentes camadas que compõem o solo [30].

Figura 16: Esquema das quatro hastes usadas no método de Wenner.



Fonte: [31]

Nesse procedimento, uma fonte injeta corrente elétrica I pela Haste 1, a qual retorna pela Haste 4. A passagem dessa corrente pelo solo gera uma diferença de potencial entre as Hastes 2 e 3, facilmente medida com um voltímetro. Com os valores da corrente aplicada e da tensão medida, calcula-se a resistência elétrica equivalente do solo R . Em seguida, a resistividade é determinada pela Equação 6 [31].

$$\rho = \frac{4\pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}}} \quad (9)$$

Devido à natureza anisotrópica e heterogênea do solo, uma única medição não é suficiente para representar toda a área. É necessário realizar grupos sucessivos de medições, variando o espaçamento a entre as hastes, o que permite obter resistividades correspondentes a diferentes profundidades [31]. A ABNT NBR 7117-1 [8] recomenda espaçamentos progressivos de 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 metros, e assim por diante, sempre mantendo as hastes alinhadas.

O número de direções em que as medições devem ser realizadas depende da importância da instalação, da extensão do sistema de aterramento e da variação observada nos valores obtidos [32]. Para aumentar a confiabilidade dos resultados, recomenda-se realizar medições em múltiplas direções, analisando posteriormente os valores registrados de modo a avaliar sua consistência e aceitabilidade [33].

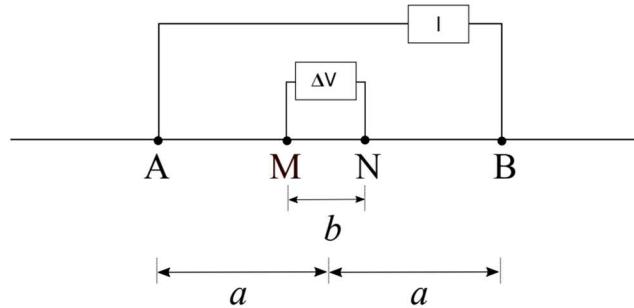
Durante as medições, alguns cuidados práticos devem ser observados [32]:

- As hastes devem ser cravadas a uma mesma profundidade (20 a 30 cm) e mantidas limpas, sem óxidos ou gorduras;
- Devem estar alinhadas e igualmente espaçadas;
- O equipamento deve estar centralizado em relação às hastes;
- A condição do solo (úmido, seco, etc.) deve ser anotada;
- Não se deve medir em condições meteorológicas adversas, devido ao risco de descargas atmosféricas;
- Animais e pessoas não autorizadas devem ser mantidos afastados da área;
- O operador deve usar calçados e luvas de isolamento;
- O aparelho deve estar em bom estado, com bateria carregada e cabos em boas condições de isolamento.

2.7.2 Schlumberger

O arranjo Schlumberger é composto por quatro eletrodos colineares. Os dois eletrodos centrais, que realizam a medição da diferença de potencial, estão posicionados próximos ao ponto médio do arranjo e apresentam uma separação reduzida em comparação à distância dos eletrodos de corrente. Com essa pequena separação, a diferença de potencial medida, quando dividida pela distância entre os eletrodos de potencial, fornece um valor próximo ao campo elétrico no ponto médio da sondagem. Durante o procedimento, a distância entre os eletrodos externos, responsáveis pela injeção de corrente no solo, é gradualmente aumentada, enquanto o espaçamento dos eletrodos de potencial é mantido constante até o limite em que ainda seja possível registrar a diferença de potencial [34].

Figura 17: Arranjo de Schlumberger.



Fonte: [35].

Nessa configuração, os quatro eletrodos são dispostos simetricamente em relação ao ponto central do arranjo. Os eletrodos M e N, separados por uma distância b , medem a diferença de potencial, enquanto os eletrodos externos A e B introduzem a corrente elétrica no solo, estando afastados entre si por uma distância $2a$ [35].

2.7.3 Comparação geral entre os dois métodos

Os arranjos de Wenner e Schlumberger estão entre os mais difundidos nos manuais de operação fornecidos pelos fabricantes de equipamentos de medição. O método Schlumberger é geralmente preferido em sondagens de grandes extensões, pois exige equipamentos mais sofisticados, capazes de fornecer maiores correntes de injeção e de apresentar elevada sensibilidade na detecção da diferença de potencial. Nesse arranjo, apenas os eletrodos externos, responsáveis pela injeção de corrente, são movimentados ao longo do ensaio, enquanto os eletrodos de potencial permanecem fixos. O método Wenner, por sua vez, também pode ser empregado em sondagens de grandes extensões, mas apresenta a desvantagem de demandar o deslocamento simultâneo dos quatro eletrodos para medições em diferentes profundidades. Apesar disso, destaca-se por proporcionar uma melhor relação sinal-ruído [36].

Além disso, ao se comparar os arranjos de Wenner e Schlumberger, observa-se que, para um mesmo espaçamento L entre os eletrodos de corrente, o arranjo de Schlumberger é capaz de atingir profundidades de investigação ligeiramente superiores àquelas alcançadas pelo arranjo de Wenner. Essa característica torna o método Schlumberger particularmente vantajoso em investigações com foco na variação vertical da resistividade do solo, nas quais o objetivo principal é identificar camadas profundas e mudanças estratigráficas ao longo da profundidade [37].

Por outro lado, o arranjo de Wenner apresenta maior sensibilidade à variação lateral da resistividade e uma melhor relação sinal-ruído, o que contribui para a obtenção de medições mais estáveis e reproduutíveis. No contexto deste trabalho, a escolha pela utilização do método de Wenner justifica-se pelo fato de que o foco principal da pesquisa está na comparação do

desempenho dos equipamentos de medição em função da abertura das hastes. Nesse arranjo, o aumento progressivo do espaçamento entre os eletrodos permite avaliar de forma mais direta e consistente como as diferenças entre os equipamentos se acentuam à medida que a profundidade de investigação aumenta, tornando o método de Wenner mais adequado aos objetivos propostos.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, este capítulo consolidou o embasamento teórico e normativo necessário para a compreensão dos fenômenos que regem o comportamento dos sistemas de aterramento e a caracterização elétrica do solo. A análise dos conceitos fundamentais, aliada ao estudo da distribuição de correntes e potenciais no meio terrestre, permitiu compreender de que forma o solo responde aos estímulos elétricos e como fatores externos, tais como as correntes telúricas e a não homogeneidade do terreno, podem influenciar a confiabilidade das medições realizadas em campo.

A resistividade do solo destacou-se como o parâmetro central para a modelagem geoelétrica, evidenciando que a variação das propriedades físico-químicas do terreno exerce influência direta sobre o comportamento das tensões de passo e de toque, elementos críticos para a avaliação da segurança de instalações elétricas. Nesse contexto, a representação do solo por meio de modelos estratificados mostrou-se essencial para uma descrição mais fiel das condições reais encontradas em projetos de aterramento.

O detalhamento dos instrumentos empregados nos ensaios, em especial a análise comparativa entre o terrômetro e o resistivímetro, evidenciou as particularidades operacionais e as limitações inerentes a cada equipamento quando associados aos métodos de medição da resistividade. Ademais, a abordagem da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), por meio dos arranjos de Wenner e Schlumberger, forneceu o suporte metodológico necessário para a aquisição e interpretação dos dados de campo.

Com essa base conceitual estabelecida, cria-se o arcabouço necessário para o desenvolvimento das etapas experimentais e das análises computacionais apresentadas nos capítulos seguintes, nos quais esses fundamentos serão aplicados de forma prática para avaliar o impacto das diferenças de medição nos parâmetros de segurança de sistemas de aterramento por meio do software XGSLab.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS INSTRUMENTOS

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para a execução das campanhas de medição em campo, bem como apresenta os resultados experimentais obtidos ao longo da pesquisa. São detalhadas as etapas práticas do estudo, abrangendo os locais de medição, as especificações técnicas dos instrumentos utilizados e a aplicação da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) para a obtenção dos dados de resistividade do solo.

A partir das medições realizadas, são apresentados os dados experimentais e as respectivas curvas de resistividade aparente, permitindo a análise do comportamento do solo em função da profundidade. Nesse contexto, realiza-se uma comparação direta entre os resultados obtidos com o terrômetro e com o resistivímetro, destacando-se as convergências e divergências observadas para um mesmo perfil de solo e evidenciando os limites e potencialidades de cada equipamento frente às condições reais de campo.

A organização, o tratamento e a interpretação inicial desses dados constituem uma etapa fundamental do trabalho, uma vez que fornecem os parâmetros de entrada necessários para a modelagem computacional e para a avaliação dos critérios de segurança de sistemas de aterramento. Esses resultados servirão de base para as simulações e análises desenvolvidas nos capítulos seguintes, por meio do software XGSLab, permitindo investigar o impacto das diferenças de medição nos indicadores de desempenho e segurança das instalações.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL DA ABORDAGEM

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada de modo a possibilitar uma avaliação comparativa consistente entre um terrômetro e um resistivímetro na medição da resistividade do solo, considerando os valores obtidos pelos instrumentos durante os ensaios.

As medições de campo destinadas à comparação direta entre os equipamentos, realizadas por meio do método de Wenner, com diferentes espaçamentos entre eletrodos, teve como foco analisar a variação da relação tensão/corrente (V/I) fornecida por cada instrumento

em função do aumento progressivo da abertura das hastes, permitindo a quantificação do erro percentual entre as medições.

De forma geral, a metodologia foi concebida para garantir condições equivalentes de ensaio, padronização dos procedimentos e rastreabilidade das medições, assegurando que as diferenças observadas estejam associadas às características dos instrumentos e às condições naturais do solo.

3.2 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADOS

Para a realização dos ensaios foram utilizados dois equipamentos principais: um terrômetro portátil e um resistivímetro empregado em levantamentos geofísicos.

O terrômetro utilizado é o modelo MTD-2000e, fabricado pela Megabras, com intervalo de medição de 0,01 Ω a 2000 Ω . A última calibração do equipamento foi realizada em 03/04/2025 (Vide Anexo A). O terrômetro fornece diretamente a relação entre a tensão medida e a corrente injetada, permitindo o cálculo da resistividade aparente conforme o método de ensaio adotado.

Figura 18: Terrômetro MTD-2000e utilizado nas medições em campo.



Fonte: Autor.

O resistivímetro empregado é o modelo X6XTAL 500, fabricado pela Auto Energia, com capacidade máxima de injeção de corrente de 500 mA. Inicialmente, o equipamento realiza a leitura do potencial espontâneo (SP) do solo, correspondente à diferença de potencial natural existente entre os eletrodos antes da injeção de corrente. Em seguida, o resistivímetro aplica a corrente elétrica ao solo e realiza a leitura simultânea da tensão entre os eletrodos de potencial e da corrente injetada, fornecendo essas leituras necessárias para a determinação da resistividade aparente e possibilitando uma análise mais detalhada do comportamento elétrico durante as medições. A última calibração do equipamento ocorreu em 16/06/2025 (Vide Anexo B).

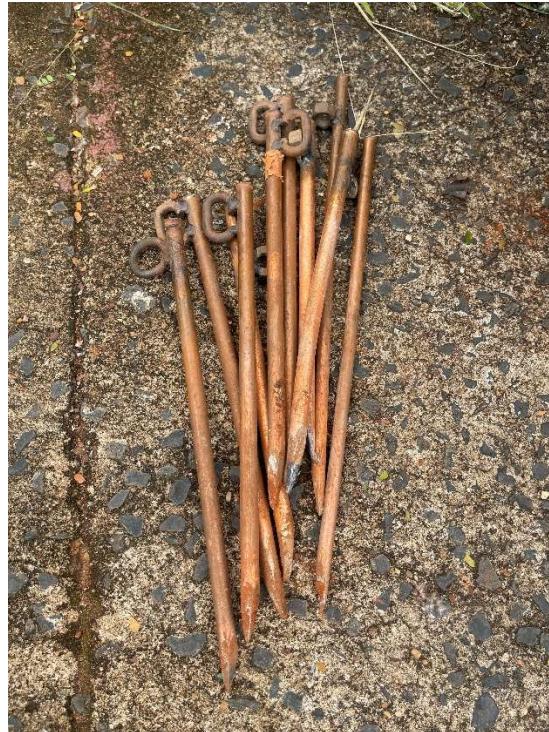
Figura 19: Resistivímetro X6XTAL 500 utilizado nos ensaios.



Fonte: Autor.

Para a execução dos ensaios de campo foram utilizadas estacas metálicas de cobre com comprimento de 40 cm e cabos de interligação de comprimentos compatíveis com os espaçamentos adotados. A cravação das estacas foi realizada com o auxílio de marreta de 2 kg, garantindo bom contato elétrico entre os eletrodos e o solo.

Figura 20: Estacas utilizadas nos ensaios de resistividade.



Fonte: Autor.

Figura 21: Cabos de conexão e bateria auxiliar do resistivímetro utilizados nos ensaios de resistividade.



Fonte: Autor.

3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS EQUIPAMENTOS

A comparação entre terrômetros e resistivímetros evidencia diferenças significativas quanto à robustez, à profundidade de investigação e à confiabilidade dos resultados. Enquanto os terrômetros foram projetados prioritariamente para medições de aterramentos de pequeno

porte, com limitações de potência e alcance, os resistivímetros se destacam por oferecer recursos que ampliam sua aplicabilidade em contextos mais exigentes.

Uma das principais vantagens do resistivímetro em relação ao terrômetro está no fato de operar com corrente contínua ou de muito baixa frequência, o que possibilita maior penetração da corrente elétrica no solo. Esse aspecto elimina os efeitos associados à condução superficial, como o efeito pelicular, permitindo a prospecção de camadas mais profundas do solo, algo essencial em estudos geoelétricos complexos [8].

Outro ponto de destaque é a potência significativamente superior dos resistivímetros, que pode ser mais de cem vezes maior do que a de um terrômetro. Essa maior capacidade energética possibilita a injeção de correntes de medição muito mais altas, resultando em potenciais diferenciais (ΔV) elevados. Como consequência, obtém-se uma melhor relação sinal-ruído, aspecto fundamental para a precisão das leituras em condições adversas [8].

Essa superioridade na relação sinal-ruído garante ao resistivímetro uma maior precisão nas medições, especialmente quando são necessários grandes afastamentos entre os eletrodos de corrente ou quando se trabalha em solos de elevada resistividade (tipicamente acima de $1000 \Omega \cdot m$) [8]. Dessa forma, o resistivímetro se torna um equipamento mais confiável e versátil, adequado tanto para medições em campo restrito quanto para investigações em ambientes de maior complexidade elétrica e geológica.

Com o objetivo de aprofundar a comparação entre terrômetros e resistivímetros, para além das diferenças construtivas e conceituais, foi realizado um ensaio experimental complementar em condições controladas. Esse experimento teve como finalidade analisar o comportamento elétrico dos equipamentos durante a medição da resistividade do solo, bem como avaliar a potência efetivamente injetada no sistema por cada instrumento.

O ensaio foi conduzido em ambiente de laboratório, com solo úmido, caracterizando um solo de baixa resistividade. O arranjo experimental seguiu o método de Wenner, com espaçamento entre eletrodos de 2 m, mantendo-se rigorosamente a mesma configuração geométrica e as mesmas posições das hastes para o terrômetro e para o resistivímetro. A aquisição dos sinais elétricos foi realizada por meio de um osciloscópio Fluke 190-104, possibilitando a observação simultânea das formas de onda de tensão e de corrente durante a execução das medições.

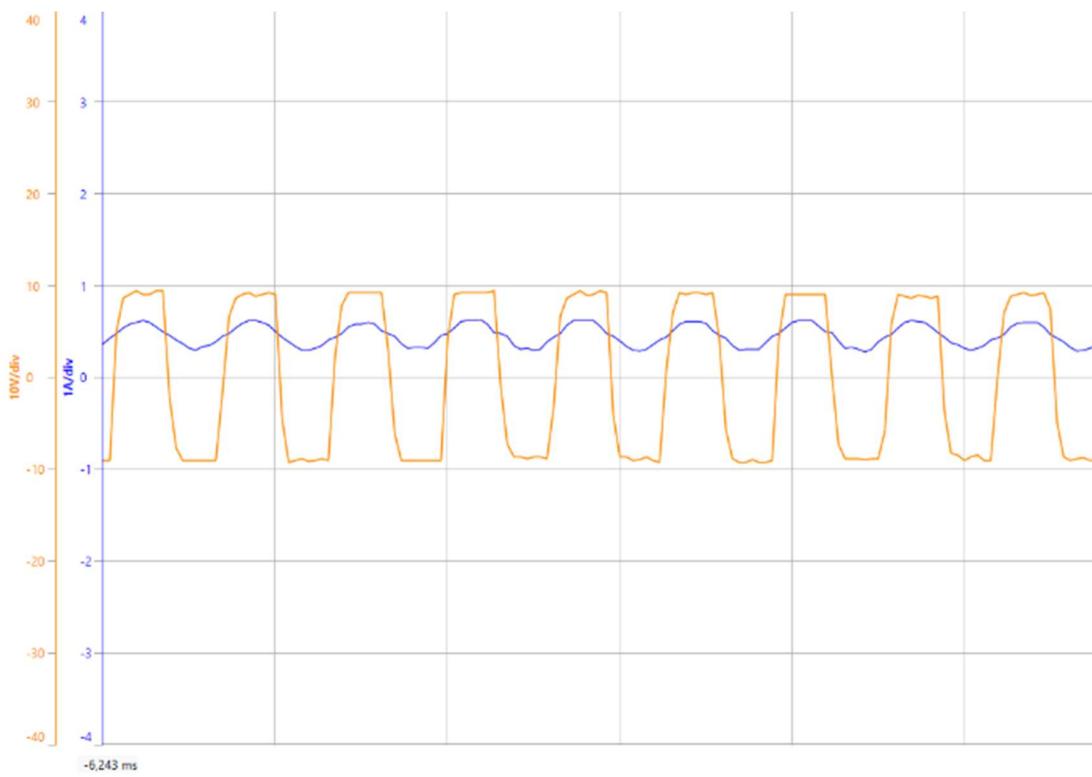
Figura 22: Osciloscópio Fluke 190-104 utilizado no experimento.



Fonte: Autor.

Para o terrômetro, foram registrados valores de corrente de 0,0235 A e de tensão de 8,4 V, correspondendo a uma potência elétrica injetada no solo de 0,1974 W. A análise das formas de onda evidenciou que a tensão aplicada ao solo apresenta forma de onda quadrada, com frequência aproximada de 1497 Hz, enquanto a corrente resultante apresenta forma de onda senoidal. Esse comportamento está associado ao princípio de funcionamento do equipamento, baseado em excitação por chaveamento eletrônico, resultando em sinais pulsados de baixa amplitude.

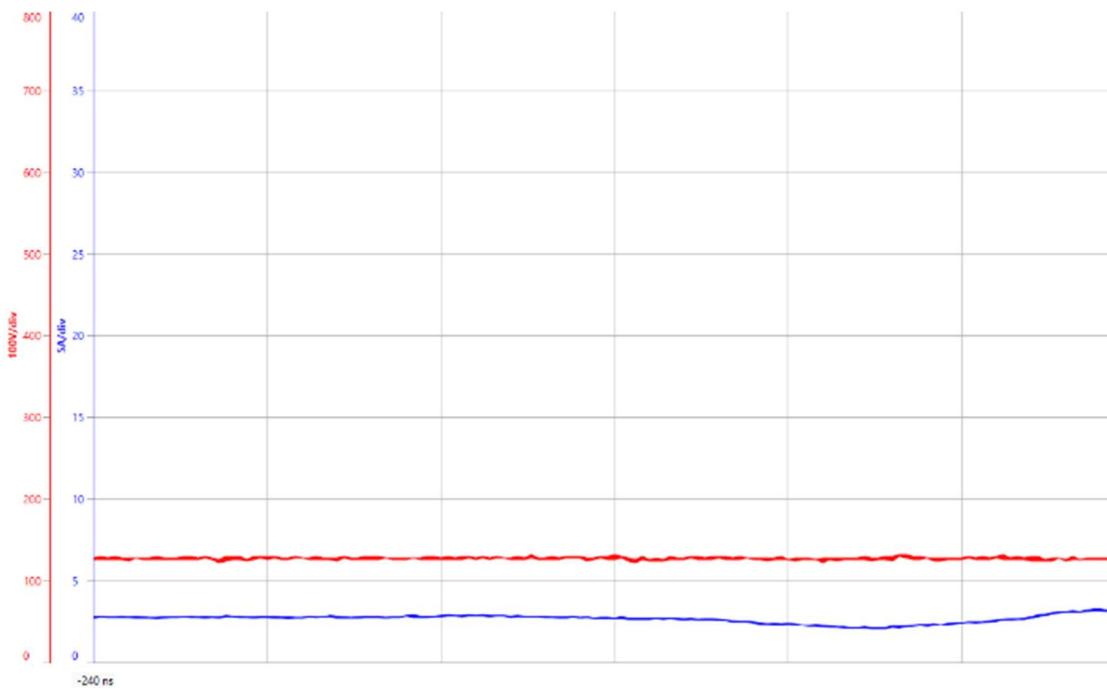
Figura 23: Formas de onde de tensão (cor laranja) e corrente (cor azul) obtidas com o terrômetro.



Fonte: Autor.

No caso do resistivímetro, os valores observados foram de 0,142 A para a corrente e de 126 V para a tensão, o que corresponde a uma potência elétrica injetada no solo de 17,892 W. As formas de onda de tensão e corrente apresentaram comportamento praticamente contínuo ao longo do tempo, sem a presença de chaveamentos abruptos ou componentes periódicas de alta frequência. Esse comportamento experimental está de acordo com a fundamentação teórica apresentada anteriormente, segundo a qual o resistivímetro opera com corrente contínua ou de muito baixa frequência, favorecendo maior penetração da corrente no solo.

Figura 24: Formas de onda de tensão (cor vermelha) e corrente (cor azul) obtidas com o resistivímetro.



Fonte: Autor.

A comparação direta entre os resultados evidencia que o resistivímetro injeta no solo uma potência cerca de 90 vezes superior à do terrômetro quando ambos operam sob as mesmas condições experimentais. Essa diferença explica a maior estabilidade das formas de onda observadas no resistivímetro e a superior relação sinal-ruído associada às suas medições, especialmente em situações que demandam maiores espaçamentos entre eletrodos ou em solos de resistividade elevada.

Adicionalmente, as formas de onda registradas permitem identificar a presença de ruídos elétricos em ambos os equipamentos. No terrômetro, esses ruídos apresentam maior influência relativa sobre o sinal, estando associados principalmente ao processo de chaveamento da tensão. No resistivímetro, embora também sejam observados ruídos, estes apresentam menor impacto sobre a forma global do sinal, em função da maior amplitude e da maior estabilidade da tensão e da corrente injetadas.

Os resultados obtidos neste ensaio experimental corroboram, de forma objetiva, a discussão teórica previamente apresentada, demonstrando que as diferenças entre terrômetros e resistivímetros se manifestam diretamente no processo de medição, na qualidade dos sinais elétricos e na potência transferida ao solo. Esses aspectos explicam a maior robustez e versatilidade do resistivímetro em investigações mais exigentes, ao passo que o terrômetro permanece adequado a aplicações de menor porte, compatíveis com sua concepção e capacidade energética.

3.4 CENÁRIOS DE MEDIÇÃO

As medições foram realizadas em cinco locais distintos, selecionados com o objetivo de abranger diferentes características físicas e ambientais, permitindo avaliar o comportamento dos equipamentos em condições variadas. Os locais foram definidos da seguinte forma:

- A: Terezópolis de Goiás – GO
- B: Uberlândia – MG
- C: Sacramento – MG
- D: Ituiutaba – MG
- E: Trindade - GO

Em todas as medições, foi adotado o método de Wenner, com espaçamentos entre eletrodos de 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 m nos locais de Terezópolis de Goiás e Uberlândia, e até 32 m nos demais locais (restrição do espaço físico para se fazer até o espaçamento de 64 m), possibilitando a investigação progressiva da resistividade do solo em diferentes profundidades.

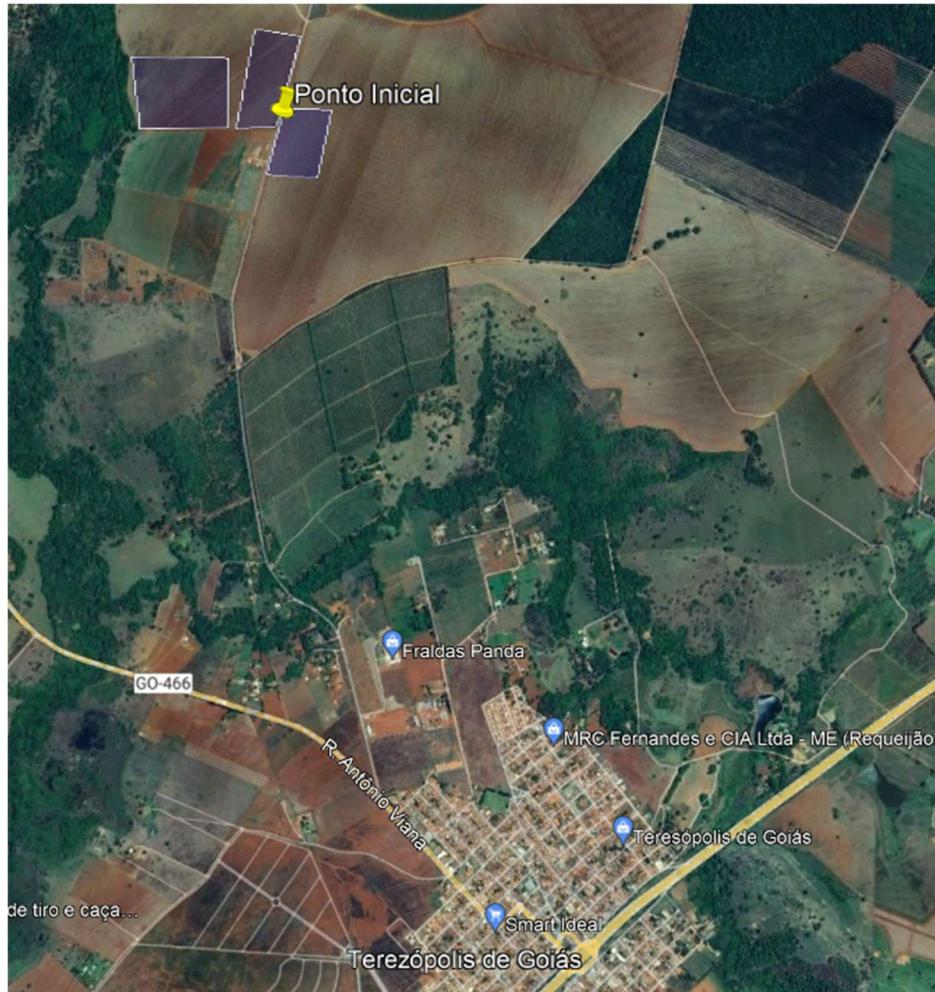
Para evitar repetições, este trabalho detalha apenas os procedimentos adotados no local A - Terezópolis de Goiás. Ressalta-se, entretanto, que as medições nos demais locais seguiram rigorosamente a mesma metodologia, garantindo uniformidade nos procedimentos. Os resultados obtidos em todos os locais serão apresentados posteriormente para análise comparativa.

3.5 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Os procedimentos de medição apresentados neste item referem-se exclusivamente ao Local A – Terezópolis de Goiás, adotado como área de referência para a descrição detalhada da metodologia aplicada neste trabalho. A escolha desse local se deve à sua extensão, às características do terreno e ao fato de tratar-se da área destinada à implantação de uma futura usina fotovoltaica, o que exige uma caracterização elétrica do solo compatível com sistemas de aterramento de grande porte.

A área investigada possui aproximadamente 20 hectares, estando situada a uma altitude média de 808 m. A Figura 25 ilustra a localização da área de estudo, permitindo a visualização do seu posicionamento geográfico e da extensão total abrangida pelos ensaios.

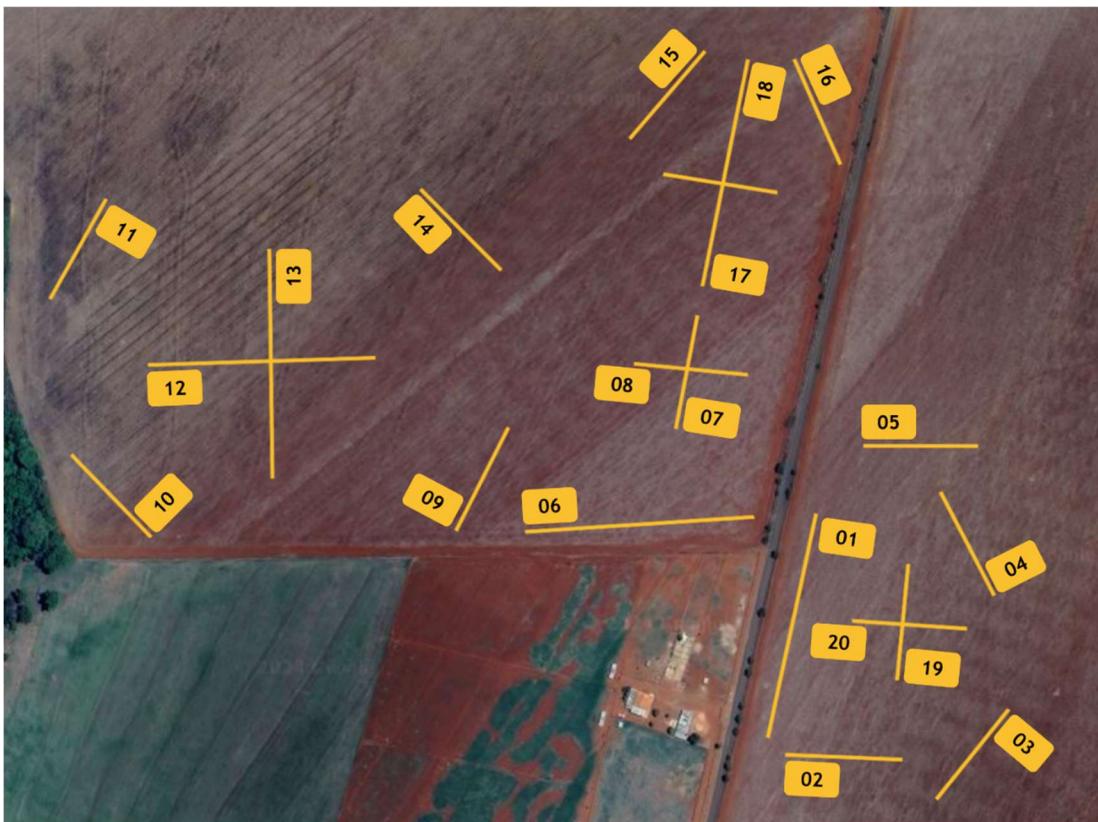
Figura 25: Localização das áreas de estudos no município de Terezópolis de Goiás, GO.



Fonte: *Google Earth*.

Com o objetivo de garantir uma cobertura representativa de toda a área destinada à usina fotovoltaica, foram implantadas 20 linhas de medições, organizadas de forma a abranger uniformemente o terreno, conforme recomendação da NBR7117-1. O arranjo das linhas foi definido considerando a geometria da área. A disposição das linhas de ensaio é apresentada na Figura 26, na qual é possível observar a distribuição espacial adotada para as medições.

Figura 26: Direções das linhas de medições executadas.



Fonte: Autor.

As medições ao longo das linhas foram realizadas utilizando o método de Wenner, com espaçamentos progressivos entre os eletrodos. Dentre as 20 linhas executadas, as linhas 1, 6, 12, 13 e 17 foram medidas com espaçamentos entre eletrodos de até 64 m, possibilitando uma investigação mais profunda do perfil elétrico do solo nessas regiões. As demais linhas foram medidas com espaçamentos de até 32 m, atendendo às limitações físicas do terreno e mantendo a consistência metodológica do levantamento.

A instalação dos eletrodos seguiu o procedimento descrito anteriormente neste capítulo, com a cravação das estacas metálicas no solo e a conexão dos cabos de medição de forma a assegurar bom contato elétrico. A Figura 27 apresenta um detalhe do processo de cravação das estacas e da conexão dos cabos, exemplificando o procedimento adotado durante os ensaios em campo.

Figura 27: Cravação e cabo conectado à estaca.



Fonte: Autor.

A partir das medições realizadas ao longo das 20 linhas, foram obtidos os valores necessários para a determinação da resistividade do solo. A etapa seguinte consiste na apresentação dos dados coletados e na descrição do tratamento aplicado a esses valores até a obtenção dos resultados finais de resistividade, a qual será abordada na sequência deste capítulo.

3.6 DETALHAMENTO DO CÁLCULO DE RESISTIVIDADE APARENTE

Conforme apresentado anteriormente, a determinação da resistividade aparente do solo foi realizada a partir das medições obtidas pelo método de Wenner, aplicado ao longo das linhas de ensaio no local de estudo em Terezópolis de Goiás. Para cada espaçamento entre eletrodos e para cada linha de medição, os valores de tensão e corrente registrados pelos instrumentos de medição e permitiram a obtenção da relação (V/I), a qual constitui a base para o cálculo da resistividade aparente.

De acordo com o método, a resistividade aparente do solo é determinada por meio da Equação (9), considerando o espaçamento entre os eletrodos e as condições geométricas do arranjo adotado. Durante as medições, as hastas foram cravadas a uma profundidade aproximada de 20 cm, valor considerado no cálculo, conforme recomendado para esse tipo de ensaio em solos superficiais.

A Tabela 2 apresenta os valores da relação V/I lidos diretamente no resistivímetro para cada uma das 20 linhas de medição, em função dos espaçamentos entre eletrodos adotados, em

quanto a Tabela 3 apresenta os valores para o terrômetro. Esses dados correspondem às leituras brutas obtidas em campo e representam a resposta elétrica do solo para diferentes profundidades de investigação.

A partir dos valores apresentados nas Tabelas 2 e 3, e da aplicação da Equação (9), foram calculadas as resistividades aparentes correspondentes a cada medição individual. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4 para o resistivímetro e na Tabela 5 para o terrômetro, que reúne os valores de resistividade aparente para cada linha de medição, bem como o valor médio associado a cada espaçamento entre eletrodos.

Observa-se que, para um mesmo espaçamento, há variações nos valores de resistividade aparente entre as diferentes linhas de medição, refletindo a heterogeneidade natural do solo ao longo da área investigada. Diante disso, torna-se necessária a aplicação de critérios estatísticos para a identificação e remoção de valores extremos que possam comprometer a representatividade do modelo de solo.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS INSTRUMENTOS

Tabela 2: Relação (V/I) após o cálculo do sP com a tensão medida no Resistivímetro.

Espaçamento [m]	Relação (V/I) após o cálculo do sP com a tensão medida no Resistivímetro																			
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06	Medição 07	Medição 08	Medição 09	Medição 10	Medição 11	Medição 12	Medição 13	Medição 14	Medição 15	Medição 16	Medição 17	Medição 18	Medição 19	Medição 20
1	39,9	63,8	69,9	74,5	54,1	62,0	92,7	91,3	96,6	83,7	77,8	68,6	74,3	74,7	94,8	69,4	69,0	86,3	76,0	71,6
2	22,1	37,5	40,3	36,7	32,4	42,3	57,9	56,2	59,2	52,8	54,0	43,8	38,4	41,6	58,0	50,2	56,6	54,0	45,1	46,4
4	13,3	19,7	21,0	19,7	20,4	25,6	31,1	12,0	31,7	19,8	29,9	25,0	15,2	21,3	33,6	36,3	33,6	31,9	30,3	30,4
8	10,2	13,2	12,6	14,7	14,9	13,3	17,3	16,9	13,8	11,8	13,5	14,0	12,4	14,2	21,3	9,2	20,5	20,4	20,5	20,2
16	7,9	8,2	8,7	8,2	8,9	5,7	8,2	7,7	5,6	6,0	2,7	6,8	6,9	10,0	14,0	12,3	16,4	12,4	10,2	9,6
32	3,8	4,3	3,7	2,9	3,2	10,6	2,4	2,9	0,9	3,0	1,5	2,1	1,9	4,3	7,4	5,4	5,0	4,8	3,9	3,8
64	1,4					0,4							0,9	0,9				9,0		

Fonte: Autor.

Tabela 3: Relação (V/I) lida no Terrômetro.

Espaçamento [m]	Relação V/I Lida no Terrômetro																			
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06	Medição 07	Medição 08	Medição 09	Medição 10	Medição 11	Medição 12	Medição 13	Medição 14	Medição 15	Medição 16	Medição 17	Medição 18	Medição 19	Medição 20
1	36,4	80,2	55,8	63,6	64,9	47,7	104,7	75,9	128,4	59,6	95,7	48,2	86,2	65,9	120,5	82,6	46,4	80,9	92,4	73,6
2	29,1	40,2	31,3	39,6	25,6	29,4	55,5	62,6	70,6	41,6	48,6	58,7	45,7	28,9	56,9	50,0	62,0	63,7	49,3	56,4
4	15,5	22,6	16,3	14,7	20,6	33,6	22,9	10,4	41,5	13,5	25,3	29,8	10,7	18,5	24,7	36,9	29,2	25,8	38,2	38,8
8	10,9	8,8	10,9	12,6	15,9	17,6	17,2	17,1	17,6	10,4	13,9	11,0	11,2	12,5	24,5	8,7	20,6	14,4	24,9	17,6
16	6,0	10,9	8,9	7,4	6,1	6,9	5,5	8,0	6,0	5,5	2,0	4,4	5,0	11,6	16,6	8,2	21,1	10,6	8,0	7,0
32	2,9	5,3	3,5	2,8	3,4	9,2	3,1	2,3	1,2	2,5	1,8	2,6	2,4	4,7	7,7	3,9	4,1	3,7	5,0	3,1
64	1,0					0,3						1,0	1,0					11,7		

Fonte: Autor.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS INSTRUMENTOS

Tabela 4: Resistividades aparentes para o resistivímetro.

Espaçamento [m]	Resistividade [Ω.m]																				Média [Ω.m]
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06	Medição 07	Medição 08	Medição 09	Medição 10	Medição 11	Medição 12	Medição 13	Medição 14	Medição 15	Medição 16	Medição 17	Medição 18	Medição 19	Medição 20	
1	267,3	427,5	468,4	498,8	362,5	415,2	620,8	611,7	646,7	560,7	521,2	459,4	497,5	500,0	634,9	465,1	462,4	578,3	508,9	479,8	499,3
2	282,6	479,1	514,8	468,7	414,2	541,1	739,7	718,8	756,3	675,5	690,3	559,4	490,6	532,2	740,8	642,0	723,9	690,0	577,0	592,9	591,5
4	336,4	496,8	531,3	496,4	514,1	645,8	784,4	302,1	799,6	501,0	753,9	631,5	383,6	538,5	848,2	917,3	849,1	806,3	765,4	768,2	633,5
8	514,6	665,0	634,7	740,7	750,4	671,0	870,9	852,4	692,5	595,0	680,3	704,8	624,6	715,1	1070,6	462,7	1033,4	1028,5	1030,9	1014,2	767,6
16	791,9	829,4	876,2	822,6	899,5	571,0	825,5	774,3	567,9	603,4	270,4	684,1	688,9	1003,9	1410,6	1236,6	1651,4	1246,8	1024,3	965,6	887,2
32	764,4	857,4	747,1	580,8	652,9	2137,1	483,9	579,0	180,5	593,7	309,5	416,5	389,6	858,7	1485,8	1086,3	1015,4	973,7	777,7	765,7	782,8
64	550,4					168,3						354,7	366,2				3628,5				253,4

Fonte: Autor.

Tabela 5: Resistividades aparentes para o terrômetro.

Espaçamento [m]	Resistividade [Ω.m]																				Média [Ω.m]
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06	Medição 07	Medição 08	Medição 09	Medição 10	Medição 11	Medição 12	Medição 13	Medição 14	Medição 15	Medição 16	Medição 17	Medição 18	Medição 19	Medição 20	
1	243,8	537,1	373,7	425,9	434,6	319,5	701,2	508,3	859,9	399,2	640,9	322,8	577,3	441,3	807,0	553,2	310,7	541,8	618,8	492,9	505,5
2	372,0	513,9	400,1	506,2	327,2	375,8	709,5	800,2	902,5	531,8	621,2	750,4	584,2	369,4	727,3	639,1	792,5	814,3	630,2	721,0	604,4
4	391,3	570,5	411,4	371,1	520,0	848,1	578,0	262,5	1047,6	340,8	638,6	752,2	270,1	467,0	623,5	931,4	737,1	651,3	964,3	979,4	617,8
8	548,5	442,8	548,5	634,0	800,1	885,6	865,5	860,5	885,6	523,3	699,5	553,5	563,6	629,0	1232,8	437,8	1036,6	724,6	1253,0	885,6	750,5
16	603,4	1096,1	895,0	744,1	613,4	693,9	553,1	804,5	603,4	553,1	201,1	442,5	502,8	1166,5	1669,3	824,6	2121,8	1065,9	804,5	703,9	833,1
32	583,1	1065,7	703,8	563,0	683,7	1849,9	623,3	462,5	241,3	502,7	361,9	522,8	482,6	945,1	1548,3	784,2	824,4	744,0	1005,4	623,3	756,0
64	402,1					120,6						402,1	402,1				0,0				69,8

Fonte: Autor.

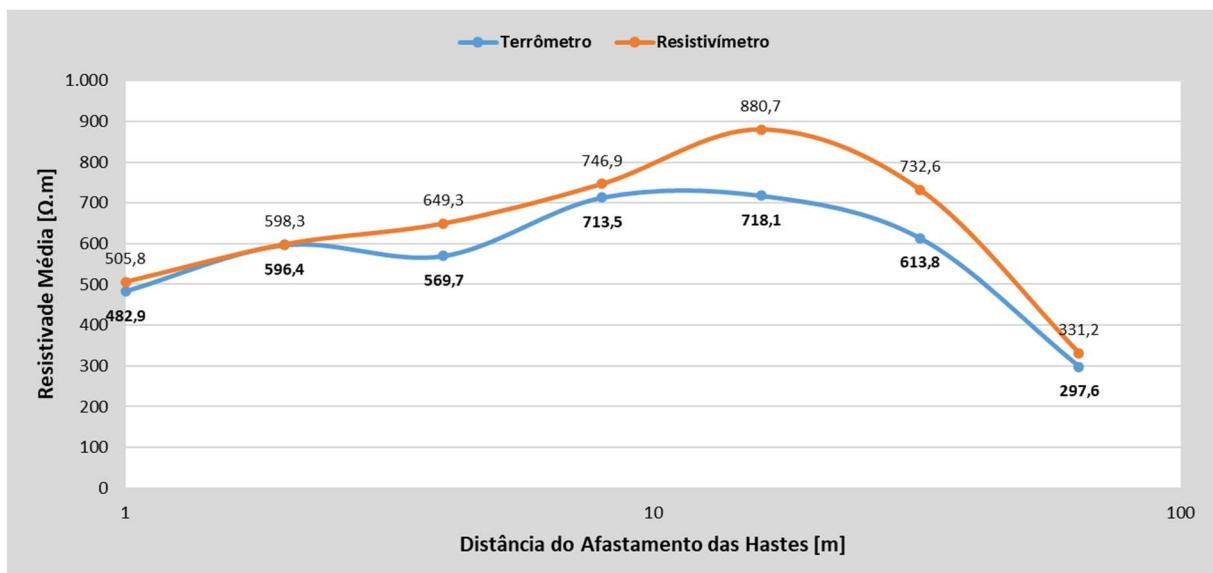
Conforme a recomendação de [8], procedeu-se à filtragem dos valores considerados discrepantes, ou outliers. Para esse fim, inicialmente foram calculados os logaritmos dos valores de resistividade aparente obtidos para cada espaçamento. Em seguida, para cada conjunto de dados, foram determinados a média aritmética e o desvio padrão dos valores logaritmizados.

Os valores que se encontravam fora do intervalo de \pm dois desvios-padrão em relação à média foram identificados como outliers e, portanto, excluídos do conjunto de dados. Após essa etapa, a média aritmética foi recalculada considerando apenas os valores remanescentes, e o logaritmo inverso dessa média foi determinado, resultando na resistividade aparente média corrigida para cada espaçamento.

A Tabela 6 apresenta os logaritmos das resistividades aparentes calculadas a partir da Tabela 4, bem como os respectivos valores de média, desvio padrão e resistividade média obtida após a filtragem estatística. A Tabela 7 realiza o mesmo procedimento para o terrômetro. Os valores identificados como outliers encontram-se destacados na cor amarela, evidenciando sua exclusão do cálculo final.

Com base nos valores médios corrigidos, foi possível traçar a curva representativa do perfil de resistividade aparente do solo até a profundidade de investigação correspondente ao maior espaçamento adotado, no caso, 64 m. A Figura 28 apresenta o gráfico das resistividades aparentes médias em função do espaçamento entre eletrodos, a curva na cor laranja representa o comportamento do resistivímetro, em quanto a cor azul representa o terrômetro.

Figura 28: Gráfico das resistividades aparentes médias (medida).



Fonte: Autor.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS INSTRUMENTOS

Tabela 6: Logaritmos das resistividades aparentes para verificação de valores extremos para o resistivímetro.

Espaçamento [m]	Logaritmos das Resistividades [Ω.m]																				Média Aritmética dos Log.	Desvio Padrão dos Log.	Média [Ω.m] (Log. Inverso)	
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06	Medição 07	Medição 08	Medição 09	Medição 10	Medição 11	Medição 12	Medição 13	Medição 14	Medição 15	Medição 16	Medição 17	Medição 18	Medição 19	Medição 20				
1	2,43	2,63	2,67	2,70	2,56	2,62	2,79	2,79	2,81	2,75	2,72	2,66	2,70	2,70	2,80	2,67	2,66	2,76	2,71	2,68	2,70	0,1	505,8	
2	2,45	2,68	2,71	2,67	2,62	2,73	2,87	2,86	2,88	2,83	2,84	2,75	2,69	2,73	2,87	2,81	2,86	2,84	2,76	2,77	2,78	0,1	598,3	
4	2,53	2,70	2,73	2,70	2,71	2,81	2,89	2,48	2,90	2,70	2,88	2,80	2,58	2,73	2,93	2,96	2,93	2,91	2,88	2,89	2,81	0,1	649,3	
8	2,71	2,82	2,80	2,87	2,88	2,83	2,94	2,93	2,84	2,77	2,83	2,85	2,80	2,85	3,03	2,67	3,01	3,01	3,01	3,01	2,87	0,1	746,9	
16	2,90	2,92	2,94	2,92	2,95	2,76	2,92	2,89	2,75	2,78	2,43	2,84	2,84	3,00	3,15	3,09	3,22	3,10	3,01	2,98	2,94	0,1	880,7	
32	2,88	2,93	2,87	2,76	2,81	3,33	2,68	2,76	2,26	2,77	2,49	2,62	2,59	2,93	3,17	3,04	3,01	2,99	2,89	2,88	2,86	0,2	732,6	
64	2,74					2,23							2,55	2,56								2,52	0,2	331,2

Fonte: Autor.

Tabela 7: Logaritmos das resistividades aparentes para verificação de valores extremos para o terrômetro.

Espaçamento [m]	Logaritmos das Resistividades [Ω.m]																				Média Aritmética dos Log.	Desvio Padrão dos Log.	Média [Ω.m] (Log. Inverso)	
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06	Medição 07	Medição 08	Medição 09	Medição 10	Medição 11	Medição 12	Medição 13	Medição 14	Medição 15	Medição 16	Medição 17	Medição 18	Medição 19	Medição 20				
1	2,39	2,73	2,57	2,63	2,64	2,50	2,85	2,71	2,93	2,60	2,81	2,51	2,76	2,64	2,91	2,74	2,49	2,73	2,79	2,69	2,68	0,1	482,9	
2	2,57	2,71	2,60	2,70	2,51	2,57	2,85	2,90	2,96	2,73	2,79	2,88	2,77	2,57	2,86	2,81	2,90	2,91	2,80	2,86	2,78	0,1	596,4	
4	2,59	2,76	2,61	2,57	2,72	2,93	2,76	2,42	3,02	2,53	2,81	2,88	2,43	2,67	2,79	2,97	2,87	2,81	2,98	2,99	2,76	0,2	569,7	
8	2,74	2,65	2,74	2,80	2,90	2,95	2,94	2,93	2,95	2,72	2,84	2,74	2,75	2,80	3,09	2,64	3,02	2,86	3,10	2,95	2,85	0,1	713,5	
16	2,78	3,04	2,95	2,87	2,79	2,84	2,74	2,91	2,78	2,74	2,30	2,65	2,70	3,07	3,22	2,92	3,33	3,03	2,91	2,85	2,86	0,1	718,1	
32	2,77	3,03	2,85	2,75	2,83	3,27	2,79	2,67	2,38	2,70	2,56	2,72	2,68	2,98	3,19	2,89	2,92	2,87	3,00	2,79	2,79	0,2	613,8	
64	2,60					2,08							2,60	2,60								2,47	0,2	297,6

Fonte: Autor.

O procedimento de cálculo e tratamento estatístico descrito neste item foi aplicado de forma idêntica aos dados obtidos em todos os locais de medição considerados neste trabalho, tanto para o resistivímetro quanto para o terrômetro. Dessa forma, assegura-se a comparabilidade direta entre os resultados, uma vez que os valores de resistividade aparente foram determinados a partir das mesmas configurações de ensaio, dos mesmos espaçamentos entre eletrodos e do mesmo critério de filtragem de valores extremos.

Com base nessa metodologia uniforme, a Tabela 8 apresenta, de forma resumida, os resultados finais de resistividade aparente média obtidos para cada local de medição, contemplando os valores calculados a partir das leituras do resistivímetro e do terrômetro. Adicionalmente, é apresentado o erro percentual entre os dois equipamentos, considerando o resistivímetro como referência, em função de sua maior capacidade de injeção de corrente e melhor relação sinal-ruído, conforme discutido anteriormente.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS INSTRUMENTOS

Tabela 8: Resultados de resistividade aparente média para cada local de medição e com seus devidos erros entre os instrumentos de medição.

Espaçamento [m]	Local A			Local B			Local C			Local D			Local E		
	Resistividade [Ω.m]			Resistividade [Ω.m]			Resistividade [Ω.m]			Resistividade [Ω.m]			Resistividade [Ω.m]		
	Terrôm.	Resist.	Diferença [%]	Terrôm.	Resist.	Diferença [%]	Terrôm.	Resist.	Diferença [%]	Terrôm.	Resist.	Diferença [%]	Terrôm.	Resist.	Diferença [%]
1	482,81	505,82	4,55	338,56	389,43	13,06	1083,68	1205,13	10,08	709,30	780,62	10,06	891,20	978,15	9,76
2	579,20	598,26	3,19	428,34	477,94	10,38	3383,69	3640,27	7,05	657,80	704,21	7,06	1106,40	1190,28	7,58
4	628,50	649,31	3,21	523,78	558,43	6,21	5979,22	6277,73	4,75	875,50	921,90	5,30	1049,80	1085,70	3,42
8	693,82	746,93	7,11	467,76	497,88	6,05	12106,86	13137,06	7,84	1440,10	1505,28	4,53	924,70	997,28	7,85
16	749,33	880,71	14,92	412,35	479,28	13,96	16071,25	19366,10	17,01	1071,70	1243,75	16,05	278,60	305,11	9,52
32	486,64	690,25	29,50	124,67	202,99	38,58	6575,54	10718,51	38,65	1223,40	1747,44	42,83	820,50	1178,78	43,67
64	294,13	331,17	29,13	60,32	90,58	33,41									

Fonte: Autor.

3.7 INVERSÃO DA CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE (ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO)

A inversão da curva de resistividade aparente foi realizada com o auxílio do software IPI2win, ferramenta computacional amplamente empregada na interpretação de dados de resistividade elétrica e na modelagem geoelétrica do solo. Desenvolvido na Rússia, o programa é reconhecido na literatura técnica por sua robustez na estimativa de modelos estratificados a partir de dados obtidos em levantamentos elétricos verticais [38].

Neste trabalho, a etapa de estratificação do solo foi executada para todas as medições realizadas, contemplando os cinco locais de estudo e os diferentes equipamentos empregados. Para cada local, procedeu-se à inversão da curva de resistividade aparente a partir dos dados experimentais obtidos em campo, de modo a permitir a caracterização estratificada do solo em profundidade.

Os dados de entrada utilizados no software IPI2win foram extraídos da Tabela 8, considerando-se os espaçamentos entre eletrodos e os valores médios de resistividade aparente obtidos com o resistivímetro e com terrômetro, para cada local. A partir desses dados, realizou-se a inversão da curva de resistividade aparente, adotando-se, em todos os casos, um modelo de solo estratificado em três ou quatro camadas, a depender da configuração que apresentou o melhor compromisso entre simplicidade do modelo e qualidade do ajuste aos dados medidos.

As tabelas seguintes apresentam os resultados do processo de inversão para cada um dos cinco locais de medição, indicando, para cada camada, os valores estimados de resistividade, bem como as respectivas espessuras e as profundidades acumuladas até a base de cada camada.

Tabela 9: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local A.

Nº de camadas	Terrômetro			Resistivímetro		
	Resistividade Aparente da Camada [$\Omega \cdot m$]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]	Resistividade Aparente da Camada [$\Omega \cdot m$]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]
1	517,0	2,7	2,7	549,0	3,67	3,67
2	910,0	14,9	17,6	1101,0	23,4	27,1
3	226,0	∞	∞	116,0	∞	∞

Fonte: Autor.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS INSTRUMENTOS

Tabela 10: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local B.

Nº de camadas	Terrômetro			Resistivímetro		
	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]
1	384,0	3,65	3,65	463,0	6,63	6,63
2	1417,0	4,49	8,14	1907,0	3,51	10,1
3	16,9	23,9	32	40,9	53,9	64
4	150000,0	∞	∞	150000,0	∞	∞

Fonte: Autor.

Tabela 11: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local C.

Nº de camadas	Terrômetro			Resistivímetro		
	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]
1	478,0	0,381	0,381	566,0	0,435	0,435
2	280000,0	1,08	1,46	750000,0	0,635	1,07
3	54,7	∞	∞	151,0	∞	∞

Fonte: Autor.

Tabela 12: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local D.

Nº de camadas	Terrômetro			Resistivímetro		
	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]
1	627,0	2,87	2,87	686,0	3,1	3,1
2	4472,0	3,34	6,21	6043,0	2,42	5,53
3	171,0	6,38	12,6	225,0	5,12	10,6
4	58365,0	∞	∞	58365,0	∞	∞

Fonte: Autor.

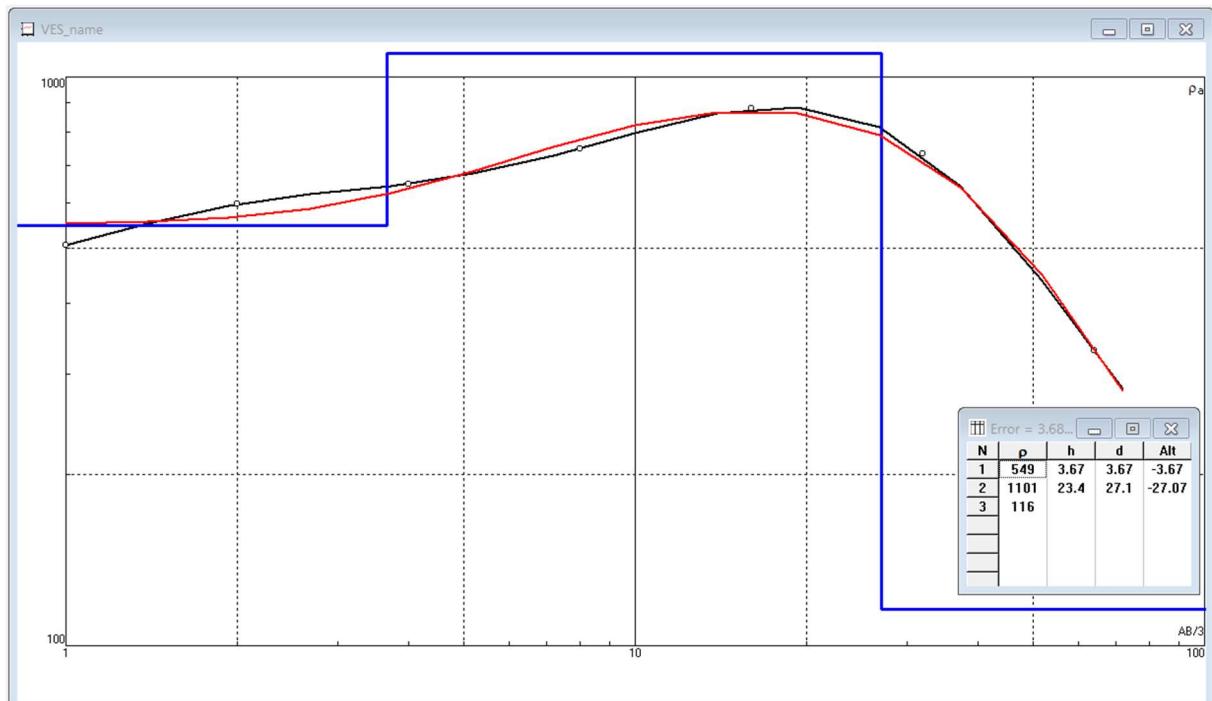
Tabela 13: Resultado do processo de inversão da curva na Modelagem Geoelétrica para o Local E.

Nº de camadas	Terrômetro			Resistivímetro		
	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]
1	816,0	1,36	1,36	1219	5,82	5,82
2	3304,0	1,7	3,05	53,9	2,24	8,06
3	58,3	3,83	6,88	136,0	0,766	0,766
4	60073	∞	∞	88050	∞	∞

Fonte: Autor.

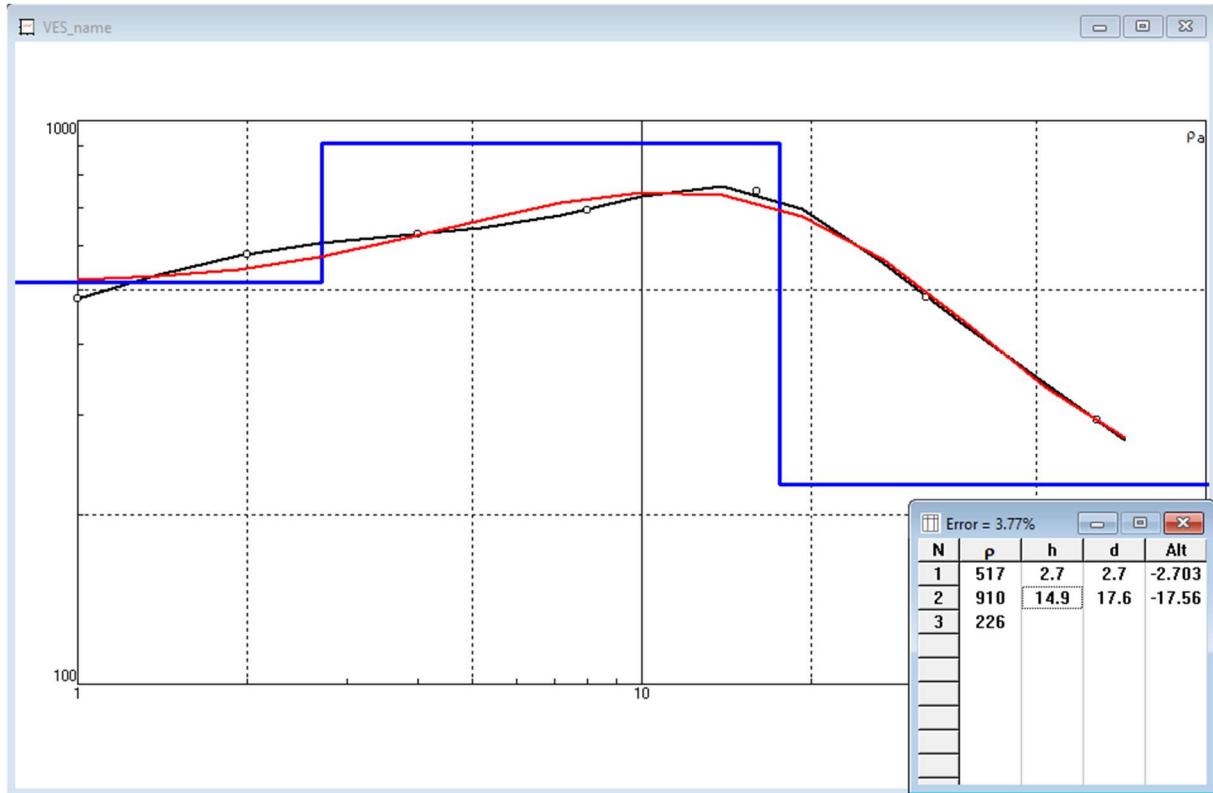
A qualidade do ajuste do modelo obtido pode ser avaliada por meio da curva de resistividade aparente calculada pelo software, ajustada aos pontos experimentais em escala logarítmica. A figura 29 e 30 apresenta essa comparação gráfica, na qual a curva ajustada representa o comportamento do modelo estratificado em relação aos valores medidos em campo. A fim de ilustar, será mostrado somente as curvas do Local A, para os 2 equipamentos.

Figura 29: Curva em vermelho obtida do modelo do solo da Tabela 9 ajustada aos pontos referentes aos dados medidos em campo (escala log-log) com o resistivímetro e curva preta o perfil real do solo, destacando assim a diferença do modelo medido e do real.



Fonte: Autor.

Figura 30: Curva em vermelho obtida do modelo do solo da Tabela 9 ajustada aos pontos referentes aos dados medidos em campo (escala log-log) com o terrômetro e curva preta o perfil real do solo, destacando assim a diferença do modelo medido e do real.



Fonte: Autor.

O desvio percentual entre os valores calculados pelo modelo e os valores medidos foi determinado em relação às resistividades aparentes experimentais. Observou-se que o maior desvio obtido foi de 3,68% para o resistivímetro e de 3,77% para o terrômetro, valor significativamente inferior ao limite de 10%, usualmente adotado na literatura técnica como critério de boa concordância para dados de resistividade do solo. Dessa forma, a estratificação obtida por meio da inversão da curva de resistividade aparente é considerada satisfatória e representativa, servindo como base confiável para as análises subsequentes desenvolvidas neste trabalho.

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados neste capítulo permitiram consolidar uma comparação objetiva entre medições de resistividade do solo realizadas por terrômetro e por resistivímetro, tanto em condições de campo quanto em ensaio experimental complementar, evidenciando como as diferenças construtivas e operacionais de cada instrumento influenciam a estabilidade das leituras e, principalmente, a profundidade efetiva de investigação associada às SEVs.

No conjunto de medições de campo, observou-se que o resistivímetro, de forma sistemática, tende a apresentar valores de resistividade aparente média superiores aos obtidos com o terrômetro. Entretanto, a magnitude dessa divergência não é constante: ela se mostra dependente do espaçamento adotado no arranjo de Wenner e, sobretudo, do nível de resistividade do terreno. Em termos práticos, verificou-se que, para afastamentos menores (tipicamente até 16 m), as discrepâncias entre os instrumentos foram, na maior parte dos casos, discretas a moderadas, sugerindo que, para investigações rasas e para aplicações em áreas fisicamente restritas, o erro entre equipamentos pode não ser tão significativo quanto normalmente se pressupõe. Por outro lado, para espaçamentos mais elevados e especialmente em solos de maior resistividade as divergências tornam-se mais expressivas, atingindo patamares que já podem comprometer a representatividade do perfil geoelétrico quando se busca inferir camadas mais profundas.

Essa dependência do erro com o afastamento e com a resistividade do solo ficou particularmente evidente ao se comparar o comportamento observado em locais de baixa resistividade (como o Local A) com locais de alta resistividade (como o Local D). No Local A, embora a diferença entre instrumentos exista, ela se mantém relativamente contida nos primeiros afastamentos e se intensifica sobretudo nos maiores espaçamentos, indicando que as leituras são mais estáveis e menos sensíveis à limitação energética do terrômetro em condições de menor impedância do meio. Já no Local D, a elevação da resistividade do terreno aumenta a dificuldade de injeção e detecção confiável de sinais em maiores afastamentos, tornando a divergência entre instrumentos mais pronunciada e destacando a maior sensibilidade do terrômetro a condições em que a relação sinal-ruído se deteriora.

A justificativa física para esse comportamento foi reforçada pelo ensaio experimental complementar com aquisição por osciloscópio. As formas de onda registradas mostraram que o terrômetro opera por excitação pulsada de baixa amplitude, com tensão quadrada em alta frequência e potência injetada significativamente reduzida, enquanto o resistivímetro opera com comportamento praticamente contínuo (corrente contínua ou de muito baixa frequência) e potência de injeção substancialmente superior. Essa diferença energética favorece maior estabilidade no sinal do resistivímetro e melhora a relação sinal-ruído, o que se torna determinante quando se exigem maiores espaçamentos entre eletrodos ou quando o solo apresenta resistividade elevada. Assim, os resultados obtidos em laboratório sustentam a interpretação de que, em cenários de maior complexidade elétrica e geológica, a capacidade de injeção do resistivímetro contribui diretamente para medições mais robustas e reproduutíveis.

Na sequência, a etapa de inversão das curvas e obtenção das modelagens geoelétricas (via IPI2win) permitiu transformar as resistividades aparentes médias em perfis estratificados

equivalentes, com parâmetros de resistividade e espessura por camada para cada local e para cada instrumento. De maneira geral, os ajustes realizados apresentaram boa aderência aos pontos medidos, com desvios máximos reduzidos, indicando consistência matemática do processo de inversão. Ainda assim, a comparação entre os modelos obtidos por terrômetro e por resistivímetro mostrou que pequenas diferenças nas resistividades aparentes sobretudo nos maiores espaçamentos podem se traduzir em alterações relevantes nos parâmetros estimados de camadas mais profundas (resistividade e/ou espessura), o que reforça a necessidade de cautela ao extrapolar conclusões de investigação profunda a partir de medições realizadas com instrumentação de menor potência.

Dessa forma, o capítulo evidencia duas conclusões centrais: (i) em afastamentos menores, especialmente até 16 m, as diferenças entre equipamentos tendem a ser menos significativas, o que indica viabilidade do uso do terrômetro em medições rasas e em contextos de menor exigência de profundidade; e (ii) em solos de elevada resistividade e/ou quando se pretende aumentar o afastamento para investigar camadas profundas, as divergências se acentuam e passam a impactar de forma mais evidente a modelagem geoelétrica, justificando a adoção do resistivímetro como instrumento preferencial quando a robustez e a profundidade de investigação forem requisitos críticos. Por fim, os perfis geoelétricos obtidos neste capítulo fornecem a base necessária para o Capítulo 4, no qual se avalia, por simulação computacional, como essas variações de resistividade e de estratificação do solo se propagam para grandezas de desempenho e critérios de segurança em sistemas reais de aterramento.

CAPÍTULO 4

ANÁLISES COMPUTACIONAIS EM SISTEMAS DE ATERRAMENTOS REAIS

Este capítulo apresenta análises computacionais com o propósito de avaliar, sob uma perspectiva aplicada, os efeitos das divergências entre as Sondagens Elétricas Verticais (SEV) realizadas com diferentes instrumentos no desempenho de sistemas de aterramento com distintos portes e características construtivas. Para essa finalidade, foram consideradas três instalações elétricas representativas: (i) uma usina fotovoltaica, caracterizada como sistema de grande porte; (ii) um hospital, representativo de um sistema com menor quantidade de material condutivo associado ao aterramento; e (iii) uma subestação elétrica típica, considerada um sistema de médio porte em relação ao material condutivo empregado.

4.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE

A comparação é realizada a partir dos sistemas de aterramento das três instalações descritas, modelados no software XGSLab. Mantêm-se inalteradas as geometrias e configurações físicas dos aterramentos, variando-se apenas os parâmetros do solo, isto é, a modelagem geoelétrica. Para fins de análise comparativa, selecionaram-se as resistividades dos locais A e D, por representarem, respectivamente, condições de baixa e alta resistividade do solo. Essa estratégia permite isolar a influência da resistividade nos principais parâmetros de desempenho dos sistemas de aterramento, tais como a resistência de aterramento, as tensões de passo e de toque e a delimitação de áreas seguras.

As análises deste capítulo fundamentam-se nos resultados experimentais apresentados nos capítulos anteriores, especialmente nas diferenças observadas entre as SEVs obtidas com terrômetro e resistivímetro e nas modelagens geoelétricas derivadas de cada instrumento, em distintos locais. Dessa forma, busca-se discutir as implicações práticas dessas variações no contexto do projeto e da avaliação de sistemas de aterramento, considerando diferentes escalas de aplicação.

Inicialmente, apresentam-se características relevantes do software XGSLab para as análises propostas. Em seguida, são descritos os sistemas de aterramento de cada instalação e

discutidos os resultados comparativos das grandezas de desempenho, sob os aspectos técnicos e de segurança. Ressalta-se que os estudos, projetos e dimensionamentos foram desenvolvidos no âmbito deste trabalho com base em demandas e entregas reais, preservadas as informações sensíveis, evidenciando o caráter aplicado da pesquisa.

4.2 SOFTWARE UTILIZADO – XGSLab

Para a realização das análises computacionais apresentadas neste capítulo, utilizou-se o software XGSLab [39], amplamente empregado no dimensionamento, na análise e no projeto de sistemas de aterramento em diferentes tipos de instalações elétricas, tais como usinas fotovoltaicas, hospitais e subestações de energia. Trata-se de uma ferramenta avançada e versátil, capaz de realizar análises em diferentes frequências e de permitir a modelagem detalhada de terrenos homogêneos e heterogêneos, bem como dos diversos elementos que compõem o sistema elétrico.

O XGSLab possibilita o cálculo preciso de grandezas relevantes para a avaliação da segurança dos sistemas de aterramento, tais como tensões de passo, tensões de toque, resistência de aterramento e distribuição das correntes de falta no solo. Essas funcionalidades permitem avaliar o desempenho do sistema frente a diferentes condições de resistividade, assegurando níveis adequados de segurança tanto para as instalações quanto para as pessoas.

Adicionalmente, o software apresenta interoperabilidade com outros programas de engenharia, suporte a normas internacionais, como IEEE e IEC, e uma interface gráfica intuitiva, que facilita a visualização dos resultados e a geração automática de relatórios técnicos. Recursos adicionais, como simulação de cenários e análises comparativas, contribuem para a avaliação do impacto de diferentes parâmetros de entrada sobre o comportamento do sistema de aterramento.

No caso específico de aplicações em usinas fotovoltaicas, o XGSLab diferencia-se por considerar todos os condutores como não ideais, incorporando suas impedâncias próprias e mútuas. O software também permite a modelagem de elementos metálicos expostos, como as estruturas (“frames”) dos painéis fotovoltaicos e cercas, que se encontram imersos no ar, bem como dos eletrodos de aterramento em contato com o solo. Essa abordagem proporciona uma representação mais realista do sistema físico, distinguindo-se daquela adotada pela maioria dos programas disponíveis no mercado.

4.3 SISTEMA DE ATERRAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA

4.3.1 Descrição do sistema

Para a modelagem do sistema de aterramento, utilizaram-se os projetos recebidos de alocação dos painéis fotovoltaicos, cabine de medição, skids e cerca perimetral, com coordenadas georreferenciadas. Vale a pena destacar que o complexo solar, contempla três usinas fotovoltaicas no município de Terezópolis de Goiás, com layout apresentado na Figura 31. Dessa forma, o sistema de aterramento é único para as três usinas, incluindo uma interligação física entre as áreas a Oeste e Leste da estrada rural, ocupando uma área aproximada de 200.000 m².

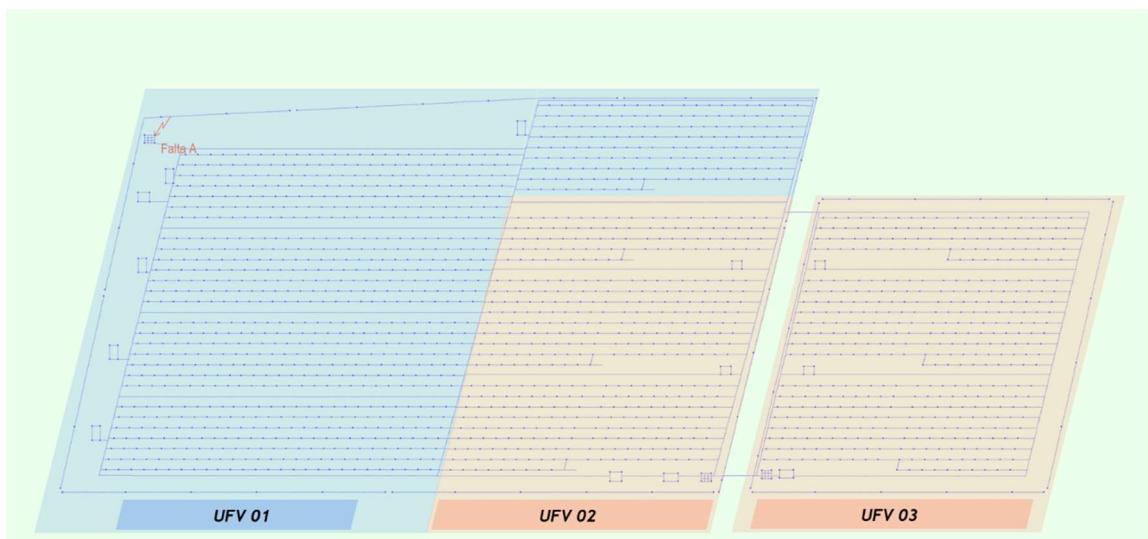
Para a modelagem desse sistema no XGSLab, consideram-se as seguintes premissas:

- Condutores Enterrados: Por questões mecânicas, adotam-se aço cobreado e/ou cobre nu de têmpora meio dura de 50 mm² para condutores enterrados, instalados a 0,6 m do nível do solo. Esse condutor promove a interligação em anel dos setores de cada 1.000 kWp entre si e às *Conversion Unities*, que são conjuntos de inversores e transformadores elevadores que atendem um determinado setor de arranjos fotovoltaicos. As *Conversion Unities* e as cabines de medição são providas de um anel de aterramento com hastes de 3/4” e 2,4 m de comprimento, espalhadas pelo perímetro dessas obras civis.
- Estruturas dos Trackers: As estruturas dos trackers fazem parte do sistema de aterramento, sendo modeladas como tubulação metálica revestida por um envelope de concreto de 30 cm de diâmetro e 1 m de comprimento.
- Interligação das Mesas de Painéis: O suporte metálico das mesas de painéis fotovoltaicos proporciona uma interligação contínua entre as bases dos trackers, sendo modelado por cabo isolado, pois não estão em contato direto com o solo. O início e o final de cada mesa de painéis são interligados com condutor nu ao anel de aterramento, através de ligação na estrutura metálica da base dos trackers. É importante se atentar para a corrosão galvânica causada pelo contato entre metais diferentes, como cobre e aço, essa deve ser evitada, caso contrário, conexões “estanhadas” podem ser utilizadas;
- Cerca Perimetral: A cerca que delimita a propriedade é representada na simulação por cabos isolados interligados a hastes de aço cobreado de 3/4” de diâmetro e 2,4 m de comprimento, desconectada do aterramento do parque e seccionada a cada 250 m;

- Corrente de Curto-Círcuito: Considera-se uma corrente de curto-círcito Fase-Terra de 3.000 A, aplicada nos condutores do anel de proteção das cabines de medição;
- Tempo de Eliminação de Falta: O tempo de eliminação de falta considerado é de 0,2 segundos.

Essas premissas asseguram que o sistema de aterramento foi projetado de acordo com os requisitos técnicos e de segurança, garantindo a integridade das usinas fotovoltaicas e a proteção dos trabalhadores e equipamentos. A Figura 31 mostra o sistema descrito, modelado no XGSLab.

Figura 31: Sistema de aterramento do complexo solar parametrizado no software XGSLab.



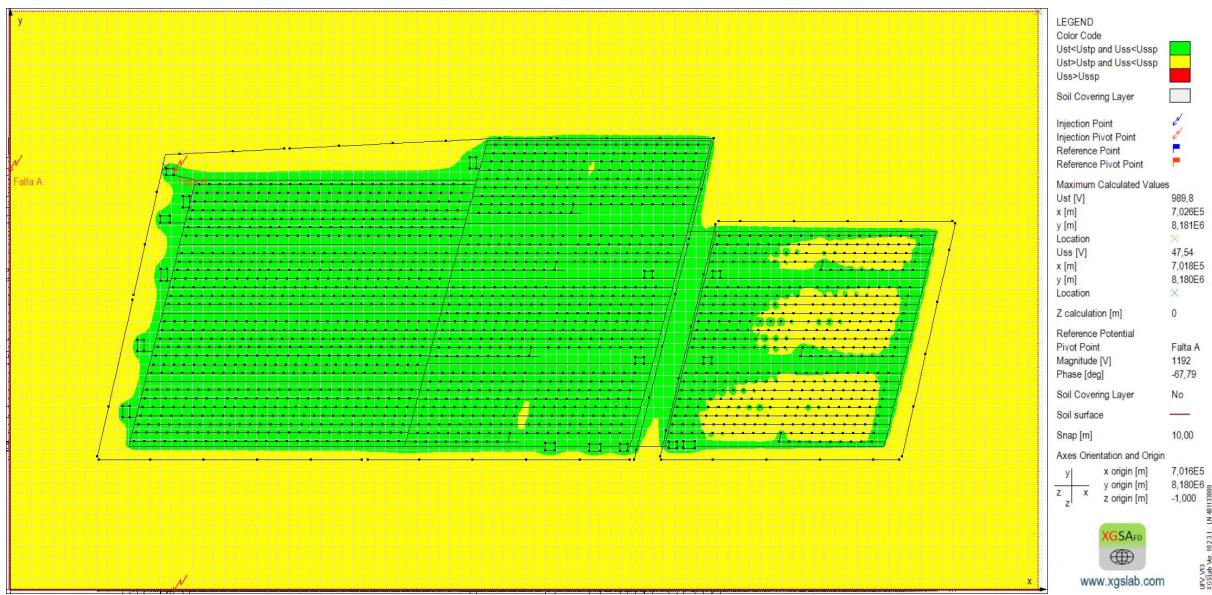
Fonte: Autor.

4.3.2 Análise das variações de resistividade

Foram considerados quatro cenários distintos, definidos a partir dos valores de resistividade obtidos nos locais A e D, utilizando tanto o terrômetro quanto o resistivímetro. Dessa forma, foi possível comparar não apenas a influência da variação espacial da resistividade do solo, mas também os efeitos associados aos diferentes instrumentos de medição empregados.

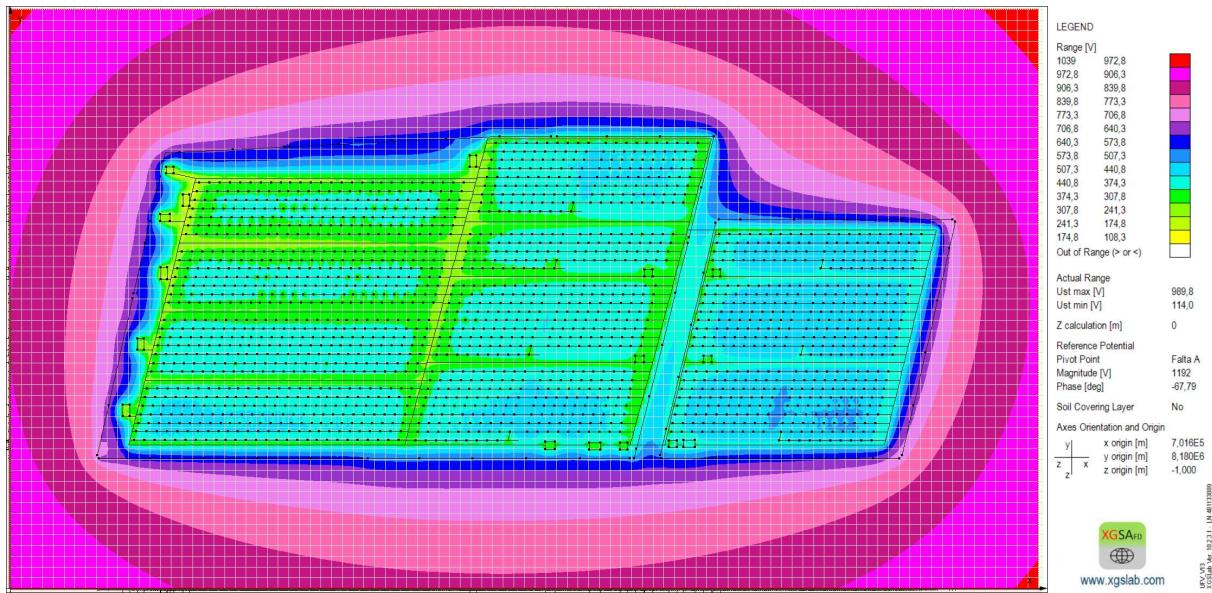
No cenário correspondente ao local A, considerando os valores de resistividade obtidos por meio do terrômetro, a simulação resultou em uma resistência de aterramento de $0,39\Omega$. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam, respectivamente, os resultados referentes à área segura, à tensão de toque e à tensão de passo para esse cenário.

Figura 32: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar para a resistividade com o terrômetro no local A.



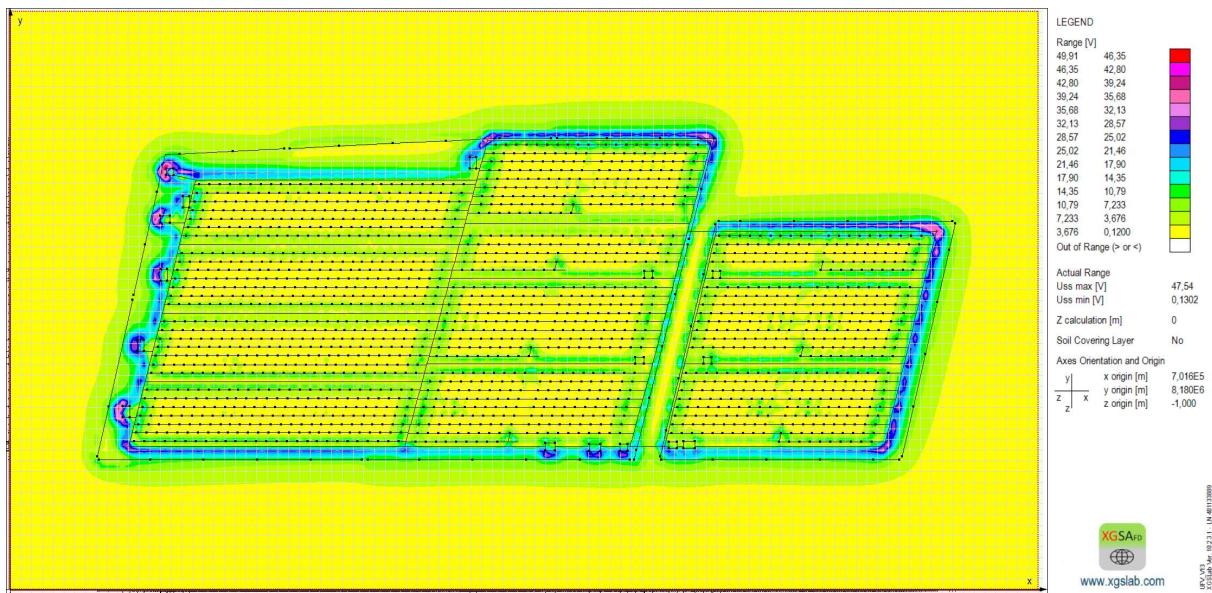
Fonte: Autor.

Figura 33: Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança para a resistividade com o terrômetro no local A.



Fonte: Autor.

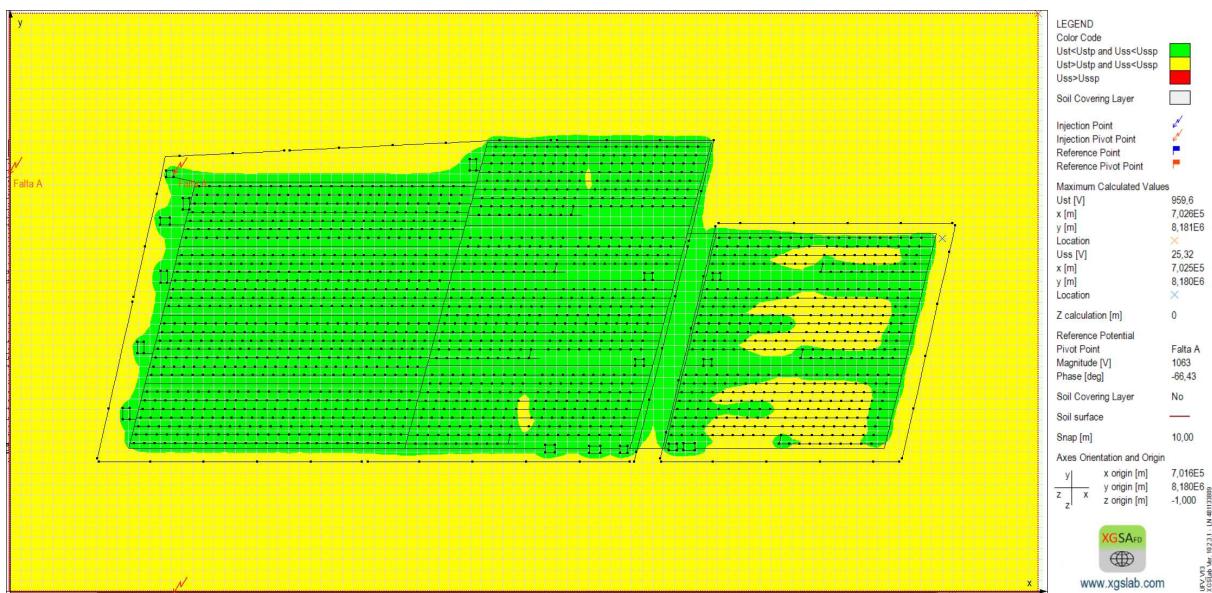
Figura 34: Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local A.



Fonte: Autor.

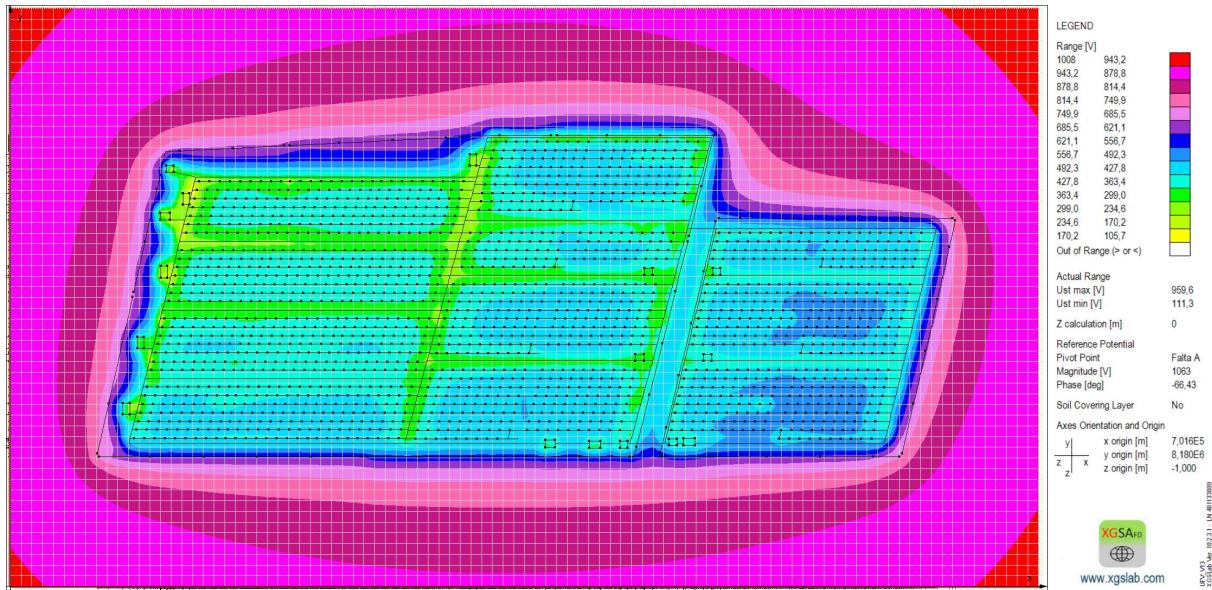
Ainda para o local A, ao se adotar os valores de resistividade determinados com o resistivímetro, obteve-se uma resistência de aterramento de $0,35\Omega$. As Figuras 35, 36 e 37 ilustram os resultados correspondentes à área segura, à tensão de toque e à tensão de passo para esse segundo cenário, permitindo a comparação direta com os resultados obtidos a partir das medições com terrômetro.

Figura 35: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar para a resistividade com o resistivímetro no local A.



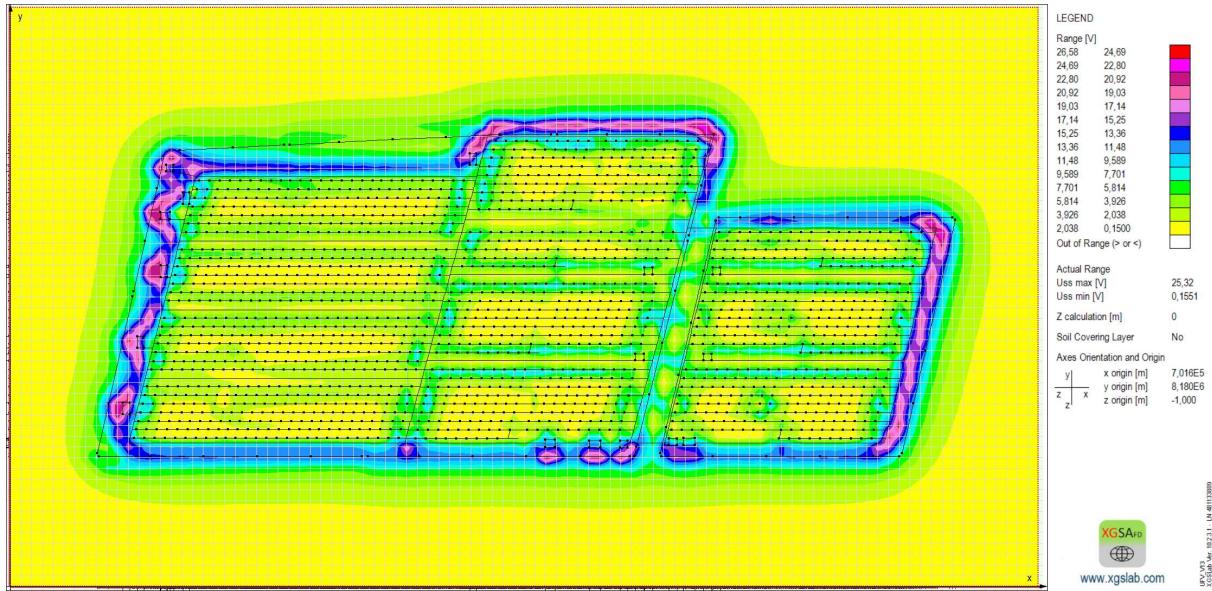
Fonte: Autor.

Figura 36: Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança para a resistividade com o resistivímetro no local A.



Fonte: Autor.

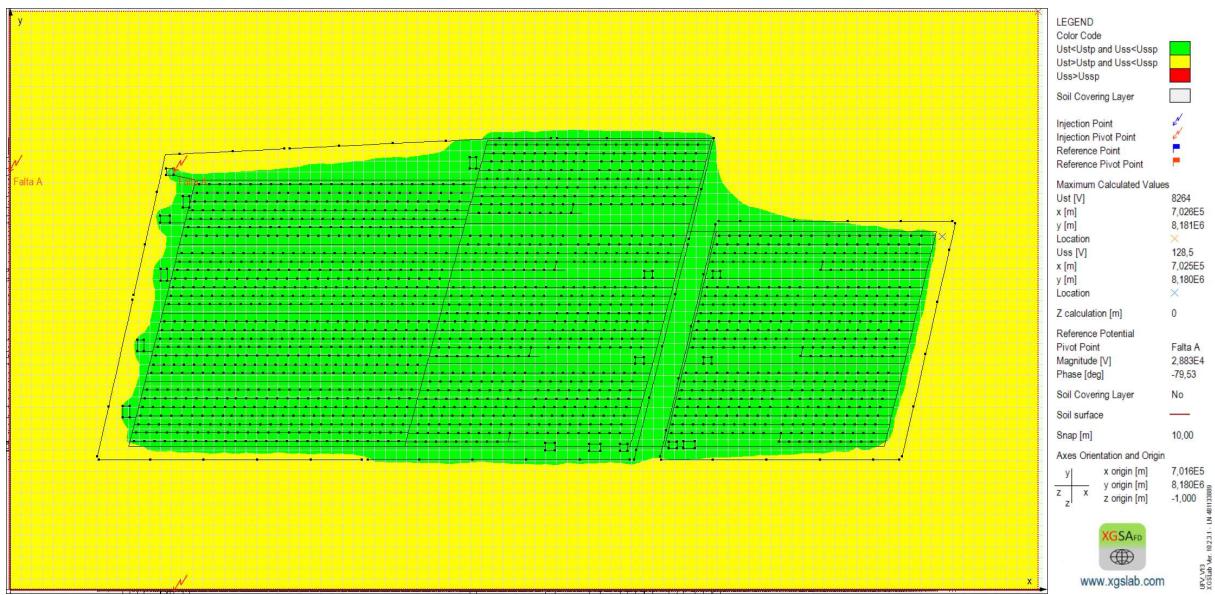
Figura 37: Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local A.



Fonte: Autor.

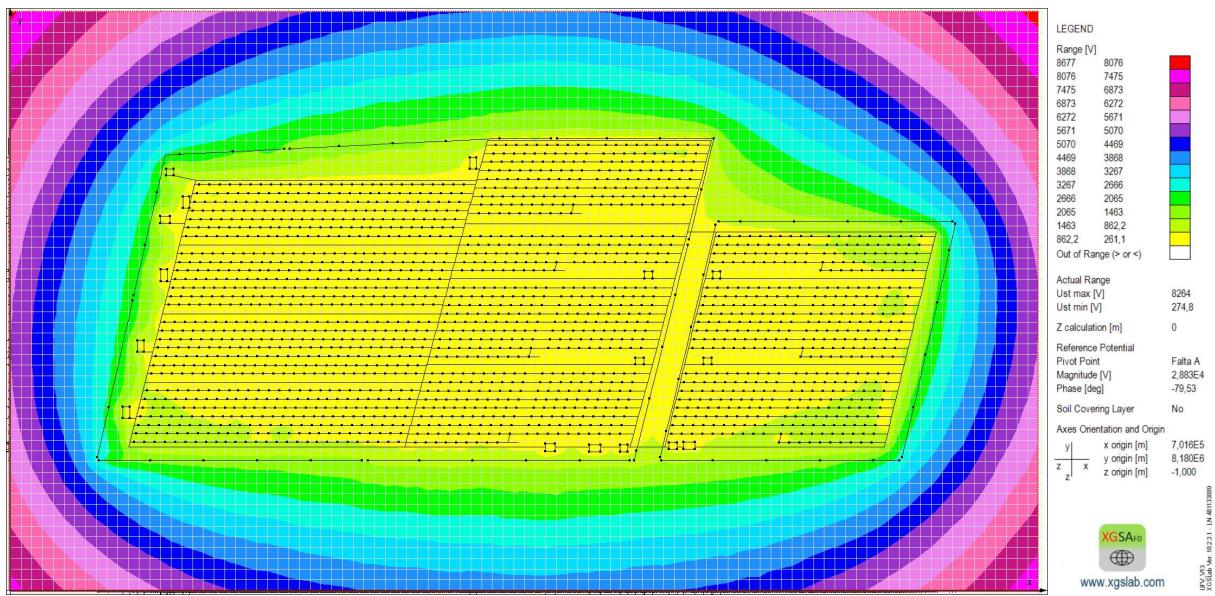
Para o local D, utilizando-se inicialmente os valores de resistividade medidos com o terrômetro, a resistência de aterramento calculada foi de $9,6\Omega$. As Figuras 38, 39 e 40 apresentam os resultados da análise de área segura, tensão de toque e tensão de passo associados a esse cenário.

Figura 38: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar para a resistividade com o terrômetro no local D.



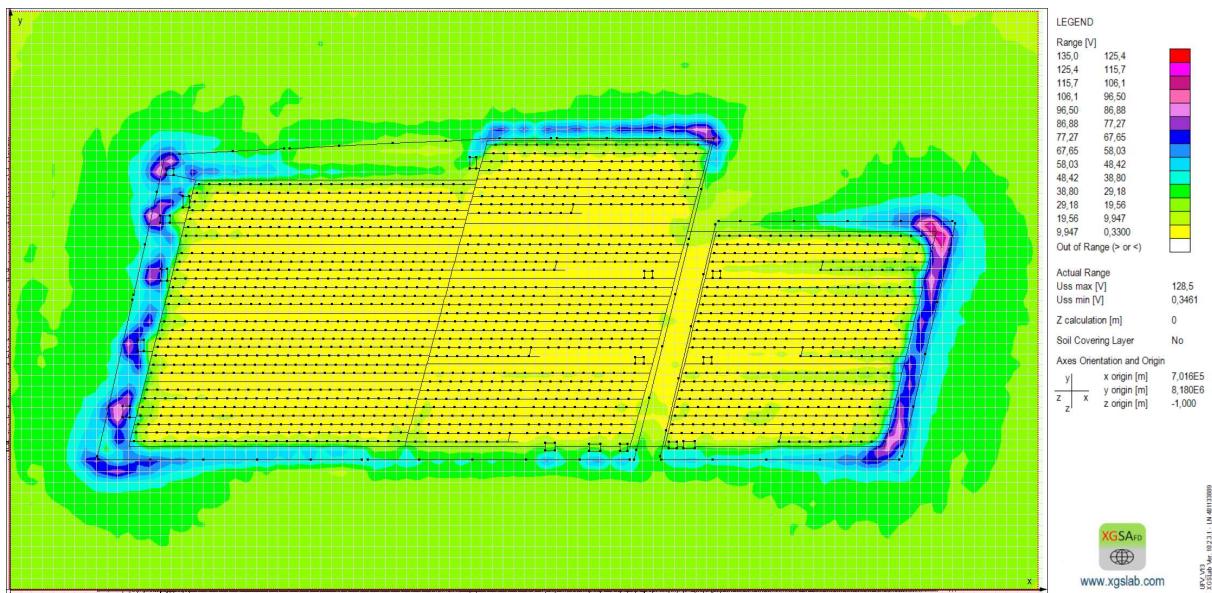
Fonte: Autor.

Figura 39: Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança para a resistividade com o terrômetro no local D.



Fonte: Autor.

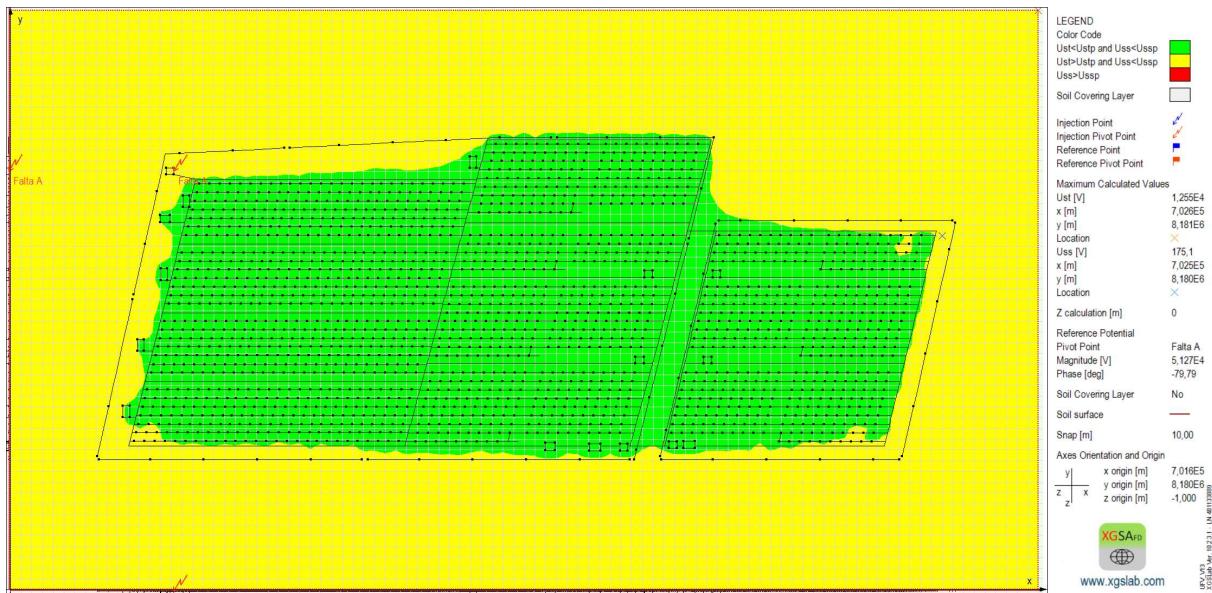
Figura 40: Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local D.



Fonte: Autor.

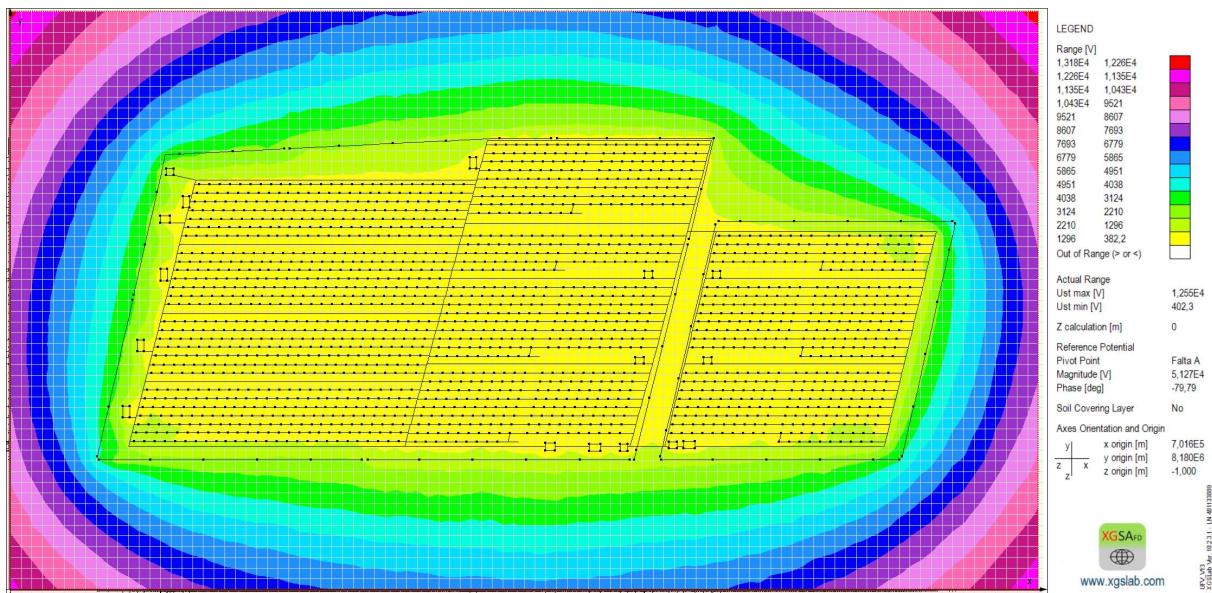
Por fim, no cenário referente ao local D, considerando os valores de resistividade obtidos por meio do resistivímetro, a simulação resultou em uma resistência de aterramento de 17Ω . As Figuras 41, 42 e 43 apresentam os resultados correspondentes à área segura, à tensão de toque e à tensão de passo, completando o conjunto de análises realizadas para o sistema de aterramento da usina fotovoltaica.

Figura 41: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar para a resistividade com o resistivímetro no local D.



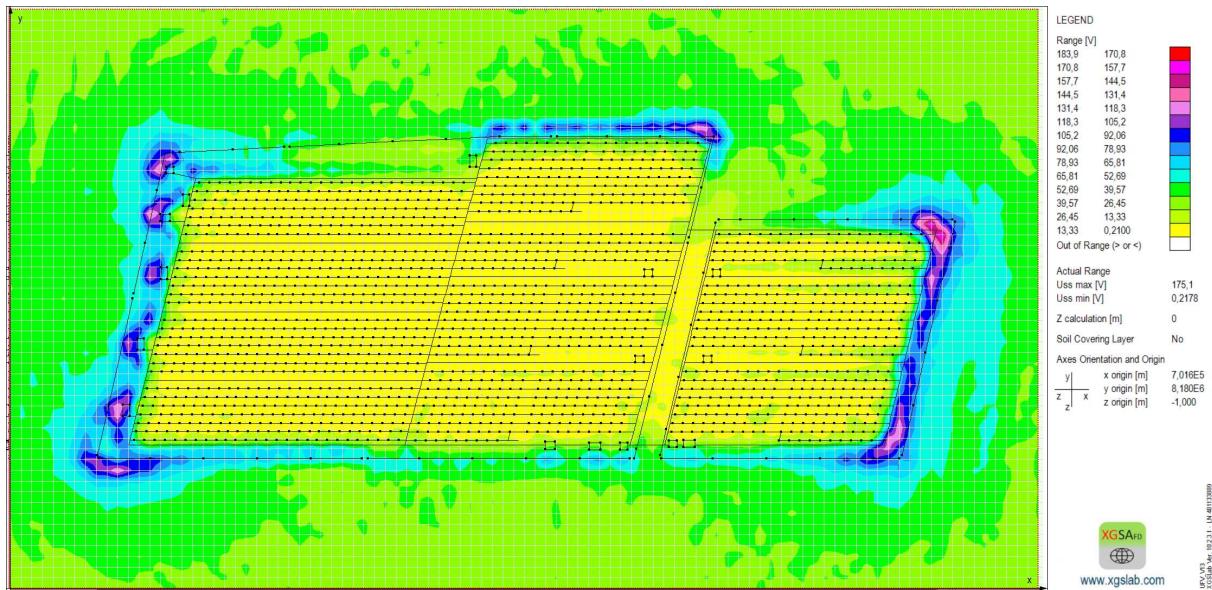
Fonte: Autor.

Figura 42: Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança para a resistividade com o resistivímetro no local D.



Fonte: Autor.

Figura 43: Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local D.



Fonte: Autor.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 32 a 43, que sintetizam os quatro cenários simulados para o sistema de aterramento da usina fotovoltaica, é possível discutir de forma comparativa a sensibilidade do desempenho do aterramento tanto às variações espaciais de resistividade (Locais A e D) quanto às diferenças associadas ao instrumento de medição (terrômetro e resistivímetro). Para organizar a análise, considera-se: Cenário 1 (Local A –

terrômetro; Figuras 32–34), Cenário 2 (Local A – resistivímetro; Figuras 35–37), Cenário 3 (Local D – terrômetro; Figuras 38–40) e Cenário 4 (Local D – resistivímetro; Figuras 41–43).

Comparando-se inicialmente os cenários de baixa resistividade (Local A), observa-se que as diferenças entre instrumentos se mostraram discretas do ponto de vista do comportamento global do sistema. No Cenário 1, obteve-se resistência de aterramento de $0,39\ \Omega$, enquanto no Cenário 2 a resistência foi de $0,35\ \Omega$, evidenciando proximidade entre os resultados quando o solo apresenta melhores condições elétricas. Esse comportamento se reflete nos níveis de tensões: a tensão de toque máxima variou de 989,8 V (Cenário 1) para 959,6 V (Cenário 2), com toque mínimo de 114,0 V e 111,3 V, respectivamente. Para a tensão de passo, embora haja variação do máximo (de 47,54 V no Cenário 1 para 25,32 V no Cenário 2), os valores absolutos permanecem reduzidos, com passo mínimo de 0,130 V e 0,155 V, respectivamente. Em termos práticos, a comparação entre as Figuras 32–37 indica que, em solo de baixa resistividade, as discrepâncias instrumentais tendem a não alterar significativamente a interpretação de segurança do conjunto, sobretudo quando a análise é dominada pelas camadas mais rasas do solo. Nesse sentido, o comportamento aqui observado é coerente com a discussão experimental desenvolvida nos capítulos anteriores: diferentemente do que muitas vezes se assume de forma generalista, em afastamentos menores (tipicamente até 16 m), as divergências entre medições de terrômetro e resistivímetro tendem a ser menos expressivas, reduzindo o impacto sobre a modelagem geoelétrica utilizada no dimensionamento.

Em contrapartida, ao se analisar os cenários de alta resistividade (Local D), as diferenças entre instrumentos tornam-se substancialmente mais evidentes e passam a impactar de forma direta as grandezas de desempenho e, consequentemente, as margens de segurança do aterramento. No Cenário 3, a resistência de aterramento resultou em $9,6\ \Omega$, enquanto no Cenário 4 aumentou para $17\ \Omega$, evidenciando forte sensibilidade do sistema ao modelo geoelétrico quando o solo é mais resistivo. Essa variação foi acompanhada por elevação expressiva das tensões máximas: a tensão de toque máxima aumentou de 8.264 V (Cenário 3) para 12.550 V (Cenário 4), e a tensão de passo máxima de 128,5 V para 175,1 V. Ainda que os valores mínimos se mantenham relativamente baixos (toque mínimo de 274,8 V e 402,3 V; passo mínimo de 0,346 V e 0,218 V), a elevação dos máximos e a alteração do perfil de segurança (Figuras 38–43) indicam um cenário potencialmente mais restritivo. Portanto, os resultados para a usina fotovoltaica evidenciam que o Local D amplifica as diferenças entre terrômetro e resistivímetro, tornando a seleção do instrumento/modelo geoelétrico um fator crítico na avaliação de tensões de passo e de toque e na delimitação de áreas seguras, enquanto no Local A tais diferenças se manifestam de maneira mais discreta.

4.4 SISTEMA DE ATERRAMENTO DO HOSPITAL

4.4.1 Descrição do sistema

O sistema de aterramento de um Hospital, localizado no município de Araguari – MG, foi projetado com o objetivo principal de atender aos requisitos de segurança elétrica e de desempenho exigidos pelos equipamentos de diagnóstico e imagem, caracterizados por elevada sensibilidade a variações de potencial elétrico.

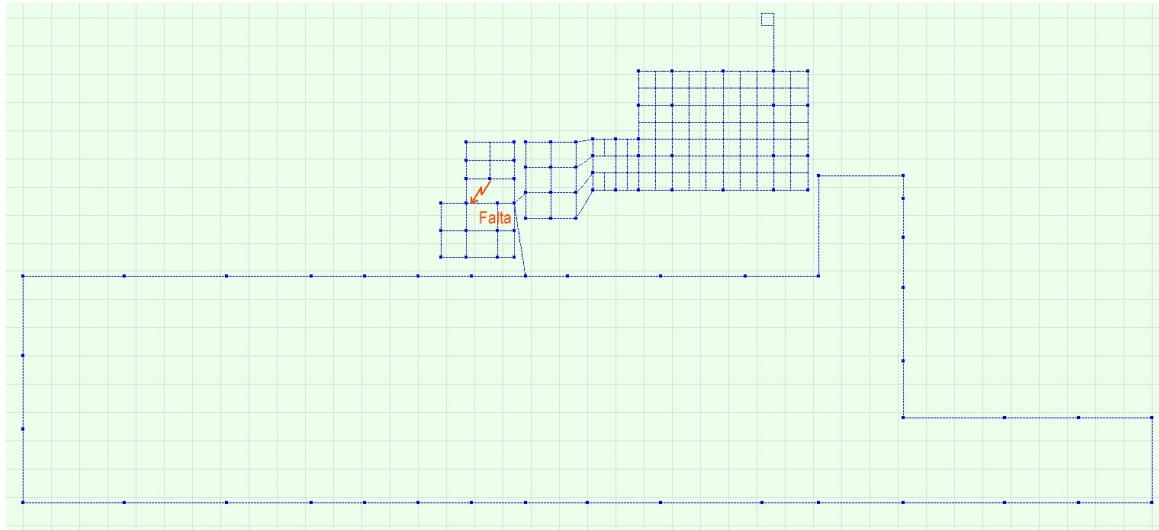
O sistema de aterramento é composto por diferentes malhas interligadas, concebidas para operar de forma integrada, buscando reduzir a resistência global de aterramento e limitar os valores de elevação do potencial de terra (GPR), bem como as tensões de passo e de toque. As principais estruturas que compõem o sistema são descritas a seguir:

- Malha de aterramento destinada aos equipamentos de diagnóstico e imagem (Malha EQUIP), construída com cordoalha de cobre nu de 70 mm², composta por sete fios trançados, instalada sob as áreas onde se encontram equipamentos como ressonância magnética, tomografia computadorizada, fluoroscopia, hemodinâmica e angiografia;
- Malhas de aterramento da subestação de energia e dos grupos geradores, com dimensões aproximadas de 15 × 9 m, também executadas com cordoalha de cobre nu de 70 mm², interligadas à malha principal do hospital;
- Malha periférica associada ao Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), configurada em forma de anel ao longo do perímetro da edificação, utilizando as ferragens das fundações e barras de aço (“re-bar”), contribuindo para a redução da resistência de aterramento global;
- Interligações equipotenciais entre as diferentes malhas, incluindo a conexão ao barramento de equipotencialização principal (BEP), visando garantir a uniformização dos potenciais elétricos e a segurança de pessoas e equipamentos.

O projeto do sistema de aterramento foi desenvolvido considerando critérios térmicos, mecânicos e de segurança estabelecidos por normas nacionais e internacionais. As conexões entre os condutores e eletrodos foram previstas por meio de solda exotérmica, conectores de compressão ou conexões parafusadas em caixas de inspeção, de modo a permitir inspeções periódicas, manutenção e medições futuras.

A Figura 44 apresenta o modelo do sistema de aterramento do Hospital importado para o software XGSLab, onde é possível visualizar a configuração das malhas interligadas, a disposição dos condutores horizontais e a integração com os sistemas de aterramento da subestação e do SPDA.

Figura 44: Sistema de aterramento do hospital parametrizado no software XGSLab.



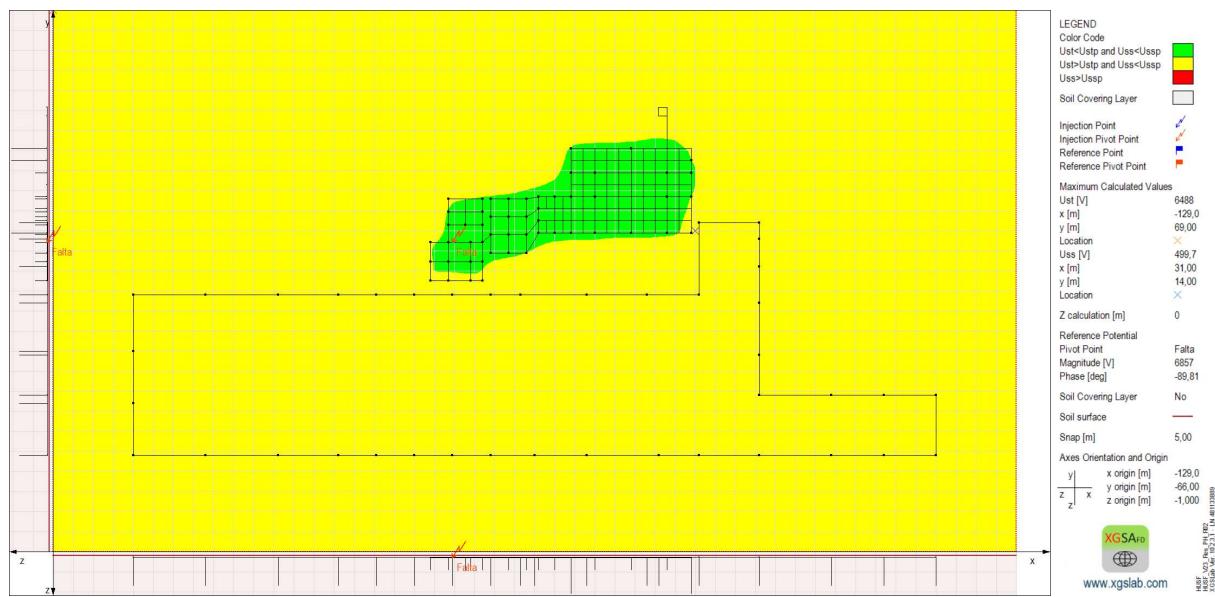
Fonte: Autor.

4.4.2 Análise das variações de resistividade

Foram analisados quatro cenários distintos, definidos a partir dos valores de resistividade obtidos nos locais A e D, empregando-se tanto o terrômetro quanto o resistivímetro. Essa abordagem permitiu avaliar a influência conjunta da variabilidade espacial do solo e das diferenças associadas aos instrumentos de medição sobre o comportamento elétrico do sistema de aterramento do hospital.

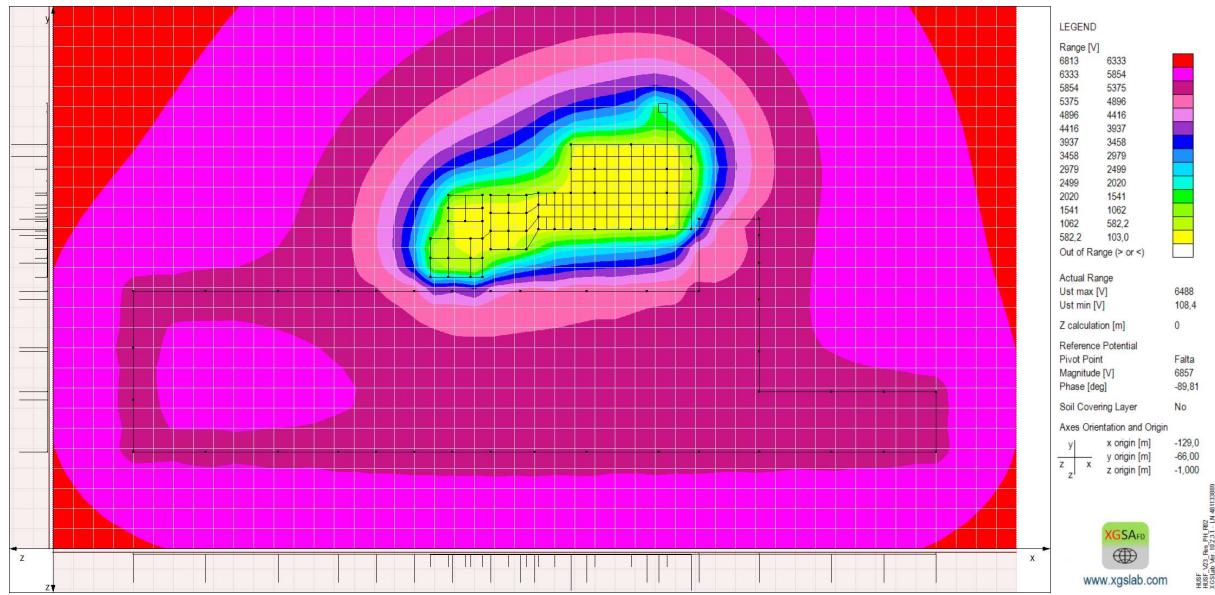
No cenário correspondente ao local A, considerando os valores de resistividade obtidos por meio do terrômetro, a simulação resultou em uma resistência de aterramento de $5,07\Omega$. As Figuras 45, 46 e 47 apresentam, respectivamente, os resultados referentes à área segura, à tensão de toque e à tensão de passo para esse cenário, evidenciando a distribuição dos potenciais na superfície do solo nas áreas acessíveis do hospital.

Figura 45: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema do hospital para a resistividade com o terrômetro no local A.



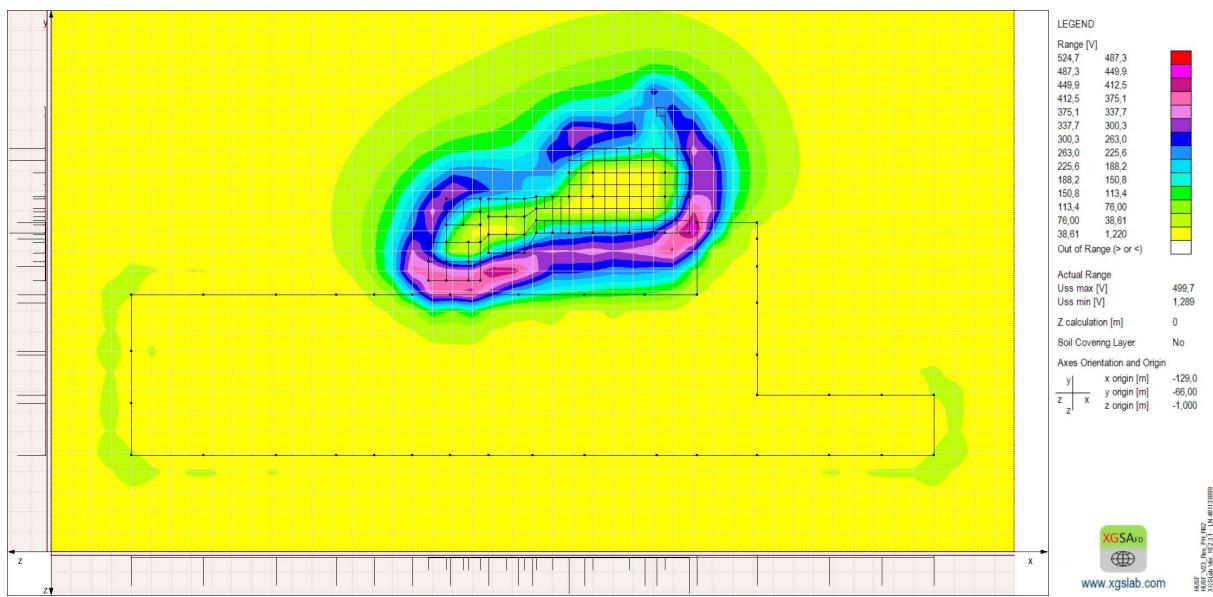
Fonte: Autor.

Figura 46: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área do hospital para a resistividade com o terrômetro no local A.



Fonte: Autor.

Figura 47: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área do hospital para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local A.



Fonte: Autor.

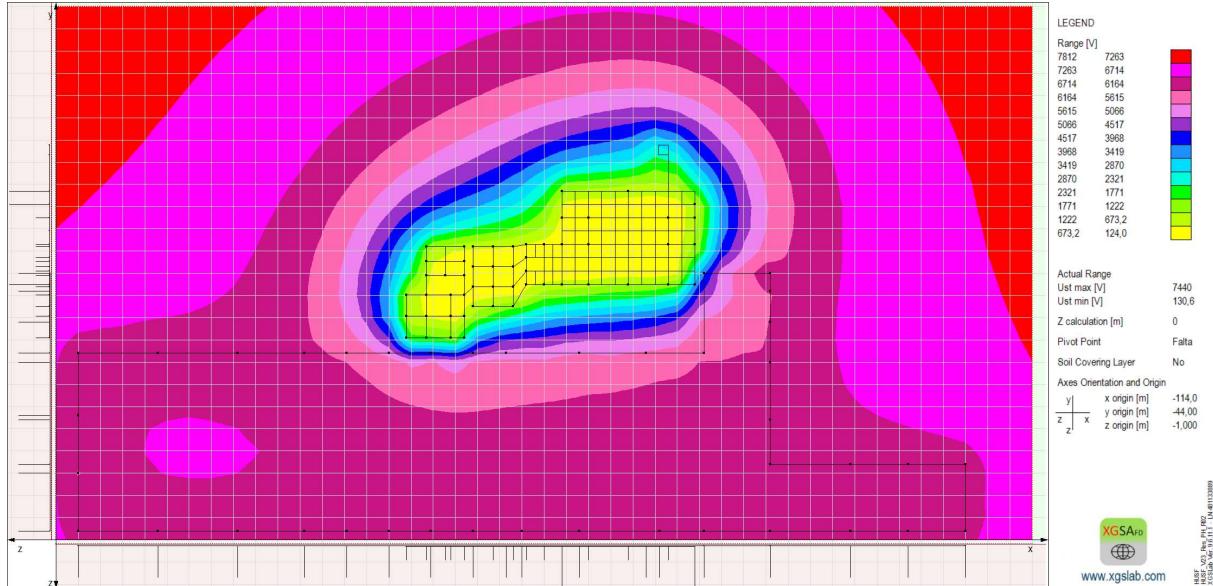
Para o local A, ao se adotar os valores de resistividade determinados com o resistivímetro, foi obtida uma resistência de aterramento de $5,74\Omega$. As Figuras 48, 49 e 50 ilustram os resultados correspondentes à área segura, à tensão de toque e à tensão de passo, permitindo avaliar as diferenças decorrentes da utilização de distintos instrumentos de medição, mantendo-se inalterada a configuração do sistema.

Figura 48: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema do hospital para a resistividade com o resistivímetro no local A.



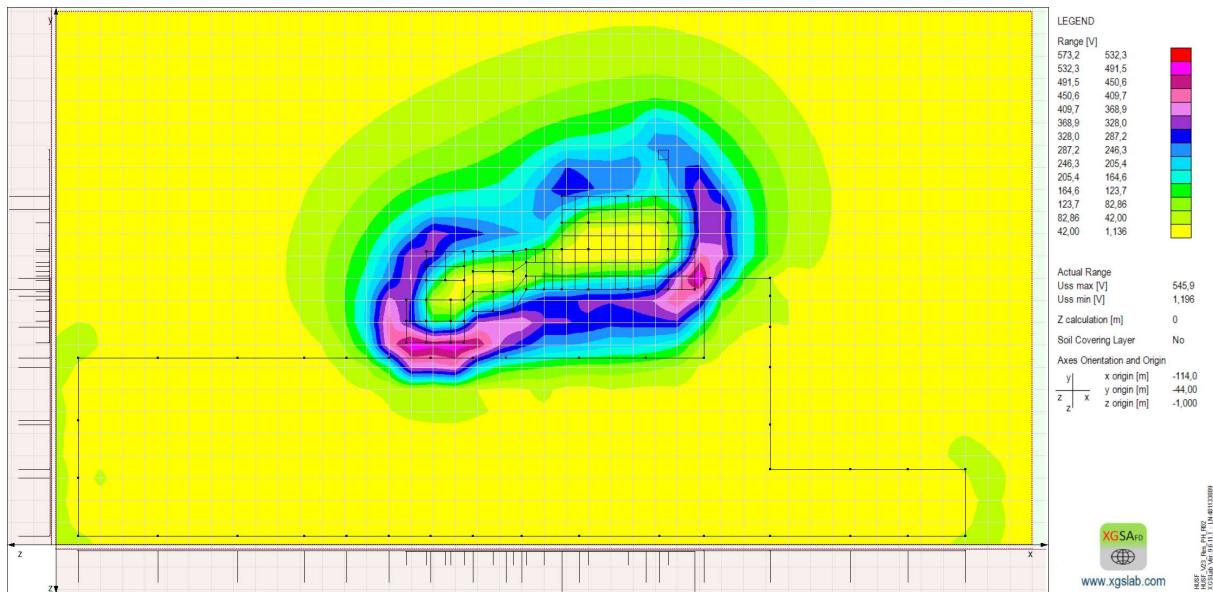
Fonte: Autor.

Figura 49: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área do hospital para a resistivímetro no local A.



Fonte: Autor.

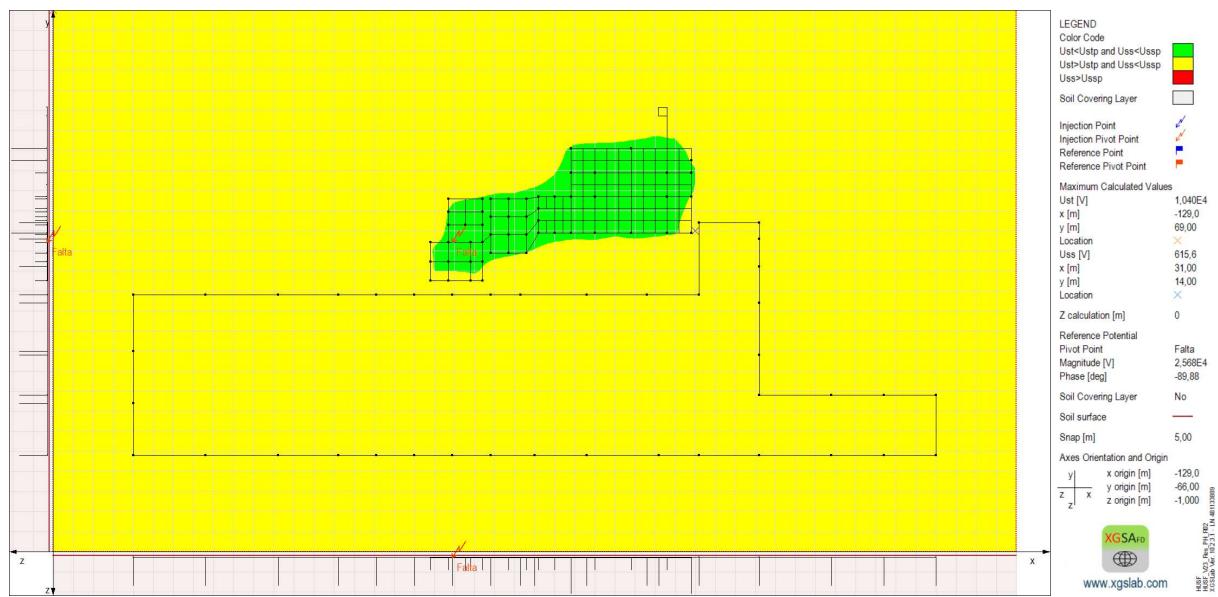
Figura 50: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área do hospital para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local A.



Fonte: Autor.

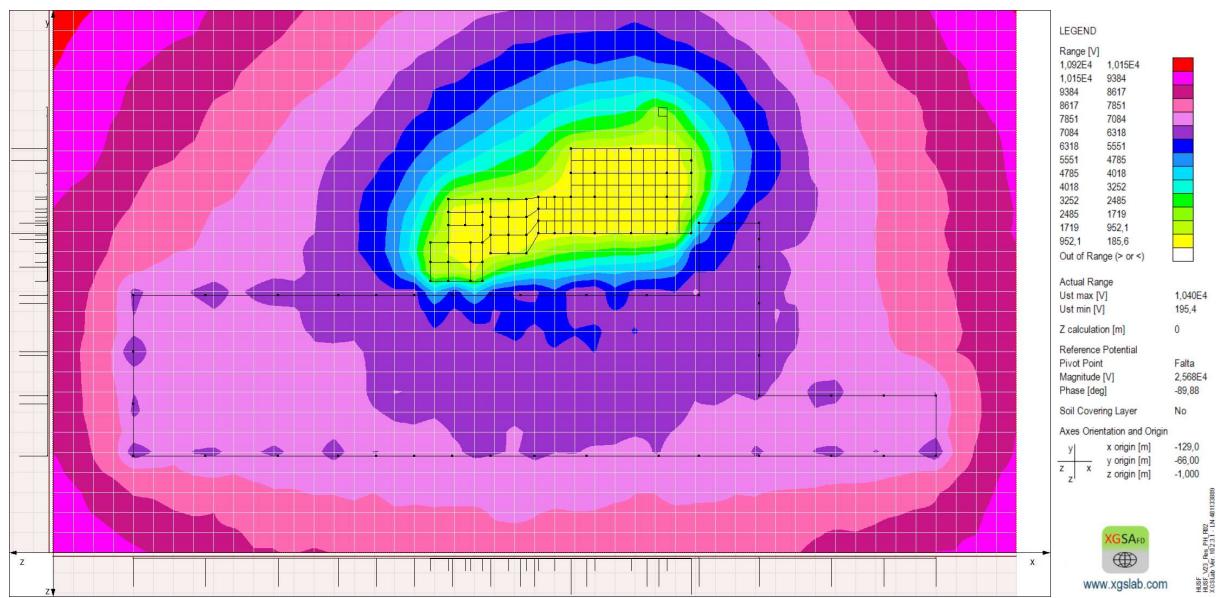
No local D, considerando inicialmente os valores de resistividade medidos com o terrômetro, a resistência de aterramento calculada foi de 19Ω . As Figuras 51, 52 e 53 apresentam os resultados associados à análise de área segura, tensão de toque e tensão de passo, destacando o comportamento do sistema em um solo com características elétricas distintas.

Figura 51: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema do hospital para a resistividade com o terrômetro no local D.



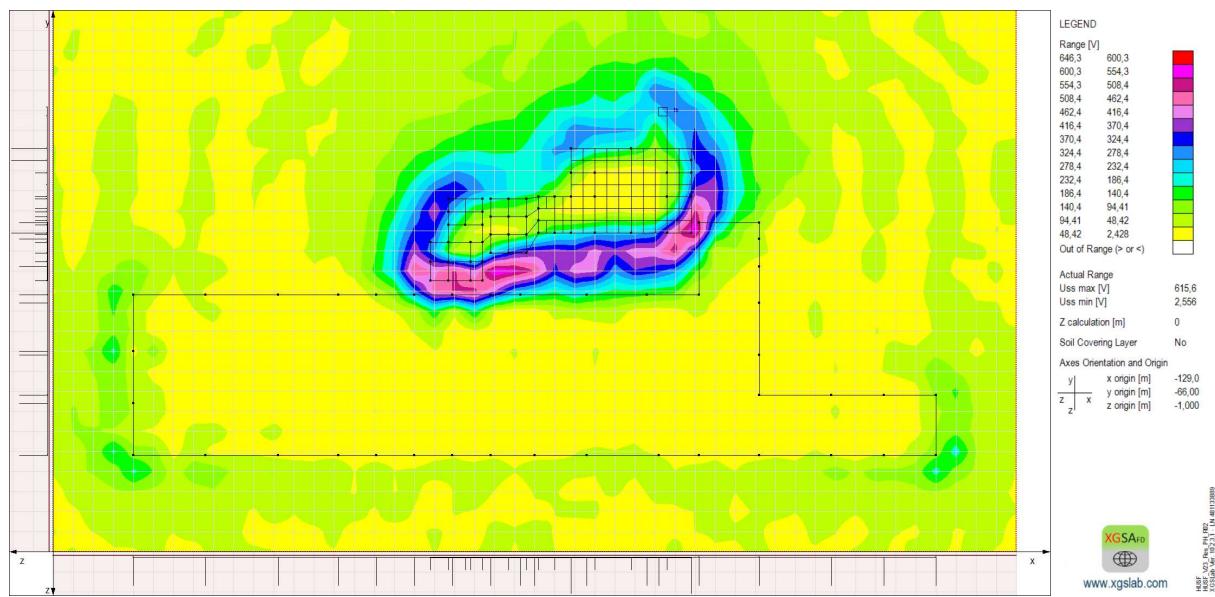
Fonte: Autor.

Figura 52: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área do hospital para a resistividade com o terrômetro no local D.



Fonte: Autor.

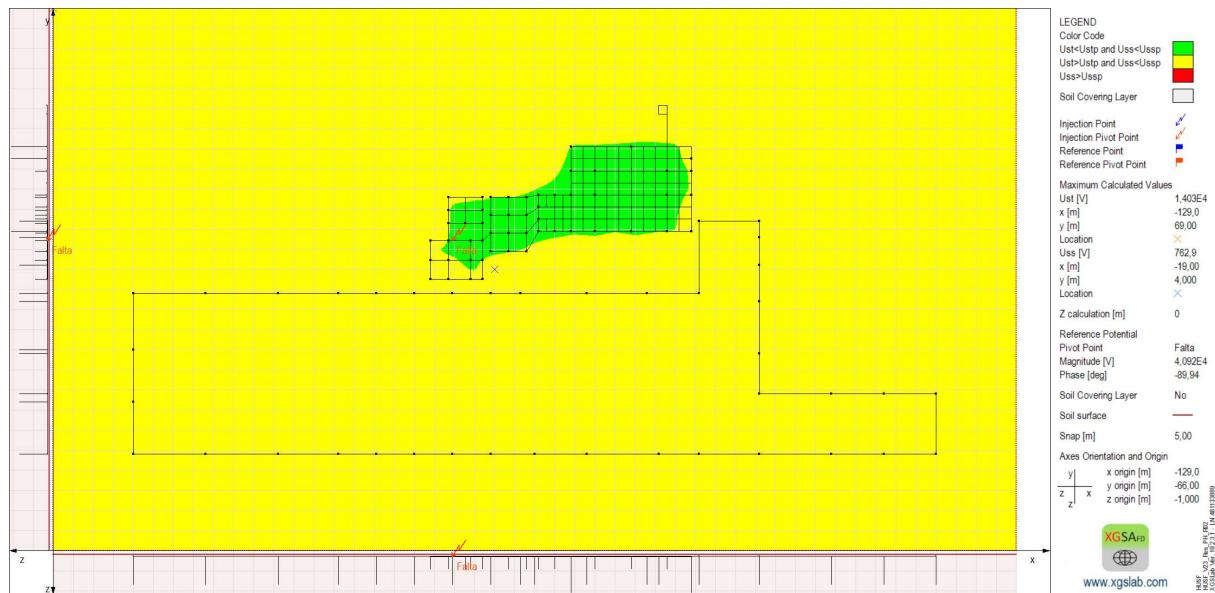
Figura 53: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área do hospital para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local D.



Fonte: Autor.

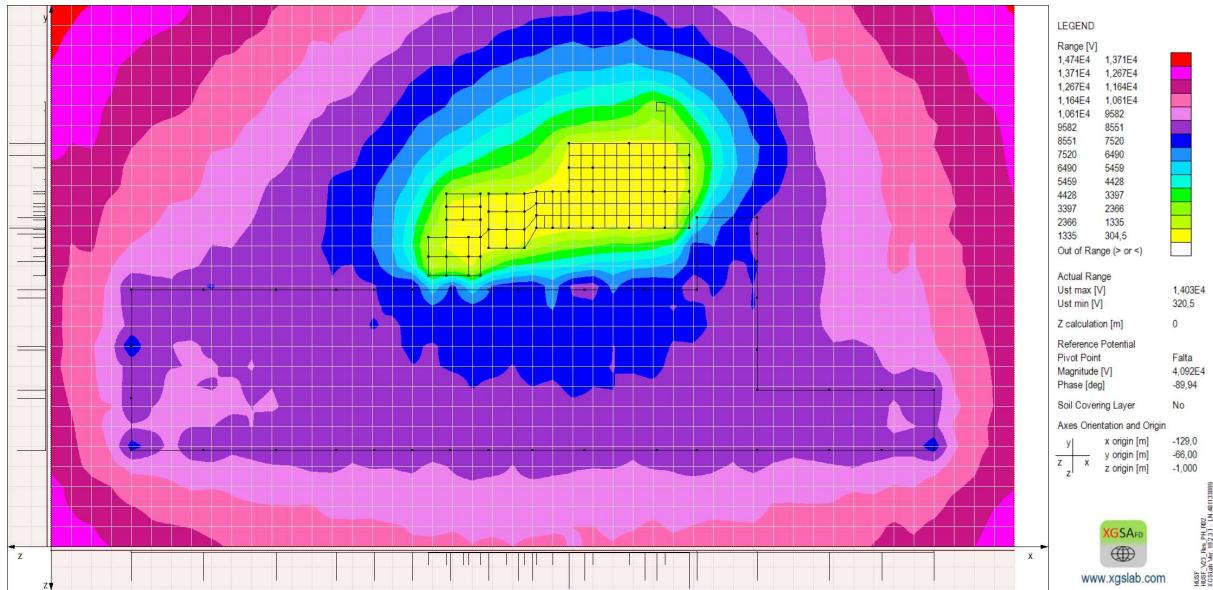
Por fim, para o local D, adotando-se os valores de resistividade obtidos por meio do resistivímetro, a simulação resultou em uma resistência de aterramento de 30Ω . As Figuras 54, 55 e 56 apresentam os resultados referentes à área segura, à tensão de toque e à tensão de passo, completando o conjunto de análises realizadas para o sistema de aterramento do hospital.

Figura 54: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema do hospital para a resistividade com o resistivímetro no local D.



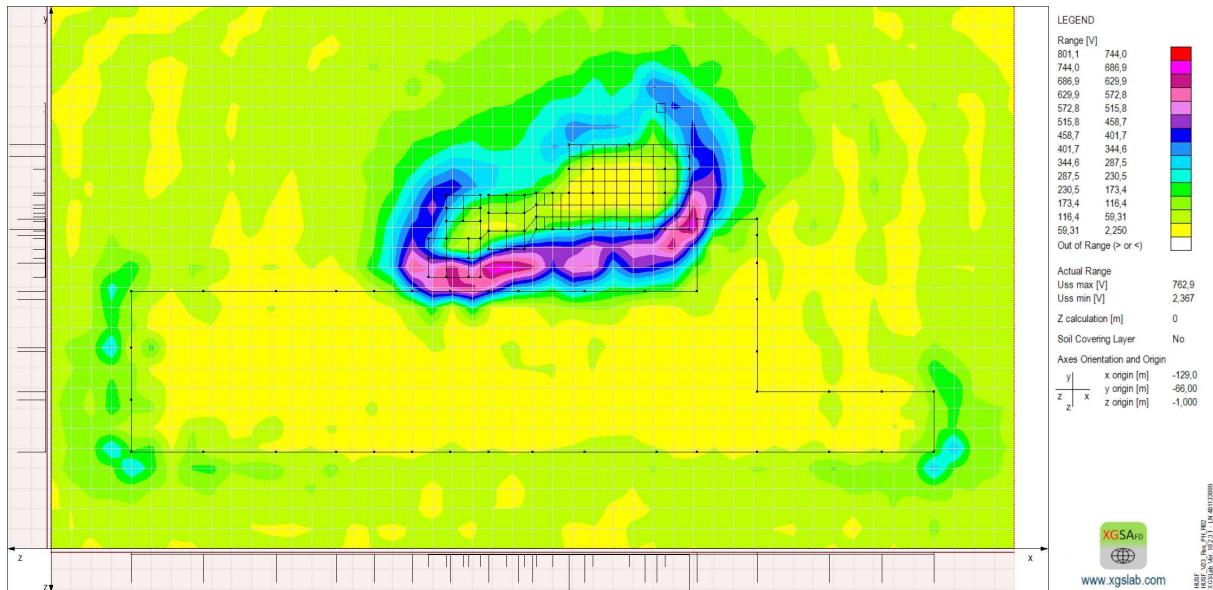
Fonte: Autor.

Figura 55: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área do hospital para a resistivímetro no local D.



Fonte: Autor.

Figura 56: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área do hospital para uma pessoa de 50 Kg, com a resistivímetro no local D.



Fonte: Autor.

Com base nas Figuras 45 a 56, que apresentam os quatro cenários simulados para o sistema de aterramento do hospital, pode-se discutir de forma consolidada o efeito das diferenças entre instrumentos na modelagem geoelétrica do solo e sua repercussão sobre as grandezas de segurança. Para fins de referência, considera-se: Cenário 1 (Local A – terrômetro; Figuras 45–47), Cenário 2 (Local A – resistivímetro; Figuras 48–50), Cenário 3 (Local D – terrômetro; Figuras 51–53) e Cenário 4 (Local D – resistivímetro; Figuras 54–56). Ressalta-se

que, em instalações hospitalares, as exigências de segurança e desempenho são particularmente relevantes, tanto pela presença de áreas acessíveis quanto pela elevada sensibilidade de equipamentos e pela necessidade de limitar gradientes de potencial.

No Local A (baixa resistividade), a comparação entre os Cenários 1 e 2 indica diferenças moderadas em resistência de aterramento, com $5,07\ \Omega$ no Cenário 1 e $5,74\ \Omega$ no Cenário 2. Essa variação repercute nos níveis máximos das tensões, elevando a tensão de toque máxima de 6.488 V para 7.440 V e a tensão de passo máxima de 499,7 V para 545,9 V. Observa-se também aumento nos valores mínimos de toque (de 108,4 V para 130,6 V) e pequena variação nos mínimos de passo (de 1,289 V para 1,196 V). Em termos interpretativos, as Figuras 45–50 sugerem que, mesmo em solo mais favorável, o sistema hospitalar pode apresentar valores de tensão elevados em termos absolutos, de modo que diferenças instrumentais, ainda que não extremas, podem representar redução de margem em regiões críticas. Essa leitura permanece alinhada à evidência experimental dos capítulos anteriores, reforçando que, para afastamentos menores (até 16 m) — associados às camadas superficiais —, o erro relativo entre instrumentos tende a ser menos determinante; porém, em sistemas mais sensíveis, mesmo variações moderadas podem ser relevantes do ponto de vista de projeto e verificação.

A distinção torna-se mais clara quando se avaliam os cenários de alta resistividade (Local D). No Cenário 3, obteve-se resistência de aterramento de $19\ \Omega$, enquanto no Cenário 4 o valor aumentou para $30\ \Omega$, indicando forte dependência do desempenho ao modelo geoelétrico quando o solo é resistivo. Esse comportamento se refletiu em aumentos consistentes dos níveis máximos: a tensão de toque máxima passou de 10.400 V para 14.030 V, e a tensão de passo máxima de 615,6 V para 762,9 V. Também houve elevação do toque mínimo (de 195,4 V para 320,5 V) e pequena variação no passo mínimo (de 2,556 V para 2,367 V). Assim, a comparação entre as Figuras 51–56 evidencia que, no Local D, as divergências entre terrômetro e resistivímetro se tornam mais evidentes e potencialmente críticas, podendo alterar a extensão e o rigor das áreas seguras e demandar estratégias de mitigação e reforço (equipotencialização local, ajustes de topologia, camadas superficiais, entre outras), dependendo dos critérios adotados. Em síntese, para o hospital, os resultados confirmam que solos resistentes amplificam a discrepância entre instrumentos e elevam significativamente as tensões de passo e toque, enquanto no Local A o efeito tende a ser mais discreto, embora não desprezível em termos de margem de segurança.

4.5 SISTEMA DE ATERRAMENDO DA SUBSESTAÇÃO

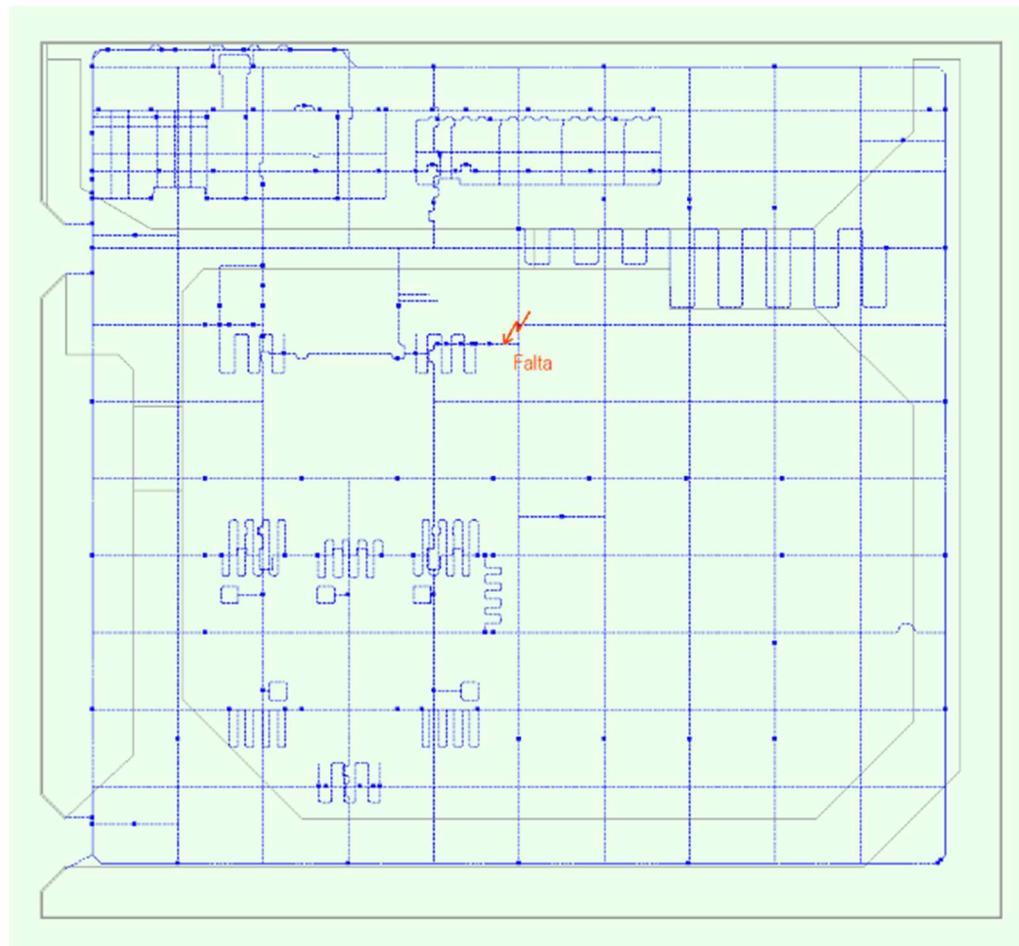
4.5.1 Descrição do sistema

O sistema de aterramento da subestação possui área aproximada de 10.700 m², com dimensões de 107 × 100 m, sendo composto pelas seguintes estruturas principais:

- Malha de aterramento principal, com reticulado médio de 10,65 × 9,60 m, instalada a uma profundidade de 1,1 m. Sua construção é realizada com cabo de cobre nu de 70 mm²;
- Malha de aterramento de equipotencialização, cuja finalidade é reduzir as distâncias da malha principal sob determinados equipamentos do sistema elétrico, promovendo a equipotencialização local. Essa malha está situada a aproximadamente 20 cm de profundidade, interligada à malha principal e construída com cabo de cobre nu de 70 mm²;
- Malha de aterramento periférica, com configuração em forma de anel circundando toda a periferia da malha principal, instalada a uma profundidade de 60 cm e interligada à malha principal. Sua construção também é realizada com cabo de cobre nu de 70 mm²;
- Hastes de aterramento em cobre, com diâmetro de 5/8” e comprimento de 3,0 m, instaladas verticalmente em diversos pontos ao longo da malha;
- Poços para eletrodos profundos.

A Figura 57 apresenta o sistema de aterramento da Subestação Trindade importado para o software XGSLab. Observa-se que os eletrodos horizontais de aterramento estão representados pela cor azul, enquanto as hastes verticais são indicadas por pontos azuis distribuídos ao longo da malha. Ressalta-se que as linhas na cor cinza representam os muros e os arruamentos internos da subestação.

Figura 57: Sistema de aterramento da SE Trindade parametrizado no software XGSLab.



Fonte: Autor.

4.5.2 Análise das variações de resistividade

A influência da resistividade do solo sobre o comportamento do sistema de aterramento da subestação de Trindade foi avaliada por meio de simulações computacionais realizadas no software XGSLab. Em todas as simulações, a topologia do sistema de aterramento e os parâmetros geométricos da instalação foram mantidos constantes, sendo alterados apenas os valores de resistividade do solo, de forma a evidenciar seu impacto direto sobre os resultados elétricos e os critérios de segurança.

Foram definidos quatro cenários de análise a partir dos valores de resistividade obtidos nos locais A e D, considerando medições realizadas com terrômetro e resistivímetro. Essa combinação permitiu analisar não apenas a influência da variabilidade do solo, mas também a sensibilidade do sistema de aterramento da subestação às diferenças provenientes dos métodos de medição empregados.

No cenário associado ao local A, com resistividade determinada por meio do terrômetro, a simulação resultou em uma resistência de aterramento de $1,7\Omega$. As Figuras 58, 59 e 60

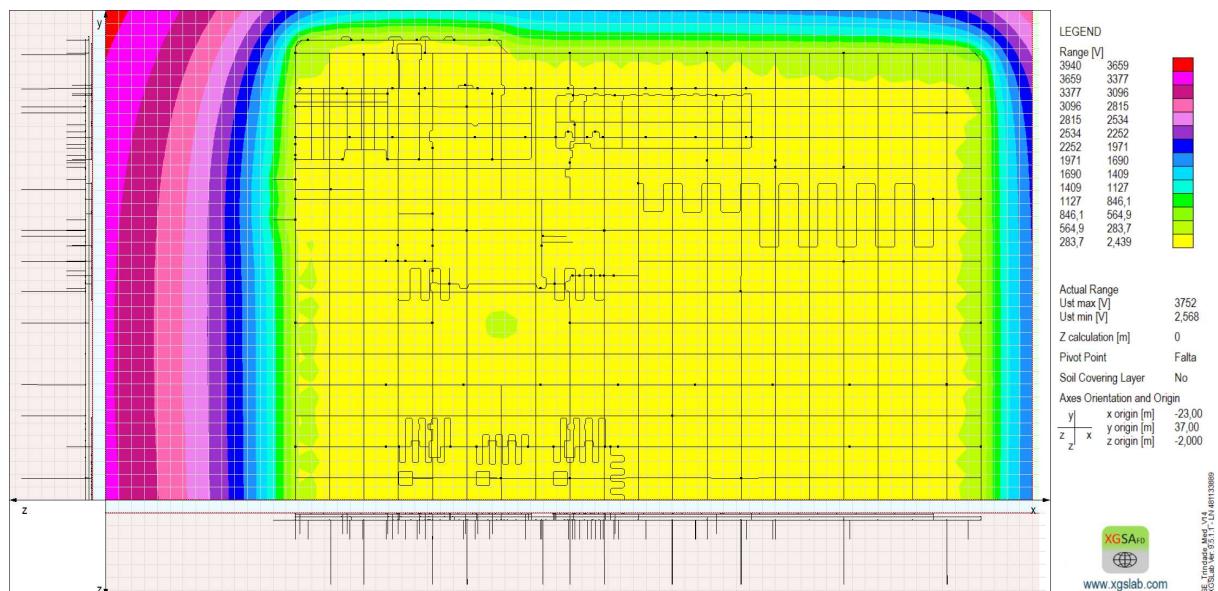
apresentam, respectivamente, a delimitação da área segura, a distribuição da tensão de toque e a distribuição da tensão de passo, evidenciando a formação de gradientes de potencial na superfície do solo característicos de sistemas submetidos a elevadas correntes de falta.

Figura 58: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema da subestação Trindade para a resistividade com o terrômetro no local A.



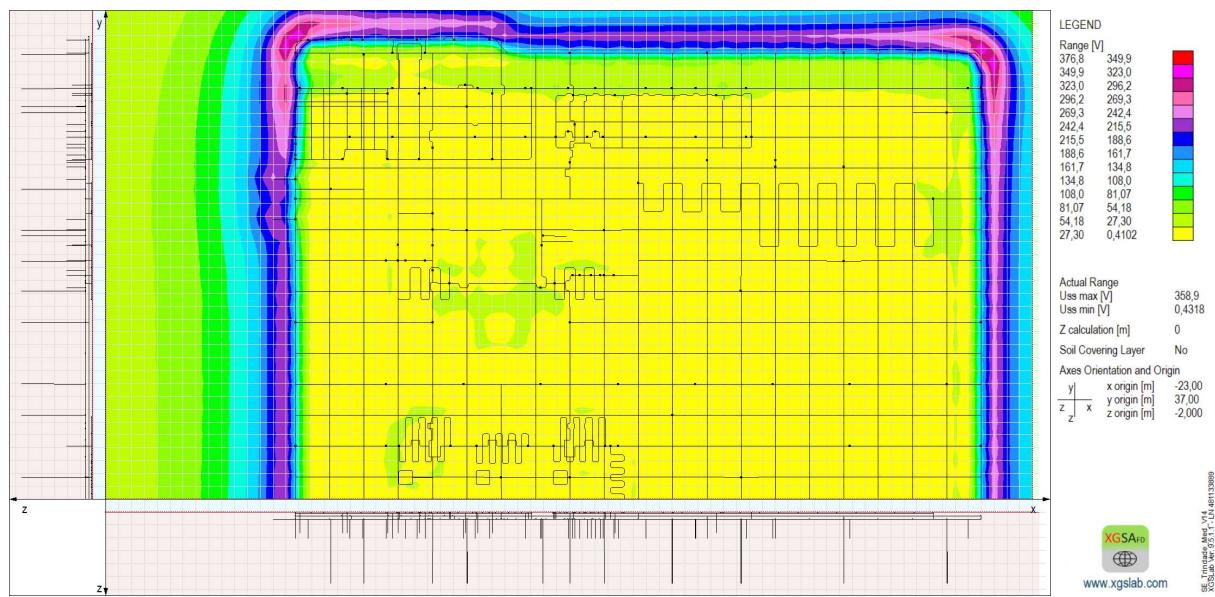
Fonte: Autor.

Figura 59: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área da subestação Trindade para a resistividade com o terrômetro no local A.



Fonte: Autor.

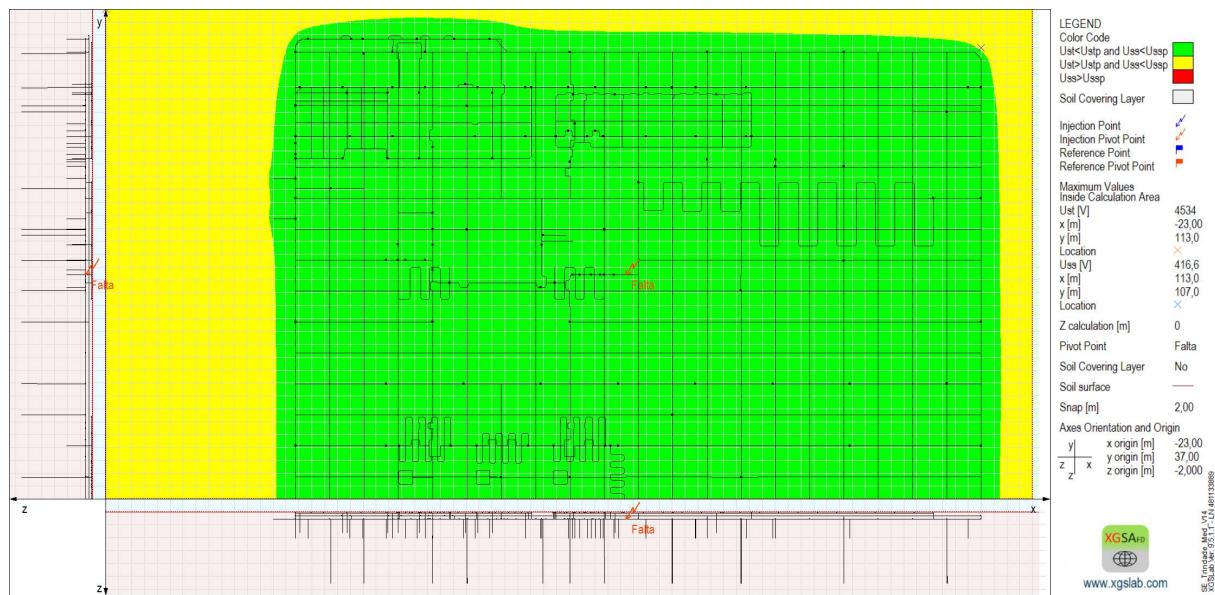
Figura 60: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área da subestação Trindade para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local A.



Fonte: Autor.

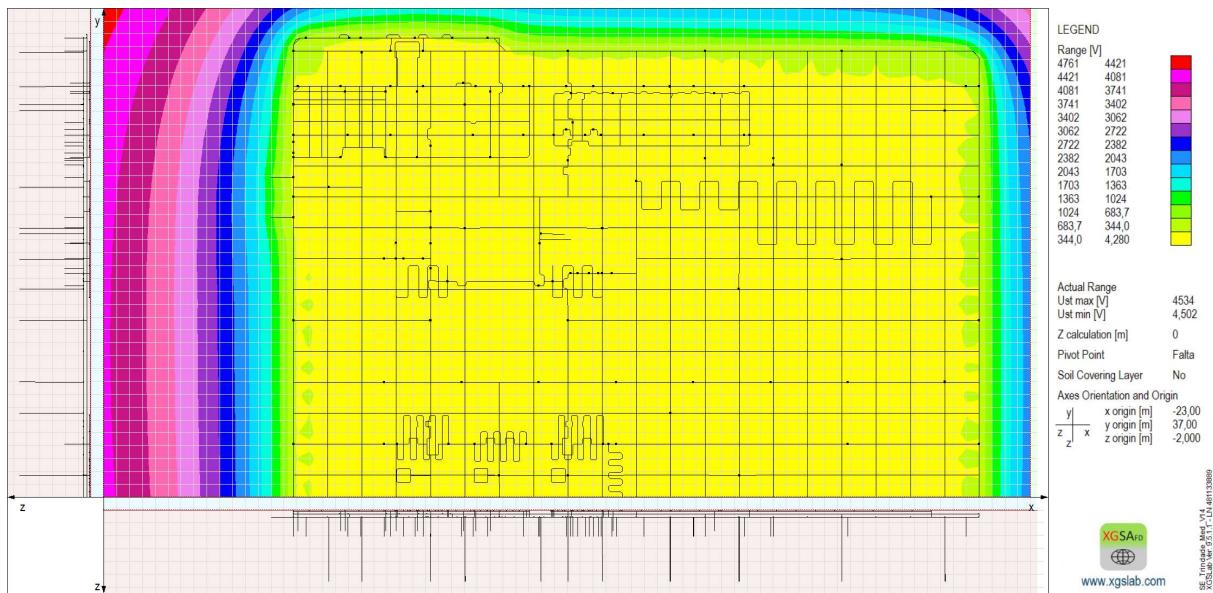
Ao se considerar, ainda para o local A, os valores de resistividade obtidos com o resistivímetro, foi obtida uma resistência de aterramento de $1,96\Omega$. As Figuras 61, 62 e 63 ilustram os resultados correspondentes à área segura, à tensão de toque e à tensão de passo, permitindo observar as alterações na distribuição dos potenciais decorrentes da variação dos parâmetros elétricos do solo.

Figura 61: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema da subestação Trindade para a resistividade com o resistivímetro no local A.



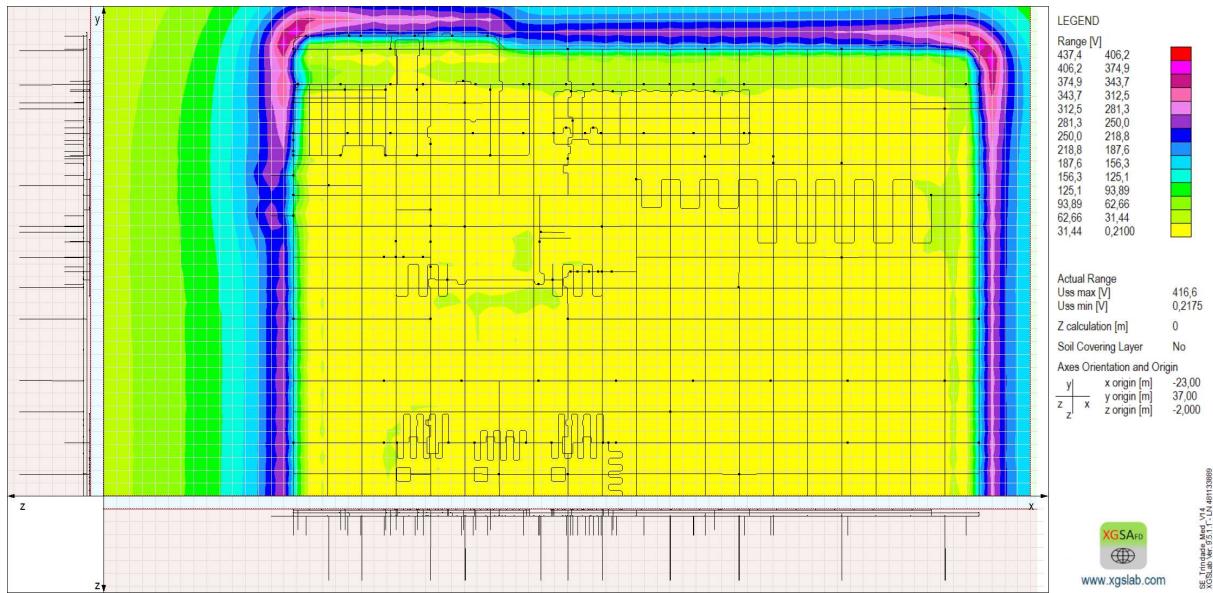
Fonte: Autor.

Figura 62: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área da subestação Trindade para a resistivímetro com o resistivímetro no local A.



Fonte: Autor.

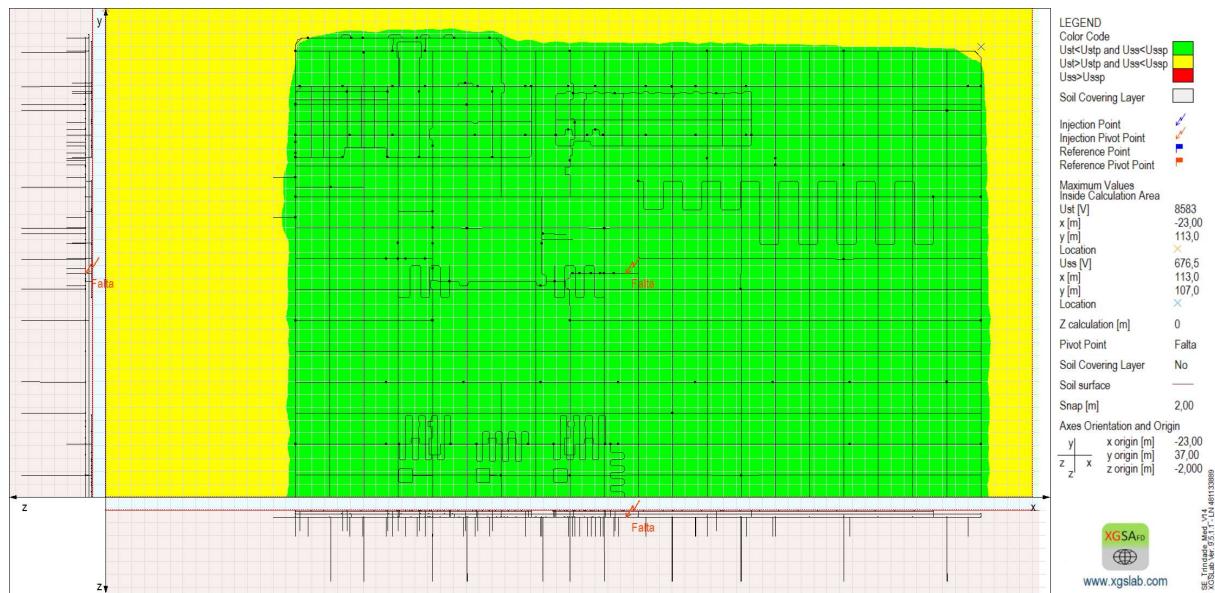
Figura 63: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área da subestação Trindade para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local A.



Fonte: Autor.

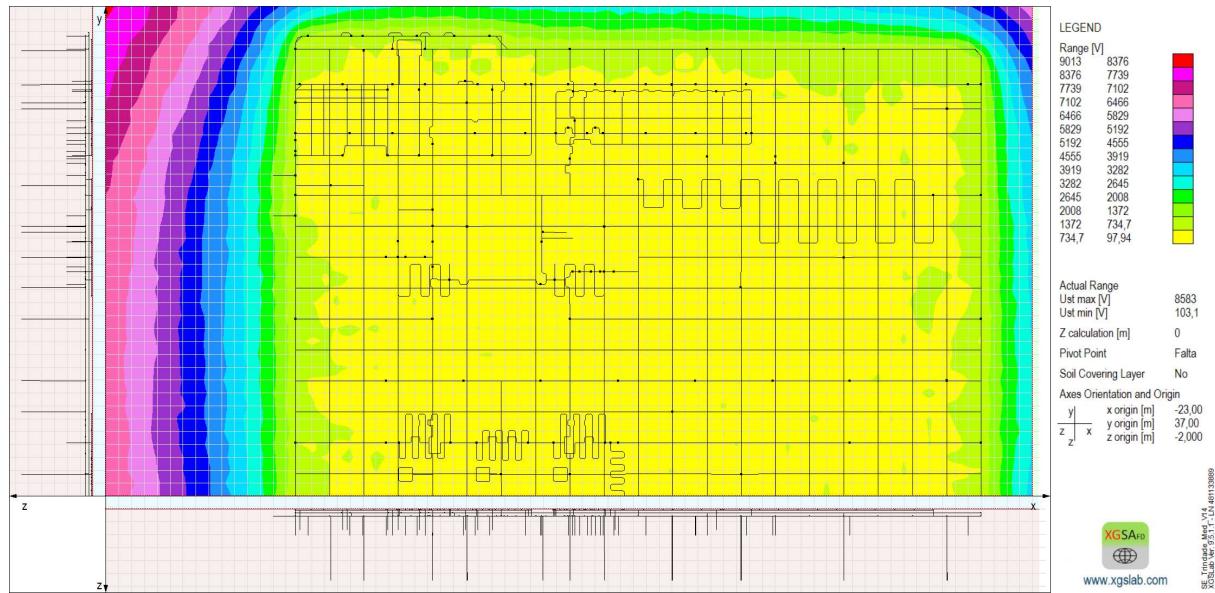
Para o local D, utilizando-se inicialmente os valores de resistividade medidos com o terrômetro, a resistência de aterramento calculada foi de $15,47\Omega$. As Figuras 64, 65 e 66 apresentam os resultados associados à análise da área segura, da tensão de toque e da tensão de passo, destacando diferenças na extensão das regiões seguras e nos níveis máximos das tensões em função das características do solo.

Figura 64: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema da subestação Trindade para a resistividade com o terrômetro no local D.



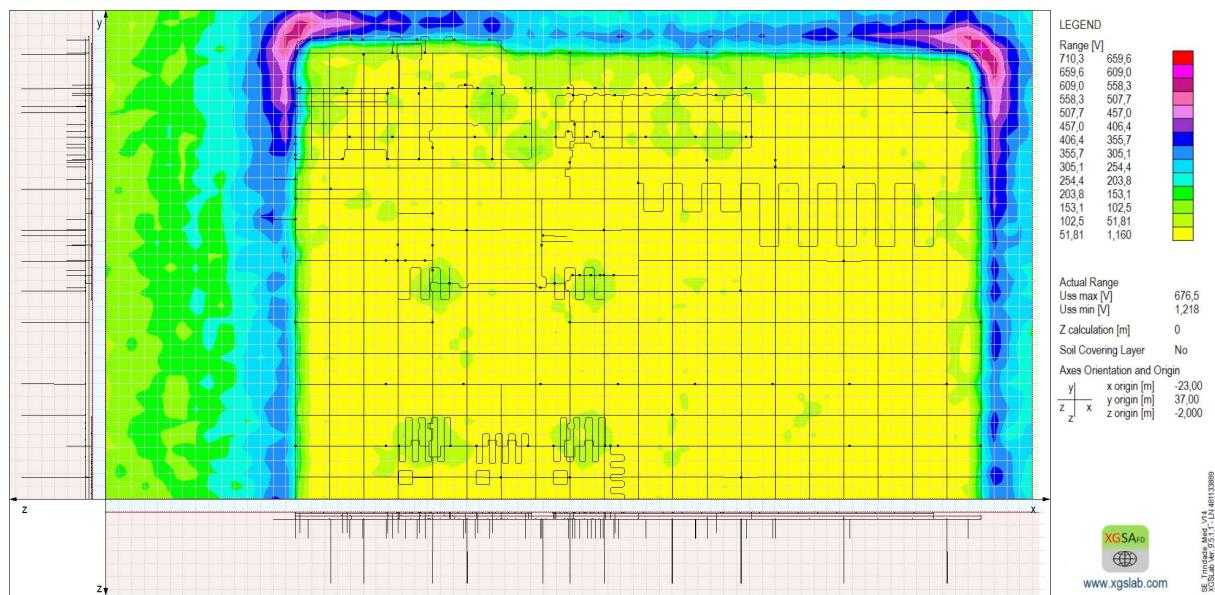
Fonte: Autor.

Figura 65: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área da subestação Trindade para a resistividade com o terrômetro no local D.



Fonte: Autor.

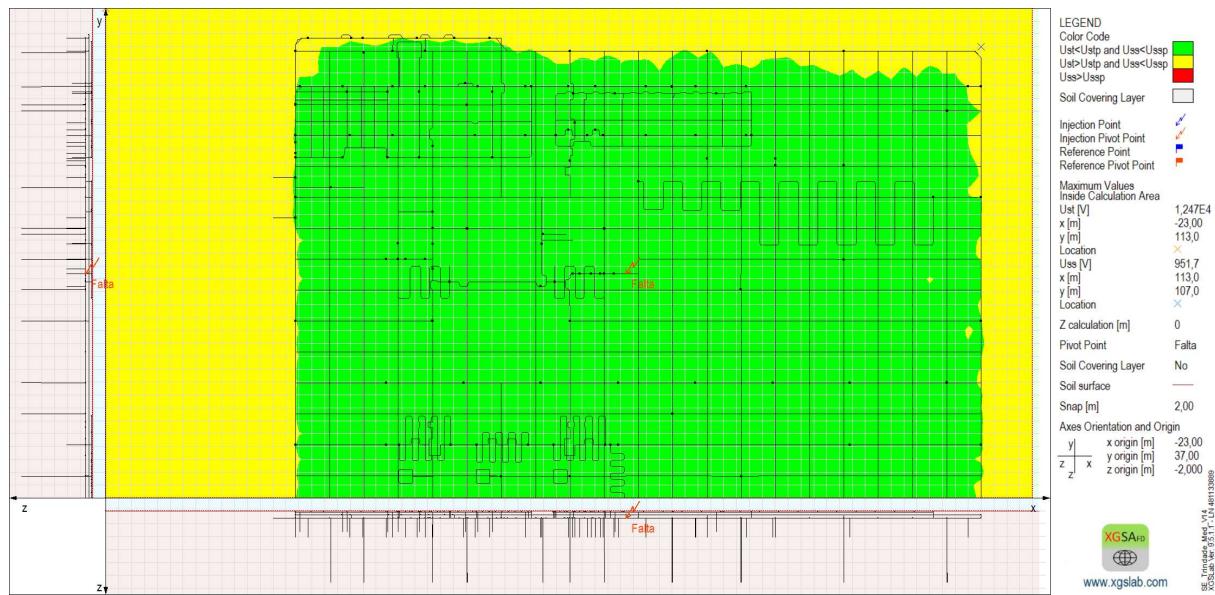
Figura 66: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área da subestação Trindade para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do terrômetro no local D.



Fonte: Autor.

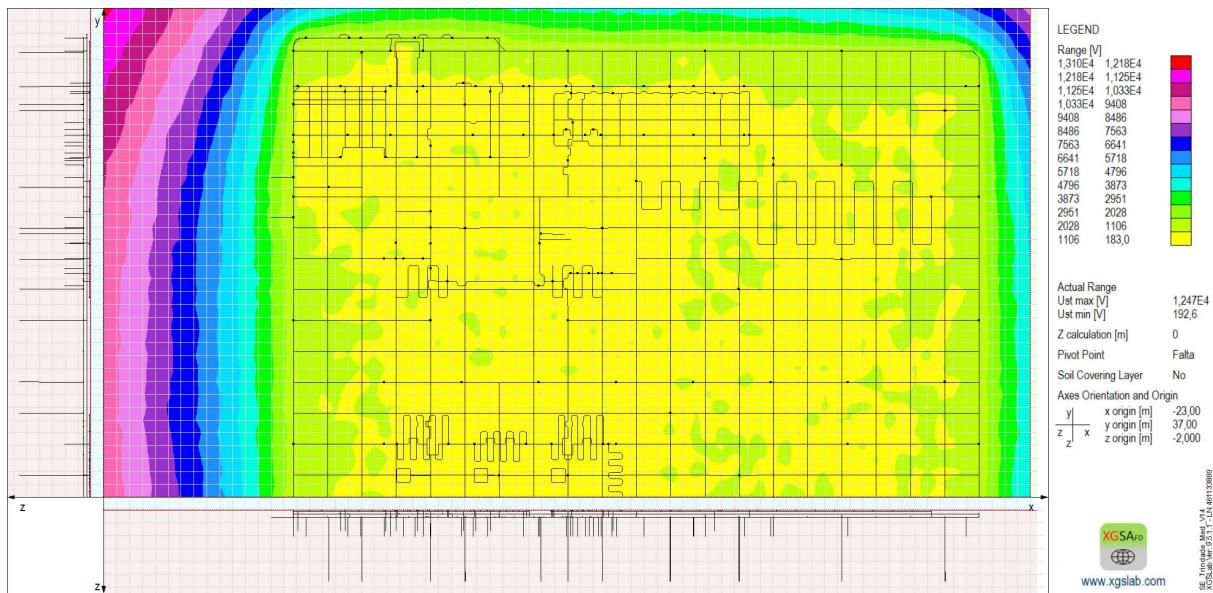
Por fim, no cenário correspondente ao local D, adotando-se os valores de resistividade determinados por meio do resistivímetro, a simulação resultou em uma resistência de aterramento de $26,04\Omega$. As Figuras 67, 68 e 69 apresentam os resultados finais da análise, completando a avaliação do impacto das variações de resistividade.

Figura 67: Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no sistema da subestação Trindade para a resistividade com o resistivímetro no local D.



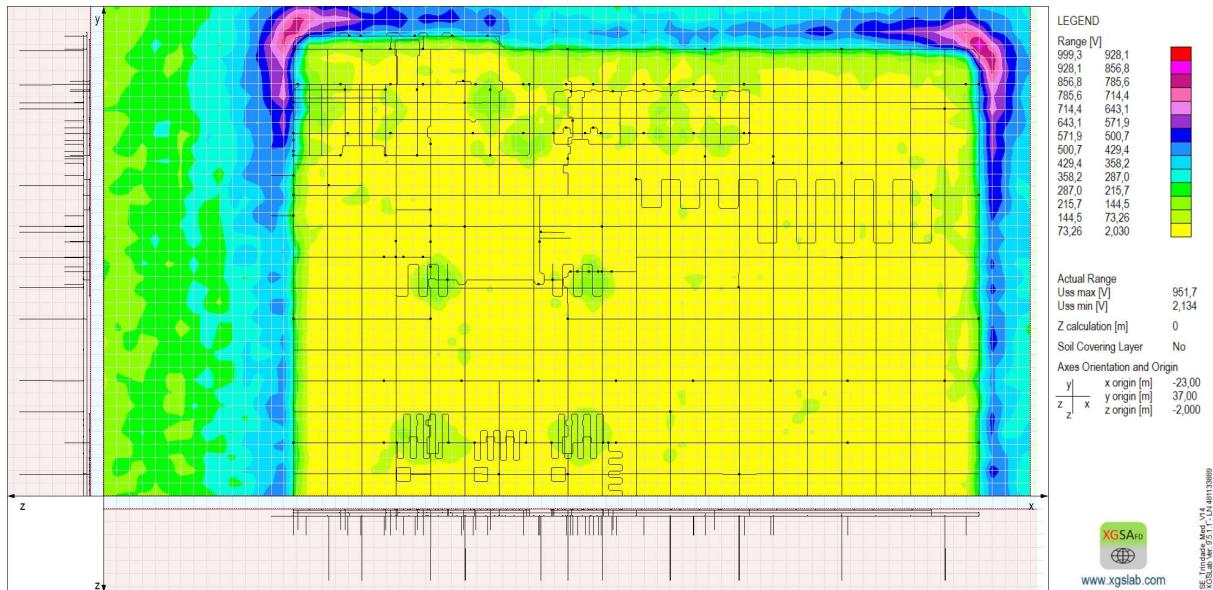
Fonte: Autor.

Figura 68: Distribuição em 2D das tensões de toque sobre a área da subestação Trindade para a resistivímetro com o resistivímetro no local D.



Fonte: Autor.

Figura 69: Distribuição em 2D das tensões de passo sobre a área da subestação Trindade para uma pessoa de 50 Kg, com a resistividade do resistivímetro no local D.



Fonte: Autor.

A análise do sistema de aterramento da subestação, conforme ilustrado nas Figuras 58 a 69, evidencia de forma consistente a sensibilidade do desempenho do aterramento às variações de resistividade do solo e às diferenças decorrentes do instrumento de medição. Para padronização da discussão, considera-se: Cenário 1 (Local A – terrômetro; Figuras 58–60), Cenário 2 (Local A – resistivímetro; Figuras 61–63), Cenário 3 (Local D – terrômetro; Figuras 64–66) e Cenário 4 (Local D – resistivímetro; Figuras 67–69). Em subestações, a formação de

gradientes elevados é característica, sobretudo em condições associadas a correntes de falta, tornando a avaliação de tensões de passo e toque e de áreas seguras particularmente relevante.

No Local A (baixa resistividade), a comparação entre os Cenários 1 e 2 mostra que a resistência de aterramento variou de $1,70\ \Omega$ (Cenário 1) para $1,96\ \Omega$ (Cenário 2), caracterizando diferença moderada. Essa variação impactou os máximos de tensão, com tensão de toque máxima elevando-se de 3.752 V para 4.534 V e tensão de passo máxima de 368,9 V para 416,6 V. Os valores mínimos permaneceram baixos (toque mínimo de 2,568 V e 4,502 V; passo mínimo de 0,432 V e 0,218 V), indicando que, em solo mais favorável, as alterações entre instrumentos tendem a modificar principalmente os picos e regiões localizadas, sem necessariamente transformar a interpretação global do sistema. Essa conclusão é compatível com o comportamento discutido nos capítulos experimentais, reforçando que, nas camadas rasas associadas a afastamentos menores (até 16 m), as divergências instrumentais tendem a ser menos marcantes e, portanto, a repercussão sobre a modelagem geoelétrica pode ser mais limitada.

Entretanto, ao se avaliar o Local D (alta resistividade), as diferenças entre instrumentos tornam-se significativamente mais pronunciadas. No Cenário 3, a resistência de aterramento foi de $15,47\ \Omega$, enquanto no Cenário 4 aumentou para $26,04\ \Omega$, evidenciando forte influência do modelo geoelétrico quando a resistividade do solo é elevada. Consequentemente, observaram-se aumentos expressivos das tensões máximas: a tensão de toque máxima passou de 8.583 V para 12.470 V, e a tensão de passo máxima de 676,5 V para 951,7 V. Também houve elevação dos mínimos (toque mínimo de 103,1 V para 192,6 V; passo mínimo de 1,218 V para 2,134 V), o que sugere um deslocamento do patamar geral de potenciais na superfície. A comparação entre as Figuras 64–69 indica, portanto, que em solos resistivos a discrepância entre terrômetro e resistivímetro pode produzir cenários mais restritivos, com maior severidade e/ou extensão das regiões críticas, influenciando a avaliação de segurança e podendo demandar medidas adicionais de mitigação. Assim, para a subestação, os resultados corroboram de modo claro a conclusão de que o Local D evidencia e amplifica as diferenças entre instrumentos, enquanto no Local A a diferença tende a ser mais discreta, apesar de perceptível nos máximos de tensões.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises computacionais realizadas neste capítulo, foi possível consolidar a compreensão sobre a influência da modelagem geoelétrica — obtida a partir de SEVs executadas com diferentes instrumentos (terrômetro e resistivímetro) — no desempenho de sistemas de aterramento de distintas tipologias e portes. Mantidas constantes as geometrias e configurações físicas dos aterramentos e variando-se exclusivamente os parâmetros do solo,

observou-se um comportamento consistente nos três estudos de caso (usina fotovoltaica, hospital e subestação): a sensibilidade do desempenho do aterramento às divergências entre instrumentos é fortemente dependente da resistividade do solo. A Tabela 14 apresenta, de forma sintética, os principais resultados obtidos para todos os cenários e instalações analisados neste capítulo.

Nos cenários associados ao Local A, caracterizado por baixa resistividade, as diferenças entre as modelagens derivadas de terrômetro e resistivímetro mostraram-se, em geral, mais discretas do ponto de vista do comportamento global do sistema. Nesses casos, as resistências de aterramento resultaram relativamente próximas e, embora existam variações nos valores máximos de tensões de passo e de toque, as interpretações de segurança e o entendimento do desempenho tendem a permanecer compatíveis entre si, com alterações mais concentradas em regiões localizadas. Esse resultado é coerente com a evidência experimental discutida nos capítulos anteriores e reforça uma conclusão relevante para a prática: em afastamentos menores (tipicamente até 16 m), frequentemente associados às camadas mais rasas do solo, a divergência entre instrumentos tende a não ser tão significativa quanto comumente se assume de forma generalista, reduzindo o impacto na modelagem geoelétrica empregada em projetos e verificações.

Em contrapartida, nos cenários do Local D, representativo de alta resistividade, as diferenças entre as modelagens geoelétricas obtidas pelos instrumentos tornaram-se substancialmente mais evidentes, refletindo-se em aumentos expressivos da resistência de aterramento e, de forma consequente, em elevação dos níveis máximos de tensões de passo e de toque. Esse comportamento reforça a interpretação física de que, em solos resistivos, pequenas diferenças na estimativa de resistividades (sobretudo associadas às camadas mais profundas) podem resultar em variações relevantes na elevação do potencial de terra e nos gradientes de superfície, impactando diretamente margens de segurança e a delimitação de áreas seguras. Dessa forma, conclui-se que, quanto maior a resistividade do solo, maior tende a ser o efeito prático da escolha do instrumento e do modelo geoelétrico, podendo influenciar decisões de projeto, como necessidade de reforços no aterramento e adoção de medidas mitigadoras adicionais.

Por fim, ao considerar simultaneamente os três tipos de instalação avaliados, verifica-se que a discrepância instrumental não atua de modo uniforme: sistemas com diferentes níveis de material condutivo e distintas condições operativas apresentam sensibilidades próprias, porém preservando o padrão central identificado — Local D evidencia e amplifica as diferenças, enquanto Local A tende a apresentar diferenças mais discretas. Assim, os resultados deste capítulo fortalecem o caráter aplicado da pesquisa ao demonstrar, com base em estudos

reais, que a seleção do instrumento e a forma de modelagem geoelétrica podem ser determinantes em condições de solo desfavoráveis, ao passo que, em condições mais favoráveis e em afastamentos menores, o impacto tende a ser menos pronunciado.

Tabela 14:Tabela resumo com todos resultados, para todos os cenários e instalações analisados.

Sistema	Local	Instrumento	Resistência de aterramento (Ω)	Tensão de Toque Mínima (V)	Tensão de Toque Máxima (V)	Tensão de Passo Mínima (V)	Tensão de Passo Máxima (V)
Usina Fotovoltaica	A	Terrômetro	0,39	114,00	968,80	0,13	47,54
	A	Resistivímetro	0,35	111,30	959,60	0,16	25,32
	D	Terrômetro	9,60	274,80	8.264,00	0,34	128,50
	D	Resistivímetro	17,00	402,30	12.555,00	0,22	175,10
Hospital	A	Terrômetro	5,07	108,40	6.488,00	1,29	499,70
	A	Resistivímetro	5,74	130,60	7.440,00	1,19	545,90
	D	Terrômetro	19,00	195,40	10.400,00	2,56	615,60
	D	Resistivímetro	30,00	320,50	14.030,00	2,36	762,90
Subestação elétrica	A	Terrômetro	1,70	2,57	3.752,00	0,43	358,90
	A	Resistivímetro	1,960	4,50	4.534,00	0,22	416,60
	D	Terrômetro	15,47	103,10	8.583,00	1,29	676,50
	D	Resistivímetro	26,04	192,60	12.470,00	2,13	951,70

Fonte: Autor.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho teve como objetivo central realizar uma análise comparativa entre resultados de Sondagens Elétricas Verticais (SEV) obtidos por meio de terrômetro e resistivímetro, avaliando não apenas as divergências em termos de resistividade aparente e modelagem geoelétrica, mas, sobretudo, as implicações práticas dessas diferenças no desempenho elétrico e nos critérios de segurança associados a sistemas de aterramento reais. Para alcançar esse objetivo, foram combinadas investigações teóricas e normativas, ensaios experimentais em campo e em laboratório e, por fim, análises computacionais em instalações representativas, modeladas no software XGSLab.

No Capítulo 1, foram estabelecidos os fundamentos de motivação e relevância do estudo, destacando-se que a qualidade da caracterização geoelétrica do solo é determinante para o dimensionamento e avaliação de sistemas de aterramento, particularmente quando se pretende avaliar resistência de aterramento, distribuição de potenciais na superfície e o atendimento a critérios de segurança humana por meio das tensões de toque e de passo. Ao longo do Capítulo 2, o embasamento teórico e as normas aplicáveis foram organizados para sustentar as escolhas metodológicas, com ênfase na importância de medições consistentes e rastreáveis, especialmente em condições que exigem investigações mais profundas e/ou em solos de maior resistividade.

A etapa experimental, desenvolvida no Capítulo 3, consolidou a comparação direta entre os instrumentos por meio de um procedimento uniforme de medição e de tratamento estatístico aplicado aos diferentes locais investigados. O método de Wenner foi empregado com espaçamentos progressivos entre eletrodos (até 64 m quando viável), assegurando comparabilidade entre conjuntos de dados e permitindo avaliar o efeito do afastamento na divergência entre resultados. A Tabela 8 sintetiza os valores finais de resistividade aparente média e o erro percentual entre instrumentos, adotando-se o resistivímetro como referência em função de sua maior capacidade de injeção e melhor relação sinal-ruído.

De modo geral, os resultados experimentais evidenciaram uma tendência consistente: o terrômetro fornece valores inferiores aos do resistivímetro, e essa diferença se torna mais sensível à medida que se avança para camadas mais profundas, ou seja, quando são necessários

espaçamentos maiores entre eletrodos. Esse comportamento foi corroborado por análises complementares do comportamento elétrico dos equipamentos, conduzidas em ambiente controlado com aquisição de formas de onda. Para o terrômetro, observou-se tensão quadrada com frequência aproximada de 1497 Hz e potência injetada da ordem de 0,20 W; já o resistivímetro apresentou formas de onda mais estáveis e potência significativamente superior (da ordem de 17,9 W), evidenciando uma diferença de ordem de grandeza que contribui para a maior estabilidade e relação sinal-ruído, especialmente em condições adversas e em solos de resistividade elevada.

Um aspecto que se mostrou relevante e contribui para o refinamento das interpretações usuais presentes na prática profissional é que, em afastamentos menores (tipicamente até 16 m), as divergências entre equipamentos tendem a ser mais discretas, enquanto em afastamentos superiores a esse patamar as discrepâncias crescem progressivamente, podendo alcançar valores próximos ou superiores a 30% nas maiores aberturas investigadas, conforme evidenciado na discussão dos resultados experimentais. Assim, embora seja recorrente, em parte da literatura técnica e do senso comum profissional, a expectativa de que as divergências sejam sempre expressivas, os resultados obtidos neste trabalho indicam que tal afirmação deve ser contextualizada: a significância do erro depende do nível de resistividade do solo e da profundidade investigada (ou, de forma equivalente, do espaçamento entre eletrodos), além das limitações inerentes ao instrumento e ao ambiente de medição.

No tocante à modelagem geoelétrica, os resultados de inversão mostraram que diferenças relativamente moderadas em resistividade aparente média podem se traduzir em alterações mais expressivas em parâmetros de camadas específicas, particularmente em cenários de maior contraste geoelétrico. Como exemplo, o Local D apresentou discrepâncias entre instrumentos em camadas intermediárias, com alterações simultâneas de resistividade e espessuras equivalentes, o que reforça a ideia de que a divergência entre instrumentos não se restringe a um único valor médio, mas pode influenciar a interpretação estratificada do solo.

As implicações práticas dessas diferenças foram exploradas no Capítulo 4 por meio de análises computacionais em sistemas reais de aterramento. A metodologia adotada consistiu em manter inalteradas as geometrias e configurações físicas dos aterramentos modelados no XGSLab, procedendo-se apenas à variação da modelagem geoelétrica do solo, a partir dos valores obtidos com terrômetro e resistivímetro. Essa estratégia permitiu isolar a influência do solo, separando-a de alterações de projeto. Para essa avaliação aplicada, foram escolhidos dois casos contrastantes: Local A, representativo de resistividade mais baixa, e Local D, representativo de resistividade mais elevada, possibilitando analisar o efeito do nível de resistividade na sensibilidade dos indicadores de desempenho.

Na usina fotovoltaica (sistema de grande porte), observou-se que no Local A as diferenças de resultados foram pequenas: a resistência de aterramento variou de $0,39\ \Omega$ (terrômetro) para $0,35\ \Omega$ (resistivímetro), refletindo alterações discretas no comportamento global do sistema. Ainda nesse cenário de baixa resistividade, as tensões máximas de toque e de passo permaneceram próximas, com variações percentuais reduzidas, mantendo o mesmo padrão de distribuição e, consequentemente, implicando mudanças pouco relevantes do ponto de vista de segurança. Em contrapartida, no Local D, a sensibilidade do sistema aumentou de modo substancial: a resistência de aterramento passou de $9,6\ \Omega$ (terrômetro) para $17\ \Omega$ (resistivímetro), praticamente duplicando. Nessa condição, as tensões máximas também se elevaram de forma mais pronunciada, com a tensão de toque máxima passando de 984 V para 1234 V e a tensão de passo máxima de 2272 V para 2864 V, evidenciando que, em solos de maior resistividade, a escolha do instrumento pode produzir diferenças de interpretação diretamente associadas ao risco e à área de exposição.

Para o hospital (sistema representativo de baixa disponibilidade de material condutivo), verificou-se comportamento semelhante, porém com uma consequência prática ainda mais sensível, em razão do nível de criticidade do ambiente e do requisito de segurança. No Local A, a resistência de aterramento variou de $5,07\ \Omega$ (terrômetro) para $5,74\ \Omega$ (resistivímetro), indicando novamente discrepâncias mais discretas em solo de resistividade mais baixa. Nesse mesmo cenário, as tensões máximas apresentaram variações moderadas, com tensão de toque máxima passando de 343,8 V para 395,5 V e tensão de passo máxima de 420,8 V para 481,3 V, mantendo a mesma ordem de grandeza e, em geral, sem provocar mudanças drásticas na interpretação das zonas mais críticas. No entanto, no Local D, a divergência tornou-se significativamente mais expressiva: a resistência de aterramento passou de $19\ \Omega$ (terrômetro) para $30\ \Omega$ (resistivímetro), evidenciando que, para solos de alta resistividade, o terrômetro pode subestimar a severidade do cenário. Do ponto de vista de segurança humana, o efeito também foi marcante, com a tensão de toque máxima elevando-se de 1293 V para 1974 V e a tensão de passo máxima de 2827 V para 4240 V, reforçando que o solo de elevada resistividade amplia o impacto das diferenças instrumentais na análise de risco.

Por fim, na subestação elétrica (sistema de médio porte, sujeito a elevadas correntes de falta), observou-se que mesmo em condições de resistividade mais baixa (Local A) as tensões atingem níveis elevados, o que por si só justifica uma caracterização do solo tecnicamente robusta. A resistência de aterramento variou de $1,7\ \Omega$ (terrômetro) para $1,96\ \Omega$ (resistivímetro), com diferença relativamente pequena. Ainda assim, as tensões máximas apresentaram aumento perceptível, com a tensão de toque máxima passando de 3752 V para 4534 V e a tensão de passo máxima de 3235 V para 3857 V, indicando que, em instalações com altos níveis de

corrente de falta, até variações moderadas no modelo de solo podem se refletir em incrementos relevantes nos níveis máximos de exposição. Para o Local D, a discrepância foi mais evidente: a resistência de aterramento passou de 15,47 Ω (terrômetro) para 26,04 Ω (resistivímetro), com reflexos diretos na severidade das tensões máximas, já que a tensão de toque máxima aumentou de 8820 V para 11556 V e a tensão de passo máxima de 10871 V para 14249 V. Esses resultados reforçam, de forma objetiva, a conclusão de que solos de elevada resistividade tornam mais evidentes e mais críticas as diferenças entre instrumentos, afetando diretamente critérios de segurança e potencialmente a conformidade do projeto quando analisado sob parâmetros normativos de passo e toque.

Com base no conjunto de evidências obtidas, conclui-se que as divergências entre terrômetro e resistivímetro devem ser analisadas sob uma ótica aplicada: não é apenas a diferença percentual em resistividade aparente que importa, mas principalmente o quanto essa diferença altera a modelagem geoelétrica e, por consequência, os indicadores de desempenho e segurança do aterramento. Em solos de resistividade mais baixa, sobretudo quando a investigação é limitada a espaçamentos menores, as diferenças tendem a ser discretas e podem não alterar significativamente a interpretação do desempenho do sistema. Em contrapartida, para solos de resistividade elevada e/ou quando há necessidade de maior profundidade de investigação (espaçamentos maiores), as diferenças tornam-se mais relevantes e podem influenciar de forma significativa a tomada de decisão em projetos reais, tanto em termos de dimensionamento quanto de avaliação de segurança.

Como principais contribuições desta dissertação, destacam-se: (i) a construção de uma metodologia experimental comparativa, com procedimentos uniformes de ensaio e tratamento estatístico, aplicada a diferentes locais e espaçamentos; (ii) a demonstração experimental, inclusive por análise de formas de onda e potência injetada, de que diferenças construtivas e operacionais entre instrumentos contribuem para divergências especialmente em condições desafiadoras; (iii) a avaliação aplicada das consequências dessas divergências por meio de simulações computacionais em três sistemas reais (usina fotovoltaica, hospital e subestação), demonstrando quantitativamente como as variações de resistividade impactam resistência de aterramento, tensões de toque e de passo e áreas seguras; e (iv) a consolidação de uma interpretação prática de que, em afastamentos menores (até aproximadamente 16 m), as divergências entre instrumentos podem ser discretas, sendo a significância do erro dependente do nível de resistividade do solo e da profundidade investigada.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o conjunto de medições com a inclusão de outros modelos de terrômetros e resistivímetros, bem como investigar diferentes condições ambientais (umidade, sazonalidade e interferências elétricas externas) que

CAPÍTULO 5 –CONCLUSÕES GERAIS

podem afetar a estabilidade e a repetibilidade das leituras. Também se propõe estender os ensaios para arranjos alternativos (como Schlumberger), quando viável, e aprofundar a validação das modelagens geoelétricas por meio de correlações com dados geotécnicos e/ou medições complementares. Finalmente, recomenda-se aprofundar a análise do impacto econômico e de segurança associado à subestimação da resistividade em solos de alta resistividade, incluindo discussões de sensibilidade no dimensionamento (incremento de malha, condutores adicionais, tratamento de solo e soluções mitigadoras), de modo a consolidar diretrizes práticas para seleção de instrumento e planejamento de campanha de medições.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. B. K. dos Santos, R. S. de Moura Junior, R. F. de Moraes, J. A. B. de Andrade, e A. S. Rodrigues Junior, “ATERRAMENTO ELÉTRICO, UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA”, *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, vol. 9, nº 5, p. 4656–4672, jun. 2023, doi: 10.51891/rease.v9i5.10380.
- [2] E. alexandre Osorio e A. C. Pan, “DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO EM UMA USINA SOLAR”, dez. 2018. doi: 10.59627/cbens.2018.105.
- [3] A. ’Souza, M. ’Pacheco, e É. ’Pinheiro, “ATERRAMENTO ELÉTRICO: IMPORTÂNCIA, NORMAS TÉCNICAS E DESAFIOS EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL”, *Revistaft*, vol. 27, nº 121, abr. 2023.
- [4] M. A. R. Gamito, “Influência do sistema de aterramento na presença de distorção harmônica”, USP - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- [5] M. H. Pianeli, “A importância da instalação do aterramento temporário em serviços de manutenção em redes de distribuição”, UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2025.
- [6] J. C. B. Corrêa Junior, I. D. da S. Martins, A. O. de Souza, e E. L. B. do Nascimento, “A evolução da NBR 5419 e seus reflexos na concepção de sistemas de aterramento”, *Cuadernos de Educación y Desarrollo*, vol. 17, nº 6, p. e8548, jun. 2025, doi: 10.55905/cuadv17n6-031.
- [7] E. G. dos S. Alves, C. R. Costa, e C. S. Xavier, “Utilização da técnica para sistema de aterramento”, Montes Claros, março de 2018.
- [8] ABNT, *ABNT NBR 7117-1: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoelétrica*. 2020.
- [9] R. M. Ribas, “Estudo da resistividade do solo e dimensionamento de malha de aterramento”, UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2023.

CAPÍTULO 6 –REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [10] G. Kindermann e J. M. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, 3^a. Porto Alegre, 1995.
- [11] S. V. Filho, *Aterramentos Elétricos*, 1^a. 2002.
- [12] MEGABRAS, “MTD-2000e Terrômetro Digital”, 2008.
- [13] K. P. C. dos Santos, “Desenvolvimento de resistivímetro de baixo custo para monitoramento ambiental”, USP - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- [14] L. V. da Silva, “Estudo e otimização do sistema de aterramento de aerogeradores em parques eólicos: desempenho e mitigação de efeitos em regiões de alta resistividade do solo.”, UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.
- [15] A. G. M. Britto, “Modelagem das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações metálicas subterrâneas e análise de impactos”, UNB - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- [16] IEEE, “IEEE Std 80 - 2013”, New York, 2013.
- [17] ABNT, “ABNT NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento”, 2009.
- [18] O setor elétrico, “Materiais para sistemas de aterramento: dimensionamento de condutores”.
- [19] ABNT, “ABNT NBR 16254-1: Materiais para sistemas de aterramento”, 2014.
- [20] ABNT, “ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão”, 2005.
- [21] T. F. L. Pinheiro, “SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM BAIXA TENSÃO”, UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [22] IEEE, “IEEE Std 81 - 2012”, New York, 2012.
- [23] ABNT, “ABNT NBR 15751: Sistemas de aterramentos de subestações - Requisitos”, 2013.
- [24] ABNT, “ABNT NBR 16527: Aterramento para sistemas de distribuição”, 2016.
- [25] ABNT, “ABNT NBR 5419: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas”, 2005.
- [26] L. J. Lanzerotti e G. P. Gregori, “Correntes telúricas: o ambiente natural e as interações com sistemas artificiais”, p. 232–257, 1986.

- [27] A. Mutoh, S. Nitta, e T. Sato, “The relationship between the Earth current and the ground resistance meter’s indication”, em *2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.03CH37446)*, IEEE, p. 789–793. doi: 10.1109/ISEMC.2003.1236708.
- [28] B. Drumond, “Resistividade do solo: o que é e como fazer sua medição”.
- [29] J. Modena e H. Sueta, “Medição da resistividade do solo”, p. 30–35.
- [30] C. T. C. do Nascimento, A. C. B. Pires, e R. A. V. de Moraes, “Reconhecimento de solos por meio de resistividade elétrica e radiação gama”, *Revista Brasileira de Geociências*, p. 383–392, setembro de 2004.
- [31] A. D. Dias, “Malhas de aterramento em subestações energizadas: medições e análises”, UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
- [32] E. dos S. S. Júnior, “Simulação, em ambiente computacional, do método de Wenner e obtenção da resistência de um sistema de aterramento usando FDTD.”, UFPA - Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- [33] G. dos S. Pires, “Desenvolvimento em um equipamento para medição de resistência e resistividade do solo em subestação energizadas”, UFMS - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2012.
- [34] J. L. Leite e J. W. P. Macêdo, “Estudo Comparativo dos Arranjos Wenner e Schlumberger Aplicados à Sondagem Elétrica Vertical”, *Revista Brasileira de Geociências*, p. 536–540, 1982.
- [35] M. S. Borja, “Modelagem e inversão de eletrorresistividade 1D usando Fortran moderno: Arranjos Wenner e Schlumberger”, UFBA - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.
- [36] L. A. Pettoruti, C. A. Sotille, e H. Takayanagi, “Método dos quatro eletrodos nos arranjos de Wenner e Schlumberger”, *O Setor Elétrico*.
- [37] F. Moreira Viana, “Interpretação da Resistividade Aparente do Solo e Estratificação com Arranjo de Schlumberger”, 2016.
- [38] “IPI2win”. Acessado: 29 de janeiro de 2026. [Online]. Disponível em: <http://geophys01.geol.msu.ru/pi2win.htm>

CAPÍTULO 6 –REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [39] “XGSLab”. Acessado: 29 de janeiro de 2026. [Online]. Disponível em:
<https://www.xgslab.com/>

ANEXOS

ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERRÔMETRO



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
No. 28483/25

Nome:	PAULO HENRIQUE OLIVEIRA REZENDE	CEP:	38410665
End.:	Avenida Vereador Carlito Cordeiro, 2315	Cidade:	Uberlândia
Bairro:	Jardim Botânico	Estado:	MG
CPF/CNPJ:	085.855.336-84		

Dados do instrumento:

Instrumento:	Terrômetro digital	Nº de Série:	
Fabricante:	MEGABRAS	Nº de Patrimônio:	N/C
Modelo:	MTD2000e	Tag:	N/C
Data da Calibração:	3 abril, 2025		

Procedimento de Calibração:

Procedimento de Calibração:	A calibração foi realizada pelo método de comparação com o (s) padrão (ões) utilizado (os), e auxílio de Instrumento de Referência Certificado.
-----------------------------	---

Condições Ambientais durante as medições:

Temperatura:	25 °C ± 0,5 °C	Umidade relativa do ar:	51 % U.R. ± 3%
Local da Calibração:	GAMA LAB		

Padrões Utilizados na calibração:

Multimetro digital Fluke, modelo 8846A, número de série 4619007, certificado No. RI 5620/23 emitido pelo laboratório Socintec (RBC 250) em 08/2023, válido até 08/2025.

Resultado da calibração:

Faixa 20 Ω

Padrão	Instrumento sob teste	Desvio	Incerteza	Fator de Abrangência
Ω 1,00020	Ω 1,12	Ω 0,1198	±Ω 0,04	k 3,31
10,00003	10,46	0,45997	0,06	3,31
15,0226	15,46	0,4374	0,08	3,31

Faixa 200 Ω

Padrão	Instrumento sob teste	Desvio	Incerteza	Fator de Abrangência
Ω 50,0001	Ω 50,1	Ω 0,0999	±Ω 0,2	k 2,87
99,9994	100,0	0,0006	0,5	3,31
150,996	150,0	-0,996	2,1	3,31

Faixa 2000 Ω

Padrão	Instrumento sob teste	Desvio	Incerteza	Fator de Abrangência
Ω 499,996	Ω 499	Ω -1,00	±Ω 3	k 3,31
999,989	1001	1,01	4	3,31
1500,330	1507	6,67	1	2,23



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
No. 28483/25

Carlos A. N. Viana

Signatário Autorizado
Técnico em eletrônica CFT: 2611842787

Certificado assinado eletronicamente.

Observações:

- 1 - A Incerteza Expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência K, estimada para um nível de confiança de 95%.
- 2 - Este certificado é válido exclusivamente para o objeto calibrado, descrito nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros, mesmo que similares.
- 3 - Somente terá validade o certificado em sua totalidade de folhas. Não é permitida a reprodução parcial deste certificado.
- 4 - Esta calibração não isenta o instrumento de controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica.

- Acesse a rastreabilidade dos padrões clicando no link abaixo

https://drive.google.com/file/d/1zDrRPdcscSJXOkoXY3jq10LoGYNqBivH/view?usp=drive_link



ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RESISTIVÍMETRO

 Relatório de Calibração de Instrumento <small>Manutenção e Ensaios</small>			
Nº Relatório:	102869/2025	Data:	16/06/2025
Cliente:	Paulo Henrique Oliveira Resende		
Endereço:	Av. Vereador Carlito Cordeiro - 2315		
Cidade:	UBERLÂNDIA		
CPF	085.855.336-84		
Inscrição Estadual:	-----		
Padrões utilizados nos Ensaios:			
Multímetro digital marca Minipa modelo ET-1649 patrimônio HRC-PAD-16, calibrado conforme certificado de calibração E3980001-0524 pelo laboratório acreditado pelo INMETRO validade 05/2026.			
Alicate amperímetro marca Minipa modelo ET-3920 patrimônio HRC-PAD-17, calibrado conforme certificado de calibração E3980003-0524 com validade até 05/2026.			
Condições Ambientais dos Ensaios			
Temperatura ambiente:	28 °C		
Umidade relativa do ar:	45%		
Objeto de Ensaio			
Descrição		Marca	Série
Eletro Resistivímetro modelo X6XTAL500		Autoenergia	012601240114B
Dados da Calibração			
Relação (Escala Baixa)			
Tensão (mv)	Corrente (mA)	Relação tensão / corrente	Erro de indicação relação ao padrão 10 (Ω)
67,2	6,75	9,955555556	-0,044444444
211,05	21,82	9,672318973	-0,327681027
370,94	37,1	9,998382749	-0,001617251
570,17	57,1	9,985464098	-0,014535902
759,44	75,97	9,996577596	-0,003422404
1090,48	109,74	9,936941863	-0,063058137
1492,98	149,2	10,00656836	0,006568365

ANEXOS

2048,9	204,87	10,00097623	0,000976229
Relação (Escala Baixa)			
Tensão (mv)	Corrente (mA)	Relação tensão / corrente	Erro de indicação relação ao padrão 10 (Ω)
138,25	13,9	9,946043165	-0,053956835
432	43,25	9,988439306	-0,011560694
764,99	76,54	9,994643324	-0,005356676
1074,3	107,41	10,00186202	0,001862024
1428,5	142,85	10	0
1957,4	195,45	10,01483755	0,014837554
2702	269,9	10,01111523	0,011115228
3765,2	376,29	10,00611231	0,006112307
Observações			
Os resultados apresentados refere-se exclusivamente ao equipamento acima.			
A HRC, autoriza a reprodução deste relatório desde que não haja nenhuma rasura ou alteração do mesmo.			
O prazo de validade deste relatório se estende por 12 meses a partir da data da calibração.			
Data da próxima verificação: 16/06/2026			
 Engº Helijelmo R. Chimatti CREA 5061578221 CRT: 17150332803			

Rua José Humberto Alcantara, 1350 - Alto Umuarama II - Uberlândia/MG - Fone: (34) 3219-8470