



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE BELÉM
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

RAPHAEL DE OLIVEIRA KIMMEL

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE MALHAS DE ATERRAMENTO EM
SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO: uma revisão bibliográfica**

BELÉM-PA
2025

RAPHAEL DE OLIVEIRA KIMMEL

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE MALHAS DE ATERRAMENTO EM
SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO: uma revisão bibliográfica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica, do Campus Universitário de Belém, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira

Coorientador(a): Prof. MSc. André Pinto Leão

BELÉM-PA
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

K49a Kimmel, Raphael de Oliveira.

Avaliação de métodos de análise de malhas de aterramento em subestações de distribuição : uma revisão bibliográfica / Raphael de Oliveira Kimmel. — 2025.

VII, 42 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira Coorientador(a): Prof. Me. André Pinto Leão Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belém, 2025.

1. Aterramento. 2. Subestação energizada. 3. Segurança elétrica. 4. Tensão de toque. 5. Tensão de passo. I. Título.

CDD 621.3126

RAPHAEL DE OLIVEIRA KIMMEL

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE MALHAS DE ATERRAMENTO EM
SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO: uma revisão bibliográfica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica, do Campus Universitário de Belém, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data da aprovação: ____ / ____ / ____

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
Orientador - Universidade Federal do Pará - UFPA

Prof. MSc. André Pinto Leão
Coorientador - Power Systems Innovations LTDA

Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira
Membro - Universidade Federal do Pará - UFPA

Eng. MSc. Welisson Lohan Aviz da Costa
Membro - Externo

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas suas bênçãos diárias em minha vida, pela força e disposição que me são fornecidas a cada minuto, que durante minha caminhada acadêmica se fez presente em cada aprendizado e superação vivida. Que toda honra e glória seja a Ele.

Agradeço a minha mãe Alzemira de Oliveira Kimmel que a cada tropeço durante a minha caminhada se fez presente para me levantar e me ensinar a voltar ao caminho certo, ao meu pai Cracin Kimmel que me incentiva sempre a ser uma pessoa mais forte, gentil e sábia com seus ensinamentos diários, a minha irmã Maitê de Oliveira Kimmel que a cada dia que passa me ensina as riquezas contidas nos atos simples da vida.

À minha namorada Alannys Bianca Pinheiro de Queiroz, que durante todo o trajeto trilhado na escrita deste trabalho se fez presente em me ajudar a superar cada obstáculo e pelo imenso carinho, que foi fundamental durante a execução desta monografia.

Aos grandes amigos que fiz durante essa jornada acadêmica, Alex Henrique, Arthur Mota, Bruno Fonseca, Carlos Henrique, Diego Ribeiro, Eduardo Prist, Eduardo Reis, Fernando Salgado, Giovanna Miranda, Paulo Durans, Rodrigo Carmo, Rômulo Vale, Thiago Pequeno, fazendo com que o cotidiano fosse mais prazeroso e leve, auxiliando na conclusão desse ciclo.

Aos meus amigos de jornada na vida que desde cedo me fizeram evoluir como pessoa e incentivaram meu lado profissional, André Menezes, Homobono Henrique, Luka Magalhães, Marina Lobato, Mariana Lobato, Paulo Cesar Magalhães e Tiago Lopes, deixo aqui meu agradecimento às inúmeras vezes que se fizeram e se fazem presente na minha vida.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os métodos de análise de integridade de malhas de aterramento em subestações de distribuição energizadas, com enfoque em variáveis que garantam tanto a segurança dos operadores quanto a proteção dos equipamentos. A pesquisa é fundamentada em uma revisão sistemática da literatura, utilizando normas técnicas como referência e trabalhos de relevância sobre a temática, abordando conceitos fundamentais como tensões de passo, tensões de toque, resistividade e permissividade do solo além dos efeitos das descargas atmosféricas e falhas internas. Além de evidenciar os principais métodos de medição utilizados no setor, o estudo avalia os limites estabelecidos por normas relevantes como IEEE e ABNT. A análise das bibliografias destacou-se por expor métodos de monitoramento contínuo de parâmetros que asseguram a operação da subestação, e integridade da malha de aterramento, sem a necessidade de desenergização da rede elétrica. Além disso, a pesquisa introduz inovações na forma de rotinas computacionais que melhoram a detecção de anomalias no sistema de aterramento por meio de apresentação de bibliografias atuais. Dessa forma, constatou-se que a correta interpretação das normas e dos dados obtidos em campo é vital para assegurar a eficiência e a segurança operacional das instalações elétricas.

Palavras-chave: Aterramento; subestação energizada; segurança elétrica; tensão de toque; tensão de passo; monitoramento online.

ABSTRACT

This study aims to analyze methods for assessing the integrity of grounding grids in energized distribution substations, with a focus on variables that ensure both operator safety and equipment protection. The research is grounded in a systematic literature review, drawing upon technical standards and scholarly works of recognized relevance in the field. Fundamental concepts such as step and touch voltages, soil resistivity and permittivity, as well as the impacts of lightning strikes and internal faults, are addressed comprehensively. In addition to identifying the primary measurement techniques employed in the sector, the study critically evaluates the thresholds established by relevant standards, including those issued by IEEE and ABNT. The reviewed literature emphasizes methodologies for continuous monitoring of key parameters that guarantee the operational reliability of substations and the structural integrity of the grounding system, without the need for network de-energization. Moreover, the research introduces innovations through the development of computational routines that enhance the detection of anomalies in grounding systems, supported by current academic references. The findings underscore that the accurate interpretation of technical standards and field data is essential to ensuring the operational efficiency and safety of electrical installations.

Keywords: Grounding; energized substation; electrical safety; touch voltage; step voltage; online monitoring.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Projeto malha de aterramento
- Figura 2** - Construção de subestação
- Figura 3** - Método de queda de potencial aplicado
- Figura 4** – Método aplicado da DDPprox
- Figura 5** – Potenciais de solo e malha
- Figura 6** – Medições realizadas para resistividade
- Figura 7** – Mapa de resistividade
- Figura 8** – Caso 1 – SE Aroeiras
- Figura 8** – Caso 1 – SE Aroeiras
- Figura 9** – Caso 5 – SE Mataraca
- Figura 10** – Caso 6 – SE Alto Branco
- Figura 11** – Malha de terra
- Figura 12** – Estudo de comportamento de malhas
- Figura 13** – Comportamento de malha
- Figura 14** – Potencial da superfície da malha
- Figura 15** – Potencial superficial da malha

LISTA DE SIGLAS

SEP- Sistema Elétrico de Potência
LT - Linhas de transmissão
SE - Subestações
QEE - Qualidade da energia elétrica
EPIs – Equipamentos de proteção individual
CPR – Cabos para-raios
SGM - *Smart Ground Multimeter*
MDF - Método das diferenças finitas
GPR – Potencial de terra
GF – Falhas de aterramento
SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*
NBR – Norma brasileira
IEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
ABNT – Associação brasileira de normas técnicas
NR – Norma regulamentadora
STD - *Standard*
DDPprox – Diferença de potencial próximo
GIS - *Gas Insulated Substation*

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ - Permissividade elétrica

Ω - Resistência elétrica

ρ - Resistividade do solo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Motivação	14
1.3 Objetivos	15
1.4 Organização do trabalho	15
2 MALHAS DE ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	17
2.1 Introdução	17
2.2 Principais componentes	19
2.3 Tipos de geometria de malhas de aterramento	21
2.4 Requisitos de projeto e dimensionamento	22
2.5 Fatores influentes no desempenho de malhas de aterramento	24
3 MÉTODOS DE ANÁLISE <i>OFFLINE</i>	27
3.1 Métodos tradicionais de medição de malhas de aterramento	27
3.1.1 Método de queda de potencial.....	27
3.1.2 Método de injeção de corrente	27
3.1.3 DDPprox.....	28
3.2 Análise de estudos <i>offline</i>	29
3.2.1 Estudo de DIAS (2018) com simulações de aterramento utilizando o software TECAT PLUS 6.3	29
3.2.2 Análise da resistividade do solo em dimensionamento da malha com base no estudo de RIBAS (2023).....	32
3.2.3 Análise das técnicas de medição em subestações energizadas com base em DIAS (2011)	35
3.2.4 Estudo de OLIZ (2023): Comportamento de malhas de aterramento de subestações tipo GIS submetidas a surtos atmosféricos	39
3.2.5 Estudo de BARBOSA (2023) sobre o uso de correntes de 25 kHz na medição da resistência de aterramento de malhas de subestações	41
4 MÉTODOS DE MONITORAMENTO <i>ONLINE</i>	47
4.1 Introdução	47
4.2 Estudo de BASTIAN et al. (2015): Monitoramento em tempo real de GPR e da impedância do sistema de aterramento de subestações utilizando faltas no sistema elétrico	48
4.2.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de BASTIAN et al. (2015)	49

4.3 Estudo de LONG et al. (2012): Monitoramento <i>online</i> das condições da malha de aterramento de subestações usando sensores de tensão de toque e passo	50
4.3.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de LONG et al. (2012)	51
4.4 Sistema eletrônico embarcado para diagnóstico das condições de aterramento: estudo de GOMES (2012).....	52
4.4.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de GOMES (2012)	55
5 CONCLUSÃO.....	57
5.1 Considerações finais	57
5.2 Trabalhos futuros	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Desde a geração até a distribuição para os consumidores finais, a energia elétrica transita por várias subestações. Pode-se afirmar que a operação eficiente dessas subestações é crucial para a preservação da integridade de todo o sistema elétrico. Para garantir o funcionamento adequado das subestações, um dos aspectos fundamentais na sua construção é o desenvolvimento de um projeto eficaz de aterramento, no qual são utilizadas malhas de aterramento, conforme as diretrizes estabelecidas pela norma IEEE Std 80-2013, que define critérios técnicos para segurança em sistemas de aterramento em subestações de corrente alternada.

Um dos principais objetivos de um sistema de aterramento em uma subestação é proporcionar um ambiente seguro para as pessoas e equipamentos no local. Atualmente, as diretrizes estabelecidas por normas como a NBR 15751 e a IEEE Std 80-2013 utilizam parâmetros determinísticos, como a corrente de falta, tempo de atuação da proteção, resistividade do solo e geometria da malha, para o projeto de uma malha de aterramento. O intuito é assegurar que os potenciais de toque e de passo, durante a ocorrência de um curto-circuito fase-terra — considerado o cenário mais crítico do ponto de vista do aterramento —, fiquem abaixo dos limites estabelecidos pelas normas técnicas.

Em um projeto de malha de aterramento, é essencial entender as propriedades elétricas do solo na área onde será realizada a instalação. Para isso, há métodos estabelecidos para medir a resistividade e modelar o solo, como o método desenvolvido por Frank Wenner, mencionado na norma "NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo". Após a obtenção das propriedades elétricas do solo, o engenheiro responsável pelo projeto da malha de aterramento define a geometria básica da malha.

As características físicas do reticulado são calculadas com base em diversas premissas, como a área da subestação, o arranjo eletromecânico dos equipamentos, a distribuição da corrente que passará pela malha em caso de curto-circuito, os potenciais perigosos de toque e passo, entre outros fatores (COUTINHO, 2021).

A análise do comportamento das malhas de aterramento em subestações é de extrema importância devido ao papel crítico que essas malhas desempenham na proteção de pessoas e equipamentos, conforme estabelecido pela norma IEEE Std 80-2013. As subestações, como componentes essenciais do sistema elétrico, têm a função de manter a tensão e a corrente que

passa por ela em níveis aceitáveis para a distribuição de energia elétrica. Para garantir a segurança e a operação eficiente, é fundamental que seus sistemas de aterramento sejam adequadamente dimensionados.

As falhas no sistema elétrico, como surtos de tensão ou defeitos no isolamento, podem causar acidentes graves, como choques elétricos, afetando a integridade dos profissionais e a segurança do sistema. Nessas situações, o sistema de aterramento tem papel fundamental, pois é responsável por conduzir as correntes de falta ao solo de forma segura, desde que a malha esteja devidamente dimensionada, conforme orientam a IEEE Std 80-2013 e a NBR 15751:2013. Dessa forma, estudar os parâmetros que influenciam a eficiência do aterramento e como eles se comportam em diferentes condições é importante para melhorar a segurança das instalações e otimizar o desempenho operacional das subestações.

Ademais, o crescimento constante da demanda por energia e a complexidade dos sistemas de distribuição de eletricidade exigem que novas abordagens e tecnologias sejam implementadas para monitorar e melhorar os sistemas de aterramento. A utilização de tecnologias avançadas, como simulações computacionais e medições em tempo real, oferece uma oportunidade para realizar diagnósticos mais precisos e eficazes, como demonstrado por DIAS (2018), que aplicou o software Tecat Plus na simulação de malhas de aterramento, e por GOMES (2012), que propôs um sistema eletrônico embarcado para o diagnóstico de subestações energizadas. Assim, este estudo visa contribuir para o entendimento acerca dos impactos das características do solo, o comportamento do sistema de aterramento e dos efeitos das falhas, com a finalidade de fomentar o desenvolvimento de soluções mais robustas e eficazes.

1.2 Motivação

Diante do contexto exposto e considerando o atual déficit de estudos publicados referentes ao tema, desencadeou-se a seguinte questão norteadora da pesquisa: “Como as características e a eficiência dos sistemas de aterramento impactam na segurança pessoal e no desempenho operacional de subestações energizadas, especialmente quando submetidas a descargas atmosféricas e falhas internas no sistema elétrico?”

1.3 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar os métodos de análise de malha de aterramento em subestações energizadas, considerando os impactos das características do solo, da integridade física e os surtos na rede de distribuição, visando melhorar a segurança pessoal e o desempenho operacional. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar o impacto da resistividade e permissividade do solo na eficácia do sistema de aterramento de subestações;
- Avaliar como as descargas atmosféricas e as falhas no sistema de distribuição afetam o comportamento das malhas de aterramento;
- Investigar a relação entre o tipo de aterramento e a segurança dos profissionais e equipamentos nas subestações.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho foi conduzido por meio de uma revisão bibliográfica. A metodologia envolveu a análise comparativa dos principais métodos existentes de medição de resistência de aterramento, com foco nas técnicas aplicadas em subestações de distribuição e nas implicações dos surtos atmosféricos. Além disso, foram analisados estudos de caso e simulações computacionais para entender melhor os parâmetros que influenciam a eficiência do aterramento.

Com base na análise de diversas fontes previamente publicadas, incluindo artigos científicos, dissertações, teses, anais de conferências e livros, essa pesquisa teve como intuito extrair conclusões consistentes e bem fundamentadas. A estrutura do processo seguiu uma sequência de etapas planejadas, garantindo uma análise aprofundada do tema e da metodologia adotada. Inicialmente, foi estabelecido o escopo da pesquisa, seguido por uma revisão inicial da literatura, que proporcionou a base teórica necessária para orientar a elaboração do estudo.

A etapa seguinte envolveu a seleção de fontes relevantes, utilizando ferramentas como Google Acadêmico e *Web of Science*. Para refinar a busca, foram aplicadas palavras-chave específicas, como "malhas de aterramento" e "subestações de alta potência", interligadas pelo operador booleano "AND". Isso garantiu que os documentos selecionados abordassem simultaneamente os dois temas, permitindo uma coleta de dados mais focada e eficiente.

Os critérios de inclusão abrangeram publicações em português e inglês, com foco nas obras lançadas nos últimos cinco anos, revisadas por pares e com acesso integral gratuito. Já os

critérios de exclusão foram definidos por pesquisas em outros idiomas e as quais não atendessem aos requisitos de acessibilidade e gratuidade, assegurando assim a qualidade e relevância das fontes utilizadas na pesquisa. Entretanto, devido à escassez de estudos diretamente relacionados ao tema em questão, foi necessário ampliar a busca para incluir alguns trabalhos com mais de cinco anos, a fim de garantir uma análise mais abrangente e aprofundada do tópico.

A seção 1 apresenta a introdução do trabalho, contendo a contextualização do tema, a motivação da escrita, os objetivos da pesquisa e sua organização.

Na seção 2, abrange-se a temática de malhas de aterramento em subestações energizadas, abordando seus principais componentes, tipos de geometria de malha de aterramento, requisitos de projeto de dimensionamento e os fatores influentes no desempenho de malhas de aterramento.

A seção 3 trata dos métodos de análise das malhas de aterramento no âmbito *off-line*, organizados em estudos relevantes da literatura, abrangendo análises e simulações baseadas em autores como DIAS (2011, 2018), GOMES (2012), OLIZ (2023), BARBOSA (2023), ZENG et al. (2005) e CHOI et al. (2004), permitindo uma comparação crítica das contribuições em torno da temática.

A seção 4 contempla os métodos de monitoramento *online* das malhas de aterramento, com a contribuição de estudos influentes como os de ZHANG et al. (2020), ZU et al. (2022), realizando uma avaliação comparativa das abordagens dos autores supracitados.

Por fim, a seção 5 apresenta a conclusão do trabalho, sintetizando nas considerações finais os principais achados e sugerindo caminhos para futuros trabalhos.

2 MALHAS DE ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 Introdução

Ao longo dos últimos cem anos, o mundo passou por um processo de modernização e automação das indústrias, com a energia elétrica ganhando um papel central na matriz produtiva. Proveniente de outras fontes de energia, a eletricidade tem a capacidade de gerar calor, trabalho mecânico e luz, sendo uma das formas mais eficientes para esses fins (DIAS, 2018).

Para atender à crescente demanda, as redes elétricas foram ampliadas, com a construção de novas unidades geradoras em várias regiões, sendo as principais fontes: térmica, hidráulica e nuclear. A eletricidade é transmitida aos consumidores por meio do Sistema Elétrico de Potência (SEP), que é composto por quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo (DIAS, 2018).

Os SEPs são redes de grande escala, complexas e interconectadas. Devido a essas características, para garantir o funcionamento eficaz de um SEP, é necessário adotar padrões rigorosos de qualidade, continuidade e segurança. Um dos componentes essenciais para a proteção desses sistemas é o aterramento elétrico. O aterramento é aplicado em diversos elementos do SEP, como linhas de transmissão (LT) e subestações (SE) (BARBOSA, 2023).

Nas SEs, o aterramento é realizado por meio de malhas reticuladas, projetadas para garantir níveis seguros de potenciais de toque e passo, tanto para os seres humanos quanto para os equipamentos do sistema. Além disso, essas malhas desempenham um papel crucial, permitindo o fluxo de correntes geradas por falhas no sistema, como curtos-circuitos fase-terra, e por correntes associadas a fenômenos impulsivos, como descargas atmosféricas (BARBOSA, 2023).

O projeto das malhas de aterramento em subestações (SEs) é fundamental para a garantia da compatibilidade eletromagnética, um conceito que abrange diversas áreas do conhecimento técnico, como: qualidade da energia elétrica (QEE), confiabilidade, sistemas de proteção, testes em dispositivos eletrônicos sensíveis, entre outros. O principal objetivo da malha de aterramento é assegurar que os níveis de tensão fiquem dentro dos limites estabelecidos pelas normas (proteção e segurança do aterramento). Para isso, a malha deve oferecer uma rota segura e com alta capacidade de condução, permitindo a passagem de correntes indesejadas entre os condutores energizados e a terra, em situações de distúrbios (OLIZ, 2023).

Em geral, o projeto das malhas de aterramento em subestações é elaborado levando em conta apenas solicitações lentas, como os curtos-circuitos. Nesse contexto, algumas premissas fisicamente plausíveis podem ser aplicadas para a modelagem do aterramento. Para frequências baixas (dezenas de Hz), os efeitos de propagação não são significativos, assim como os efeitos reativos, capacitivo e indutivo podem ser desconsiderados. Com base nessas suposições, é possível considerar que todos os eletrodos de uma malha estejam no mesmo potencial elétrico, o que permite a utilização do método de potencial constante na modelagem do aterramento em frequências baixas (ABNT NBR 15751, 2013).

O principal objetivo das medições em instalações energizadas é assegurar a continuidade do fornecimento de energia aos consumidores. Para que as medições possam ser realizadas de forma adequada, é necessário adotar diversas medidas de segurança tanto para os equipamentos quanto para os profissionais envolvidos, além de garantir a precisão e validade dos valores obtidos (DIAS, 2011).

Em relação à segurança, qualquer instalação energizada pode ser afetada por eventos como curtos-circuitos, aumento de potenciais e sobretensões transitórias. Portanto, todos os equipamentos e pessoas envolvidas no processo de medição estão expostas a esses mesmos riscos (NBR 15749). Assim, os profissionais que realizam as medições devem usar equipamentos de proteção individual (EPIs) de acordo com as diretrizes da norma NR 10 (2004). Além disso, é recomendável que os dispositivos de medição sejam equipados com sistemas de proteção para evitar danos durante a ocorrência desses eventos (DIAS, 2011).

A seleção do método de medição deve considerar todos os fatores mencionados. Métodos como o de queda de potencial, injeção de corrente em altas frequências ou medição simultânea das correntes do sistema, juntamente com outros que atendam aos critérios estabelecidos, são opções a serem avaliadas para a realização dos testes. Cada método tem características específicas que se alinham com seu objetivo final, apresentando facilidades e desafios que precisam ser considerados no planejamento da medição como citado na NBR 15749.

Em uma subestação (SE), a medição da resistência da malha de aterramento é realizada não apenas antes do início da operação, mas também após a energização do sistema. Durante a operação, as medições são feitas com o intuito de verificar se há degradação na malha ou nos pontos de conexão. Contudo, quando há a conexão de cabos para-raios (CPR) das linhas de transmissão à malha, esses CPRs funcionam como um caminho alternativo para a corrente gerada pelo equipamento de medição (BARBOSA, 2023).

2.2 Principais componentes

Conforme estabelecido pelas normas técnicas como a ABNT NBR 15751 (sistema de aterramento de subestações) e a NBR 5410 (instalações elétricas de baixa tensão) — os principais componentes de uma malha de aterramento são:

1. **Condutores de Aterramento:** Cabos utilizados para conectar partes metálicas não enterradas — como estruturas metálicas, equipamentos e condutores de descida — às hastes de aterramento. Normalmente, são instalados em disposição anelar ao redor da edificação a ser protegida, enterrados diretamente no solo a uma profundidade mínima de 50 cm. Esses condutores atuam como eletrodos horizontais de aterramento, cuja principal função é controlar o gradiente de potencial elétrico na superfície do solo, garantindo maior segurança ao sistema.
2. **Hastes de aterramento:** Comumente classificadas como eletrodos verticais e desempenham papel essencial no sistema de proteção e na equipotencialização do sistema elétrico. São elementos condutores instalados verticalmente no solo com a finalidade de estabelecer um contato eficaz com a terra, permitindo a dispersão segura de correntes de fuga ou de descargas elétricas para o subsolo. Geralmente fabricadas em comprimentos padrão de 3 metros, essas hastes podem possuir roscas nas extremidades, o que viabiliza a união com outras hastes, possibilitando seu aprofundamento em camadas de solo com menor resistividade elétrica — aumentando, assim, a eficiência do sistema.
3. **Conectores também denominados elementos de junção:** Componentes essenciais no sistema de aterramento, utilizados para estabelecer conexões seguras entre os condutores da malha, hastes de aterramento, equipamentos elétricos e partes metálicas não enterradas. Sua função principal é assegurar a continuidade elétrica e a integridade mecânica das interligações do sistema. Esses elementos são comumente fabricados em bronze ou latão estanhado, materiais que oferecem boa condutividade elétrica, resistência à corrosão e compatibilidade eletroquímica com condutores de cobre. Para situações em que é necessário conectar metais diferentes (por exemplo, cobre com alumínio), há conectores específicos com espaçadores isolantes, que impedem o contato direto entre os metais e, assim, evitam o processo de corrosão galvânica.
4. **Soldas exotérmicas:** são conexões permanentes obtidas por meio da fusão de metais através de uma reação química exotérmica, que atinge temperaturas superiores a 1.000 °C. Esse processo gera uma ligação molecular entre os condutores metálicos,

resultando em uma conexão de alta condutividade elétrica e elevada resistência mecânica. Esse tipo de conexão é amplamente utilizado em pontos enterrados do sistema de aterramento, devido à sua excelente durabilidade e resistência à corrosão. Ao eliminar a presença de interfaces metálicas sujeitas à oxidação, a solda exotérmica evita o aumento da resistência elétrica de contato ao longo do tempo, garantindo maior confiabilidade e desempenho do sistema.

5. Cordoalha flexível: Condutor formado por fios de cobre estanhado trançados em malha, cuja construção confere alta flexibilidade mecânica e adequada capacidade de condução elétrica. Essa característica permite que a cordoalha acompanhe movimentos mecânicos sem comprometer a continuidade elétrica do sistema de aterramento. Normalmente, é fornecida em pequenos comprimentos, de até 50 cm, e aplicada em situações onde há movimentação relativa entre elementos, como em portas, portões metálicos, tampas de painéis e estruturas móveis. Sua utilização tem como principal objetivo garantir a equipotencialização e a segurança elétrica em componentes sujeitos a deslocamentos frequentes.
6. Caixa de inspeção: Elemento acessório utilizado nos sistemas de aterramento para viabilizar o acesso às conexões entre os condutores da malha e as hastes de aterramento. Geralmente apresenta formato cilíndrico ou retangular e pode ser fabricada em concreto, cerâmica ou PVC de alta resistência. A tampa, normalmente confeccionada em ferro fundido, deve conter identificação que indique sua função específica no sistema de aterramento. Sua principal função é permitir a verificação e manutenção das conexões de aterramento, além de possibilitar a realização de medições de resistência de aterramento e resistividade do solo, conforme exigido pelas normas técnicas. As conexões internas são geralmente realizadas por sistemas de aperto mecânico, que permitem a desconexão temporária dos condutores para fins de teste e inspeção.

Dessa forma, a eficiência de uma malha de aterramento depende da qualidade, da correta instalação e da integração adequada desses componentes, tendo em vista que, de acordo com a NBR 15751:2013, enfatiza-se que a escolha incorreta de materiais ou geometrias pode comprometer a segurança operacional do sistema, aumentar a resistência de aterramento da malha e causar possíveis falhas na equipotencialização dos equipamentos.

2.3 Tipos de geometria de malhas de aterramento

Os principais tipos de geometrias de malha de aterramento, conforme orientações das normas ABNT NBR 5419-1:2015 e IEEE Std 80, são:

1. Malha Retangular (ou quadrada): Malha composta por condutores dispostos em malhas ortogonais (como uma grade). Usada em subestações, edificações industriais e comerciais. Possuindo boa uniformidade na dissipação da corrente e no controle do gradiente de potencial.
2. Malha em Anel (ou Anel Perimetral): Um único condutor formando um círculo ou retângulo ao redor da edificação. Usado em edificações pequenas, postes, torres ou sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Geometria simples e eficaz para equalização de potencial, servindo como base para derivações.
3. Malha em Estrela (ou radial): Condutores saem de um ponto central em forma de estrela ou raios. Usada em áreas com espaço limitado ou em estruturas pequenas. Possui fácil instalação e bom desempenho se associado a eletrodos verticais.
4. Malha em Grelha Múltipla: Conjunto de malhas retangulares sobrepostas em diferentes profundidades ou interligadas em um único plano com espaçamento reduzido. Aplicadas em subestações de alta tensão ou áreas sensíveis onde o controle de tensão de passo e toque é crítico. Com alta eficiência, baixa resistência de aterramento e controle preciso do gradiente elétrico.
5. Geometria Irregular ou Adaptada: A malha segue o contorno da edificação ou da área disponível, sendo adaptada conforme o terreno. Utilizada em terrenos acidentados, espaços restritos ou estruturas com formato não ortogonal, devendo-se garantir uniformidade da resistência e equipotencialização, mesmo com o formato irregular.

Segundo a norma vigente, a geometria da malha deve permitir uma equipotencialização eficaz entre todos os pontos protegidos e uma dissipação eficiente da corrente no solo. Portanto, a escolha da geometria mais adequada é um fator crítico no desempenho e segurança de sistemas de aterramento, especialmente em instalações industriais, subestações e locais com presença de público ou equipamentos sensíveis.

2.4 Requisitos de projeto e dimensionamento

O choque elétrico pode ser prejudicial ao ser humano, podendo até ser fatal, dependendo da sua duração e intensidade. Por isso, é essencial implementar todas as medidas de proteção nas instalações para minimizar o risco de acidentes dessa natureza (PAIVA, 2021).

Em sistemas de aterramento elétrico, o objetivo é estabelecer um parâmetro de resistência próxima de zero Ohms como referência segura para correntes de fuga. Componentes eletricamente conectados à rede de aterramento geralmente compartilham esse potencial de referência, o que contribui para a segurança do sistema em caso de falha, direcionando corrente indesejada para a terra. Quando ocorre um fluxo de corrente elétrica, ela busca sempre o trajeto de menor impedância. No momento em que uma pessoa entra em contato com a terra ou o solo, dependendo da resistência elétrica do corpo, o caminho de menor resistência pode ser através do corpo, permitindo que a corrente passe se houver uma diferença de potencial (PAIVA, 2021).

Os efeitos de um choque elétrico em uma pessoa variam amplamente e dependem de vários fatores, podendo resultar em danos graves e duradouros ou, por outro lado, em consequências leves e temporárias, sem sequelas permanentes. As consequências para o ser humano podem ser influenciadas por aspectos como o caminho percorrido pela corrente elétrica através do corpo, a intensidade dessa corrente, a duração do choque, a área de contato do condutor energizado com o corpo, a pressão exercida no ponto de contato, o tipo de corrente (alternada ou contínua), a frequência de operação, a tensão aplicada, as condições da pele (se está seca ou úmida), que afetam a resistência final do corpo, a região onde ocorre o choque e o estado de saúde geral da pessoa (PAIVA, 2021).

Ao dimensionar os equipamentos de proteção, a definição do tempo necessário para a eliminação de falhas deve ser feita de forma cautelosa, considerando a corrente máxima suportável pelo ser humano, também conhecida como corrente de choque elétrico de curta duração (Ichcd). Essa corrente é aquela que aproximadamente 99,5% da população com peso superior a 50 kg pode tolerar por um intervalo de 0,03 a 3 segundos sem sofrer danos permanentes (PAIVA, 2021).

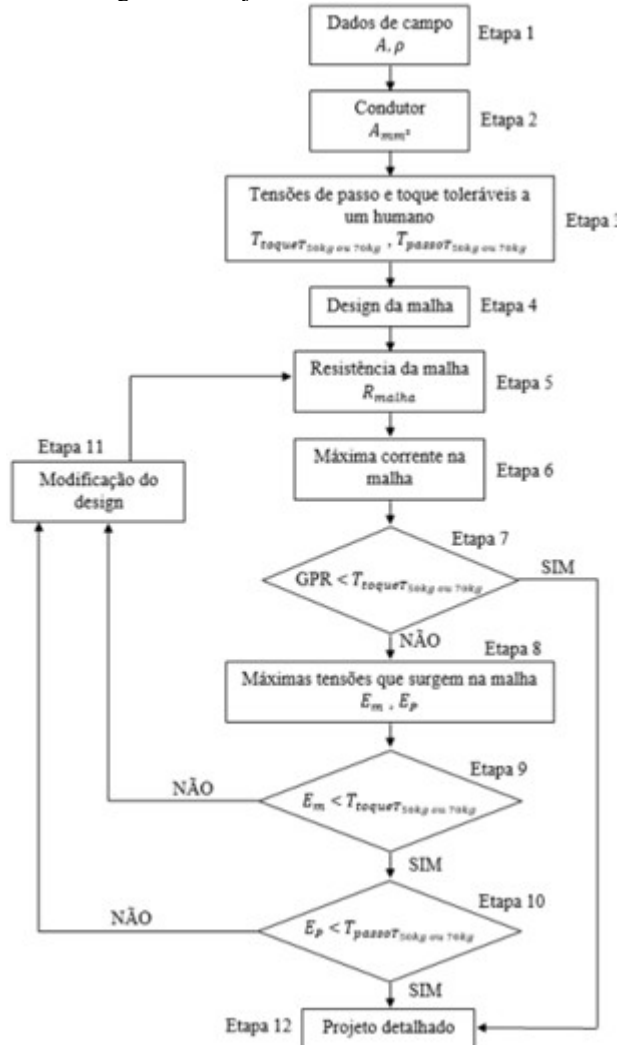
Além disso, é importante levar em conta a corrente de longa duração, ou corrente de choque elétrico de longa duração (Ichld), que não ativa os dispositivos de proteção e não possui um limite de tempo específico. Portanto, é essencial garantir que a corrente seja segura para os seres humanos, sem causar danos graves (PAIVA, 2021). No contexto nacional, a NBR 15751 (2013) estabelece as diretrizes para o dimensionamento e as condições de segurança tanto para as pessoas quanto para as instalações, tanto dentro quanto fora dos limites do sistema de

aterramento de uma subestação. Essa norma brasileira aplica-se a aterramentos de subestações com tensões superiores a 1 kV e em frequências industriais. Sua metodologia para o desenvolvimento de projetos de malhas segue os princípios da norma internacional mencionada anteriormente.

De acordo com a IEEE 80 (2013), o sistema de aterramento seguro deve ser capaz de conduzir a corrente elétrica para a terra, tanto em condições normais quanto durante falhas, sem ultrapassar os limites operacionais e dos equipamentos da rede. Além disso, um sistema de aterramento eficiente minimiza os riscos de interrupções na rede e de choques elétricos graves em pessoas nas imediações da instalação aterrada. Para atender a esses requisitos, a norma sugere que o projeto da malha de aterramento, seja com ou sem hastes verticais, siga um fluxograma composto por 12 etapas.

A Figura 1 apresenta o passo a passo da execução de um projeto de malha de aterramento.

Figura 1 - Projeto malha de aterramento.



Fonte: STEFANELLO (2024).

Conforme o projeto de malhas de aterramento, a resistividade do solo afeta diretamente as tensões de toque e passo que são toleráveis, a impedância do sistema de aterramento e as tensões máximas de toque e passo geradas na malha. Indiretamente, ela também influencia o GPR, pois este depende da impedância da malha. Portanto, a resistividade do solo não pode ser ignorada (STEFANELLO, 2024).

2.5 Fatores influentes no desempenho de malhas de aterramento

O desempenho de sistemas de aterramento, especialmente em instalações elétricas de média e alta tensão, depende diretamente de diversos fatores que influenciam sua capacidade de dissipação de correntes de falta e de garantir segurança operacional. Assim, os principais fatores podem ser classificados:

1. Resistividade do Solo (ρ): A resistividade do solo é uma propriedade elétrica intrínseca que expressa a oposição que o solo oferece à passagem da corrente elétrica. Trata-se de uma grandeza fundamental na análise e no dimensionamento de sistemas de aterramento elétrico, pois influencia diretamente a dissipação de correntes para a terra. A principal componente da resistência de aterramento é a resistividade do solo no qual os eletrodos de aterramento estão implantados. Desta forma, é de extrema importância o conhecimento desse parâmetro para o dimensionamento correto do sistema de aterramento (SILVA, 2015). Segundo a ABNT NBR 15751:2013, a resistividade deve ser determinada por métodos geofísicos, como o método de Wenner, e considerada durante todo o projeto da malha, especialmente para subestações e áreas industriais críticas.
2. Permissividade elétrica (ϵ): É a constante que cada material possui de resistir a influência de um campo elétrico fornecido por uma carga induzida. Essa propriedade é fundamental na formulação das equações do eletromagnetismo, especialmente na Lei de Gauss e nas equações de Maxwell, influenciando diretamente a formação de campos elétricos em meios materiais. De suma importância nos estudos de malha de aterramento, pois está diretamente ligada às possíveis interferências na análise de dados obtidos pelo equipamento de medição de malhas de aterramento em subestações energizadas.
3. Geometria e Dimensões da Malha: A geometria do sistema de aterramento tem impacto direto na distribuição do potencial elétrico na superfície do solo. Malhas do tipo

retangular, radial, em estrela ou mista devem ser dimensionadas com base na resistividade local e na magnitude das correntes de falta (ANDRADE, 2021). A norma IEEE Std 80-2013 estabelece critérios de dimensionamento que visam garantir tensões de toque e passo dentro de limites seguros. Complementarmente, a NBR 15751:2013 recomenda malhas simétricas e de baixa impedância para melhor uniformidade de potencial.

4. Estratificação do Solo: A presença de camadas com diferentes resistividades pode alterar significativamente o desempenho da malha. Solos estratificados exigem modelagens mais complexas, pois a corrente tende a se concentrar em camadas de menor resistividade. Estudos como o de S. Visacro e E. P. P. SOARES (2014) recomendam a utilização de modelos estratificados para simulações mais realistas de aterramento em ambientes com heterogeneidade geológica (PIMENTA, 2017).
5. Condições Ambientais e Corrosão: O tipo de solo (argiloso, arenoso, salino etc.), seu pH, umidade e presença de contaminantes afetam diretamente a durabilidade dos condutores e eletrodos de aterramento (BEZERRA, 2011). A ABNT NBR 16254-1:2013 trata da avaliação da agressividade do solo e recomenda o uso de materiais como cobre estanhado ou aço cobreado em ambientes de alta corrosividade. A falha na seleção adequada de materiais pode acarretar o aumento da resistência ao longo do tempo.
6. Conexões e Integridade dos Componentes: A resistência de contato entre os elementos da malha (condutores, hastes, equipamentos) deve ser minimizada por meio de conexões seguras, como soldas exotérmicas ou conectores de alta condutividade (RIBEIRO, 2024). A IEEE Std 837-2014 estabelece diretrizes para conexões permanentes em sistemas de aterramento, destacando a importância da proteção contra oxidação e corrosão galvânica, fatores que impactam diretamente na continuidade elétrica.

Diante disso, a consideração cuidadosa desses fatores, aliada ao cumprimento das normas técnicas vigentes, é essencial para o projeto e a implementação de sistemas de aterramento seguros e eficientes.

Figura 2 - Construção da subestação



Fonte: Acervo UFRN, 2012

3 MÉTODOS DE ANÁLISE *OFFLINE*

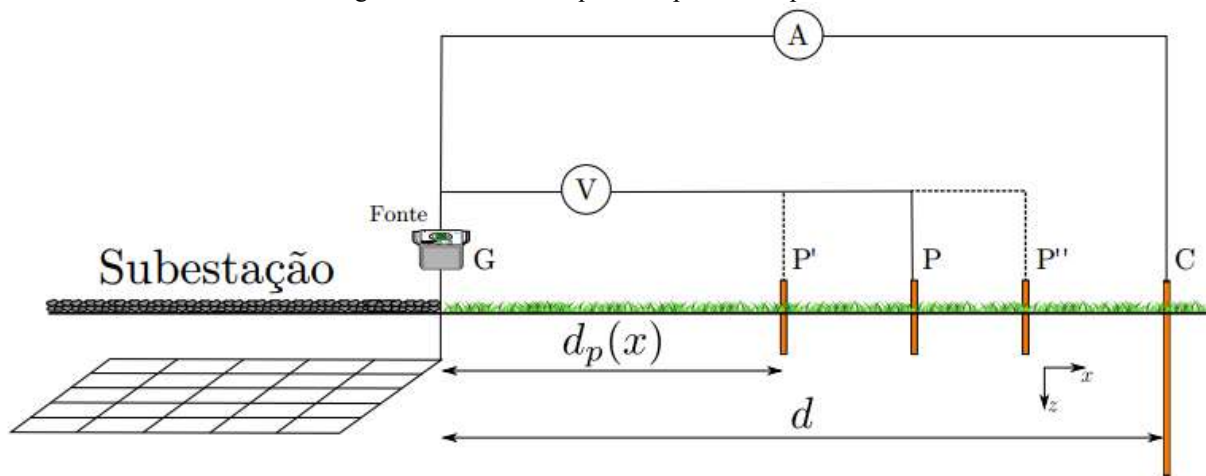
3.1 Métodos tradicionais de medição de malhas de aterramento

3.1.1 Método de queda de potencial

Como o nome indica, o método de queda de potencial é baseado na técnica de queda de potencial. No entanto, a execução das medições por meio dessa abordagem requer o uso de equipamentos especializados, como o Smart Ground Multimeter (SGM), desenvolvido pela empresa Hood-Paterson & Dewar (DIAS, 2011).

O SGM é um dispositivo projetado para medir a impedância de terra em sistemas de aterramento de instalações energizadas, mas não fornece informações sobre a frequência da corrente injetada no solo. Sabe-se, entretanto, que o processamento e a interpretação dos dados coletados durante a medição são feitos por um software específico, que estima a impedância do sistema de aterramento utilizando métodos de estimativa (DIAS, 2011).

Figura 3 – Método de queda de potencial aplicado



Fonte: COELHO (2015).

3.1.2 Método de injeção de corrente

O método de injeção de corrente de baixas frequências é fundamentado no princípio da queda de potencial. A medição é realizada pela injeção de correntes elevadas, na faixa de dezenas de ampères, ou correntes menores, na ordem de dezenas de miliamperes, desde que a frequência da corrente seja distinta da frequência do sistema. Além disso, o equipamento usado na medição deve possuir filtros apropriados para isolar os resultados provenientes

exclusivamente do sinal injetado, removendo os ruídos e tensões presentes na instalação em teste (NBR 15749).

Semelhante ao método anterior, o Método de Injeção de Corrente de Altas Frequências também visa determinar a impedância do aterramento em teste, utilizando o método tradicional da queda de potencial. No entanto, a diferença é que os pontos de fixação dos eletrodos de potencial estarão localizados nas extremidades da malha, enquanto o eletrodo de corrente será colocado relativamente próximo ao sistema de aterramento em avaliação (DIAS, 2011).

O equipamento usado para realizar as medições precisa contar com um gerador de sinal de alta frequência (na faixa de algumas dezenas de kHz) e correntes da ordem de dezenas de miliampères. Além disso, deve ter filtros de alta seletividade para eliminar os efeitos das correntes parasitas de frequência industrial presentes no solo (NBR 15749).

3.1.3 DDPprox

As medições realizadas em malhas de aterramento com diferentes configurações indicaram que os resultados obtidos por meio da metodologia DDPprox variam conforme a presença ou ausência de outros sistemas de aterramento interligados ao sistema sendo medido. Para malhas conectadas a outros sistemas de aterramento, como no caso de cabos para-raios de linhas de transmissão, foi observado que o valor mínimo da curva de resistência em função da distância (obtido nas áreas periféricas da malha) tende a igualar-se ao valor da resistência da malha quando a medição é feita sem o circuito de compensação de reativos do protótipo. Em contrapartida, quando a medição é realizada com o circuito de compensação de reativos, o valor mínimo da curva se aproxima do valor da impedância do sistema (DIAS, 2011).

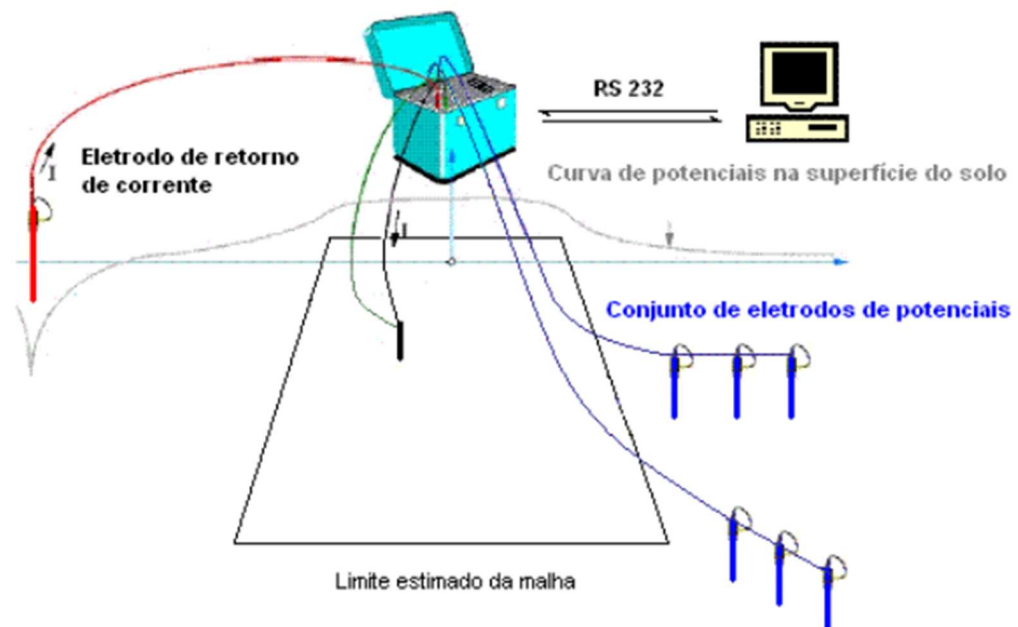
Assim, utilizando a metodologia DDPprox, é necessário apenas medir a diferença de potencial entre a malha de aterramento e um ponto localizado a 1 metro de sua borda, e então relacioná-la à corrente de medição, para determinar a resistência específica da malha de aterramento (em um circuito de medição sem compensação de reativos) ou a impedância do sistema (em um circuito de medição com compensação de reativos). Não é preciso realizar a coleta completa da curva de variação da resistência em função do posicionamento dos eletrodos de potencial até alcançar a região de estabilização (DIAS, 2011).

O método de medição simultânea de corrente envolve a medição da corrente que é injetada na malha de aterramento pelo sistema, via o neutro do transformador, enquanto, simultaneamente, se mede a tensão da malha em relação a um eletrodo remoto de potencial,

colocado relativamente próximo (NBR 15749). Embora a distância entre o eletrodo remoto de potencial e a malha seja menor do que em outros métodos, como o convencional, essa distância é proporcional ao tamanho da malha.

A corrente de desequilíbrio é monitorada e somada utilizando transdutores de corrente/tensão do tipo alicate, posicionados em locais estratégicos da instalação em análise. Os sinais de corrente e tensão são visualizados por meio de um osciloscópio digital, permitindo verificar a consistência entre os valores registrados. Após essa verificação, calcula-se o valor da resistência do aterramento. Para reduzir os riscos ao equipamento e aos profissionais durante a medição, é necessário utilizar pontas de prova de alta tensão (DIAS, 2011).

Figura 4: Método aplicado da DDPprox



Fonte: BELTANI, 2007

3.2 Análise de estudos *offline*

3.2.1 Estudo de DIAS (2018) com simulações de aterramento utilizando o software TECAT PLUS 6.3

No estudo de DIAS (2018), foi realizada uma extensa série de simulações e análises para a malha de aterramento aplicada a dois tipos de solo indicados, avaliando a influência do solo no projeto do aterramento. Foram comparados os valores de resistência da malha e os potenciais de acordo com os esquemas sugeridos.

O processo para determinar a resistividade aparente do solo não envolve a medição direta dessa grandeza. Utilizando o terrômetro, a informação coletada em campo é a resistência do solo. Observou-se uma grande diferença nos valores obtidos em dois locais, apesar de ambos estarem classificados na mesma categoria de solo (latossolos) e utilizarem o mesmo método e equipamento de medição.

A primeira explicação para a discrepância nos valores de resistência foi descartada, pois as condições climáticas durante a medição na Samambaia deveriam ter favorecido a redução das resistências medidas, o que não foi confirmado empiricamente. A segunda explicação considera o uso do solo: enquanto a área no Senado Federal é destinada a um jardim, o terreno na Samambaia, região administrativa do Distrito Federal (DF), é uma área ociosa da cidade, sem uso definido.

O conceito de aterramento é essencial para os profissionais da área de engenharia elétrica, mas, apesar de sua relevância, o tema é frequentemente tratado de forma negligente. Nesse contexto, a técnica de aterramento tem ganhado maior importância, tanto pela necessidade de proteção em instalações e para os usuários, quanto pelas regulamentações específicas e o fortalecimento da fiscalização.

Diante da falta de conteúdos aprofundados e do interesse pela área, o estudo de DIAS (2018) apresentou uma metodologia apropriada para aterramento, ilustrada em uma subestação comercial. Para garantir a viabilidade de qualquer instalação elétrica e assegurar proteção contra acidentes fatais, a subestação deve ter um sistema de aterramento adequado ao projeto. Entender os diferentes tipos de hastes de aterramento e saber aplicá-las corretamente de acordo com as características do solo onde a subestação será construída é crucial para a eficiência da malha de aterramento.

Além disso, foi analisada a influência do solo no dimensionamento da malha, utilizando o software profissional Tecat Plus 6.3, e foram sugeridas alternativas para otimizar os parâmetros encontrados. Durante a elaboração do projeto, foi necessário considerar aspectos como as dimensões e características do terreno, a resistividade do solo, o arranjo proposto para a malha, a resistência da malha e os potenciais envolvidos.

O superdimensionamento de uma malha resulta apenas em desperdício de recursos financeiros e tempo. Observa-se que a redução das malhas é uma opção eficaz para diminuir os potenciais de passo, proporcionando economia por meio do encurtamento de cabos, conexões e hastes.

3.2.1.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de DIAS (2018)

No estudo sobre a metodologia de aterramento para subestações utilizando o software Tecat Plus 6.3, foram identificadas diversas vantagens e desvantagens que merecem destaque.

Uma das principais vantagens do trabalho foi a análise detalhada da influência do solo nos sistemas de aterramento. A pesquisa possibilitou avaliar como diferentes tipos de solo afetam o desempenho do sistema, resultando em uma melhor adequação do projeto conforme as características específicas do solo. A utilização do software especializado Tecat Plus 6.3 também se destacou, uma vez que permitiu simulações precisas para o dimensionamento da malha de aterramento, o que pode levar a designs mais eficazes e confiáveis. Além disso, o estudo propôs diferentes arranjos de malha para os terrenos analisados, oferecendo alternativas que podem ser mais custo-efetivas e eficientes na redução da resistência de aterramento. Outro aspecto relevante foi a identificação de parâmetros críticos, como a relação entre umidade do solo, temperatura e resistência de aterramento, informação vital para a implementação de sistemas eficientes.

Entretanto, o estudo também identificou algumas desvantagens. Uma das principais foi a discrepância nos valores de resistência de malha observada entre os diferentes terrenos, o que pode complicar a implementação de soluções universais de aterramento. Além disso, os resultados demonstraram uma dependência significativa das condições ambientais, como umidade e temperatura, o que sugere que os resultados podem não ser replicáveis em diferentes contextos climáticos. O custo de implementação dos arranjos propostos também é uma consideração importante, pois a implementação pode envolver investimentos significativos, especialmente se forem necessários tratamentos adicionais do solo para melhorar a resistência de aterramento. Por fim, a necessidade de monitoramento contínuo da eficácia do sistema de aterramento foi uma questão levantada, já que sua eficiência pode mudar ao longo do tempo devido a variações no solo ou nas condições ambientais, exigindo assim práticas de manutenção regulares.

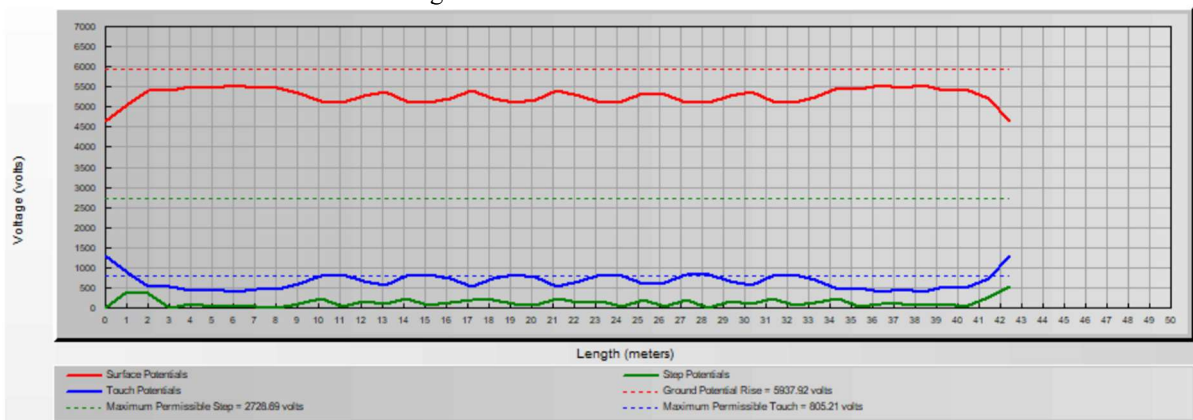
Essas considerações sobre as vantagens e desvantagens do sistema de aterramento são essenciais para a correta abordagem ao projetar e implementar soluções na área de engenharia elétrica.

3.2.2 Análise da resistividade do solo em dimensionamento da malha com base no estudo de RIBAS (2023)

No estudo de RIBAS (2023), foram detalhados parâmetros como a resistividade elétrica do solo, a estratificação geológica, a profundidade e geometria dos condutores da malha, bem como as tensões de passo e toque. As diretrizes para o projeto consideraram os limites de segurança definidos por normas técnicas, com o apoio de simulações via software CYMGRD para garantir a eficácia da malha de aterramento frente às condições reais do solo.

A Figura 4 ilustra os potenciais de risco do solo e da malha para análise do comportamento.

Figura 5 - Potenciais de solo e malha.



Fonte: RIBAS (2023).

Os dados de estratificação do solo indicaram que 73% das amostras foram classificadas usando o método de duas camadas. O resultado obtido foi eficiente, mesmo com a utilização de apenas três espaçamentos diferentes nas medições de cada amostra (2 m, 4 m e 8 m), que apresenta o arranjo adotado no campo para a coleta dos dados de resistividade. A Figura 5 a seguir demonstra as marcações das medições realizadas:

Figura 6 - Medições realizadas para resistividade



Fonte: RIBAS (2023).

O solo analisado, em termos gerais, exibiu uma faixa de resistividade típica de solos predominantemente argilosos, com boas características de drenagem e alta compactação. No local onde a malha de aterramento foi simulada, esse tipo de solo — classificado majoritariamente como argiloso com estratificação em duas camadas e baixa umidade superficial — contribuiu para a obtenção de um valor de resistividade mais baixo, o que favoreceu a redução das tensões de toque e passo, mantendo os valores dentro dos limites de segurança recomendados pelas normas.

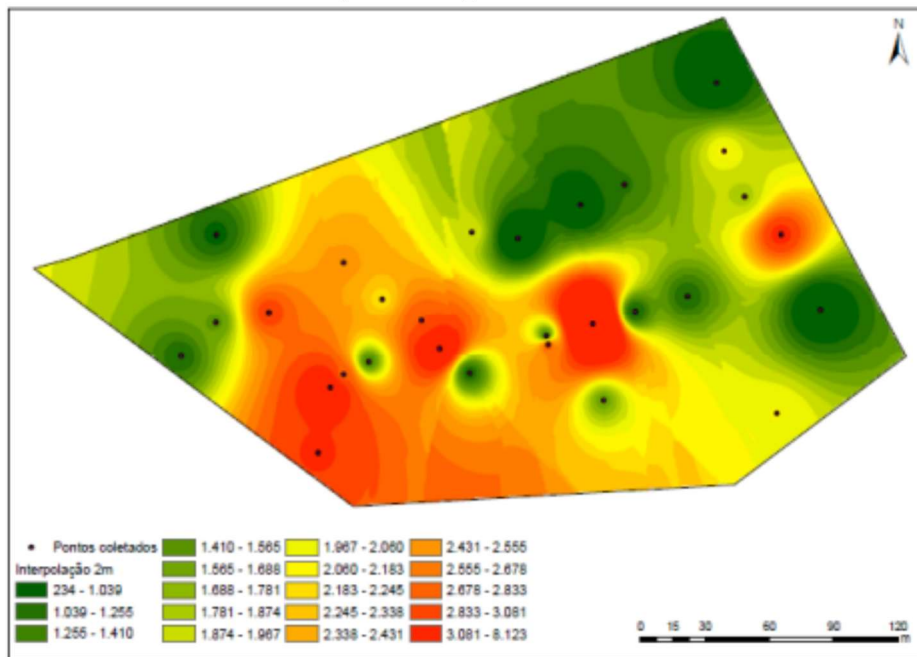
Apesar das dificuldades metodológicas descritas por RIBAS (2023, p. 39), como a necessidade de instalar os eletrodos de medição em solo compacto e a limitação de distâncias maiores entre os eletrodos, além do desafio de aprender a simular malhas de aterramento no software CYMGRD, as ferramentas e diretrizes utilizadas proporcionaram um resultado satisfatório na elaboração de um projeto de malha de aterramento. Os registros dessas etapas estão documentados no trabalho original, incluindo o procedimento de medição com espaçamentos de 2 m, 4 m e 8 m.

3.2.2.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de RIBAS (2023)

O presente estudo sobre a resistividade do solo e o dimensionamento de malhas de aterramento evidenciou um conjunto de vantagens e desvantagens que são relevantes para a configuração de sistemas de aterramento eficazes.

Entre as principais vantagens, destaca-se a geração de mapas de resistividade ilustrado na Figura 6, uma ferramenta essencial que permite a visualização das variações espaciais no solo e suas implicações no desempenho de sistemas de aterramento. Além disso, a estratificação do solo em duas camadas revelou informações cruciais sobre as características distintas de cada estrato, promovendo uma modelagem mais precisa do sistema de aterramento. A garantia da confiabilidade dos dados foi assegurada por meio de múltiplas medições e a análise do desvio padrão, o que contribuiu para a robustez dos resultados obtidos. Ademais, o trabalho aponta para a necessidade de pesquisas futuras, sugerindo a ampliação da densidade amostral e do número de medições, possibilitando assim uma investigação mais abrangente e detalhada.

Figura 7 – Mapa de resistividade.



Fonte: RIBAS (2023).

Contudo, o estudo também enfrentou algumas limitações. Entre estas, encontram-se as dificuldades técnicas relacionadas à cravação dos eletrodos de medição em substratos de alta resistência, o que restringiu a realização de medições em maiores distâncias e, por consequência, poderá ter comprometido a precisão dos dados registrados. Além disso, a

variação da resistividade observada em pontos adjacentes sugere que medições em solos heterogêneos podem resultar em dados inconsistentes, sublinhando a necessidade de um aumento na quantidade de amostras para proporcionar uma análise mais robusta. Por fim, é relevante notar que o trabalho se baseou em apenas três espaçamentos nas medições de cada amostra, limitando potencialmente a compreensão integral das condições do solo e da eficácia do projeto da malha de aterramento.

Essas considerações salientam tanto os benefícios quanto os desafios inerentes ao estudo, reafirmando a necessidade de levar em conta ambos os aspectos na elaboração de sistemas de aterramento que sejam não apenas eficientes, mas também seguros.

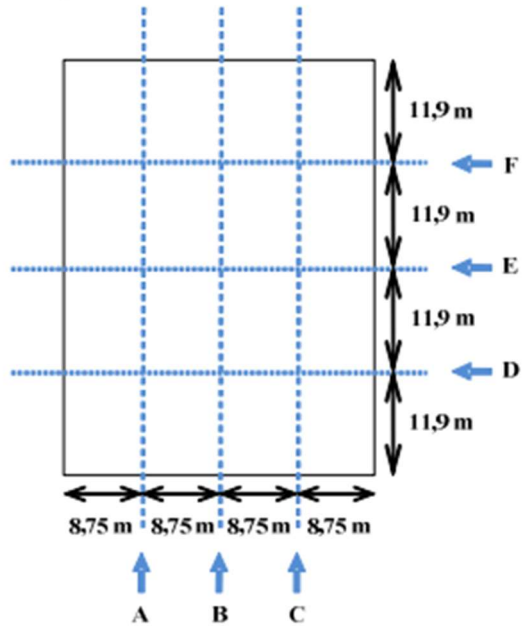
3.2.3 Análise das técnicas de medição em subestações energizadas com base em DIAS (2011)

No estudo de DIAS (2011), foram apresentadas diversas técnicas de medição que podem ser empregadas em conjunto para monitorar e avaliar o estado de conservação das malhas de aterramento. Essas técnicas, aplicadas em subestações energizadas, envolvem a medição da resistividade do solo utilizando o método de Wenner, com diferentes espaçamentos de sondagem para mapear as variações do solo; a medição da resistência da malha de aterramento com e sem energização da subestação, com o objetivo de avaliar sua eficácia em diferentes condições operacionais; e a análise dos potenciais de toque e de passo a partir da simulação computacional.

Além disso, o autor propôs o uso de uma rotina baseada no método das diferenças finitas (MDF) para calcular os potenciais de superfície, ampliando a capacidade de diagnóstico e análise das condições da malha. Essas metodologias foram aplicadas em campanhas distintas no campo e serviram como referência para validar os parâmetros considerados seguros nas normas técnicas. Tais abordagens são fundamentais para garantir a segurança das instalações e o desempenho adequado das subestações energizadas (DIAS, 2011, p. 43–63).

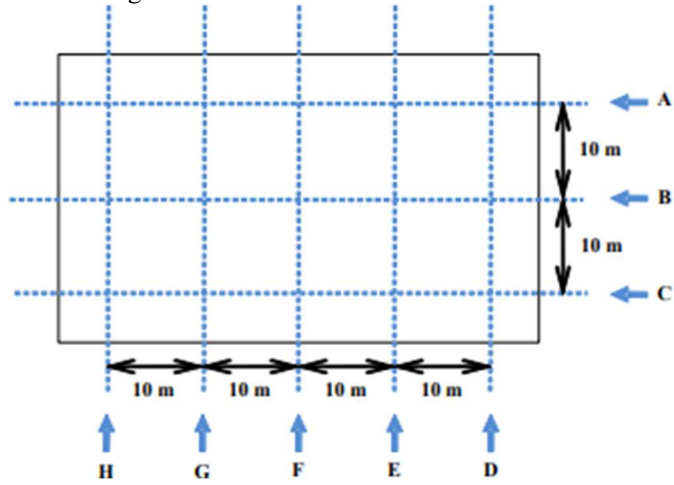
As Figuras 7 e 8 apresentam os casos estudados pelo autor.

Figura 8 - Caso 1 - SE Aroeiras.



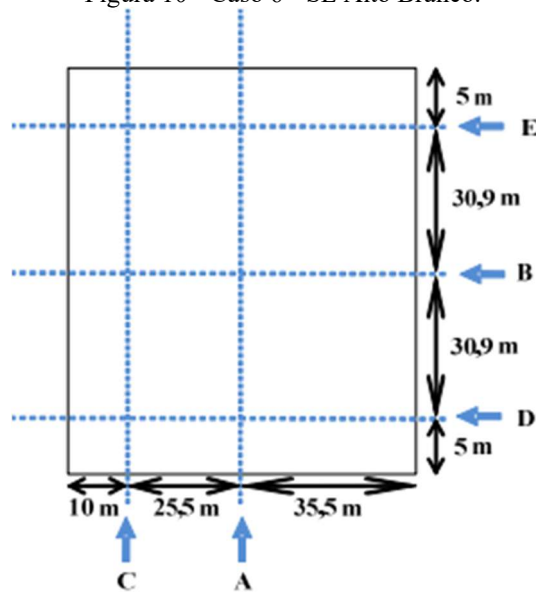
Fonte: DIAS (2011).

Figura 9 - Caso 5 - SE Mataraca.



Fonte: DIAS (2011).

Figura 10 - Caso 6 - SE Alto Branco.



Fonte: DIAS (2011).

Foram realizados estudos de caso em seis subestações de distribuição da Energisa-PB. No entanto, devido às limitações práticas, nem todos os métodos de monitoramento foram aplicados a todas as subestações. A medição da resistividade do solo foi realizada em três subestações (Caso 1, Caso 5 e Caso 6). Nos casos 1 e 6, os resultados indicaram uma resistividade do solo adequada para subestações elétricas. No entanto, o Caso 5 revelou um solo de péssima qualidade, impróprio para subestações, e, mesmo com a malha em boas condições de funcionamento, haveria dificuldades no escoamento da corrente de desequilíbrio do neutro, além de problemas com correntes provenientes de falhas.

Esse método permite realizar medições sem a necessidade de desconectar a malha de aterramento do sistema, o que é especialmente útil em subestações em operação. A técnica baseia-se na aplicação de uma corrente de teste e na medição da tensão gerada, permitindo o cálculo da resistência de aterramento por meio da relação $R = \frac{V}{I}$. A pinça amperimétrica, por sua vez, mede a corrente de fuga e ajuda a detectar possíveis falhas na continuidade da malha. Este procedimento é reconhecido por sua praticidade e segurança, sendo indicado para medições em tempo real sem interromper o funcionamento da subestação (DIAS, 2011, p. 51–84).

Após a validação da técnica de medição em sistemas energizados, ela foi aplicada nas outras subestações. Os resultados de resistência das malhas foram baixos, indicando que as malhas estavam em excelentes condições operacionais, exceto no Caso 5. É importante destacar

que valores elevados de resistência eram esperados para o Caso 5, devido à alta resistividade elétrica do solo nessa área.

A análise gráfica dos potenciais de superfície ao longo do tempo pode contribuir significativamente para o monitoramento e a avaliação do estado de conservação das malhas de aterramento. Assim, pode-se concluir que o monitoramento e a análise das condições das malhas de aterramento exigem uma abordagem abrangente e contínua, não sendo tarefas simples. Portanto, diagnósticos baseados exclusivamente em técnicas de medição isoladas não conseguem refletir as verdadeiras condições das malhas. Dessa forma, é necessário implementar um plano de verificação de forma periódica para garantir um diagnóstico mais confiável das condições operacionais da malha de aterramento.

3.2.3.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de DIAS (2011)

O estudo conduzido por André Dantas Dias destaca uma série de vantagens significativas relacionadas à implementação de técnicas de medição em subestações energizadas. Uma das principais inovações propostas é a possibilidade de realizar medições em tempo real, o que permite a avaliação do estado das malhas de aterramento sem a necessidade de interromper o fornecimento de energia elétrica. Essa característica não apenas assegura a continuidade do serviço prestado aos consumidores, mas também, e principalmente, promove a segurança dos operadores, minimizando os riscos associados ao trabalho em instalações desenergizadas.

Além disso, a pesquisa enfatiza a importância da utilização de um conjunto diversificado de técnicas de medição, tais como a medição de potenciais de superfície e a resistividade do solo. Essa abordagem multifacetada contribui para um diagnóstico mais abrangente e preciso das condições das malhas de aterramento, superando as limitações inerentes aos métodos tradicionais, que frequentemente requerem a desenergização das subestações para sua aplicação.

Outro avanço significativo apresentado na dissertação é o desenvolvimento de uma rotina computacional destinada ao tratamento e análise dos dados obtidos durante as medições. Essa ferramenta computacional possibilita o monitoramento contínuo dos parâmetros de aterramento, permitindo a detecção precoce de degradações e anomalias ao longo do tempo. A representação gráfica bidimensional e tridimensional dos potenciais na superfície do solo,

facilitada por essa rotina, constitui um aporte visual de valor incalculável, pois favorece a identificação de áreas críticas, potencialmente riscada à segurança operacional da instalação.

Entretanto, o estudo também apresenta desvantagens que merecem consideração meticulosa. Primeiramente, a implementação das técnicas inovadoras requer um nível elevado de conhecimento técnico e operacional, o que pode representar um desafio substancial para equipes não familiarizadas com tais metodologias. A complexidade dos procedimentos envolvidos demanda formação especializada, o que pode limitar a adoção generalizada dessas técnicas em determinadas instituições.

Adicionalmente, o custo associado à aquisição de equipamentos específicos e aos softwares necessários para a análise dos dados pode ser um fator restritivo. Este investimento pode ser significativo, principalmente para empresas que operam em contextos orçamentários limitados, dificultando a adoção das novas práticas em uma ampla gama de subestações.

Outra limitação a ser mencionada diz respeito à dependência das condições ambientais, como a umidade do solo, que podem afetar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos. Por conseguinte, torna-se fundamental garantir que os profissionais responsáveis pela medição e monitoramento das malhas de aterramento recebam treinamento contínuo e adequado, de forma a assegurar a correta aplicação das novas técnicas.

Por fim, cabe ressaltar que a eficácia das metodologias propostas pode não ser universalmente aplicável a todas as subestações, especialmente em locais com características variáveis de solo e estruturas. Tal variabilidade pode exigir adaptações específicas, o que pode complicar ainda mais a implementação das novas práticas. Portanto, é evidente que, enquanto as inovações apresentadas no estudo oferecem potencial para melhorias significativas, sua aplicação requer uma análise cuidadosa dos contextos específicos em que serão utilizadas.

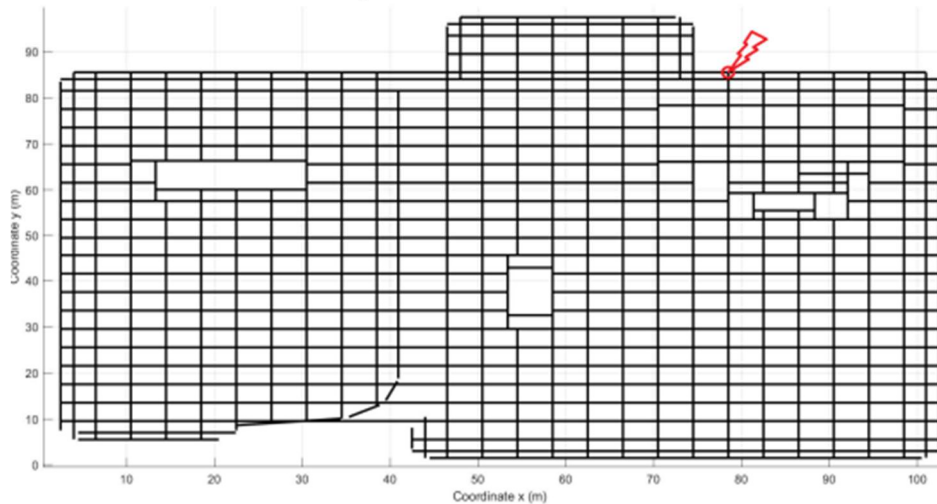
3.2.4 Estudo de OLIZ (2023): Comportamento de malhas de aterramento de subestações tipo GIS submetidas a surtos atmosféricos

As curvas de impedância impulsiva associadas às duas malhas analisadas apresentaram comportamento similar. Conforme previsto, o aumento na resistividade do solo ocasiona uma elevação no potencial de terra (GPR), influenciando diretamente os valores da impedância impulsiva, da impedância de surto e da resistência em baixa frequência. Além disso, foi constatado que a permissividade do meio — uma variável de difícil quantificação — exerce influência considerável sobre as curvas de impedância impulsiva. Por outro lado, a variação do

tempo de subida dos surtos apresentou impacto pouco significativo sobre os parâmetros avaliados.

A Figura 11 aponta uma das malhas estudadas pelo autor.

Figura 11 - Malha de terra.



Fonte: OLIZ (2023).

A análise dos resultados das simulações indicou que as curvas de impedância impulsiva das duas malhas investigadas exibiram comportamentos semelhantes. Conforme era esperado, observou-se que um aumento na resistividade do solo leva a um incremento no potencial de terra (GPR), o que, por sua vez, causa uma alteração considerável na impedância impulsiva, bem como na impedância de surto e na resistência em baixa frequência.

Foi igualmente identificado que a permissividade do meio, um parâmetro complexo do solo, contribui para mudanças significativas nas curvas de impedância impulsiva. Em contraste, surtos de corrente com diferentes tempos de frente de onda não apresentaram uma grande influência nos parâmetros avaliados.

É importante observar que experimentos em alta frequência e a análise do comportamento transitório dos sistemas de aterramento não são práticas comuns entre a maioria dos fabricantes de subestações, sejam elas convencionais (isoladas a ar) ou GIS, nem durante as etapas de comissionamento. Nesse sentido, este estudo contribui ao apresentar um procedimento computacional que permite a análise desses aspectos de maneira mais eficiente e aplicável.

Além disso, vale destacar que a pesquisa abordou casos reais de subestações em funcionamento, utilizando dados de projetos já existentes. O objetivo foi avaliar o

comportamento das malhas de aterramento em subestações do tipo GIS externa, fornecendo informações valiosas para a compreensão e melhoria desses sistemas.

3.2.4.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de OLIZ (2023)

O estudo sobre o comportamento das malhas de aterramento em subestações do tipo GIS submetidas a surtos atmosféricos apresenta alguns prós e contras. Entre os principais prós, destaca-se a metodologia robusta desenvolvida, que combina dados práticos de subestações em operação com simulações computacionais, proporcionando uma validação eficaz dos resultados. Essa abordagem não apenas aumenta a relevância das conclusões, mas também oferece uma compreensão aprofundada de como variáveis do solo, como resistividade e permissividade, influenciam o desempenho das malhas de aterramento. Além disso, ao identificar os riscos associados a surtos atmosféricos, o trabalho contribui para a proteção dos equipamentos, resultando em uma diminuição dos custos de manutenção e das falhas operacionais.

Entretanto, alguns contras também devem ser considerados. As medições de campo focaram principalmente em malhas de aterramento em baixa frequência, o que limita a avaliação da resposta em altas frequências e torna a análise incompleta. Ademais, a dependência dos resultados em condições locais específicas do solo pode dificultar a generalização das conclusões para outros locais com características diferentes. A complexidade das simulações, que requer o uso de ferramentas avançadas como CDEGS e MATLAB, pode ser um desafio para profissionais não familiarizados com esses softwares, restringindo a aplicabilidade da metodologia proposta. Por último, a criação e implementação de sistemas de aterramento adequados, conforme os resultados obtidos, pode resultar em custos elevados, especialmente quando envolve a necessidade de estudos adicionais e simulações complexas. Portanto, esta análise proporciona um panorama equilibrado sobre o impacto do estudo na prática da engenharia elétrica e no projeto de subestações.

3.2.5 Estudo de BARBOSA (2023) sobre o uso de correntes de 25 kHz na medição da resistência de aterramento de malhas de subestações

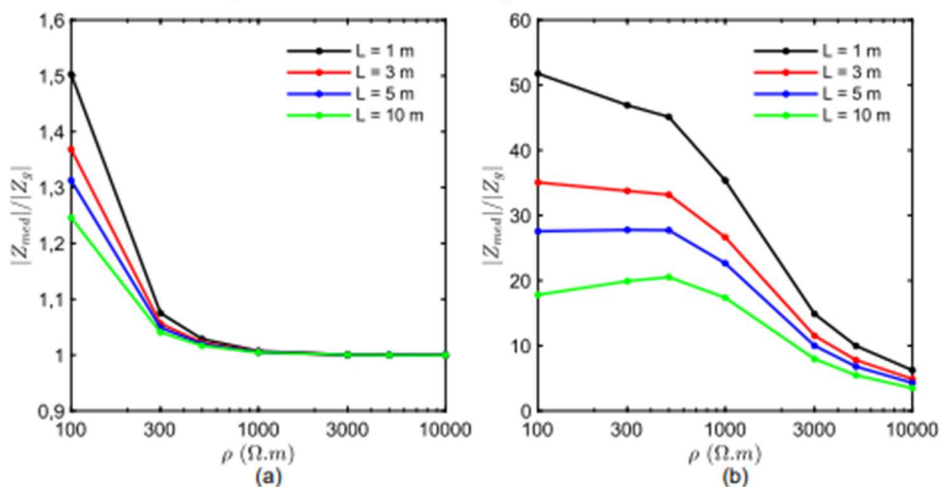
No trabalho de BARBOSA (2023), foram realizadas análises com o objetivo de avaliar o impacto do uso de correntes de baixa e alta frequência para determinar a resistência de

aterramento de malhas reticuladas em subestações. As frequências analisadas foram 100 Hz (baixa frequência) e 25 kHz (alta frequência). Simulações computacionais foram conduzidas para medir as impedâncias de malhas de diferentes tamanhos em ambas as frequências.

Os resultados indicaram que a frequência de 25 kHz não é apropriada para a medição da resistência em muitas malhas, pois, nessa faixa de frequência, os aterramentos apresentaram características de impedância com reatâncias significativas que não podem ser ignoradas.

A figura 12 apresenta os estudos do autor.

Figura 12 - Estudos de comportamento de malhas.

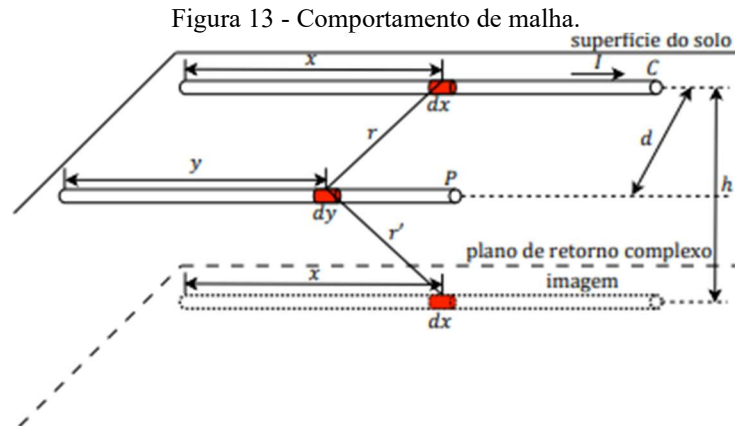


Fonte: BARBOSA (2023).

Ademais, em determinados casos, as impedâncias demonstraram variação de acordo com a posição da malha (Q, L e C). Quando as impedâncias se mostraram iguais nos três pontos, geralmente houve discrepâncias em relação aos valores medidos a 100 Hz. Em relação à compensação de reativos, os resultados indicaram que essa técnica é eficaz apenas para malhas de menor porte e localizadas em solos com resistividade mais baixa. Foram também apresentados resultados de medições, nos quais os dados obtidos em alta frequência foram consistentemente superiores aos obtidos em baixa frequência.

As simulações indicaram que esse fenômeno tende a ocorrer em malhas de aterramento com maiores dimensões e em solos com baixa ou média resistividade. Ressalta-se que, nos locais analisados, não havia dados disponíveis sobre a resistividade do solo, o que pode ter influenciado os resultados. Outro fator relevante é o acoplamento entre os circuitos de corrente e de tensão, que pode intensificar os erros de medição em altas frequências. Essa limitação foi evidenciada nas medições realizadas no município de Araripina, situado no sertão de Pernambuco, onde os circuitos de medição apresentavam extensões consideráveis.

A Figura 13 apresenta o esquema para obter o modelo de análise de comportamento da malha.



Fonte: Autor (2025).

A 25 kHz, a partir dos resultados das simulações, foram observadas diferenças consideráveis nos resultados em comparação com os obtidos a baixa frequência. De maneira geral, a componente reativa da impedância não pode ser ignorada em relação à componente real, de modo que os valores das impedâncias em alta frequência diferem dos valores obtidos a 100 Hz. Em algumas situações, constatou-se que a impedância pode variar dependendo da posição onde a corrente é injetada na malha.

Em outros casos, embora a impedância apresente o mesmo valor nas posições analisadas, o módulo da impedância é significativamente diferente quando comparado aos valores obtidos a 100 Hz. Quanto à técnica de compensação reativa, as simulações mostraram que ela é eficaz apenas para malhas de pequeno porte localizadas em solos com resistividade inferior a 1 k Ω .m. Em outros casos, a parcela real da impedância medida a 25 kHz apresentou valores discrepantes em relação aos obtidos a 100 Hz. Dessa forma, a compensação reativa é limitada a malhas menores em solos de baixa a média resistividade.

3.2.5.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de BARBOSA (2023)

A dissertação em questão ressalta tanto as vantagens quanto as desvantagens do emprego de correntes de 25 kHz para a medição da resistência de aterramento em malhas de subestações.

Dentre os aspectos positivos, destaca-se a capacidade de desacoplar os cabos para-raios, possibilitada pelo uso da alta frequência. Essa propriedade ajuda a reduzir as

interferências que podem ocorrer durante a medição, resultando em leituras mais precisas. Além disso, os resultados obtidos indicam que a corrente de medição que flui pelo cabo para-raios pode ser minimizada, evitando, assim, a ocorrência de erros significativos nas medições. Outro ponto vantajoso é a eficácia do uso de 25 kHz para determinar a resistência de malhas de aterramento, especialmente em dimensões grandes e com variadas resistividades do solo, o que amplia a aplicabilidade dessa técnica em diferentes cenários. Ademais, as informações geradas por equipamentos operando em 25 kHz mostraram-se semelhantes aos dados obtidos por equipamentos tradicionais que funcionam a 100 Hz, evidenciando que a nova abordagem não compromete a precisão das medições.

Por outro lado, o estudo também aponta algumas desvantagens associadas. Uma delas é a falta de normas e diretrizes que definam critérios para o uso de dispositivos de alta frequência. Essa ausência pode restringir a adoção ampla da técnica e evidencia a necessidade de mais pesquisas sobre os efeitos das medições realizadas nessa faixa de frequência. Outro fator a ser considerado é que as medições em alta frequência podem exibir variações significativas entre diferentes instrumentos, exigindo uma análise cuidadosa dos resultados obtidos. Além disso, as condicionantes do solo, como resistência e umidade, podem impactar os resultados, tornando-se um aspecto que deve ser controlado para assegurar a exatidão das medições. Finalmente, a dissertação enfatiza que ainda existem poucos estudos sobre os efeitos da alta frequência, o que aponta para a necessidade de uma base teórica e prática mais robusta para fundamentar a metodologia proposta.

Essas reflexões sobre as vantagens e desvantagens devem ser consideradas ao optar pela implementação de técnicas de medição que utilizem correntes de 25 kHz, levando em conta seu potencial para melhorar a eficácia nas medições de resistência de aterramento.

3.2.6 Estudos complementares

3.2.6.1 Estudo de ZENG et al. (2005)

Uma pesquisa sobre o impacto dos CPRs nas medições em subestações foi conduzida por ZENG et al. (2005). Neste estudo, os autores realizaram comparações entre os resultados da medição da impedância de aterramento obtidos por simulações e medições no campo. A malha simulada inicialmente tinha dimensões de 100m x 100m e estava localizada em um solo com resistividade de 150 Ω .m.

Durante as simulações, variaram-se a impedância do pé-de-torre das estruturas de linhas de transmissão (LT), a impedância da malha de aterramento e o número de CPRs

conectados à malha. Os resultados mostraram que o aumento da impedância do pé-de-torre reduz a corrente desviada, enquanto o aumento da impedância da malha e do número de CPRs conectados à subestação resulta em um aumento na corrente.

A segunda simulação foi realizada com uma malha de subestação real, com dimensões de 250m x 400m, conectada a 14 CPRs, e os resultados obtidos foram comparados com os dados das medições realizadas na subestação. Ao comparar os resultados das medições com a malha conectada e desconectada dos CPRs, observou-se que a conexão dos cabos diminui a impedância de aterramento, mas causa um aumento no ângulo de fase devido ao aumento da indutância total do sistema. Os autores sugerem em suas conclusões que, sempre que possível, os CPRs devem ser desconectados antes de realizar a medição.

3.2.6.2 Estudo de CHOI ET AL. (2004)

No estudo de CHOI ET AL. (2004), são apresentados os resultados da medição da resistência de aterramento de uma subestação em operação, conectada a CPRs de linhas de transmissão e aos neutros das linhas de distribuição. Os pesquisadores realizaram medições das correntes que percorrem os CPRs e os neutros, bem como da tensão gerada no sistema de aterramento.

A corrente que entra no aterramento é calculada pela diferença entre a corrente injetada durante a medição e as correntes desviadas, sendo o valor de R_g obtido pela relação entre a tensão medida e a corrente da malha. Esses dados foram comparados com a situação em que as correntes de desvio não foram compensadas, resultando em um erro de 6%.

Uma outra abordagem para determinar a resistência (ou impedância) de malhas de aterramento em subestações conectadas a CPRs é discutida por PULZ ET AL. (2022). Esta abordagem envolve a realização de medições para determinar as tensões geradas no solo. Em seguida, são aplicados cálculos para calcular a resistência (ou impedância) da malha e do sistema externo conectado à subestação, utilizando técnicas de otimização.

A metodologia proposta exige, como parte essencial, a medição das correntes que circulam pelos CPRs. Além disso, os resultados obtidos são analisados para avaliar a eficácia da segurança da subestação, considerando parâmetros como corrente de curto-circuito e os potenciais de toque e passo.

A validação dessa técnica foi feita por meio da comparação com estudos anteriores que também apresentaram medições em subestações, além de medições realizadas pelos

próprios autores em uma malha experimental e em duas subestações reais. No entanto, a técnica não leva em consideração os ângulos de fase da tensão, corrente e impedância, e, por isso, os autores destacam que os resultados são conservadores, mas ainda assim relevantes para a avaliação dos critérios de segurança em subestações.

4 MÉTODOS DE MONITORAMENTO *ONLINE*

4.1 Introdução

Conforme as normas técnicas, como a NBR 5410 e a NBR 15751, a malha de aterramento deve manter uma baixa resistência elétrica ao longo do tempo, assegurando que qualquer corrente de falta possa ser rapidamente dissipada. No entanto, fatores como corrosão, envelhecimento dos materiais, rompimentos mecânicos e ações eletroquímicas do solo podem comprometer a integridade da malha, elevando sua impedância e, conseqüentemente, tornando o sistema menos eficaz e potencialmente perigoso (ABNT, 2010).

Nesse contexto, a simples instalação de uma malha de aterramento não garante a segurança contínua do sistema elétrico. É essencial adotar práticas de monitoramento que assegurem sua operação adequada ao longo do tempo. No passado, a inspeção da integridade dessas malhas era feita, em grande parte, de forma manual, através de testes de resistência de terra realizados periodicamente com instrumentos portáteis, muitas vezes exigindo o desligamento parcial da instalação para segurança dos técnicos envolvidos (GOMES et al., 2019).

Com a evolução tecnológica e o avanço da automação industrial, surgem novas alternativas para esse tipo de verificação: os métodos de monitoramento *online* de malhas de aterramento. Essas soluções, baseadas em sensores e sistemas de aquisição de dados embarcados, permitem a coleta, processamento e transmissão contínua de informações sobre o estado da malha, sem a necessidade de paralisação do sistema elétrico (RODRIGUES, 2018).

O monitoramento *online* de malhas de aterramento pode ser definido como o conjunto de técnicas, equipamentos e algoritmos aplicados para avaliar em tempo real a condição elétrica e estrutural das malhas de aterramento instaladas em ambientes energizados. O objetivo central é detectar precocemente alterações nos parâmetros elétricos — como resistência, impedância, continuidade ou integridade física dos condutores — que indiquem falhas, desgaste ou risco potencial à segurança operacional da instalação (SILVA, 2020).

Esses sistemas normalmente utilizam sensores de corrente e tensão, módulos de processamento embarcado e canais de comunicação — como redes industriais cabeadas ou sem fio — para transmitir os dados ao centro de operação e manutenção. Com isso, torna-se possível realizar diagnósticos em tempo real e implantar ações de manutenção preditiva, otimizando custos e aumentando a confiabilidade da instalação (RODRIGUES, 2018).

Além disso, ao integrar o monitoramento online com sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e bancos de dados históricos, é possível mapear o comportamento da malha ao longo do tempo, identificar tendências de deterioração e priorizar intervenções em pontos críticos antes que se transformem em falhas graves (RODRIGUES, 2018).

Diferente dos métodos convencionais que exigem a interrupção da operação para realização de testes de continuidade e resistência, os métodos online permitem a manutenção preditiva e aumentam a disponibilidade operacional do sistema elétrico (GOMES et al., 2019). Além disso, esses sistemas contribuem para a segurança das instalações, prevenindo acidentes elétricos e aumentando a confiabilidade geral das redes de energia.

4.2 Estudo de BASTIAN et al. (2015): Monitoramento em tempo real de GPR e da impedância do sistema de aterramento de subestações utilizando faltas no sistema elétrico

O estudo conduzido por BASTIAN et al. (2015) examina a importância do monitoramento contínuo dos sistemas de aterramento em subestações elétricas, ressaltando a necessidade de garantir a segurança e a confiabilidade das operações elétricas. Durante falhas, como as falhas de aterramento (GF), as correntes de falha retornam ao ponto de aterramento através da massa de terra e da grade de aterramento local, elevando o potencial de aterramento (GPR) na subestação. Essas elevações podem criar riscos elétricos, como os perigos de toque e passo, que podem afetar tanto os funcionários quanto a população circundante. Portanto, garantir a eficácia dos sistemas de aterramento é uma responsabilidade crucial para os proprietários de subestações.

As normas de segurança recomendam que os sistemas de aterramento sejam avaliados ao longo de sua vida útil, mas a execução dessas avaliações, que geralmente incluem inspeções visuais e testes de injeção de corrente, impõe desafios logísticos significativos para empresas que operam várias subestações. Para abordar essas questões, os autores propõem um sistema de monitoramento em tempo real que permite a avaliação do desempenho do sistema de aterramento durante eventos de GF. A metodologia envolve a coleta de dados sobre GPR em situações reais de falha, o que permite calcular a impedância do sistema de aterramento e estabelecer perfis probabilísticos importantes para caracterizar o desempenho da instalação.

Os resultados do estudo revelam múltiplos benefícios do monitoramento em tempo real. Em primeiro lugar, a capacidade de detectar alterações na impedância do sistema de aterramento em tempo real possibilita intervenções rápidas, prevenindo falhas que possam

comprometer a segurança operacional. Além disso, o monitoramento ajuda a validar suposições e análises realizadas durante a fase de projeto do sistema de aterramento, promovendo uma compreensão mais clara do seu desempenho em condições reais. A coleta contínua de dados também possibilita o desenvolvimento de modelos probabilísticos que podem melhorar as avaliações de risco, um aspecto essencial para a segurança nas operações de subestações.

Entretanto, o estudo também destaca desafios potenciais, como a complexidade técnica na implementação do sistema de monitoramento e a variabilidade das situações de falha, que podem dificultar a análise consistente dos dados coletados. Apesar desses desafios, as vantagens do monitoramento em tempo real são promissoras. O trabalho de BASTIAN et al. (2015) representa um avanço significativo nas práticas de gestão de sistemas de aterramento, potencializando a segurança e a eficiência das operações no setor elétrico. Assim, a pesquisa não apenas esclarece a relevância da monitorização contínua, mas também abre caminhos para futuras investigações sobre a modelagem probabilística das falhas no sistema elétrico, contribuindo para a segurança e a eficácia na operação de subestações.

4.2.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de BASTIAN et al. (2015)

O estudo apresenta várias vantagens relacionadas ao sistema de monitoramento em tempo real do desempenho de sistemas de aterramento em subestações. Em primeiro lugar, essa abordagem permite uma vigilância contínua, o que facilita a detecção de alterações na impedância ao longo do tempo. Essa capacidade é crucial para identificar falhas em componentes críticos, como ligações de cabos e fios de proteção, garantindo, assim, a segurança e a eficácia operacional do sistema. Além disso, o monitoramento dinâmico possibilita a validação dos parâmetros de projeto estabelecidos pelos engenheiros, aumentando a confiabilidade nas análises realizadas durante a fase de planejamento.

Outro aspecto positivo é a capacidade de gerar dados que possibilitam a criação de perfis probabilísticos, ajudando na avaliação de riscos associados a choques elétricos e potenciais de passo e toque. Isso é particularmente relevante para a gestão de segurança em ambientes em que a exposição a esses riscos é uma preocupação constante. O sistema também se mostra uma ferramenta útil de gerenciamento de ativos, fornecendo alertas precoces sobre quaisquer aumentos na impedância do sistema de aterramento, o que pode levar a ações de manutenção preventivas e, conseqüentemente, à redução de custos operacionais.

No entanto, o estudo também aponta algumas desvantagens que precisam ser consideradas. A implementação do sistema de monitoramento pode ser tecnicamente complexa, exigindo conhecimento especializado para sua instalação e operação efetiva. Além disso, a variabilidade nos cenários de falta pode dificultar a realização de análises consistentes, uma vez que diferentes condições podem afetar as medições do GPR e a impedância. O custo de desenvolvimento e instalação desse tipo de sistema pode ser significativo, representando um desafio para utilitários que gerenciam múltiplas subestações. Por fim, é importante ressaltar que o desempenho do sistema de monitoramento está intrinsecamente ligado à integridade física dos componentes de aterramento. Eventuais falhas em outros componentes do sistema elétrico podem comprometer a eficácia das medições e do monitoramento, sublinhando a necessidade de uma abordagem holística na gestão da infraestrutura elétrica.

4.3 Estudo de LONG et al. (2012): Monitoramento *online* das condições da malha de aterramento de subestações usando sensores de tensão de toque e passo

No contexto da segurança elétrica, as malhas de aterramento em subestações desempenham um papel crucial na redução de elevações de potencial que podem afetar tanto os operadores quanto os equipamentos. A avaliação confiável dessas malhas é essencial para prevenir danos e garantir a segurança operacional. O estudo realizado por LONG et al. (2012) apresenta um novo esquema de monitoramento online para as condições das malhas de aterramento, superando limitações dos métodos tradicionais de medição, que muitas vezes dependem de medições pontuais e têm respostas lentas a mudanças rápidas nas condições de aterramento.

A metodologia proposta no estudo envolve a injeção contínua de corrente com o uso de um gerador de sinal baseado em tiristores, que simula uma falha temporária ao injetar uma corrente de teste controlável na grade de aterramento. Este processo gera as tensões de toque e passo que são fundamentais para avaliar a condição do sistema. Sensores distribuídos em pontos estratégicos monitoram continuamente essas tensões, transmitindo os dados coletados de forma sem fio para um banco de dados centralizado. Nesse banco de dados, os dados são analisados em comparação com medições históricas, permitindo uma avaliação contínua das condições da grade de aterramento.

Entre as várias vantagens do sistema de monitoramento online, destaca-se a capacidade de resposta rápida a alterações nas condições de aterramento, o que reduz o risco de falhas

inesperadas que poderiam resultar em acidentes. Além disso, a análise histórica dos dados fornece *insights* valiosos sobre tendências e permite prever problemas antes que se tornem críticos. A flexibilidade do sistema também permite adaptações na frequência das medições durante condições meteorológicas extremas, assegurando que a segurança seja mantida em todos os momentos, e o uso de sensores sem fio simplifica a infraestrutura necessária para a operação.

Em conclusão, o estudo de LONG et al. (2012) apresenta um avanço significativo na forma como as condições das malhas de aterramento são monitoradas em subestações elétricas. A adoção de um sistema de monitoramento *online* permite às concessionárias elétricas garantir um nível mais elevado de segurança e eficiência operacional. Entretanto, o estudo também aponta que a pesquisa pode ir além do monitoramento de tensões de toque e passo, sugerindo o desenvolvimento futuro de sensores voltados para a proteção de equipamentos, a fim de criar um sistema ainda mais abrangente que atenda a todas as facetas da segurança elétrica em subestações. Com a evolução contínua da tecnologia de comunicação e sensores, espera-se que esse método se torne um componente vital dos sistemas de subestações inteligentes, facilitando intervenções proativas e melhorando o gerenciamento dos ativos de infraestrutura elétrica.

4.3.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de LONG et al. (2012)

No estudo "Monitoramento *online* das condições da malha de aterramento de subestações usando sensores de tensão de toque e passo" realizado por LONG et al. (2012), foram identificadas vantagens e desvantagens relacionadas à implementação de um sistema de monitoramento *online* das condições da malha de aterramento de subestações.

Entre as vantagens do sistema, destaca-se a capacidade de monitoramento contínuo, que permite a medição em tempo real das tensões de toque e passo. Essa característica proporciona informações atualizadas sobre as condições da malha de aterramento, melhorando a capacidade de resposta a alterações nas condições do solo e a outros fatores que podem impactar a segurança operacional. Além disso, o sistema facilita a detecção rápida de problemas, como a corrosão e o roubo de varas de aterramento, que podem comprometer a integridade do sistema, superando as limitações dos métodos de medição *offline* que realizam análises pontuais.

A utilização de tecnologia avançada, que inclui sensores de detecção e medição de corrente e tensão sem fio e comunicação de dados em tempo real, resulta em uma infraestrutura

menos complexa para realização das medições, tornando o sistema mais acessível e de fácil manutenção. Outro ponto positivo é a capacidade de análise histórica e comparativa, possibilitada pelo uso de um banco de dados que permite a comparação das medições atuais com dados históricos. Essa funcionalidade contribui para a avaliação de tendências e a antecipação de problemas potenciais, considerando variações sazonais e outros fatores que podem afetar a segurança.

No entanto, a implementação do sistema também apresenta desvantagens significativas. Primeiramente, o custo associado à instalação de um sistema de monitoramento *online* pode ser elevado, englobando despesas relacionadas à tecnologia de sensores, infraestrutura de comunicação e à manutenção do banco de dados. Ademais, a eficácia do sistema passa a depender da confiabilidade das tecnologias utilizadas, como a rede sem fio e a integridade dos sensores, visto que falhas técnicas podem resultar em lacunas críticas na monitoração.

Outrossim, a complexidade inerente ao gerenciamento de tal sistema pode representar um desafio adicional para as concessionárias, que necessitarão de pessoal capacitado para a operação e manutenção da infraestrutura. Além disso, embora a abordagem online melhore a coleta de dados, sua interpretação requer um conhecimento técnico específico e uma capacidade analítica apropriada para diferenciar entre variações normais e problemas reais no sistema.

Por fim, é importante ressaltar que o sistema se concentra nas tensões de toque e passo, aspectos que estão diretamente relacionados à segurança das pessoas. Isso pode limitar sua eficácia em abordar outras preocupações, como a proteção de equipamentos, o que sugere a necessidade de uma abordagem mais abrangente em monitoramento de sistemas de aterramento.

Assim, ao considerar as vantagens e desvantagens identificadas, fica evidente que, embora o sistema de monitoramento online traga melhorias significativas em relação às práticas tradicionais, ele também impõe desafios que devem ser cuidadosamente considerados pelas concessionárias ao implementar essa tecnologia.

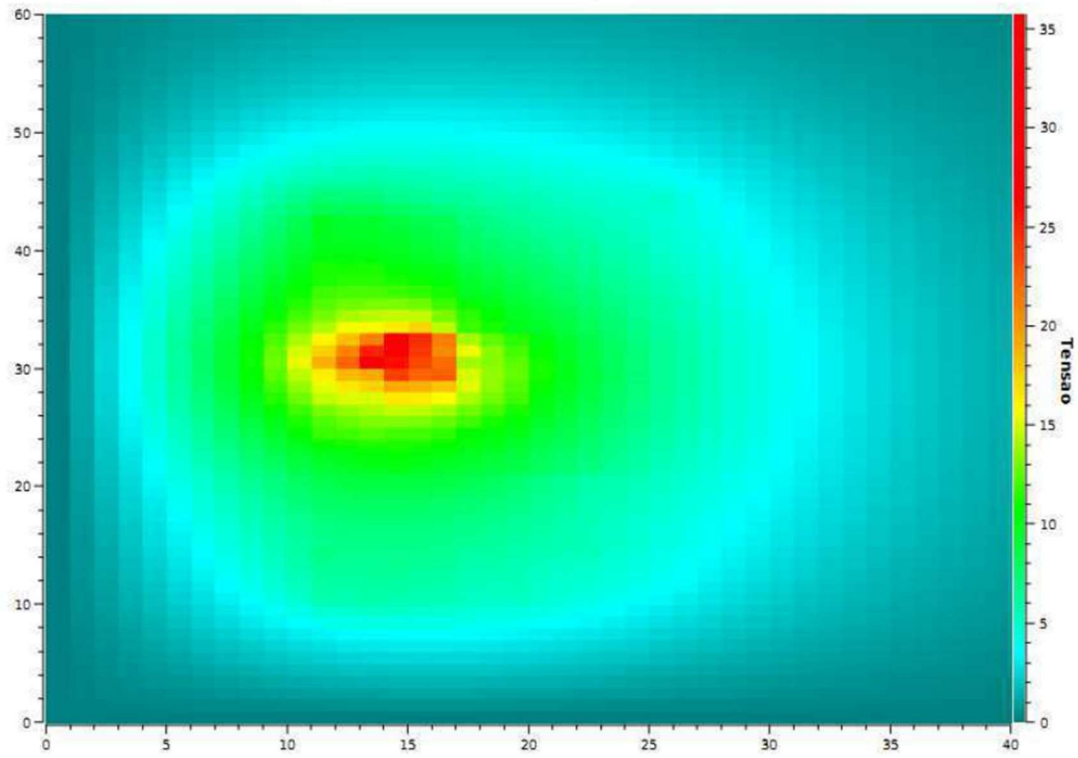
4.4 Sistema eletrônico embarcado para diagnóstico das condições de aterramento: estudo de GOMES (2012)

No trabalho de GOMES (2012), as medições dos potenciais de superfície foram realizadas em ambiente laboratorial, seguindo a metodologia de Ensaio de Medição de Malha

de Aterramento. Essa metodologia baseia-se na aplicação de uma corrente alternada de baixa frequência na malha de aterramento, com a medição da diferença de potencial entre dois eletrodos dispostos sobre o solo. O objetivo é avaliar a distribuição dos potenciais de toque e de passo, permitindo identificar a integridade da malha e possíveis falhas no sistema de aterramento. O procedimento foi realizado por meio de um gerador de corrente, multímetro digital e sistema de aquisição de dados. Foram registrados 91 pontos de medição, com distância média de 1,5 m entre eles, simulando uma malha de subestação energizada em ambiente controlado.

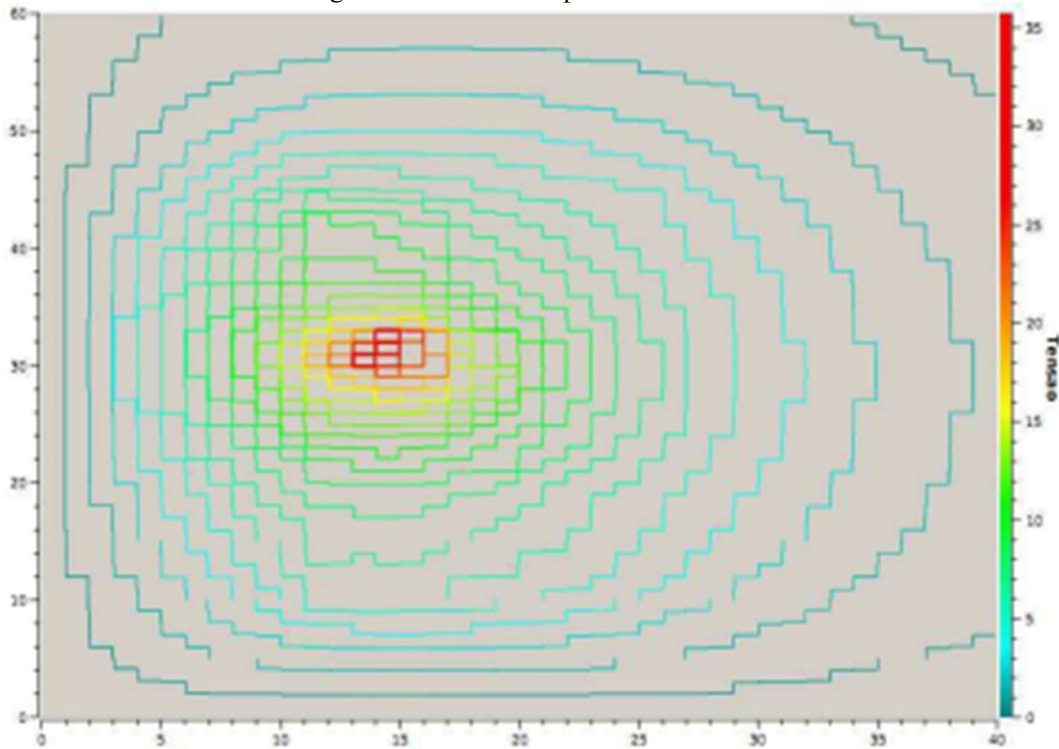
O ponto de referência foi colocado a 48 m da malha de aterramento, e uma corrente de desequilíbrio de 5A foi injetada no sistema. Os resultados fornecidos pelo sistema eletrônico embarcado, para as condições de regime permanente, estão ilustrados nas Figuras 14 e 15, que mostram respectivamente a distribuição dos potenciais de superfície e as linhas equipotenciais no solo.

Figura 14 - Potencial da superfície da malha.



Fonte: Gomes (2012).

Figura 15 - Potencial superficial da malha.



Fonte: Gomes (2012).

No desenvolvimento do sistema eletrônico embarcado para o diagnóstico das condições operacionais da malha de aterramento energizada, foram empregadas diversas tecnologias, como microcontroladores na criação do sistema de medição, uma linguagem de programação embarcada para implementar a rotina computacional e a plataforma Beagleboard para gerenciar o sistema e permitir a interação do usuário.

O sistema eletrônico embarcado foi inspirado no medidor de potencial e representa uma evolução do método de diagnóstico utilizado na dissertação de DIAS (2011), pois aprimora a técnica ao integrar, em um único equipamento, o sistema de medição e o mapeamento dos níveis de potencial de superfície, tornando o diagnóstico mais eficaz e acessível. No trabalho de GOMES (2012), os resultados obtidos demonstraram a capacidade do sistema em detectar variações nos potenciais ao longo da malha, possibilitando a identificação de pontos com maior risco de degradação, o que valida sua aplicação no monitoramento e avaliação da integridade de sistemas de aterramento.

4.4.1 Análise de vantagens e desvantagens do método de GOMES (2012)

O estudo em questão destacou qualidades e limitações relacionadas ao sistema eletrônico embarcado desenvolvido para a avaliação das condições de aterramento em subestações energizadas.

Dentre as qualidades, destaca-se a capacidade do sistema de realizar avaliações das condições de aterramento sem a necessidade da desenergização da subestação, um aspecto fundamental para a garantia da continuidade do fornecimento de energia elétrica. Adicionalmente, o sistema proporciona medições em tempo real, o que facilita um monitoramento contínuo das condições operacionais. Outro benefício relevante é a habilidade do sistema de gerar mapas raciais de potenciais superficiais, permitindo a identificação de áreas com potenciais degradações ou falhas no sistema de aterramento. Por último, a integração das funções de medição e processamento em um único dispositivo otimiza o diagnóstico, resultando em uma resposta mais ágil e eficiente.

Entretanto, foram identificadas desvantagens que necessitam de consideração cuidadosa. Uma delas é a dependência de tecnologias específicas, como microcontroladores e a plataforma Beagleboard, o que pode restringir a adaptabilidade do sistema em contextos diversos. Ademais, embora os resultados apresentados tenham demonstrado uma precisão satisfatória em comparação com instrumentos convencionais, como osciloscópios, ainda

permanece uma margem de erro a ser considerada nas medições eletrônicas. Por fim, a complexidade operacional do sistema pode requerer um nível adequado de conhecimento técnico, o que pode constituir uma barreira para usuários que não possuem formação especializada em engenharia elétrica.

Esses fatores evidenciam tanto a relevância quanto os desafios associados à implementação de sistemas tecnológicos inovadores voltados para o diagnóstico das condições de aterramento em subestações eletrificadas.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

O problema de pesquisa proposto neste trabalho foi respondido por meio de uma revisão sistemática da literatura especializada, permitindo compreender como diferentes técnicas e metodologias vêm sendo empregadas na análise do comportamento de malhas de aterramento em subestações energizadas. A partir dos estudos analisados, verificou-se que é possível realizar diagnósticos confiáveis da integridade das malhas sem a necessidade de desenergizar os sistemas, utilizando medições de campo, simulações computacionais e sistemas embarcados.

Embora a escassez de material disponível tenha sido um limitador do desenvolvimento do projeto em questão, a inclusão de estudos mais antigos forneceu informações valiosas sobre as interações entre trabalhos, identidade e profissões de alto risco, sendo fundamental para fornecer uma visão mais completa da literatura existente e entender a evolução do debate sobre o tema, além de permitir a comparação entre abordagens passadas e as mais recentes.

Assim, os objetivos declarados foram plenamente alcançados. Os principais parâmetros que afetam a segurança e eficiência da rede podem ser determinados, tais como resistividade do solo, frequência da corrente de teste, geometria da rede e tipo de instalação. Além disso, o estudo reúne e compara diferentes métodos utilizados em medições e simulações reais, demonstrando a importância de análises abrangentes para obter resultados mais precisos e preventivos.

Os resultados da revisão evidenciam a evolução das técnicas de medição e diagnóstico ao longo dos anos, e apontam para a crescente relevância de sistemas automatizados, análise gráfica dos potenciais e uso de correntes alternadas de alta frequência na avaliação das malhas. Essas abordagens têm se mostrado promissoras para garantir a segurança operacional e a longevidade das instalações elétricas.

Conclui-se, assim, que o estudo investigativo sobre os métodos permitiu revisar os conhecimentos essenciais sobre os métodos de avaliação de malhas de aterramento em subestações, destacando a importância da adoção de estratégias integradas, seguras e adequadas à realidade operacional das instalações em regime energizado.

5.2 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos de caso com aplicação prática das técnicas identificadas nesta revisão, bem como o desenvolvimento de ferramentas de monitoramento contínuo e em tempo real. Investigações em diferentes condições geográficas e tipos de solo também podem enriquecer o campo e permitir o aperfeiçoamento das normas técnicas vigentes.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Arthur Francisco et al. "Análise de um novo fator geométrico para medição de resistividade do solo." *Revista Tecnologia em Marcha*, vol. 34, no. 7, 2021, pp. 171–181.
- ARANHA, Bruno Gomes. **Gerenciamento de projetos de subestações de alta tensão em parques eólicos: estudo de caso**. Trabalho de Graduação (Bacharelado – Engenharia elétrica). Ilha Solteira, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15751: Sistema de aterramento de subestação**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Rio de Janeiro, 2012.
- BARBOSA, Ericles Mauricio. **Avaliação do uso de correntes de 25 kHz na medição da resistência de aterramento de malhas de subestações**. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2023.
- BASTIAN, Matthew B.; CARMAN, William D.; WOODHOUSE, Darren J. **Real-Time Monitoring of Substation Ground Potential Rise and Grounding System Impedance Using Power System Faults**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 51, n. 6, p. 5298-5304, nov./dez. 2015. DOI: 10.1109/TIA.2015.2470420.
- BEZERRA, Sergio Ricardo Campos. "Avaliação de sistemas de aterramento considerando a utilização de condutores e hastes envolvidos em concreto." Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2011
- CHOI, Jong-kee et al. **A new method of grounding performance evaluation of multigrounded power systems by ground current measurement**. 2004 International Conference on Power System Technology, Powercon. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- COUTINHO, Braulio Roberto de Melo. **Avaliação de malhas de aterramento de subestações: uma abordagem probabilística do risco de fatalidades**. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2021.
- DIAS, André Dantas. **Malhas de aterramento em subestações energizadas: medições e análises**. Dissertação (Mestrado – Engenharia elétrica). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.
- DIAS, Luidi Filipe Oliveira Cruz. **Metodologia de aterramento para subestação utilizando o software Tecat Plus 6.3**. Monografia (Graduação – Engenharia da Computação). Brasília, 2018.
- GOMES, Luana de Vasconcelos. **Sistema eletrônico embarcado para diagnóstico das condições de aterramento de subestações energizadas**. Dissertação (Mestrado – engenharia elétrica). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2012.

LONG, X.; DONG, M.; XU, W.; LI, Y. W. **Online monitoring of substation grounding grid conditions using touch and step voltage sensors**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 3, n. 2, p. 761-768, jun. 2012. DOI: 10.1109/TSG.2011.2171223.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

OLIZ, Diego Mizette. **Estudo do comportamento de malhas de aterramento de subestações tipo GIS submetidas a surtos atmosféricos**. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2023.

PAIVA, Gustavo Raphael Alves. **Análise teórica-experimental do comportamento de topologias clássicas de aterramentos elétricos conhecidos quando interligadas entre si: um estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Engenharia Elétrica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Itumbiara, 2021.

PIMENTA, Camila Madeiros Alcantara. "Avaliação da influência da resistividade elétrica do solo e de tipos de envelopamento no sistema de aterramento elétrico de subestações." Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2017.

PULZ, Lucas T. C. et al. **Evaluation of a methodology for estimating the symmetrical ground current in substations: a study considering the influence of transmission lines guard wire**. 2022.

RIBAS, Ronan Moreira. **Estudo da resistividade do solo e dimensionamento de malha de aterramento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Engenharia elétrica). Universidade Federal de Ouro Preto. João Monlevade, 2023.

Ribeiro, Geovane Romeu. "Cálculo da impedância de aterramento usando modelos analíticos e o método de elementos finitos: resistividade e permissividade dependentes da frequência." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2024

ROSA, Wagner. **Metodologia para avaliação das consequências da expansão dos sistemas elétricos nos sistemas de aterramento das subestações**. Dissertação (Mestrado – Sistemas de Energia). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

SILVA, Joana Ventura da. "Um estudo da resistividade do solo em sistemas de aterramento: simulação numérica e modelo matemático." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

STEFANELLO, Roberta. **Influência da resistividade do solo no desempenho de malhas de aterramento em uma rede de distribuição do tipo T2F**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2024.

ZENG, Rong et al. **Influence of overhead transmission line on grounding impedance measurement of substation**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 1219-1225, abril 2005.