



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REGINA VICTÓRIA DE LUCENA PERONICO

ANÁLISE DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM REPETIDORAS NO SOLO DO
ESTADO DO TOCANTINS: UM ESTUDO DE CASO

Palmas, TO

2024

Regina Victória de Lucena Peronico

**ANÁLISE DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM REPETIDORAS NO SOLO DO
ESTADO DO TOCANTINS: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada à Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Palmas para obtenção do título de bacharel em engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Barbosa de Oliveira Neto

Palmas, TO

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- P453a Peronico, Regina Victoria de Lucena.
Análise dos sistemas de aterramento em repetidoras no solo do estado do Tocantins: um estudo de caso. / Regina Victoria de Lucena Peronico. – Palmas, TO, 2024.
61 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2024.
Orientador: Antonio Barbosa de Oliveira Neto

1. Aterramento. 2. Estação Repetidora. 3. Análise de Árvore de Falha. 4. Estado do Tocantins. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

REGINA VICTÓRIA DE LUCENA PERONICO

ANÁLISE DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM REPETIDORAS NO SOLO DO ESTADO DO TOCANTINS: UM ESTUDO DE CASO

Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, foi avaliada para a obtenção do título de graduação em engenharia elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 04/12/2024

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO BARBOSA DE OLIVEIRA NETO**
Data: 05/12/2024 11:56:24-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Antonio Barbosa de Oliveira Neto (Orientador), UFT

Documento assinado digitalmente
 **ADELICIO MAXIMIANO SOBRINHO**
Data: 05/12/2024 15:02:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Adelficio Maximiano Sobrinho, UFT

Documento assinado digitalmente
 **ELIEL POGGI DOS SANTOS**
Data: 05/12/2024 14:09:33-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Eliel Poggi dos Santos, UFT

Á minha mãe.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por sempre torcer por mim e me apoiar incondicionalmente.

Ao Victor, por estar ao meu lado nos últimos quatro anos de faculdade, compartilhando cada momento.

A todos os meus amigos, que tornaram essa jornada mais leve e divertida.

E, por fim, mas não menos importante, ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Barbosa de Oliveira Neto, que me guiou com excelência durante todo esse processo.

RESUMO

Este projeto de pesquisa visa realizar uma análise dos sistemas de aterramento em estações repetidoras (ER) de uma concessionária de energia elétrica que opera no Estado do Tocantins. Para tanto, foi conduzida uma pesquisa abrangente sobre aterramento elétrico e ER. Em seguida, foi realizada a catalogação de 36 ER por meio da coleta de suas informações operacionais, tais como dados de localização, altura, tipo de estrutura, resistência de aterramento, quantidade de equipamentos, formatação da blindagem e dados de falhas dos equipamentos. Adicionalmente, realizou-se uma análise das informações coletadas das ER e uma investigação dos dados de falhas nas ER por meio análise da árvore de falhas (AAF). Foi obtido o perfil de falha e construída uma árvore de falhas, possibilitando determinar quais componentes mais falharam, os principais fatores associados, e os eventos de base, intermédio e topo da árvore de falhas. Adicionalmente, em função do estudo realizado, foram elaboradas recomendações técnicas relacionadas ao melhoramento do solo, ao sistema de aterramento e a padronização para coleta dos dados de falhas. Por fim, por meio desta pesquisa, é possível entender a constituição das falhas que ocorreram nos equipamentos das ER, relacionadas aos sistemas de aterramento, subsidiando, assim, informações que auxiliem tomadas de decisão que possam implicar em redução dos danos e custos, continuidade nas comunicações e aumento da confiabilidade sistêmica.

Palavras-chave: Análise da árvore de falhas; aterramento; estações repetidoras; Estado do Tocantins; resistividade do solo.

ABSTRACT

This research project aims to analyze the grounding systems in repeater stations (RS) of an electric utility company operating in the State of Tocantins. To this end, a comprehensive study on electrical grounding and RS was conducted. Subsequently, 36 RS were cataloged by collecting their operational information, such as location data, height, type of structure, grounding resistance, number of equipment, shielding format, and equipment failure data. Additionally, an analysis of the collected RS information and an investigation of the RS failure data were carried out using fault tree analysis (FTA). A failure profile was obtained, and a fault tree was constructed, allowing the determination of which components failed the most, the main associated factors, and the base, intermediate, and top events of the fault tree. Furthermore, based on the study conducted, technical recommendations were made regarding soil improvement, the grounding system, and standardization for collecting failure data. Finally, through this research, it is possible to understand the nature of the failures that occurred in the RS equipment related to the grounding systems, thus providing information that can assist in decision-making processes that may lead to reduced damage and costs, continuity in communications, and increased system reliability.

Key-words: Fault Tree Analysis; Grounding; Repeater Stations; State of Tocantins; Soil Resistivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma representativo da metodologia proposta.....	19
Figura 2: Representação do aterramento elétrico de uma edificação.....	26
Figura 3: Composição do solo do Estado do Tocantins: (a) mapa do Estado do Tocantins; (b) percentagens dos tipos de solo de acordo com o SiBCS.....	28
Figura 4: Ilustração das estruturas de ER: (a) Torre estaiada (b) Torre autoportante.....	30
Figura 5: Sistema de aterramento em uma estação repetidora.....	31
Figura 6: Ilustração de um raio atingindo uma torre repetidor.....	32
Figura 7: Porcentagem dos solos identificados na amostragem do estudo.....	37
Figura 8: Porcentagem dos equipamentos afetados.....	38
Figura 9: Representação geográfica com magnitude de repetição de falha.....	40
Figura 10: Árvore de falhas.....	42
Figura 11: Quantidade de equipamentos que falharam por evento intermediário.....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Definições básicas da estrutura da malha de aterramento.....	29
Quadro 2: Tipo de solo e textura das estações repetidoras analisadas.....	36
Quadro 3: Ficha proposta de inspeção para malha de aterramento de estações repetidoras.....	46
Quadro 4: Ficha proposta para análise de ocorrências em estações repetidoras.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Medição de aterramento das estações repetidoras.....	35
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAF	Análise de Árvore de falhas
ER	Estação Repetidora
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
FEMM	Finite Element Methods on Magnetism
FGCG	Flexible graphite-copper composited
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MEF	Método dos Elementos Finitos
MoM	Método dos Momentos
MPS	Medida de Proteção Contra Surtos
MRT	Monofilares com Retorno por Terra
MTL	Método De Linha De Transmissão
NBR	Norma Brasileira
PDA	Proteção Contra Descargas Atmosféricas (PDA)
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Resistividade do solo
R	Resistência elétrica
Ω	Ohm

SÚMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos.....	18
1.3	Metodologia.....	18
1.3.1	Coletar e Organizar os Dados.....	19
1.3.2	Analisar Dados.....	20
1.3.3	Propor Recomendações Técnicas.....	20
1.4	Estrutura da Pesquisa.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1	Aterramento Elétrico.....	26
3.1.1	Resistência De Aterramento.....	27
3.1.2	Resistividade Do Solo.....	27
3.1.3	Solo No Estado Do Tocantins.....	27
3.1.4	Malha De Aterramento, Condutores, Eletrodos, Haste De Aterramento, Arranjos De Medição	29
3.2	Estações Repetidoras (ER).....	29
3.2.1	Estrutura Básica.....	30
3.2.2	Estrutura de Aterramento na Repetidora.....	31
3.2.3	Principais Problemas Relacionados a Descargas Atmosféricas.....	32
3.2.4	Custos Associados.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1	Medição do Aterramento.....	34
4.1.1	Solos Analisados.....	35
4.2	Análise dos Dados de Falhas.....	37
4.3	Análise da Árvore de Falhas (AAF)	41
4.4	Recomendações Técnicas.....	43
4.4.1	Tratamento Químico do Solo.....	43
4.4.2	Melhoria da Malha do Aterramento.....	45
4.4.3	Estabelecimento de um Padrão de Coleta de Dados.....	45

4.4.4	Conclusões das Recomendações.....	47
5	CONCLUSÕES.....	48
	TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A	55

1. INTRODUÇÃO

A comunicação é um componente fundamental para os projetos de automação e operação remota de subestações, representando um grande desafio para as concessionárias de energia pela necessidade de criar uma infraestrutura própria (JAMHOUR *et. al*, 2023). Um equipamento fundamental para ampliação de alcance do sinal dessa comunicação são as estações repetidoras (ER). Estas ER são capazes de receber e retransmitir o sinal de comunicação de forma simultânea.

Conforme o estudo realizado por Moraes (2013), a estação repetidora deve ser alocada, preferencialmente, no ponto mais alto do local onde será instalada para atender o maior número de clientes possível. Ademais, é necessário que as proteções elétricas estejam funcionando de maneira adequada, para evitar falhas de comunicação e a falha de equipamentos. Dentre as medidas de proteção que podem ser adotadas em uma estação repetidora se destaca o sistema de aterramento (SHARMA *et al.*, 2022).

O aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo (VISACRO FILHO, 2002). De acordo com Bispo *et al.* (2021), os principais objetivos de um protejo de aterramento são: obter uma resistência de aterramento a mais baixa possível, para correntes de falta a terra; manter os potenciais produzidos pelas correntes injetadas no solo dentro dos limites de segurança; fazer com que os equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra; proporcionar um caminho de escoamento para terra de descargas atmosféricas; usar a terra como retorno de corrente de circuitos monofilares com retorno por terra (MRT); escoar cargas estáticas acumuladas nas carcaças das máquinas ou equipamentos para a terra.

Sendo assim, o adequado aterramento dos equipamentos possibilita uma operação rápida e efetiva dos dispositivos de proteção, na ocorrência de defeitos devido a rupturas no isolamento, e limita a valores não perigosos as tensões de toque e de passo.

Complementarmente, segundo Campagnolo e Kindermann (2020), um dado importante na elaboração do projeto de aterramento é o conhecimento das características do solo, principalmente sua resistividade elétrica.

Considerando a importância do adequado aterramento para o funcionamento seguro e eficiente das ER, torna-se fundamental adotar metodologias que possibilitem avaliar dados de falhas e consequentemente aumentar a confiabilidade desses sistemas.

Nesta linha de abordagem, a análise da árvore de falhas (AAF) é uma das metodologias mais empregadas no processamento dos dados de falhas. A aplicação da AAF permite a

ordenação dos componentes em uma forma de ramificação, a qual possibilita a alocação da probabilidade de ocorrência de falha em cada componente que integra o sistema. Trata-se de uma análise dedutiva, com abordagem *top-down*, em que o diagrama permite detalhar uma falha em sucessíveis níveis (RODRIGUES *et al.*, 2022).

1.1 Justificativa

O Estado do Tocantins está localizado em uma região com alto índice de descargas atmosféricas sendo que de acordo com o INPE (2024) para o biênio 2018/2019, último biênio publicado, a incidência de descargas por todo o estado variou de 16.400 a 88.000.

Segundo Fonseca e Menezes (2014), as torres de telecomunicações são estruturas robustas e elevadas, geralmente instaladas no topo de serras e devido a localização elevada, geralmente, essas torres são bastante expostas aos efeitos das descargas atmosféricas, sejam descargas que caem diretamente na torre quanto descargas que caem nas proximidades. Sendo assim, para se minimizar os efeitos destas descargas é usual a instalação de uma boa malha de aterramento na base da torre na tentativa de se propiciar um caminho preferencial para as correntes de descargas atmosféricas.

No estudo realizado por Diego e Gomes (2011), chegou-se à conclusão de que os arredores das torres de telecomunicações devem ser providos de um sistema de aterramento distribuído e integrado, incorporado com um sistema de dispositivos de proteção contra surtos coordenado adequadamente. Adicionalmente, também foi constatado que múltiplas referências de aterramento influenciam adversamente os equipamentos da torre afetada, inclusive a NBR 5419 (2015) reforça a necessidade da interligação dos sistemas de aterramento.

Além disso, no Estado do Tocantins 91,6% do solo é argiloso e/ou arenoso (IBGE,2023) e neste tipo de solo a resistividade de aterramento é alta, estando compreendida na faixa 80 $\Omega.m$ a 8.000 $\Omega.m$ (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2020).

Nesse contexto, compreender as interações que podem causar falhas nos equipamentos das ER, especialmente aquelas que poderiam ser evitadas com um sistema de aterramento adequado, é fundamental para melhorar a confiabilidade sistêmica. Para isto, este trabalho utiliza a análise da árvore de falhas (AAF) como ferramenta principal para identificar e abordar essas interações.

De acordo com Yamane e Sousa (2007), a AAF é um método eficaz para identificar e compreender interações complexas que levaram ou podem levar às falhas. Logo, a AAF pode ser utilizada na análise dos dados de falhas com objetivo de fundamentar tomadas de decisões voltadas a ações corretivas, preventivas e preditivas (GONÇALVES, 2018).

Dessa forma, este estudo busca contribuir para o entendimento da constituição das falhas que ocorrem nas ER, relacionadas aos sistemas de aterramento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise dos sistemas de aterramento em ER de uma concessionária de energia que opera no Estado do Tocantins.

1.2.2 Objetivos Específicos

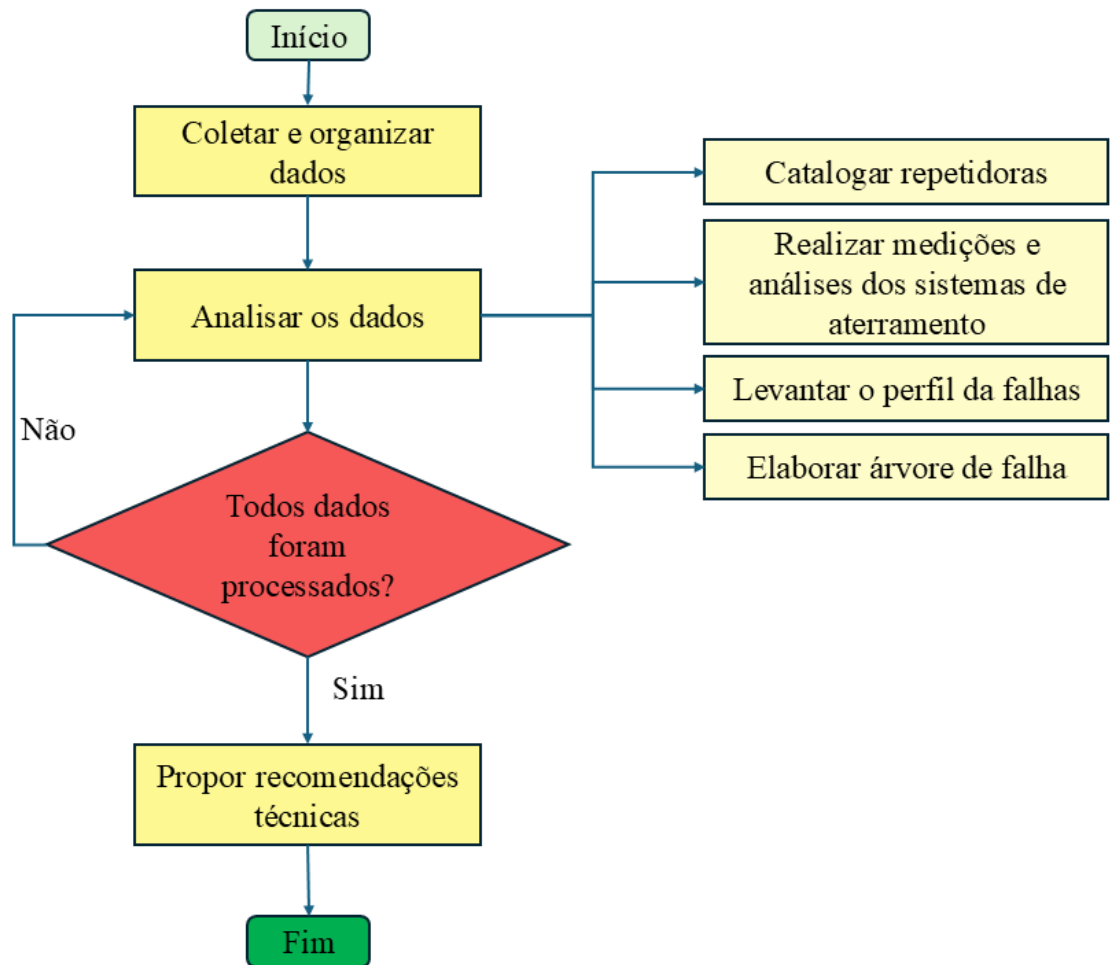
Para alcançar o objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Catalogar as repetidoras de uma concessionária de energia elétrica que opera no Estado do Tocantins;
- Coletar e analisar dados de medição de resistência de aterramento e outros dados operacionais, tais como a formatação da blindagem das ER;
- Realizar o levantamento dos dados de falhas e traçar o respectivo perfil de falhas;
- Realizar uma investigação dos dados de falhas em equipamentos das ER por meio da AAF;
- Propor recomendações técnicas para os sistemas de aterramento das ER estudadas.

1.3 Metodologia

Como procedimento inicial da metodologia adotada, foi efetuado um levantamento bibliográfico visando obter as informações relevantes sobre aterramento, o solo do Estado do Tocantins, normas técnicas e os parâmetros a serem avaliados, conforme destacado no Capítulo 2. Neste capítulo, são apresentados os demais materiais e procedimentos utilizados na metodologia para análise dos sistemas de aterramento das estações repetidoras (ER) de uma empresa do sistema de distribuição que opera no Estado do Tocantins, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma representativo da metodologia proposta



Fonte: Autoria própria (2024).

1.3.1 Coletar e Organizar os Dados

Foram coletadas informações de 36 ER da concessionária que opera o sistema de distribuição de energia elétrica no Estado do Tocantins. As informações coletadas são:

- Localização;
- Altura;
- Tipo de estrutura (estaiada ou autoportante);
- Formatação da blindagem;
- Dados de falhas dos equipamentos.

Complementarmente, devido a limitações operacionais, das 36 ER analisadas, foi coletado os dados de resistência de aterramento, tipo de solo e textura do solo para 12 ER.

1.3.2 Analisar Dados

Em seguida, foi realizado a análise e catalogação das 36 ER. Logo após, foram realizadas medições de resistência de aterramento e análise dos sistemas de aterramento para 12 ER. Por meio dessa análise e das medições, foi realizado o levantamento do perfil de falha dos equipamentos. Adicionalmente, foi elaborada uma AAF referentes aos dados coletados de janeiro de 2022 a julho de 2023.

1.3.3 Propor Recomendações Técnicas

Por fim, são apresentadas recomendações técnicas relacionadas aos sistemas de aterramento das ER, destacadamente, com foco no tratamento adequado do solo, na melhoria do aterramento das ER e na padronização dos processos de coleta dos dados de falhas.

1.4 Estrutura da Pesquisa

A pesquisa está organizada conforme segue. No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica relativa aos sistemas de aterramento elétrico com foco no aterramento em ER. Em seguida, no Capítulo 3, realiza-se o embasamento teórico. Os resultados obtidos e as discussões correspondentes são apresentados no Capítulo 4. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões do estudo, seguido pelas sugestões para trabalhos futuros, referências e apêndice.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos relacionados ao aterramento elétrico são empregados em diversas pesquisas, principalmente, relacionadas ao dimensionamento da malha de aterramento. Ademais, o aterramento também aparece em estudos relacionados a análise da qualidade e confiabilidade de serviços fornecidos, seja na transmissão de energia elétrica, seja nos serviços de telecomunicações. A seguir, são apresentadas pesquisas, e seus idealizadores, a respeito do aterramento elétrico e sua relevância para o funcionamento correto de outros serviços.

Um amplo campo de estudo sobre aterramento elétrico é o uso de diferentes métodos, ferramentas, estruturas e configurações geométricas das malhas de aterramento. Nesse sentido, Arthuzi Junior e Barberini (2004), utilizaram o método de diferenças finitas no domínio do tempo, do inglês *finite-difference time-domain* (FDTD), como ferramenta para analisar a distribuição do campo elétrico na interface ar-solo de malhas de aterramento em 5 malhas diferentes. De maneira geral, foi observado um aumento de eficiência da malha conforme a sua área e o número de eletrodos horizontais cresceu. Além disso, os valores de campo elétrico máximo são praticamente iguais para resistividades de solo alta e baixa. Notou-se também que praticamente não há interferência na malha que sofre o surto pela presença de uma malha externa. Por fim, foi possível observar que o campo elétrico máximo da malha de aterramento aumentou com o aumento da frequência.

Outra ferramenta utilizada para a análise de malhas de aterramento é o *Finite Element Method* (FEM). Bispo *et al.* (2021) realizaram um estudo de caso com esse método por meio do *software* FEMM (*Finite Element Methods on Magnetism*). O estudo mostrou que o modelo de aterramento de uma haste vertical é insuficiente para atender as necessidades do estudo de caso proposto. Somente o modelo com duas hastes e uma camada de brita atendeu as especificações da norma. Concluiu-se que as malhas de aterramento devem ser analisadas caso a caso, pois dependem do número de hastes, das dimensões físicas da malha e da resistividade do solo. Uma análise criteriosa destes fatores contribui em muito para a execução de um bom projeto de aterramento. Por fim, deve ser considerado também que muitos outros fatores influenciam no desempenho do aterramento, entre eles está o fenômeno de ionização do solo sob o efeito de descargas rápidas de corrente (BISPO *et al.*, 2021).

Neste mesmo campo de estudo, Chiheb *et al.* (2019) apresentaram um novo método para estudar a resposta transitória no domínio do tempo de eletrodos de aterramento verticais e horizontais sob correntes de impulso, baseado em representação de espaço de estados. O eletrodo de aterramento foi inicialmente representado por uma série de sistemas com múltiplas entradas e saídas. Eles fizeram também a incorporação do acoplamento mútuo entre segmentos

do condutor de aterramento e da ionização do solo. O potencial transitório, juntamente com os parâmetros de impedância de impulso selecionados, foi calculado e utilizado para analisar o desempenho transitório dos eletrodos de aterramento. Incorporando o acoplamento mútuo entre os segmentos do mesmo eletrodo e a ionização do solo, o método proposto pode ser utilizado como uma ferramenta de previsão eficaz para o desempenho transitório dos eletrodos de aterramento. Além disso, o método permite a consideração de solos estratificados verticalmente e foi aplicado ao caso de um eletrodo horizontal que se estende por duas regiões do solo com resistividades contrastantes.

Sendo assim, os resultados de Chiheb *et al.* (2019) mostraram que, nesses casos, os valores máximos dos potenciais transitórios não são muito afetados quando o eletrodo é energizado a partir do lado de baixa resistividade e uma parte significativa de seu comprimento está enterrada nesse lado. O efeito do solo de maior resistividade torna-se mais notável quando a proporção do comprimento do eletrodo enterrada no lado de alta resistividade aumenta. No entanto, quando o eletrodo é energizado a partir do lado de alta resistividade, os potenciais transitórios são sempre mais altos em comparação com aqueles calculados quando o eletrodo é energizado a partir do lado de baixa resistividade. Portanto, para benefícios práticos, é preferível fazer a conexão ao eletrodo de aterramento na extremidade enterrada em solo de baixa resistividade.

Nesse mesmo sentido, Jamali *et al.* (2021) realizaram uma análise de sistemas de aterramento adjacentes sob correntes de raios. Neste estudo, os comportamentos desses sistemas de aterramento sob condições de raios foram analisados utilizando o método de linha de transmissão (MTL) com múltiplos condutores em um modelo de solo em duas camadas. Neste trabalho, a matriz de conectividade é introduzida para facilitar a análise de sistemas de aterramento adjacentes de qualquer tamanho e grau de complexidade. Comparações dos resultados obtidos com o método MTL mostram a validade do procedimento utilizado para a análise. Além disso, com base nos resultados obtidos, verifica-se que, quando a resistividade de uma camada aumenta, devido à diminuição da condutividade dos sistemas de aterramento, são produzidas tensões de pico mais altas nos centros das grades de aterramento.

Ademais, Jamali *et al.* (2021) realizaram uma modelagem para dois tipos de solos com os mesmos parâmetros (resistividade e permissividade) para suas camadas não correspondentes (camada superior do solo tipo 1 semelhante à camada inferior do solo tipo 2 e vice-versa). Verificou-se que a injeção de raios em sistemas de aterramento colocados em estruturas de solo do tipo 1 (com baixa resistividade na camada superior) resulta em tensões de pico menores no ponto de injeção de raios e em tensões de pico transferidas mais altas para os sistemas de

aterramento adjacentes, em comparação com as estruturas de solo tipo 2 (com alta resistividade na camada superior).

De forma mais abrangente, Azevedo (2022) estudou a modelagem de aterramento elétrico para análise de transitórios. Nesse trabalho foram estudados diferentes modelos para calcular os parâmetros elétricos do solo. Nesses modelos, foram consideradas a dependência da frequência, o teor de umidade e a porosidade. As impedâncias harmônicas de um sistema de aterramento formado por uma haste vertical de comprimento variável foram calculadas no domínio da frequência. Para isso, foi utilizado o *software* eletromagnético de onda completa FEKO, que emprega o método dos momentos (MoM) para resolver as equações de Maxwell dos campos elétricos e magnéticos envolvidos nesse sistema. Além disso, as elevações de potencial de terra também foram calculadas por meio da técnica do Vector Fitting e da convolução recursiva.

Ainda no trabalho de Azevedo (2022), as impedâncias de todos os modelos apresentaram um comportamento resistivo em baixas frequências. Isso indica que, no caso de fenômenos com espectro predominante em uma baixa faixa de frequência, como faltas, o sistema de aterramento pode ser modelado como uma resistência. No entanto, isso não se aplica a transitórios rápidos, como descargas atmosféricas, devido ao seu amplo espectro de frequência. Acima de determinada frequência, chamada de frequência característica, as magnitudes das impedâncias do sistema de aterramento são significativamente reduzidas, dependendo do modelo empregado. A partir desse ponto, a impedância apresenta um comportamento indutivo ou capacitivo, evidenciado pela variação de sua fase.

De maneira mais focada no aterramento de estações repetidoras (ER), uma análise realizada por Diego e Gomes (2011) em 48 ER de telecomunicações do Sri Lanka (país localizado no continente africano) mostrou que um impacto direto em uma estrutura de antena em uma torre metálica é raro. No entanto, é altamente provável que ocorra uma descarga lateral ou arco elétrico para as estruturas da antena uma vez que o captor de raio e/ou o condutor de descida estejam instalados e tentativas sejam feitas para isolar o sistema da torre.

Os resultados na pesquisa de Diego e Gomes (2011) também demonstraram que a equipotencialização do sistema de aterramento, uma rede de aterramento distribuída incluindo um anel condutor e um sistema adequado de dispositivos de proteção contra surtos, desempenham um papel mais vital na proteção contra raios em equipamentos e na segurança das pessoas em comparação com os efeitos de simplesmente alcançar uma baixa resistência de aterramento. No entanto, na ausência de um sistema de aterramento integrado, distribuído e

equipotencializado, um valor elevado de resistência de aterramento aumentará drasticamente a possibilidade de acidentes e danos.

De maneira semelhante, Sharma *et al.* (2022), realizaram um estudo de campo no Vale de Kathmandu, no Nepal, visando investigar a eficácia das medidas de proteção adotadas nas estações de telecomunicações do país, identificar suas inadequações e, assim, fornecer soluções apropriadas de acordo com a norma internacional (IEC 62305-4, 2010), a fim de melhorar a qualidade dos serviços de telecomunicações.

Os resultados apresentados Sharma *et al.* (2022) demonstraram que na maioria das torres, o aterramento estava correto para minimizar a impedância. Também foi observada alta resistência, portanto, a adição de etapas para reduzir a resistência, como a integração de um condutor longo, é necessária. O condutor em anel com equipotencialização adequada deve ser feito na maioria das torres. Medidas de padrões internacionais não foram seguidas em alguns locais. Dessa forma, foi visto a necessidade da adoção de medidas de proteção de acordo com os padrões internacionais para a segurança das torres de telecomunicações, equipamentos, humanos e animais.

Outrossim, um aterramento mal dimensionado pode ter consequências para os equipamentos, para a segurança da vida humana e pode interferir na rede elétrica. Nessa perspectiva, Felipe (2007) estudou os efeitos em sistemas de distribuição de energia da incidência de descargas atmosféricas próximas, mais especificamente os efeitos da incidência em torres de telecomunicações. Visando a caracterização das sobretensões resultantes na estação de telecomunicações e na rede de distribuição próxima, foram realizadas simulações. Nestas simulações, diversos parâmetros foram variados, como o tempo de meia onda e o tempo de frente da forma de onda injetada, a topologia da rede de distribuição e a estrutura da torre de telecomunicações, incluindo seu aterramento.

Nos resultados do trabalho de Felipe (2007) foi observada uma significativa influência no valor da sobretensão na rede causada pela conexão do condutor neutro ao aterramento da estação, principalmente na parcela devida à elevação de potencial do solo causada pelo fluxo de corrente. Também, foi possível concluir que ocorre um fluxo elevado de corrente proveniente da descarga atmosférica incidente na torre para o neutro, o que eleva sobremaneira o potencial nos condutores. Nessa condição ocorreu a maior elevação de potencial e de tensão fase-neutro.

O aterramento pode influenciar também a corrente de reflexão causada por uma descarga atmosférica ao longo de estruturas altas, como as torres de telecomunicação. Rameli *et al.* (2015) realizaram um estudo da forma de onda da corrente ao longo de uma estrutura alta com relação ao sistema de aterramento. Nesse estudo, foi utilizado o *software* MATLAB para

simular o sistema de aterramento de uma torre de comunicação ao ser atingida por uma descarga atmosférica. No estudo, o sistema de disposição de aterramento foi considerado como parte de um sistema de aterramento e a impedância do solo foi assumida como puramente resistiva, independente dos elementos indutivos e capacitivos.

Os resultados obtidos por Rameli *et al.* (2015) demonstraram que a relação entre as impedâncias da torre e do solo é importante para determinar os múltiplos fatores de reflexão no solo e o efeito da corrente refletida ao longo da estrutura. As disposições de eletrodos horizontais, em grade e circulares proporcionam menos corrente refletida para alta resistividade do solo. Portanto, a influência da disposição dos eletrodos de aterramento e do valor da resistividade do solo deve ser levada em consideração ao estimar a corrente de reflexão em pontos de interesse ao longo da torre, o que pode causar um efeito significativo em qualquer instalação na torre.

A análise de falhas em ER, exige uma abordagem sistemática e detalhada para entender as causas e os efeitos das falhas. Nesse sentido, a análise de árvore de falhas (AAF) surge como uma ferramenta apropriada.

Desenvolvida por H. A. Watson em 1961, a AAF permite investigar, por meio de uma dedução formalizada, as possíveis causas que podem levar o sistema a estados indesejados, conhecidos como eventos de topo. Esses eventos representam falhas no sistema que podem ser desencadeadas por falhas de equipamentos, falhas humanas ou perturbações externas (CONTINI, 1995; RAMEZANIFAR *et al.*, 2023).

No caso das estações repetidoras, a confiabilidade do sistema de aterramento é crucial para evitar falhas que possam comprometer a telecomunicação das concessionárias. Assim, a AAF, ao adotar uma abordagem *top-down*, pode ser utilizada para analisar as falhas no aterramento dessas ER, identificando as causas subjacentes e propondo estratégias para mitigar riscos, garantindo a eficiência e a continuidade do serviço.

Portanto, por meio das pesquisas apresentadas, é possível notar a relevância de investigações voltadas à análise do aterramento elétrico e suas características, bem como a importância do aterramento em torres de telecomunicações e o entendimento das falhas que ocorrem em seus equipamentos constituintes. Logo, esta pesquisa concentra-se em analisar por meio das medições, dos dados de falhas e da AAF, o aterramento de ER no solo do Estado do Tocantins, e, por fim, propor recomendações técnicas.

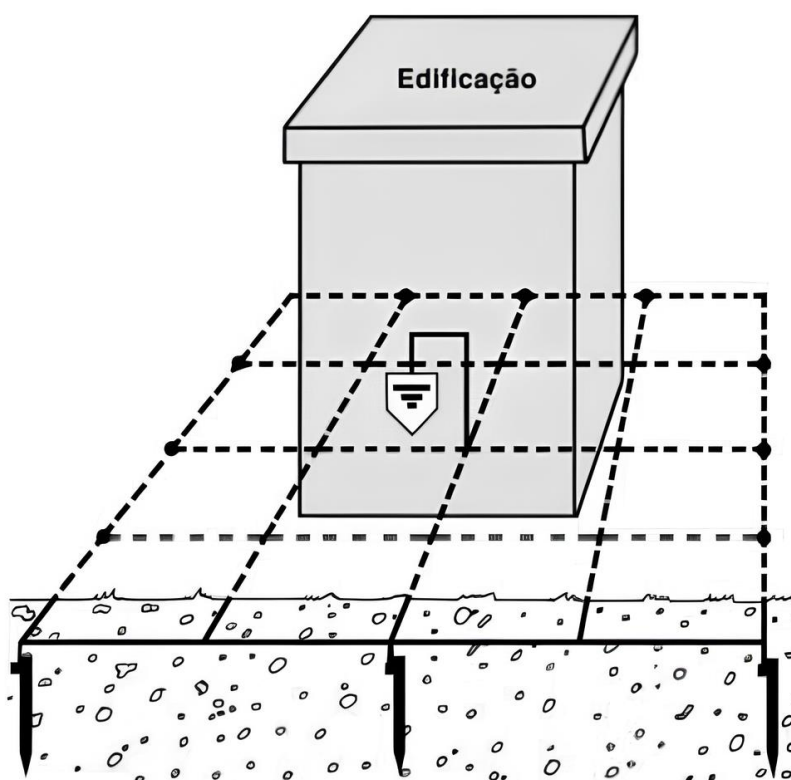
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo visa apresentar a fundamentação teórica e conceitos básicos acerca de aterramento elétrico e estações repetidoras (ER), com o intuito de trazer uma abordagem abrangente e consistente dos principais pontos para a compreensão deste trabalho de pesquisa.

3.1 Aterramento Elétrico

O aterramento elétrico é a ligação de estruturas ou instalações com a terra, a fim de se estabelecer uma referência para a rede elétrica e permitir que fluam para a terra correntes elétricas de naturezas diversas (CREDER, 2016), conforme pode ser vista na Figura 2. O ponto de aterramento a ser conectado é variável conforme a aplicação desejada, podendo assumir configurações diversas, com o objetivo principal de otimizar o desempenho do sistema e garantir a segurança e proteção das pessoas e dos equipamentos envolvidos (COSTA, 2012).

Figura 2: Representação do aterramento elétrico de uma edificação



Fonte: Creder (2016).

Além disso, de acordo com a NBR 5410 (2004), o aterramento deve ser elaborado de modo que atenda a 3 requisitos: seja confiável e satisfaça os requisitos de segurança das pessoas; possa conduzir correntes de falta à terra sem risco de danos térmicos, termomecânicos

e eletromecânicos, ou de choques elétricos causados por essas correntes; e, quando aplicável, atenda também aos requisitos funcionais de instalação.

O desempenho de um sistema de aterramento pode ser medido ou calculado com base em parâmetros específicos, como a resistência de aterramento, as tensões de passo e toque e a curva de potenciais na superfície do solo (NBR 7117-1, 2021). Outrossim, deve-se conhecer as características do solo, principalmente sua resistividade elétrica, para elaborar de maneira assertiva o projeto de um aterramento elétrico.

3.1.1 Resistência De Aterramento

O aterramento pode ser representado por um conjunto de condutâncias conectadas em paralelo, garantindo a inclusão dos efeitos mútuos condutivos entre elas. Nessa perspectiva, o sistema aterrado deixa de enxergar o aterramento como uma impedância complexa, passando a visualizá-lo como uma resistência, denominada resistência de aterramento, equivalente à solução do conjunto de condutâncias (VISACRO FILHO, 2002).

A NBR 5419 (2015), define que se deve obter a menor resistência de aterramento possível, compatível com o arranjo do eletrodo, a topologia e a resistividade do solo no local.

3.1.2 Resistividade Do Solo

A resistividade do solo (ρ) é a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta l de 1 m, área das faces A de 1 m²) preenchido com este solo. Sua unidade é “ $\Omega.m$ ” (VISACRO FILHO, 2002).

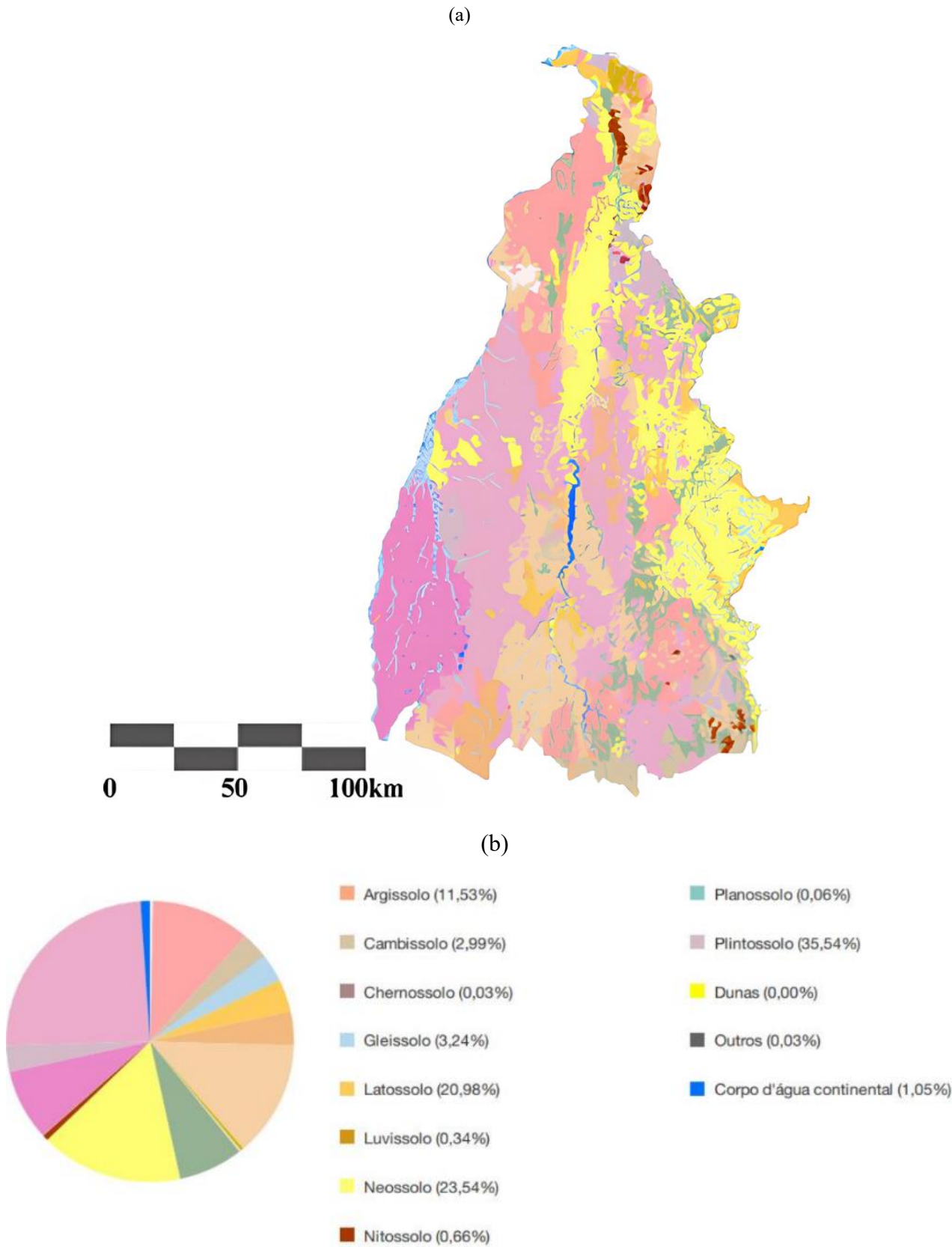
Segundo a NBR 7117-1(2021), solos podem ter classificações distintas de acordo com seus valores de resistividade, sendo:

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

3.1.3 Solo No Estado Do Tocantins

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), o Estado do Tocantins é composto, predominantemente, por 4 tipos de solo (IBGE, 2023): plintossolo (35,54%), neossolo (23,54%), latossolo (20,98%) e argissolo (11,53%). Todos esses solos são constituídos predominantemente por argila e/ou areia. Ainda, há outros 8 tipos de solo presentes em pequenas quantidades, conforme pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Composição do solo do Estado do Tocantins: (a) mapa do Estado do Tocantins; (b) porcentagens dos tipos de solo de acordo com o SiBCS



Fonte: IBGE (2023).

3.1.4 Malha De Aterramento, Condutores, Eletrodos, Haste De Aterramento, Arranjos De Medição

A definição de malha de aterramento, condutores, eletrodos, haste de aterramento e arranjos pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1: Definições básicas da estrutura da malha de aterramento

Malha de aterramento	Conjunto de elementos condutivos não naturais, interligados e enterrados no solo em uma área limitada pela instalação a ser atendida, destinados a dissipar correntes elétricas no solo.
Condutores	Condutor ou elemento metálico que faz a ligação elétrica entre uma parte de uma instalação aterrada e o eletrodo de aterramento.
Eletrodo	Elemento condutivo diretamente enterrado ou imerso em outro material (concreto e outros) enterrado, que exerce função de dissipação de corrente elétrica no solo.
Haste de aterramento	Elemento do sistema de aterramento sendo de perfil cilíndrico ou L sendo fabricado em aço revestido de cobre ou zinco pelo processo de imersão a quente.
Arranjos de medição	Um conjunto de leituras tomadas com diferentes espaçamentos entre eletrodos resulta em um conjunto de valores que, quando plotados em um gráfico, dá origem à curva de resistências aparentes, que indica a variação deste parâmetro em função do espaçamento. Existem diferentes arranjos de medição tais como os arranjos de Schlumberger e Wenner, apresentados na NBR 7117-1 (2021).

Fonte: Adaptação de NBR 15749 (2009), NBR 16254-1 (2014) e NBR 7117-1 (2021).

3.2 Estações Repetidoras (ER)

As ondas eletromagnéticas, amplamente utilizadas em telecomunicações, apresentam algumas limitações físicas, especialmente em frequências mais altas, que dificultam a passagem por obstáculos físicos significativos. Esse fenômeno é explicado por um princípio físico que determina uma característica conhecida como radio visibilidade (BARRADAS; SILVA, 1978).

Neste contexto, as antenas emissoras de ondas de rádio precisam "enxergar" as antenas receptoras de seus sinais. Para garantir uma transmissão eficiente, essas antenas devem ser instaladas em locais topograficamente privilegiados ou em torres elevadas, assegurando uma

"linha de visada direta" tanto para a transmissão, quanto recepção dos sinais. (AMARAL, *et al.*, 2008).

Assim, nas subseções seguintes são apresentados os principais elementos estruturais das ER, sistema de aterramento respectivo, bem como problemáticas relacionadas.

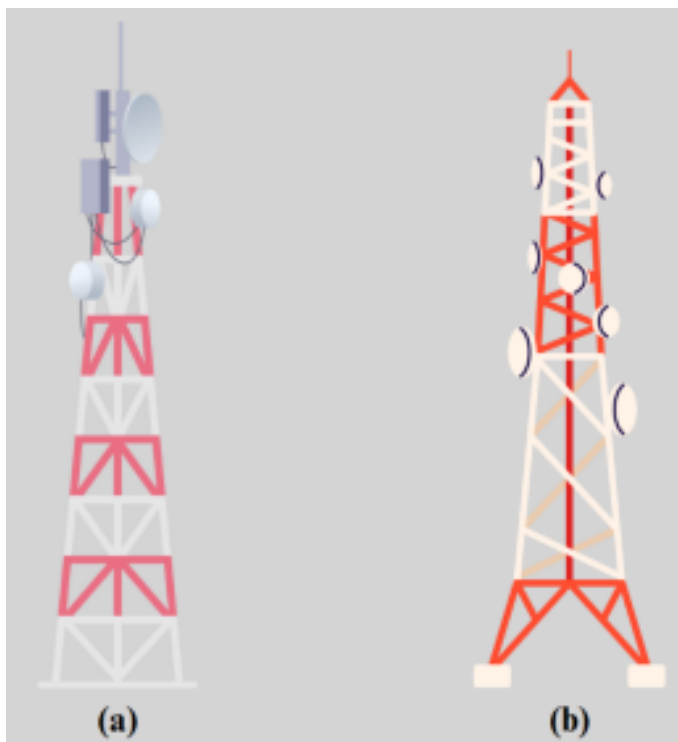
3.2.1 Estrutura Básica

As torres de telecomunicações, nas quais as ER são instaladas, podem seguir duas classificações distintas conforme descritas por Troian (2018):

- **Torres estaiadas:** caracterizam-se por serem bastante flexíveis, em geral formadas por seções caixão normalmente dispostas em forma de quadrilátero. As torres estaiadas são estabilizadas por cabos de estais que transmitem grande parcela de esforços horizontais diretamente às fundações.
- **Torres autoportantes:** são autossuficientes e em geral possuem 4 (quatro) apoios que são responsáveis pela sua estabilidade. Estas estruturas são mais rígidas e menos flexíveis.

As representações das torres dos tipos estaiada e autoportante podem ser observadas na Figura 4.

Figura 4: Ilustração das estruturas de ER: (a) Torre estaiada (b) Torre autoportante

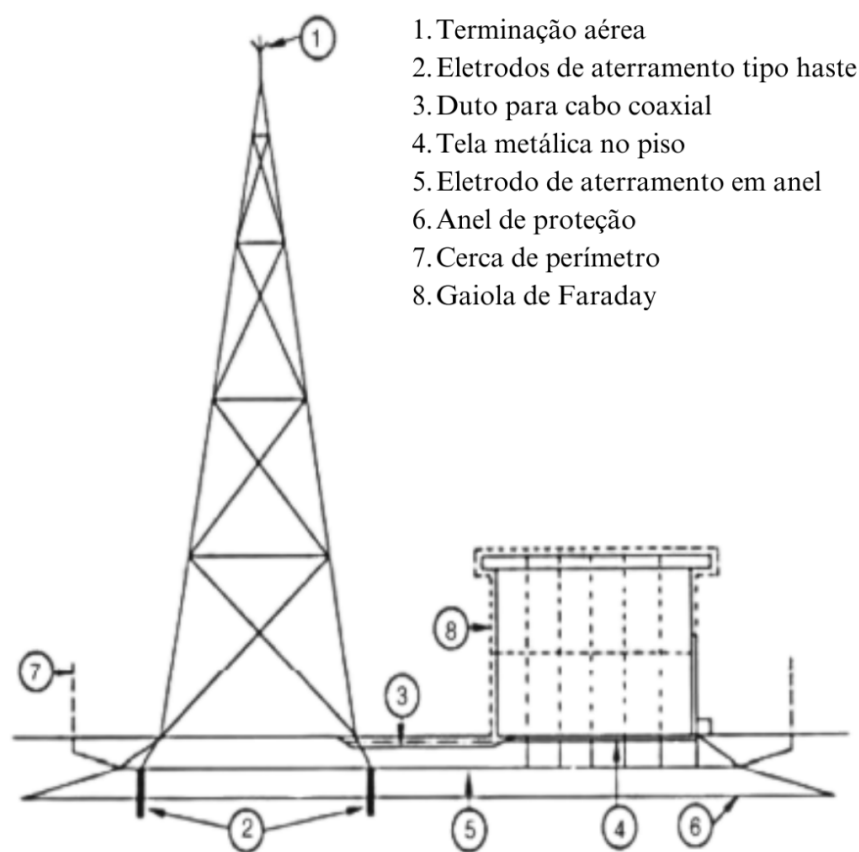


Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.2 Estrutura de Aterramento na Repetidora

A Proteção contra Descargas Atmosféricas (PDA) é composta pelo Sistema Contras Descargas Atmosféricas (SPDA) e pela medida de proteção contra surtos (MPS), essas estruturas devem estar alinhadas com o sistema de aterramento. De acordo com Sharma *et al.* (2022), a proteção externa (SPDA externo) inclui o terminal aéreo, o sistema de condutores de descida e o sistema de aterramento. A proteção interna (MPS) engloba todas as medidas adicionais para evitar interferências eletromagnéticas, sobretensões, entre outros, causadas pela corrente das descargas atmosféricas. Esse sistema pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Sistema de aterramento em uma estação repetidora



Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (2022).

Em um edifício ou outras estruturas a serem protegidas, o desvio das correntes de raios para a terra é realizado por meio da instalação de (SHARMA *et al.*, 2022):

- Um ou mais para-raios verticais conectados ou um sistema de fios horizontais conectados com o mesmo propósito, que é interceptar o líder descendente de raios;
- Um condutor de descida para levar a corrente de raios interceptada até as conexões terminais de aterramento;

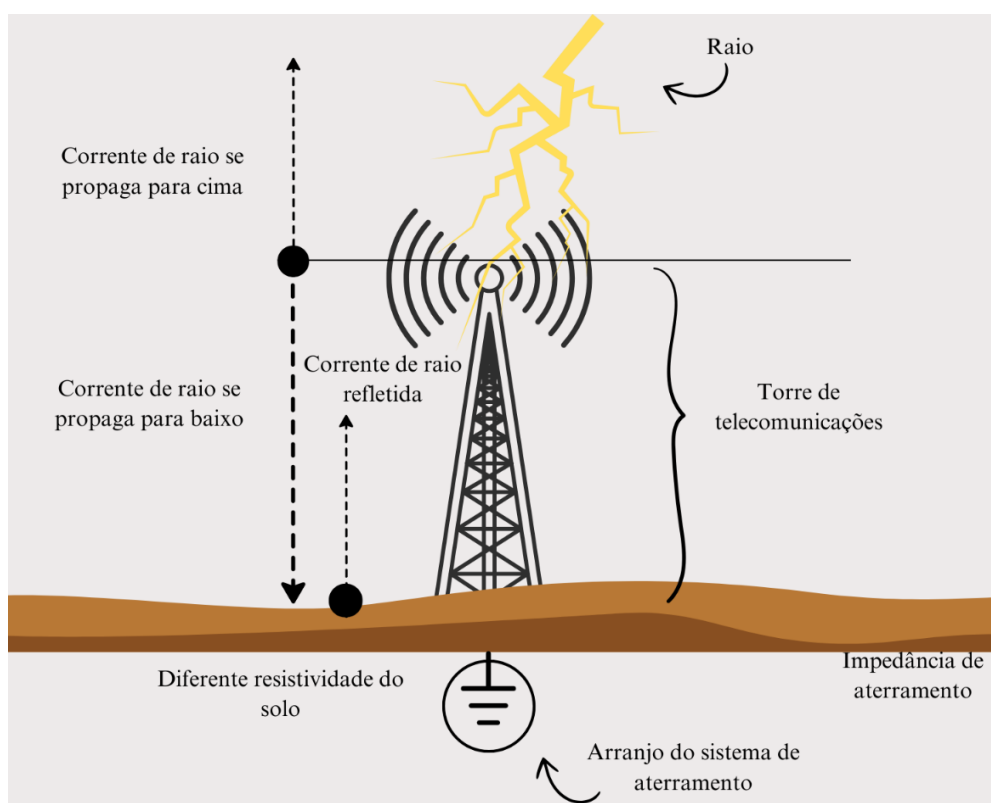
- Um sistema de terminação de aterramento para dispersar a corrente de raios no solo abaixo da superfície da terra.

3.2.3 Principais Problemas Relacionados a Descargas Atmosféricas

A NBR 5419 (2015), define descarga atmosférica para a terra como a descarga elétrica de origem atmosférica entre nuvem e terra. A descarga atmosférica é dividida em duas categorias: ascendente (quando acontece de uma estrutura aterrada para uma nuvem) e descendente (quando é iniciada por um líder descendente de uma nuvem para a terra).

As torres de telecomunicações têm uma alta tendência para serem atingidas por raios, uma vez que são estruturas altas e, por vezes, colocadas em áreas de colinas (KASIM, 2013). Dessa forma, caso essas torres sofram incidentes frequentes ocasionados por descargas atmosféricas, pode levar a um mau funcionamento dos equipamentos e sistemas instalados, resultando em transferências de informações de baixa qualidade para os usuários (RAMELI *et al.*, 2015), como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Ilustração de um raio atingindo uma torre repetidora



Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.4 Custos Associados

Um sistema adequado de proteção contra descargas atmosféricas, incluindo o aterramento, é crucial para garantir a vida útil dos equipamentos e sistemas eletrônicos, evitando danos ao sistema e exposição a riscos devido a descargas atmosféricas. O custo para reparar danos nos equipamentos é elevado. Portanto, seria mais oportuno investir mais na construção e no projeto de um sistema de proteção eficaz, em vez de consertar os danos causados por raios na torre de telecomunicações (KASIN, 2013).

De acordo com relatórios internos da concessionária do Tocantins, os principais equipamentos que precisam ser trocados em suas ER devido a falhas causada por descarga atmosférica são: Aviat IDU 8312; Aviat IDU 8540; Aviat ODU 6GHz 11; Aviat ODU 6GHz 12; Duplexador; Rádio 4RF; Rádio GE; repetidora de voz; unidade retificadora. Estima-se que, de 2019 a 2023, foram gastos pouco mais de 6,6 milhões de reais com substituição de equipamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões pertinentes à pesquisa desenvolvida. Nas seções subsequentes são apresentados os resultados e análises das medições de aterramento das estações repetidoras (ER), considerando o solo e a textura de solo em que elas se encontram, e uma investigação dos dados de falhas constatados nas ER por meio da AAF. Por fim, são elaboradas recomendações técnicas.

4.1 Medição do Aterramento

No levantamento da medição de aterramento das ER em estudo, por limitações técnicas/operacionais, foram realizadas as medições em apenas 12 das 36 ER. Das 12 ER analisadas, observou-se uma ampla variação na resistência de aterramento, com valores que variam de $1,37 \Omega$ a $110,47 \Omega$.

Na Tabela 1 são apresentadas as medições de aterramento das ER em três momentos distintos, permitindo a obtenção de uma média geral para cada torre. A repetidora de Taguatinga apresentou o melhor valor de resistência de aterramento, com uma média de $1,37 \Omega$, dentro dos limites recomendados. Em contraste, a repetidora de Recursolândia registrou o pior desempenho, com uma média de $110,47 \Omega$, um valor consideravelmente elevado.

A elevada variação da resistência de aterramento constatada pode ser atribuída principalmente às condições do solo em que cada repetidora está instalada. Solos mais arenosos e cascalhentos tendem a oferecer maior resistência à passagem de corrente elétrica, enquanto solos mais argilosos ou com maior umidade geralmente proporcionam melhores condições de aterramento, reduzindo a resistência elétrica.

A NBR 5419-3 (2015) recomenda que se obtenha a menor resistência de aterramento possível, considerando o arranjo do eletrodo, a topologia e a resistividade do solo no local. Com base nisso, percebe-se que existe a necessidade de melhorar o sistema de aterramento das ER, pois, mesmo ER que estão alocadas no mesmo tipo de solo e possuem topologias de aterramento iguais apresentaram significativa variação de resistência de aterramento. Por exemplo, a repetidora de São Valério da Natividade, que possui a mesma topologia e condições de solo que a repetidora de Recursolândia, apresenta uma média de resistência de aterramento significativamente menor.

Tabela 1: Medição de aterramento das estações repetidoras

Repetidora	Medição 01 (Ω)	Medição 02(Ω)	Medição 03 (Ω)	Média das medições (Ω)
Taguatinga	1,38	1,39	1,34	1,37
Pedro Afonso	5,88	4,74	3,74	4,79
Goiatins	7,81	6,26	5,6	6,56
Wanderlândia	18,38	17,86	17,63	17,96
Nazaré/ Luzinópolis	52	33,7	22	35,90
Colinas	42,7	35,7	29,5	35,97
Talismã	44,7	38,4	42,6	41,90
São Valério da Natividade	23,8	54	56	44,60
Itacajá	68,7	62,3	55,8	62,27
Formoso do Araguaia	62,6	67,7	68,1	66,13
Palmeirópolis	62,6	67,7	68,1	66,13
Recursolândia	128,6	102	100,8	110,47

Fonte: Autoria Própria (2024).

4.1.1 Solos Analisados

Além da medição da resistência de aterramento das 12 ER, foi realizado o levantamento do tipo e a textura do solo, conforme pode ser visto no Quadro 2. De forma complementar, na Figura 7, pode-se observar a porcentagem de cada solo identificado considerando as 12 ER.

A análise sobre o solo em que cada repetidora está situada levou à constatação de que o tipo de solo influencia diretamente na eficácia do aterramento. Solos mais arenosos e cascalhentos, como o plintossolo pétrico concrecionário, encontrado em várias das regiões analisadas, tendem a apresentar maior resistência elétrica. Isto é evidenciado pelos elevados valores de medições de aterramento nas ER de Recursolândia, Itacajá e São Valério da Natividade.

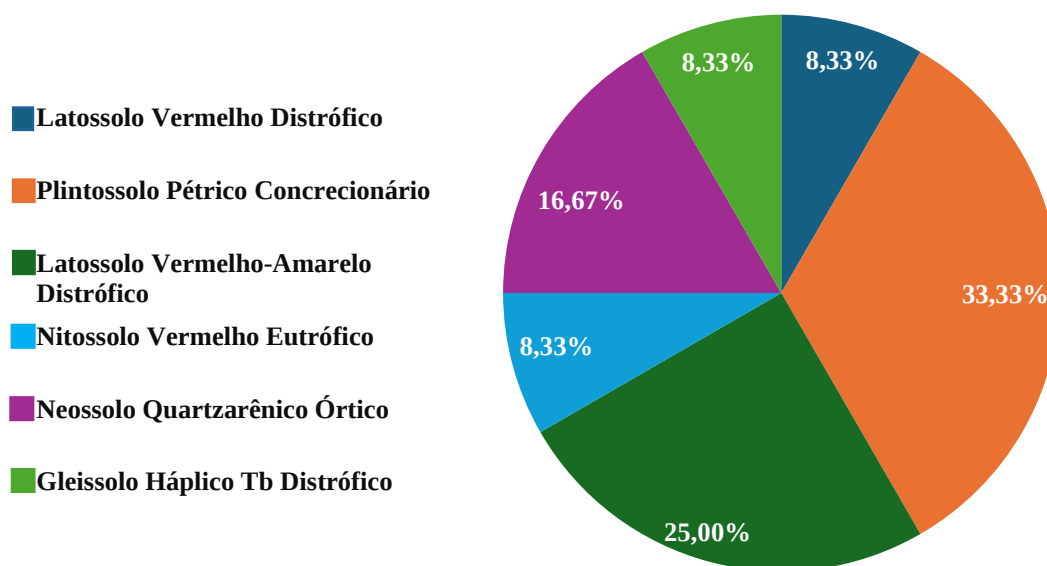
Quadro 2: Tipo de solo e textura das estações repetidoras analisadas

Repetidoras	Tipo	Textura
Taguatinga	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	Média
Pedro Afonso	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	Média
Goiatins	Neossolo quartzarênico órtico	Arenoso
Wanderlândia	Nitossolo vermelho eutrófico	Argilosa cascalhenta e argilosa
Nazaré/ Luzinópolis	Neossolo quartzarênico órtico	Arenoso
Colinas	Gleissolo háplico tb distrófico	Arenosa e média
Talismã	Latossolo vermelho distrófico	Média e argilosa
São Valério da Natividade	Plintossolo pétrico concrecionário	Média muito cascalenta/ Argilosa muito cascalenta/
Itacajá	Plintossolo pétrico concrecionário	Média muitos cascalhenta
Formoso do Araguaia	Plintossolo pétrico concrecionário	Arenosa muito cascalhenta
Palmeirópolis	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	Argilosa
Recursolândia	Plintossolo pétrico concrecionário	Média muito cascalhenta

Fonte: Autoria Própria (2024).

Por meio do levantamento apresentado no Quadro 2 é possível observar que em 4 das 12 ER o tipo de solo é o plintossolo pétrico concrecionário, o que é particularmente relevante uma vez que este tipo de solo, com textura cascalhenta, é predominante em 35,54% do estado do Tocantins, conforme Figura 3. Uma distribuição percentual dos solos, nas ER em que foram realizadas as medições de aterramento, pode ser vista da Figura 7.

Figura 7: Porcentagem dos solos identificados na amostragem do estudo



Fonte: Autoria Própria (2024).

Complementarmente, as informações apresentadas na Figura 7, indicam que muitas ER podem enfrentar dificuldades para atingir níveis aceitáveis de aterramento se não forem implementadas medidas adicionais, como o uso de aditivos químicos no solo ou a instalação de mais hastes de aterramento.

Repetidoras alocadas em solos argilosos, como Taguatinga e Pedro Afonso, apresentaram valores de resistência bem inferiores, demonstrando que esses solos oferecem melhores condições para o sistema de aterramento. Portanto, sabe-se que este é um aspecto que deve ser levado em consideração no momento de instalação de superfícies elétricas em solos em que sistemas precisos são necessários.

4.2 Análise dos Dados de Falhas

Nesta análise foram considerados dados de falhas das 36 ER. Após o processo de filtragem, ou seja, a coleta dos dados de falhas associados ao sistema de aterramento, foram obtidos 109 dados de falhas conforme apresentado no Apêndice A. A partir dos dados de falhas, tem-se uma distribuição dos equipamentos afetados, com causas oriundas de descargas atmosféricas ou variação de tensão, conforme pode ser visto na Figura 8.

Ao analisar as informações da Figura 8, nota-se que quase 50% das ocorrências estão relacionadas a falha do rádio GE. Este rádio é utilizado como “mestre” e “escravo” para realizar a comunicação. O rádio mestre controla a comunicação, definindo a sincronização,

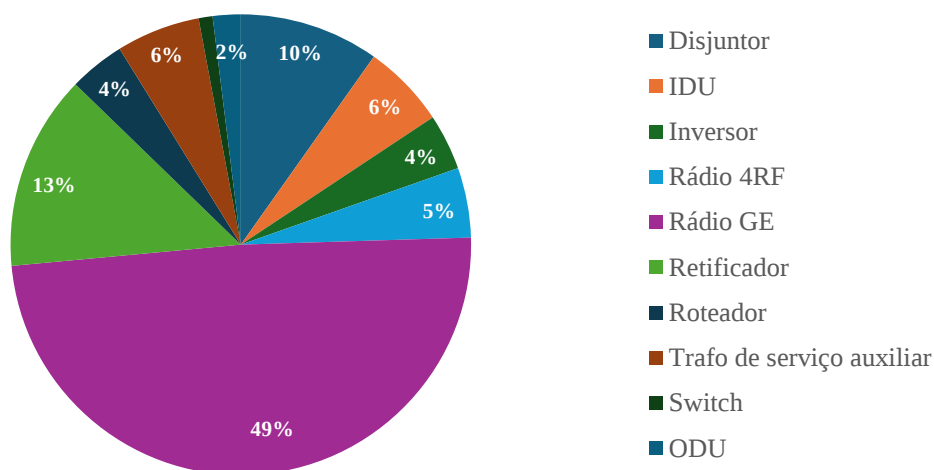
coordenando o tráfego de dados e ajustando parâmetros de rede. Já o rádio escravo segue as instruções do mestre, transmitindo dados conforme permitido e mantendo a sincronização.

Os retificadores, que desempenham um papel essencial na conversão de corrente alternada para corrente contínua, ocupam o segundo lugar, com 13% das falhas. Por sua função crítica na estabilização de energia, falhas nesses dispositivos podem comprometer o funcionamento de outros equipamentos interligados.

Outros dispositivos, como disjuntores (10%), IDUs (6%) e inversores (6%), apresentam percentuais de falhas relevantes. Estes equipamentos, embora representem uma parcela menor das falhas gerais, também são essenciais para a operação contínua do sistema. Problemas nos disjuntores, por exemplo, podem impedir a proteção eficaz contra sobrecargas, agravando o impacto de falhas em outros dispositivos.

Os roteadores e os rádios 4RF apresentam uma menor incidência de falhas, com 4% cada, sugerindo que, embora sejam suscetíveis a aterramentos inadequados, são menos impactados em comparação com outros componentes. Por fim, os transformadores de serviço auxiliar (2%) registram a menor proporção de falhas, o que pode ser explicado por seu papel menos exposto a perturbações elétricas diretas.

Figura 8: Porcentagem dos equipamentos afetados



Fonte: Autoria Própria (2024).

Complementarmente, as ER que apresentaram falhas relacionadas ao sistema de aterramento são distribuídas geograficamente, incluindo a quantidade de ocorrências por repetidora, como podem ser visualizadas na Figura 9.

Por meio da Figura 9, é possível observar que as ER que possuem uma maior quantidade de falha de equipamentos são:

- Nova Olinda (9 ocorrências);
- Recursolândia (9 ocorrências);
- Natividade (8 ocorrências);
- Axixá (6 ocorrências);
- Lagoa da Confusão (6 ocorrências) e
- Palmeirópolis (6 ocorrências).

Analisando o mapa da distribuição de falhas por ER, da Figura 9, em conjunto com as medições do aterramento, conforme na Tabela 1, observa-se que as ER que apresentaram uma maior resistência de aterramento também registraram uma maior quantidade de ocorrências de queima ou travamento dos equipamentos devido às falhas no aterramento, com exceção das ER de Pedro Afonso e Goiatins. Embora Goiatins tenha apresentado uma resistência de aterramento maior que Pedro Afonso, não houve nenhuma ocorrência em Goiatins, enquanto Pedro Afonso registrou uma ocorrência.

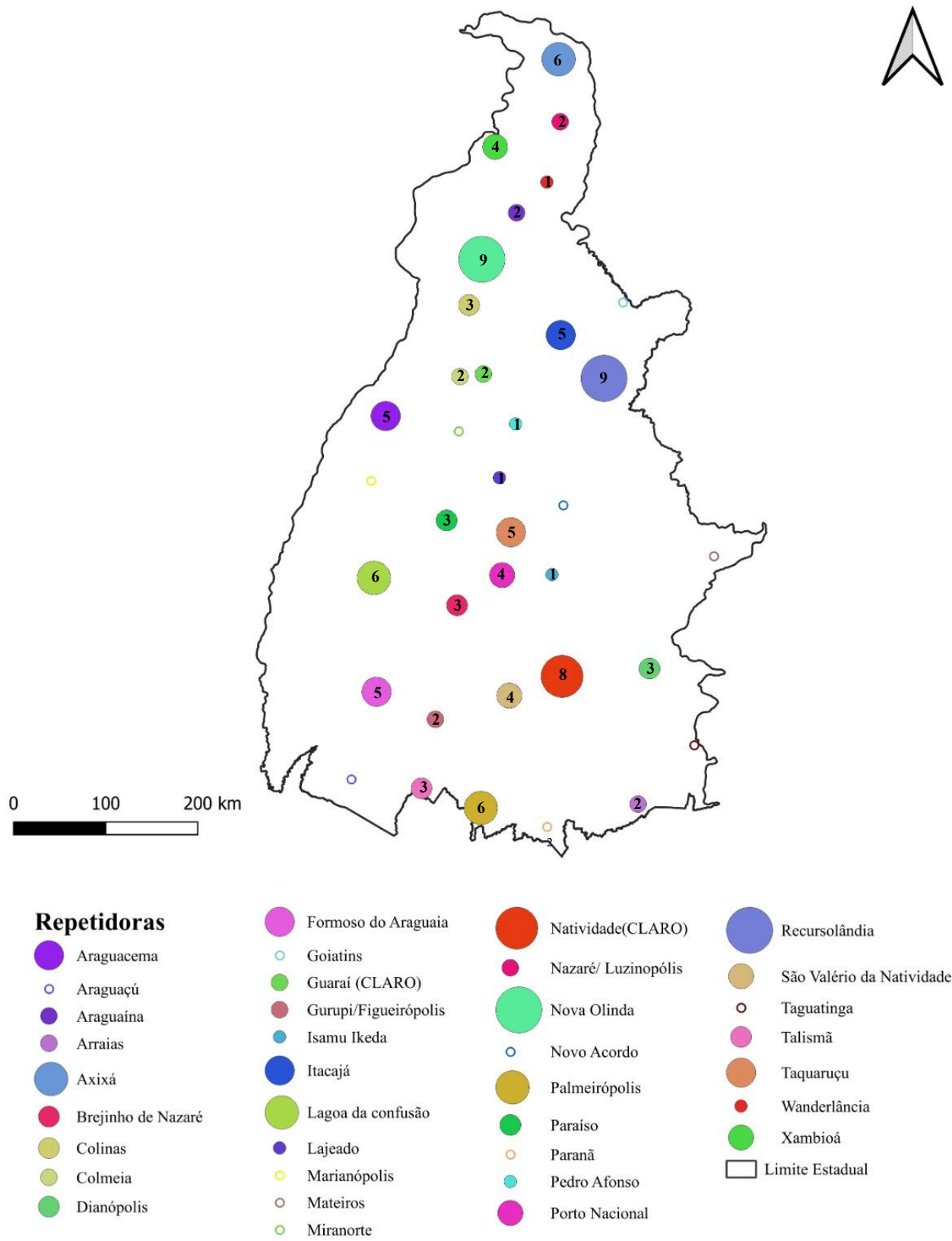
Outro aspecto que merece atenção é que, durante o período analisado, não foram registradas ocorrências relacionadas ao aterramento em 8 ER, sendo elas:

- Araguacema;
- Goiatins;
- Marianópolis;
- Mateiros;
- Miranorte;
- Novo Acordo;
- Paranã; e
- Taguatinga.

Essas ER são representadas na Figura 9 por circunferências não preenchidas.

Por fim, a análise das ocorrências em conjunto com os dados de aterramento apresentados no mapa reforça a importância de medidas proativas. A implementação de soluções, como a melhoria dos sistemas de aterramento e a adoção de tecnologias de proteção contra surtos elétricos, é fundamental para reduzir o impacto dessas falhas e aumentar a confiabilidade das ER.

Figura 9: Representação geográfica com magnitude de repetição de falha



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.3 Análise da Árvore de Falhas (AAF)

Considerando os dados e análises que foram apresentados sobre a falha (queima ou travamento) de equipamentos em ER, é importante investigar em que circunstâncias essas falhas ocorreram para compreender melhor o processo de falha nesses equipamentos. Essa análise pode ser realizada por meio da AAF.

Nesta análise, os eventos de base, representados por formas circulares, interagem e resultam em falhas de nível intermediário, que são representadas por formas retangulares. Finalmente, essas falhas podem levar ao evento de topo indesejado, também representado por uma forma retangular.

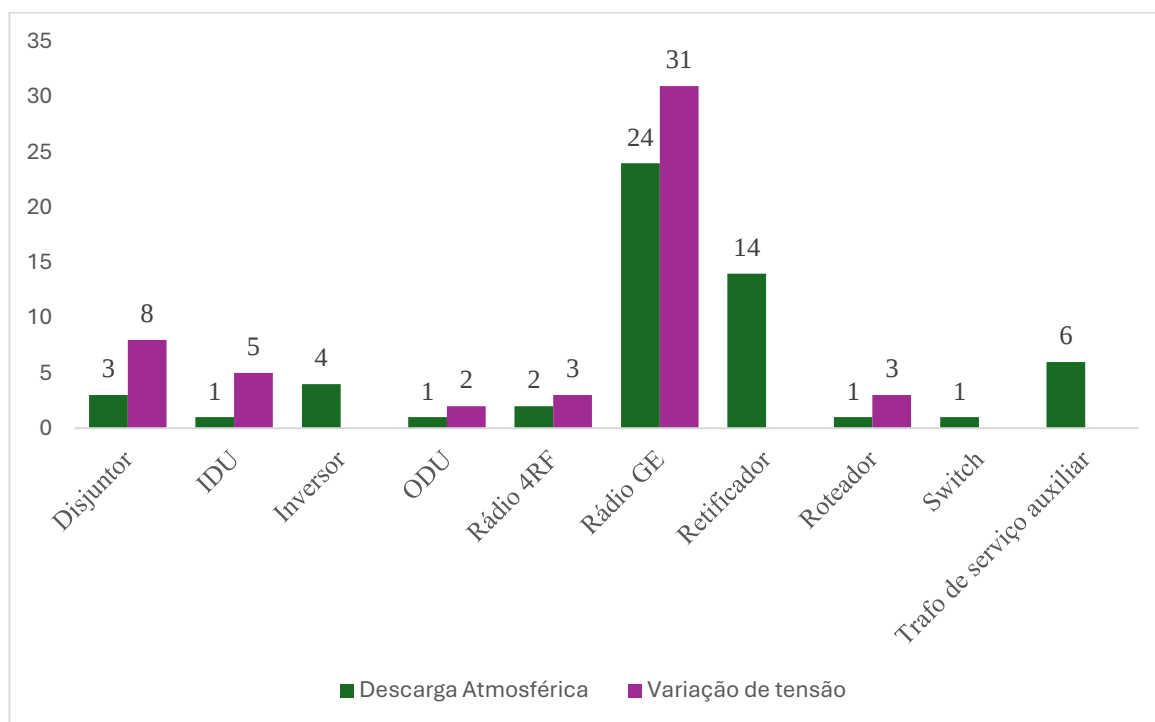
Com base nos dados de falhas coletados, identificou-se que algumas falhas base têm o potencial de gerar uma falha em nível intermediário, que, por sua vez, pode provocar a falha do equipamento da repetidora, conforme representado na Figura 10. Em relação às falhas observadas nas ER, todas as incidências básicas são potencialmente prejudiciais ao funcionamento do sistema de telecomunicações da concessionária e, por isso, foram correlacionadas por uma porta lógica OR, conforme ilustrado na Figura 10. Dessa maneira, a ocorrência de uma ou mais falhas básicas pode comprometer o funcionamento adequado das ER e, conseqüentemente, a qualidade da comunicação entre os equipamentos e o centro de operações, o que pode afetar a automação das subestações, reguladores de tensão e religadores da distribuição.

Além disso, é crucial considerar a frequência e a gravidade das falhas base para priorizar ações corretivas e preventivas. A análise da árvore de falhas (AAF) permite identificar não apenas as causas imediatas das falhas, mas também as condições subjacentes que podem estar contribuindo para a ocorrência dessas falhas.

A implementação de medidas preventivas, como uma inspeção mais detalhada do aterramento das ER e uma análise mais crítica das ocorrências, pode reduzir significativamente a probabilidade de falhas.

Adicionalmente, analisando o evento intermediário, observou-se que o número de equipamentos danificados por descargas atmosféricas foi superior. Além disso, as descargas atmosféricas também ocasionaram falhas em equipamentos mais robustos, como inversores e retificadores. Enquanto a variação de tensão na rede ocasionou falha apenas de equipamentos mais sensíveis como os disjuntores e rádios, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: Quantidade de equipamentos que falharam por evento intermediário



Fonte: Própria Autoria (2024).

Em resumo, a análise detalhada das falhas e a aplicação da AAF são essenciais para garantir a confiabilidade e a continuidade do serviço nas ER. Ao identificar e mitigar as causas das falhas, é possível melhorar a eficiência do sistema de telecomunicações e assegurar uma comunicação eficiente e ininterrupta entre os equipamentos e o centro de operações.

4.4 Recomendações Técnicas

Nesta subseção são apresentadas recomendações técnicas para aprimorar o sistema de aterramento das ER analisadas. Para tanto, são apresentadas recomendações voltadas a melhoria do solo, malha de aterramento e padronização da coleta dos dados de falhas.

4.4.1 Tratamento Químico do Solo

O tratamento químico do solo visa à diminuição da resistência de terra de um sistema que já está fisicamente definido e instalado. É importante que os materiais a serem utilizados possuam boa higroscopia, sejam não lixiviáveis, não corrosivos, tenham baixa resistividade elétrica, sejam quimicamente estáveis no solo, não sejam tóxicos e não causem danos à natureza (TEIXEIRA, 2019). Existem três principais tipos de tratamento químico do solo: bentonita; cloreto de sódio; carvão mineral; e gel.

4.4.1.1 Bentonita

A bentonita é um material quimicamente menos agressivo do que os sais e é largamente utilizada em sistemas de aterramento como agente redutor de resistência. Ela tem as propriedades de absorver facilmente a água, reter a umidade, ser boa condutora de eletricidade, possuir baixa resistividade e não ser corrosiva (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2020). A sua grande vantagem é não alterar as suas características com o passar dos anos. A concentração maior de umidade se estende inclusive ao solo adjacente à bentonita, o que resulta em uma significativa redução da resistividade do solo, justamente na região que é crítica para definição do valor da resistência de aterramento (VISACRO FILHO, 2002).

Diversos estudos e investigações foram conduzidos para analisar o uso da bentonita como tratamento de solo, visando melhorar o desempenho dos sistemas de aterramento, com foco na redução da resistência de terra. Entre os trabalhos, destacam-se os de Ahmad *et al.* (2018), Ahmad *et al.* (2021), Ismujianto *et al.* (2019), Rodrigues (2012) e Teixeira (2019). Em todos esses estudos, a bentonita demonstrou ser uma solução eficaz para a diminuição da resistência de aterramento, apresentando baixo custo, não lixiviando gradualmente e sem causar danos ao solo.

4.4.1.2 Cloreto de Sódio e Carvão Mineral

A aplicação de cloreto de sódio e carvão mineral em sistemas de aterramento é uma prática comum para diminuir a resistividade do solo. Contudo, é essencial garantir que esse material não tenha contato direto com os eletrodos, a fim de prevenir a corrosão. A resistividade do solo é influenciada pela quantidade de sais presentes, considerando que a água pura apresenta uma resistividade extremamente alta, funcionando como um isolante quase perfeito. A ionização, por outro lado, possibilita a condução de corrente elétrica (TEIXEIRA, 2019).

Entretanto, o tratamento do solo por meio da utilização de cloreto de sódio e carvão mineral não apresenta os efeitos esperados, principalmente pela curta duração de sua eficiência e pela agressão corrosiva nos eletrodos de terra (BANDEIRA, 2010).

4.4.1.3 Gel

O gel é o produto mais usado no tratamento químico do solo, pois é constituído de vários materiais que, com a presença de água, formam um agente ativo. Além disso, o gel é quimicamente estável, não solúvel em água, não corrosivo, não é atacado pelos ácidos contidos no solo e seu efeito é de longa duração (REIS, 2017).

As limitações do uso do sal (cloreto de sódio) como tratamento químico corroboraram para que, ao longo dos anos, diversos estudos tenham sido realizados para encontrar outras substâncias químicas que apresentem um melhor resultado. Diferentes autores estudaram sobre o uso de géis para a redução da resistência de aterramento, podendo citar, Clark e Watkins (1960), Sanik (1953), Higashimura *et al.* (1974), Montana *et al.* (2017) e Wooi *et al.* (2024). Nessas pesquisas são apresentados diferentes compostos para os géis como hidrogel, gel de sílica e ferrocianeto de cobre. Porém, todas elas mostram que esses géis podem construir uma solução mais permanente que os sais comuns, com uma notável diminuição no valor da resistência de aterramento.

4.4.2 Melhoria da Malha do Aterramento

Para se obter um desempenho adequada da malha de aterramento, é fundamental adotar soluções que maximizem a condutividade elétrica e minimizem a resistência de aterramento.

Um dos problemas do aterramento é a oxidação do cobre com o passar do tempo. Sendo assim, Gong *et al.* (2016) introduziram um novo material de aterramento composto de grafite-flexível e cobre, do inglês *flexible graphite-copperbcomposited* (FGCG). Este material é altamente condutivo e possui uma área de superfície maior que o cobre. Análises de simulação mostram que o FGCG tem uma maior capacidade de suportar corrente de curto-circuito em comparação com materiais metálicos convencionais. Além disso, o FGCG demonstrou alta capacidade térmica. Medições comparativas indicam que o FGCG tem menor resistência de contato que o aço devido ao seu maior diâmetro e flexibilidade, e ambos têm desempenho semelhante quando enterrados em solo de granulometria fina.

4.4.3 Estabelecimento de um Padrão de Coleta de Dados

A coleta de dados de falhas desempenha um papel essencial na manutenção da confiabilidade de sistemas de aterramento. Dados precisos e consistentes são fundamentais para garantir uma eficiente análise das falhas e ações preventivas e/ou preditivas mais precisas. Para isso, é imprescindível adotar procedimentos padronizados de coleta, permitindo a organização, identificação e modos das falhas, essenciais para estudos e planejamento da operação e manutenção (O&M).

De acordo com a NBR 5410 (2004), a inspeção visual deve ser realizada a fim de confirmar se a instalação: está seguindo as normas aplicáveis, foi corretamente selecionada e instalada de acordo com a norma e não apresenta danos aparentes que possam comprometer seu funcionamento adequado e a segurança.

Além disso, a gestão de riscos é um processo iterativo que apoia as organizações na formulação de estratégias, no cumprimento de metas e na tomada de decisões bem fundamentadas. O processo de gestão de riscos consiste na aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas para atividades como comunicação e consulta, estabelecimento do contexto, avaliação, tratamento, monitoramento, análise crítica, registro e relato de riscos (NBR ISO 3100, 2018).

Com base nas normas citadas e na NBR ISO 31010 (2021), foi elaborada uma ficha de inspeção específica para coleta dos dados de falhas que envolvam o sistema de aterramento, como pode ser vista no Quadro 3, a ser preenchida durante as inspeções em ER. O objetivo é possibilitar uma análise mais precisa e detalhada do sistema de aterramento, garantindo maior adequação e eficiência na avaliação.

Quadro 3: Ficha proposta de inspeção para malha de aterramento de estações repetidoras.

INSPEÇÃO DE REPETIDORA – MALHA DE ATERRAMENTO			
Data:		Repetidora:	
Verificações na Malha de Aterramento			
Verificações	Ok	Não Ok	Observações
Inspeção Visual			
Limpeza geral			
Local de inspeção nas decidas			
Caixa de inspeção			
Continuidade			
SPDA			
Medição de Resistência de Aterramento			
Haste	Valor medido		Observações
01			
02			
03			
Outras observações:			

Fonte: Autoria Própria (2024).

Adicionalmente, foi criada uma ficha de análise das ocorrências, disponível no Quadro 4, essencial para examinar todas as situações envolvendo ER, não se limitando apenas ao aterramento elétrico. Com um registro e análise cuidadosos, esta etapa possibilita aumentar a

confiabilidade do sistema, com a identificação de pontos de melhoria e em quais períodos do ano cada tipo de ocorrência é mais frequente. É de extrema relevância que o colaborador a preencher a ficha de análise seja devidamente treinado e qualificado.

Quadro 4: Ficha proposta para análise de ocorrências em estações repetidoras.

Análise de ocorrências em repetidoras			
Data:	Hora:	Repetidora:	Equipamento:
Descrição da ocorrência:			
Causa:		Subcausa:	
Impacto:			
Riscos identificados:			
DEC*:	Solução:		
FEC**:			
Hora de início do atendimento:		Hora de fim do atendimento:	

* DEC - Duração de Eventos a Clientes

** FEC - Frequência de Eventos a Clientes

Fonte: Autoria Própria (2024).

4.4.4 Conclusões das Recomendações

As recomendações apresentadas possibilitam: a melhoria da resistividade do solo; a redução da resistência de aterramento; a diminuição das falhas em equipamentos, otimizando o uso de recursos; o aprimoramento na análise e no tratamento de dados relacionados a falhas; a redução do tempo necessário para reparos; a garantia de maior continuidade nas comunicações; e o aumento da confiabilidade sistêmica.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizada uma análise das falhas em estações repetidoras (ER) de uma concessionária que opera no estado do Tocantins, com ênfase no estudo do aterramento. A partir dos resultados obtidos foi possível analisar dados de medição do aterramento, realizar uma investigação dos dados falhas por meio da análise da árvore de falhas (AAF) e elaborar algumas recomendações baseadas na literatura. As análises realizadas demonstram que:

- Há uma significativa variação na resistência de aterramento das repetidoras analisadas, que pode ser atribuída principalmente às diferentes condições do solo em que cada repetidora está instalada;
- A resistência de aterramento das repetidoras tem uma influência direta na quantidade de falhas dos equipamentos;
- As descargas atmosféricas foram identificadas como a principal causa de danos, afetando tanto equipamentos robustos quanto sensíveis. Já a variação de tensão na rede impactou principalmente os equipamentos mais sensíveis;
- O tratamento químico do solo, especialmente com bentonita e gel, mostram-se na literatura como maneiras eficazes na diminuição da resistência de aterramento.
- A padronização da coleta de dados é essencial para garantir uma análise precisa e ações preventivas/preditivas mais eficazes.

Pelo exposto, conclui-se que a análise realizada sobre as falhas em ER no estado do Tocantins, com foco no sistema de aterramento, contribuiu para o desenvolvimento de uma árvore de falhas capaz de identificar e compreender os fatores que afetam o desempenho desses sistemas. Além disso, as recomendações elaboradas, fundamentadas na literatura, reforçam a importância de práticas adequadas de aterramento e da aplicação de medidas corretivas para mitigar problemas relacionados à resistência do solo e à proteção contra descargas atmosféricas.

Ademais, os resultados obtidos neste trabalho evidenciam que as análises realizadas são fundamentais para o aprimoramento dos processos de manutenção, prevenção e predição de falhas em ER. A adoção de técnicas eficazes, como o tratamento químico do solo e a padronização da coleta de dados representam passos significativos para aumentar a confiabilidade desses sistemas, contribuindo para a continuidade e a qualidade dos serviços prestados pela concessionária.

TRABALHOS FUTUROS

Com os objetivos da pesquisa cumpridos, é possível realizar novos estudos que visam a um aprofundamento do conhecimento e melhorias nas soluções desenvolvidas e propostas neste trabalho. A construção de sistemas de aterramento mais eficientes e a análise de confiabilidade dos equipamentos permanecem temas relevantes, a fim de garantir o desempenho das estações repetidoras (ER).

Uma das propostas é a realização de estudos de viabilidade técnica e econômica para diferentes tipos de tratamentos de solo, como a adição de gel, bentonita ou outros materiais. Esses estudos devem avaliar a relação custo-benefício de cada método, considerando fatores como durabilidade, eficácia e impacto ambiental.

Outra linha de pesquisa diz respeito à elaboração de sistemas de aterramento eliminando as emendas, a fim de reduzir a oxidação que ocorre nas emendas e que podem comprometer a eficiência do aterramento e aumentar a suscetibilidade às falhas. Essa abordagem demanda estudos práticos para validar seu desempenho e durabilidade em condições reais de operação.

Complementarmente, outra pesquisa a ser desenvolvida corresponde à realização das análises de confiabilidade a partir da coleta de dados históricos. Por meio de análises mais aprofundadas e ferramentas estatísticas seria possível identificar padrões de falhas mais detalhados, permitindo ações preventivas/preditivas mais assertivas.

Além disso, a elaboração de sistemas de predição de falhas utilizando inteligência artificial se mostra uma oportunidade promissora. A aplicação de aprendizado de máquina para prever falhas em equipamentos pode facilitar a detecção precoce de problemas, possibilitando intervenções antes que ocorram interrupções no sistema.

Desta forma, sugerem-se como trabalhos futuros os seguintes temas:

- Conduzir estudos de viabilidade técnica e econômica para tratamentos de solo, considerando o desempenho, custo e impacto ambiental de cada método;
- Desenvolver e avaliar sistemas de aterramento eliminando as emendas, analisando seus impactos na confiabilidade e eficiência do sistema;
- Realizar análises de confiabilidade com base na coleta e modelagem de dados históricos, identificando padrões de falhas;
- Elaborar e implementar sistemas preventivos e preditivos baseados em inteligência artificial para antecipar falhas em equipamentos alocados em ER.

Por fim, as propostas elencadas têm o potencial de contribuir significativamente para a otimização das ER, promovendo eficiência dos sistemas de aterramento, continuidade da operação das redes de telecomunicações e uma maior confiabilidade sistêmica.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, S. K.; SABRY, R. Z.; GOMES, C. Improving the Grounding System by Adding Bentonite to Reduce the Potential Distribution. **International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)**, p. 1-5, Kuala Lumpur, Malaysia, 2021.
- AHMAD, W. F. H. W.; HAMZAH, N. H.; JASNI, J.; AB-KADIR, M. Z. A.; GOMES, C. A Study on Bentonite and Kenaf Properties for Grounding Purposes. **34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)**, p. 1-8, Rzeszow, Poland, 2018.
- AMARAL, C. T.; CORREIA, M. P.; PEREIRA, P. T. Corrosão em Estruturas Metálicas: Uma Breve Discussão Acerca da Prevenção em Torres de Telecomunicações. Centro Universitário de Belo Horizonte, Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia - Engenharia de Telecomunicações. **E-XACTA**, v. 1, n. 1, 2008.
- ARTHUZI JUNIOR, W. A.; BARBERINI, S. J. **Análise do Campo Elétrico na Interface Ar-Solo em Malhas de Aterramento Usando o Método FDTD**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia, Curitiba, PR, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15749: Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento. Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16254-1: Materiais para Sistemas de Aterramento: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5419-1: Princípios Gerais**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5419-2: Gerenciamento de Risco**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5419-3: Danos Físicos a Estruturas e Perigos à Vida**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5419-4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7117-1: Medição da Resistividade e Modelagem Geométrica**. Rio de Janeiro, RJ, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 31000: Gestão de Riscos - Diretrizes**. Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 31010: Gestão de Riscos – Técnicas para o Processo de Avaliação de Riscos. Rio de Janeiro, RJ, 2021.

AZEVEDO, W. L. M. **Modelagem de Aterramento Elétrico para Análise de Transitórios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 2022.

BANDEIRA, T. C. O. **Projeto de Sistemas de Aterramento para Laboratórios de Alta Tensão**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

BARRADAS, O. C. M.; SILVA, G. V. F. **Telecomunicações – Sistemas de Rádio Visibilidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embratel, 1978.

BISPO, D.; CAMACHO, J. R.; CHIOVATTO, C.; DALAIBA, A. C.; SILVA, S. F. P. **Método dos Elementos Finitos Aplicado em Projetos de Sistemas de Aterramento**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, MG, 2021.

CHIEB, M. T.; KHERIF, S. O.; MEKHALDI, A.; HARID, N. Investigation of Horizontal Ground Electrode's Effective Length under Impulse Current. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 61, n. 5, p. 1515-1523, outubro, 2019.

CLARK, R. J.; WATKINS, B. O. Some Chemical Treatments to Reduce the Resistance of Ground Connections. **AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 79, n. 3, p. 1016-1023, 1960.

CONTINI, S. A New Hybrid Method For Fault Tree Analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 49, pages 13-21.1995

COSTA, W. J. N. A. **Análise de Aterramento em Linhas de Transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2012.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2016.

DE MORAES, J. L. B. **Infraestrutura de Redes sem Fio na Zona Rural de Bueno Brandão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnológica de Redes de Computadores) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Inconfidentes, MG, 2013.

DIEGO, A. G.; GOMES, C. Lightning Protection Scenarios of Communication Tower Sites: Human Hazards and Equipment Damage. **Safety Science**, v. 49, n. 10, p. 1355-1364, maio, 2011.

FELIPE, M. A. **Sobretensões em Redes de Distribuição de Correntes da Incidência de Descargas Atmosféricas em Torres de Telecomunicações**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2007.

FONSECA, W. G.; MENEZES, F. S. **Dispositivos de Proteção contra Descarga Atmosférica em Estações de Telecomunicações**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica ou Engenharia de Telecomunicações) – Instituto de Engenharia e Tecnologia do Centro Universitário de Belo Horizonte, Belo Horizonte, MG, 2014.

GONG, R.; J. RUAN, J.; HU, Y.; WU, Y.; JIN, S. Research on flexible graphite-copper composited electrical grounding material. **International Conference on AC and DC Power Transmission ACDC**, Breijing, 2016.

GONÇALVES, F. C. **Uma Abordagem *Multistakeholder* para Análise de Árvore de Falhas no Setor Terciário**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2018.

HIGASHIMURA, E.; SEKIMOTO, Y.; HATABU, E. Earth Resistance-Reducing Agent and Method of Reducing Earth Resistance by Use of Same. **U.S. Patent Application** 212.658, US3857991 A, dezembro, 1974.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Dados e Informações Ambientais – Pedologia**. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acesso em: 10 jun. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Incidência de Descargas Atmosféricas no País: Mapa do Biênio 2018/2019**. Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT). Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/incidencia.de.descargas.no.pais.php>. Acesso em: 5 abr. 2024.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 62305: Protection against Lightning**. 2010.

ISMUJIANTO; ISDAWIMAH; NADHIROH, N. Improvement of Electrical Grounding System Using Bentonite. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1364, 1st Workshop on Engineering, Education, Applied Sciences, and Technology, Surabaya, Indonesia, 2019.

JAMALI, M.; NIASATI, M.; JAZAERI, M. Lightning Analysis of Adjacent Grounding Systems Using Multi-Conductor Transmission Line Method. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 14, n. 10, p. 848-852, março, 2021.

JAMHOUR, E.; MIGUEL, M. L. F.; BICZKOWSKI, M.; ZAMBENEDETTI, V. C. Implantação de Ferramenta de *Software* para Planejamento da Comunicação de Rede Inteligente da COPEL DIS. **Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**, Vitória, ES, 2023.

KASIM, C. V. B. Analysis of Existing Effectiveness and Method to Enhance the Lightning, Shielding and Earthing Protection Schemes Applied on the Parit Raja's Telecommunication Tower System. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Tun Hussein Onn Malaysia, Baty Pahat, Johor, 2013.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. **Aterramento Elétrico**. 7. ed. Florianópolis, SC: Labplan, 2020.

MONTANA, J.; ARDILA, J.; SCHURCH, R. **Evaluation of the Grounding Resistance Reduction Due to Soil Treatment for Different Grounding Electrode Configurations**. The 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017.

RAMELI, N.; AB-KADIR, M. Z. A.; IZADI, M.; GOMES, I.; AZIS, N. Effect of the Grounding System on the Lightning Current Profile Along a Tall Structure. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 9, n. 6, p. 717-727, setembro, 2015.

RAMEZANIFAR, E.; GHOLAMIZADEH, K., MOHAMMADFAM, I.; ALIABADI, M.M. **Risk Assessment Of Methanol Storage Tank Fireaccident Using Hybrid FTA-SPA**, *Plos One*, volume 18(3), e028265.7. 2023.

REIS, P. C. S. **Estudo da Resistividade do Solo para Aterramento Elétrico**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica – Universidade Anhanguera de Niterói, Niterói, RJ, 2017.

RODRIGUES, M. A. O. **Avaliação do Desempenho de Novas Concepções de Malhas de Aterramento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2012.

RODRIGUES, R. A.; MACÊDO NETO, J. C.; MORAIS, J. S.; SILVA, M. O.; COSTA, C. W. L.; CARDOSO, B. C.; ROCHA, A. F.; FREITAS, M. S. Aplicação da Ferramenta Análise de Árvore de Falhas ou Fault Tree Analysis (FTA) para Redução de Custo no Processo de Fundição em Alumínio GDC no Polo de Duas Rodas. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 17629-17646, 2022.

SANIK, I. H. **Bull Schweiz Electrotechn**, 1953, v. 44, n. 25, p. 1052.

SHARMA, S.; SHRESTHA, PRABIDHI; SHRESTHA, PITAMBAR. Telecom Tower Under the Threat of Lightning Hazards. **Scientific World**, v. 15, n. 15, p. 158-166, junho, 2022.

TEIXEIRA, L. Q. **Tratamento Químico do Solo para Sistemas de Aterramento Elétrico**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, 2019.

TROIAN, S. P. **Sobre a Resposta Estrutural Dinâmica de uma Torre Estaiada de Linha de Transmissão Submetida a Ventos do Tipo EPS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2018.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos elétricos**. 1. ed. São Paulo, SP: Artliber Editora Ltda, 2002.

WOOL, C.; OSMAN S. N. B.; AFROUZI, H. N.; ARSHAD HASHIM, S. N. B.; MEHRANZAMIR, K.; OTHMAN, M. Grounding Performance of Hydrogel, Silica Gel and Charcoal Ash as Additive Material in Grounding System. **International Journal of Nanoelectronics and Materials (IJNeM)**, v. 17, n. June, p. 107–114, 2024.

YAMANE, A. K.; SOUZA, L. G. M. Aplicação do Mapeamento de Árvore de Falhas (FTA) para Melhoria Contínua em uma Empresa do Setor Automobilístico. **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Foz do Iguaçu, PR, 2007.

APÊNDICE A

Neste apêndice são apresentados os dados de falhas filtrados que ocorreram em estações repetidoras (ER), causadas por descargas atmosféricas ou por variação de tensão, e que estão relacionadas ao sistema de aterramento, conforme Quadro A 1.

Quadro A 1: Dados de falha filtrados.

Repetidora	Data	Falha	Equipamento	Causa
Taquaruçu	02/01/2022	Travamento	Rádio 4RF	Descarga atmosférica
Colmeia	14/01/2022	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Nova Olinda	15/01/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Axixá	16/01/2022	Queima	Disjuntor	Variação de tensão
Itacajá	17/01/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Nova Olinda	17/01/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Nova Olinda	23/01/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Arraias	30/01/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Natividade	31/01/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Lagoa da Confusão	12/02/2022	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Brejinho de Nazaré	14/02/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Taquaruçu	25/02/2022	Queima	Inversor	Descarga atmosférica
Porto Nacional	25/02/2022	Travamento	Rádio GE	Variação de tensão
Dianópolis	27/02/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Lagoa da Confusão	28/02/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão

Lajeado	14/03/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Araguaçu	14/04/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Porto Nacional	29/04/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Axixá	02/06/2022	Travamento	Rádio 4RF	Variação de tensão
Nazaré	02/06/2022	Travamento	Rádio GE	Variação de tensão
Brejinho de Nazaré	02/06/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Pedro Afonso	05/06/2022	Travamento	IDU	Descarga atmosférica
Wanderlândia	07/06/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Lagoa da Confusão	08/06/2022	Queima	Trafo de serviço auxiliar	Descarga atmosférica
Nova Olinda	13/06/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Xambioá	22/06/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Porto Nacional	11/07/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Natividade	13/07/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Gurupi/Figueirópolis	20/07/2022	Travamento	Roteador	Descarga atmosférica
Paraíso	26/07/2022	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Recursolândia	31/07/2022	Travamento	IDU	Variação de tensão
Taquaruçu	02/08/2022	Queima	Disjuntor	Variação de tensão
Xambioá	10/08/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão

Colinas	10/08/2022	Travamento	Roteador	Variação de tensão
Paraíso	11/08/2022	Travamento	Roteador	Variação de tensão
Taquaruçu	18/08/2022	Queima	Disjuntor	Variação de tensão
Gurupi/Figueirópolis	18/08/2022	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Porto Nacional	19/08/2022	Queima	Disjuntor	Variação de tensão
Recursolândia	20/08/2022	Travamento	IDU	Variação de tensão
Axixá	22/08/2022	Queima	Rádio 4RF	Variação de tensão
Xambioá	23/08/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Nova Olinda	25/08/2022	Queima	Disjuntor	Descarga atmosférica
Recursolândia	26/08/2022	Travamento	IDU	Variação de tensão
Brejinho de Nazaré	28/08/2022	Queima	Disjuntor	Variação de tensão
São Valério da Natividade	01/09/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Formoso do Araguaia	04/09/2022	Queima	Trafo de serviço auxiliar	Descarga atmosférica
Recursolândia	04/09/2022	Travamento	IDU	Variação de tensão
Itacajá	12/09/2022	Queima	Trafo de serviço auxiliar	Descarga atmosférica
Palmeirópolis	01/11/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Nova Olinda	01/11/2022	Queima	Retificador	Descarga atmosférica

Colinas	05/11/2022	Queima	Trafo de serviço auxiliar	Descarga atmosférica
Nova Olinda	06/11/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Itacajá	09/11/2022	Queima	Disjuntor	Variação de tensão
Paraíso	10/11/2022	Queima	Switch	Descarga atmosférica
Recursolândia	10/11/2022	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Itacajá	11/11/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Itacajá	12/11/2022	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Arraias	13/11/2022	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Araguaçu	17/11/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Natividade	18/11/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Formoso do Araguaia	19/11/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Lagoa da Confusão	23/11/2022	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Lajeado	27/11/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Araguaçu	31/12/2022	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Axixá	04/01/2023	Queima	Rádio 4RF	Descarga atmosférica
Axixá	08/01/2023	Queima	Rádio 4RF	Variação de tensão
São Valerio da Natividade	09/01/2023	Queima	ODU	Variação de tensão

Araguaçu	09/01/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Lajeado	11/01/2023	Travamento	Roteador	Variação de tensão
Dianópolis	12/01/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Guaraí	12/01/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
São Valerio da Natividade	15/01/2023	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Colinas	15/01/2023	Queima	Disjuntor	Descarga atmosférica
Xambioá	19/01/2023	Queima	Disjuntor	Variação de tensão
Palmeirópolis	20/01/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Recursolândia	21/01/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Palmeirópolis	21/01/2023	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Natividade	24/01/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Recursolândia	30/01/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Axixá	03/02/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Dianópolis	06/02/2023	Queima	Inversor	Descarga atmosférica
Formoso do Araguaia	07/02/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Nova Olinda	08/02/2023	Queima	Disjuntor	Descarga atmosférica
Nova Olinda	11/02/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica

São Valério da Natividade	12/02/2023	Queima	Trafo de serviço auxiliar	Descarga atmosférica
Palmeirópolis	12/02/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Talismã	15/02/2023	Queima	ODU	Variação de tensão
Natividade	16/02/2023	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Araguaçu	16/02/2023	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Araguaína	19/02/2023	Queima	Disjuntor	Variação de tensão
Talismã	21/02/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Formoso do Araguaia	23/02/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Natividade	25/02/2023	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Isamu Ikeda	25/02/2023	Queima	Inversor	Descarga atmosférica
Talismã	26/02/2023	Queima	Inversor	Descarga atmosférica
Natividade	28/02/2023	Queima	Retificador	Descarga atmosférica
Taquaruçu	28/08/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Lagoa da Confusão	28/08/2023	Travamento	IDU	Variação de tensão
Palmeirópolis	01/03/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Recursolândia	16/03/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Lagoa da Confusão	19/03/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica

Guaraí	26/03/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Palmeirópolis	28/03/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Nazaré	04/04/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Formoso do Araguaia	09/04/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão
Araguaína	10/04/2023	Queima	ODU	Descarga atmosférica
Natividade	21/04/2023	Queima	Trafo de serviço auxiliar	Descarga atmosférica
Recursolândia	01/05/2023	Queima	Rádio GE	Descarga atmosférica
Colmeia	10/05/2023	Queima	Rádio GE	Variação de tensão

Fonte: Autoria Própria (2024).