

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO

Douglas Goulart Lopes

**Análise de Sistemas de Aterramento em Ambientes Industriais Agressivos**

Uberaba-MG

2024

Douglas Goulart Lopes

**Análise de Sistemas de Aterramento em Ambientes Industriais Agressivo**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. David Calhau Jorge

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius B. Mendonça

Uberaba-MG

2024

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

L851a      Lopes, Douglas Goulart  
            Análise de sistemas de aterramento em ambientes industriais agressivos /  
Douglas Goulart Lopes. -- 2024.  
            57 f. : il., graf., tab.

            Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2024  
            Orientador: Prof. Dr. David Calhau Jorge  
            Coorientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius B. Mendonça

            1. Linhas elétricas subterrâneas. 2. Descargas elétricas. 3. Carga e  
distribuição elétrica. I. Jorge, David Calhau. II. Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 621.3.053

**DOUGLAS GOULART LOPES****ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS AGRESSIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 19 de fevereiro de 2024

**Banca Examinadora:**

Dr. David Calhau Jorge – Orientador  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dra. Juliane Cristina de Oliveira Fandi  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Edilberto Pereira Teixeira  
Universidade de Uberaba



Documento assinado eletronicamente por **DAVID CALHAU JORGE, Professor do Magistério Superior**, em 19/02/2024, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **JULIANE CRISTINA DE OLIVEIRA FANDI, Professor do Magistério Superior**, em 19/02/2024, às 11:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edilberto Pereira Teixeira, Usuário Externo**, em 19/02/2024, às 11:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufm.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1171170** e o código CRC **E45DA348**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela oportunidade de chegar até aqui e por todo amparo. Agradeço também ao meu orientador Prof. David e ao meu co-orientador Prof. Marcus, por todo apoio, orientação e parceria.

Agradeço à minha noiva Jéssika, por toda cumplicidade e ajuda ao longo desse período, por ser a melhor parceira que poderia escolher. Aos meus funcionários, agradeço por todo auxílio e apoio para que eu pudesse alcançar o objetivo do mestrado. E, por fim, agradeço à minha família por todo incentivo, em especial à minha avó Volive, que foi minha incentivadora desde a infância.

## RESUMO

O aterramento elétrico possui dentre suas funções primordiais na segurança de indivíduos contra choques elétricos e equipamentos das consequências associadas às descargas atmosféricas, sendo imprescindível a manutenção e inspeção contínua de sistemas de aterramento, garantindo, assim, a confiabilidade destes. O objetivo do presente estudo foi analisar a oxidação da malha de aterramento devido à reação com substâncias químicas em ambientes industriais. Para isso foram utilizados dois instrumentos de medição ôhmica: o terrômetro e o alicate terrômetro, além de registros fotográficos para elucidar a oxidação da malha de aterramento ao longo das medições. A coleta de dados foi realizada em uma Indústria de Produtos Químicos. Foi possível verificar, na indústria de produtos químicos, que houve um pequeno aumento da resistência de aterramento de uma das hastes que estava localizada próximo ao local de fabricação dos ácidos e que a descida do para-raios nessa região estava oxidada devido ao vapor dos ácidos produzidos, demonstrando que o contato com as substâncias químicas acelerou a oxidação da malha de aterramento.

Palavras-chave: descarga elétrica; aterramento; resistividade.

## **ABSTRACT**

Electrical grounding has a primary function in the safety of individuals against electrical shocks and equipment from the consequences associated with atmospheric discharges, making it essential to maintain and continuously inspect grounding systems, thus ensuring their reliability. The objective of the present study was to analyze the oxidation of the grounding mesh due to the reaction with chemical substances in industrial environments. For this, two ohmic measuring instruments were used: the thermometer and the thermometer pliers, in addition to photographic records to elucidate the oxidation of the grounding mesh throughout the measurements. Data collection was carried out in a Chemical Industry. It was possible to verify that in the chemical industry there was a small increase in the grounding resistance of one of the rods that was located close to the place where the acids were manufactured and that the descent of the lightning rod in this region was oxidized due to the vapor of the acids produced. It was possible to verify that contact with chemical substances accelerated the oxidation of the grounding mesh.

Keywords: electric discharge; grounding; resistivity.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                              | <b>12</b> |
| <b>3. PERCURSO DA DISSERTAÇÃO .....</b>                            | <b>20</b> |
| <b>4. OBJETIVO.....</b>  | <b>24</b> |
| <b>5. MÉTODO .....</b>   | <b>25</b> |
| 5.1 INSTRUMENTOS.....  | 25        |
| 5.2 PROCEDIMENTOS.....   | 25        |
| 5.2.1 Coleta de dados.....   | 25        |
| 5.2.2 Análise de dados.....  | 28        |
| <b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                              | <b>31</b> |
| <b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                | <b>53</b> |
| <br>   |           |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>56</b> |
| <b>APÊNDICE A – AUTORIZAÇÃO DE INSTITUIÇÃO CO-PARTICIPANTE....</b> | <b>59</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

Instalações de transmissão e distribuição em correntes alternadas surgiram a partir do século XVIII (RANDO, 2021). Dentre os diversos itens estudados nas Instalações Elétricas o sistema de aterramento merece destaque: em algumas situações ele é constituído por um cabo de cobre nú enterrado sob o solo, que interliga todos os pontos que necessitam de aterramento, sendo que, quando existe uma malha de aterramento específica separada, é necessário que esta esteja ligada à malha de aterramento geral. Ademais, todas as estruturas metálicas e equipamentos que possuam carcaça metálica devem ser interligados a malha de aterramento, pois todos estes materiais podem possuir um potencial elétrico e, conseqüentemente, levar a um fluxo de corrente elétrica pelo corpo de um indivíduo (RANDO, 2021).

De acordo com Kindermann e Campagnolo (1995) os principais objetivos do aterramento são:

Obter uma resistência de aterramento, a mais baixa possível, para correntes de falta à terra; manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança, de modo a não causar fibrilação do coração humano; fazer que equipamentos elétricos e eletrônicos sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra; proporcionar um caminho de escoamento para a terra de descargas atmosféricas; usar a terra como retorno de corrente no sistema MRT; escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos (p. 1).

Visando atingir tais objetivos, é possível aterrar um sistema elétrico de diversas maneiras, utilizando hastes, placas de formas e tamanhos diversos ou cabos enterrados no solo, sendo fundamental o conhecimento das características e resistividade do solo.

Dessa maneira, o aterramento elétrico possui função primordial na segurança de indivíduos contra choques elétricos e de equipamentos das conseqüências associadas às descargas atmosféricas. Todavia, para além da importância para segurança e proteção na Engenharia Elétrica, os sistemas de aterramento também podem contribuir para localização de falhas nas camadas da Terra, jazidas minerais, lençol d'água, petróleo, subsídio para descobertas arqueológicas, entre outras contribuições à Geologia e Arqueologia (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Em muitos casos o aterramento utiliza de hastes e cabos de cobre nú interligados de maneira a garantir a equipotencialidade, nesse sentido, o aterramento elétrico busca equipotencializar uma região para protegê-la dos danos causados pelas descargas elétricas (SANTOS ET AL., 2023). São três componentes que constituem o aterramento elétrico: eletrodos de aterramento, conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos e a terra que envolve os eletrodos (VISACRO FILHO, 2002).

As cargas elétricas podem fluir pelo meio da terra. O cobre é um bom condutor elétrico, que tem sua resistividade em torno de  $1,67 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  a  $20^\circ C$ , dessa forma, comparado ao solo, o cobre é um bilhão de vezes melhor condutor de cargas elétricas. Nesse contexto, faz-se importante citar que os metais são bons condutores de cargas elétricas devido aos elétrons livres (RANDO, 2021). O solo permite que o fluxo de cargas elétricas flua através dele, difundindo-se em função da sua resistividade. Para que isso ocorra à necessidade de um elemento que realize essa função, denominado sistema de aterramento, que deve obedecer a capacidade adequada de conduzir corrente elétrica de falta e manter um baixo valor de resistência de aterramento mesmo diante das variações climáticas (RANDO, 2021, p. 33).

Dessa forma, é imprescindível a manutenção e inspeção contínua de sistemas de aterramento, garantindo a confiabilidade destes. Todavia, um aterramento eficiente e bem executado não significa que o local estará isento de surtos, mas que estará protegido de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a qual postula que a resistência máxima da malha deve ser de  $10 \Omega$ , contudo quanto mais próximo de zero estiver a resistência da malha, mais eficiente será o sistema (SILVA ET AL, n.d.).

Nesse contexto, visando garantir a segurança, as normas NBR 14039 e a NR 10 (2004) exigem que toda instalação elétrica tenha um aterramento. Em construções em que há o uso de substância químicas, os sistemas de aterramento merecem um cuidado especial. Empresas de químicos e produtos inflamáveis devem realizar anualmente a medição da malha de aterramento, sendo necessário que um Engenheiro Eletricista assine tal medição. Caso o valor da medição não esteja dentro do valor permitido pela norma NBR 5419 (2015), é necessário realizar modificações visando que o sistema atenda as normas.

As instalações elétricas em indústrias químicas, que contam com a possibilidade de misturas explosivas, necessitam de maior cuidado e atenção devido ao risco que oferecem. Essas áreas são definidas com o código BE3, na norma ABNT NBR 5410 (2021). O aterramento elétrico nestes ambientes tem a função de eliminar o nível de

tensão para evitar a energia de ativação necessária para ocorrer uma explosão ou iniciar um incêndio (RANDO, 2021).

É imprescindível que todos os projetos de aterramento sigam as normas específicas para cada caso – aterramento residencial, as linhas de alta tensão ou subestações, aterramento de telecomunicações – que asseguram a boa qualidade da instalação, visando sua segurança. Apesar das normas diferenciarem-se em cada país, sendo importante que os projetos respeitem as normas locais em que serão realizadas as instalações, a maioria dos países utilizam as normas internacionais para o desenvolvimento dos projetos e instalações, devido ao seu reconhecimento (GENNARI, 2017).

Os eletrodos que compõe a malha de aterramento são constituídos de um corpo metálico enterrado no solo, sendo o cobre um material utilizado para constituição da malha. Contudo, o cobre, quando em contato com o oxigênio ou com a água, sofre processo de oxidação, sendo, ainda, que o contato com outras substâncias químicas pode acelerar tal processo de oxidação, o que pode comprometer a eficácia e segurança da malha de aterramento. Diante disso, peças galvanizadas ou pintadas devem garantir que o valor da resistência de aterramento não seja alterado, permitindo uma continuidade elétrica em toda a instalação ao potencial da terra (RANDO, 2021).

Neste contexto, o presente estudo é fruto de um projeto de pesquisa que foi desenvolvido com o objetivo de analisar e compreender a oxidação da malha de aterramento devido à reação com substâncias químicas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A NBR 5419 (2015) é uma norma brasileira que estabelece as diretrizes para o projeto e a execução de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). A norma visa estabelecer critérios para a proteção de estruturas e pessoas contra os efeitos das descargas atmosféricas, fornecendo diretrizes para o projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção. Aplica-se a todas as estruturas sujeitas a danos causados por raios, como edifícios, torres, antenas, entre outros.

A norma define quatro zonas de proteção contra descargas atmosféricas: Zona de Captação, Zona de Condução, Zona de Proteção de Equipotencialização e Zona Livre. Ademais, a NBR 5419 (2015) estabelece critérios para o dimensionamento de captadores, condutores de descida, sistemas de aterramento e dispositivos de proteção contra surtos e define os requisitos para os materiais utilizados no SPDA, garantindo sua eficácia e durabilidade. De acordo com a NBR 5419 (2015) são necessárias inspeções regulares e manutenção dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas visando garantir seu funcionamento adequado ao longo do tempo.

A norma (NBR 5419, 2015) inclui recomendações para a proteção de equipamentos sensíveis contra sobretensões induzidas por descargas atmosféricas e sugere diretrizes para a integração do SPDA com outros sistemas, como sistemas elétricos e de telecomunicações. É importante observar que a norma é revisada periodicamente para refletir avanços tecnológicos e atualizações nas práticas de segurança. Portanto, ao realizar projetos ou instalações, é aconselhável consultar a versão mais recente da NBR 5419.

Logo, o aterramento elétrico tem várias funções essenciais, como garantir a segurança, o funcionamento adequado dos equipamentos e a proteção contra possíveis riscos. Em relação a segurança pessoal, o aterramento proporciona um caminho de baixa resistência para a corrente elétrica fluir em direção à terra em casos de falhas no sistema elétrico, como curtos-circuitos. Isso reduz o risco de choques elétricos para as pessoas que operam ou estão em contato com equipamentos elétricos (PURCELL, 2011). O aterramento ajuda a desviar correntes indesejadas, como surtos de tensão causados por raios ou flutuações na rede elétrica, para a terra. Isso protege os equipamentos elétricos e eletrônicos contra danos causados por picos de tensão e ajuda a prolongar sua vida útil (IEEE Std 1100-1999, 2015). Ademais, o aterramento adequado também contribui para

estabilização da tensão em sistemas elétricos, reduzindo flutuações e variações que podem prejudicar o funcionamento de dispositivos sensíveis (MEIER, 2006), prevenindo o acúmulo de cargas elétricas nos equipamentos, evitando faíscas e arcos elétricos que podem levar a incêndios e explosões. O aterramento auxilia ainda a dissipar interferências eletromagnéticas, o que é especialmente importante em sistemas de comunicação e eletrônicos sensíveis para manter a qualidade do sinal (PAUL, 2006). Em situações de falha, como curtos-circuitos, o aterramento oferece um caminho seguro para que a corrente de falha possa fluir, permitindo a atuação dos dispositivos de proteção, como disjuntores, para interromper a corrente e isolar a falha (GONEN, 2014). Muitos padrões e regulamentos de segurança elétrica exigem sistemas de aterramento adequados em edifícios e instalações, objetivando garantir a segurança dos ocupantes e a proteção dos sistemas elétricos.

Dessa forma, visando compreender de maneira mais profunda a importância dos Sistema de Proteção contra Descargas Elétricas (SPDA) para as construções e a vida dos indivíduos, foi realizada uma revisão da literatura sobre tal temática. Buscou-se por artigos publicados no período de 2014 a 2023 que respondessem à seguinte pergunta norteadora: “Qual a importância dos Sistemas de Proteção contra Descargas Elétricas?”. Apresentamos, assim, alguns artigos buscando responder tal questão norteadora e discutir a relevância do SPDA em diferentes contextos.

O Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas possui importância fundamental já no início de obras e construções. Catanhede e Magno (2021) abordam a padronização do aterramento em equipamentos elétricos móveis em canteiros de obras a partir da realização de uma avaliação do aterramento utilizado em um canteiro de obras. O aterramento adequado é fundamental para desviar correntes indesejadas para o solo, protegendo tanto os operadores quanto os dispositivos. O artigo discute as normas e regulamentos relevantes, destacando a importância do cumprimento dessas diretrizes para prevenir danos aos equipamentos, reduzir riscos de incêndio e choque elétrico, e manter a eficiência operacional nos canteiros de obras. Os autores realizaram análises de campo, preparação do ambiente e dos aterramentos para verificações das análises do solo, e encontraram um solo homogêneo e próprio para aterramento. Na análise realizada foi concluído que todo aterramento utilizado precisaria ser refeito, além de ser preparado toda malha de aterramento do canteiro de obras, visto que apenas se utilizava uma barra de eletrodo fora do padrão das normas vigentes, e apresentaram o Kit de Aterramento, em que através da cadeia de ajuda, pode ser verificado o local, máquinas e

equipamentos a ser utilizado.

Além da necessidade de segurança contra descargas elétricas nos canteiros de obras, as construções também devem ser protegidas contra descargas elétricas, quando necessário. Objetivando, assim, compreender sobre o SPDA e o impacto das descargas atmosféricas sobre construções realizadas com concreto, Juliatti e Lage (2019) estudaram o impacto de uma descarga atmosférica no concreto armado, visando verificar se quando há a descarga a resistência do concreto diminui. Para alcançar o objetivo pretendido foram utilizados 12 corpos de prova ao mesmo tempo, ou seja, foram contruídos blocos de concretos e alocado um condutor no meio de cada um deles – um corpo de aço. Para simular a descarga atmosférica, os autores utilizaram uma máquina de solda. Os resultados mostraram que a resistência do concreto diminuía a medida que uma maior quantidade de energia passava pelo concreto. Dessa forma, pôde-se concluir que utilizar a estrutura da coluna de ferro da construção como a descida do para-raios diminui a resistência à compressão do concreto conforme as descargas elétricas são conduzidas pelos ferros, podendo, ao longo do tempo, oferecer risco para a segurança da construção. Concluiu-se, assim, que é mais seguro para a construção que a descida do SPDA ocorra de maneira externa, evitando, dessa forma, que as descargas elétricas possam afetar a compressão do concreto.

Nesse sentido, buscando avaliar a eficiência do sistema de SPDA da construção de um prédio de uma universidade no Amazonas, de acordo com a norma NBR 5419 (2015), Junior et al. (2021) realizaram cálculos visando verificar se o número de descidas da construção estava correto, a disposição dos captosres estava pertinente, e se o captor tipo Faraday e a escolha dos locais dos captosres Franklyn também estava adequada. Nesse contexto, os autores verificaram, a partir do uso do terrômetro, a possibilidade de que a malha de aterramento não estava interligada suficiente ou de que o número de hastes não era adequado. Dessa forma, puderam concluir que o sistema não estava apropriado e era necessário adequações, como o aumento do número de hastes, permitindo, assim, que a malha de aterramento tivesse uma resistência menor, conduzindo melhor as descargas atmosféricas.

Já Feitosa e Guerra (2020) realizaram uma análise se há necessidade de criar um sistema de SPDA em uma fazenda de energia fotovoltaica em uma cidade do Rio Grande do Norte. O terreno analisado possuía 3.500m<sup>2</sup>, 1.350 módulos fotovoltaicos e havia, ainda, uma pequena casa de comando onde fica um transformador para elevar o nível de tensão e um banheiro para quem fosse realizar manutenção. Tendo como base a norma

NBR 5419 (2015), e utilizando as tabelas desta norma, realizaram levantamentos e cálculos buscando a compreensão se haveria a necessidade da instalação de um Sistema de Proteção contra Descargas Elétricas no local, levando em conta o tamanho do terreno, a altura dos elementos do terreno, a periculosidade do local e a quantidade de pessoas frequentadoras da área, utilizando, ainda, a tabela do INPE para calcular a probabilidade de ocorrer uma descarga atmosférica por km<sup>2</sup> naquela região. Os resultados mostraram não haver necessidade da implantação de um SPDA visto que a chance de ocorrer uma descarga atmosférica é de  $4,60940 \times 10^{-8}$ , ou seja, o valor encontrado nos cálculos foi menor do que o valor mínimo sugerido pela norma NBR 5419 (2015) de  $1,016745 \times 10^{-3}$ . Dessa forma, como a probabilidade de uma descarga atmosférica na região é baixa, não representa um grande risco à proteção das pessoas e de bens materiais.

Dessa maneira, é possível compreender que, apesar da enorme importância da instalação de SPDAs em diversas construções e instalações, nem sempre o Sistema será necessário, visto os baixos riscos de perda de vida humana ou ferimentos permanentes e perda de valor econômico (estrutura e seu conteúdo, instalação de serviço e perda de atividade) que a região pode oferecer, ou seja, é possível que uma construção ofereça segurança sem a necessidade de gastos com tal implementação. Todavia, é necessário um estudo apurado e detalhado para que a ausência desse Sistema não represente um risco à população e aos bens materiais da região, sendo imprescindível que, quando for necessário a implantação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, ele seja efetuado da melhor maneira possível, sendo verificado o número de hastes, o material utilizado, a descida, e todos os detalhes envolvidos em tal instalação, garantindo a segurança do local.

Desse modo, para realizar projetos de aterramento elétrico, Freire (2023) destaca que seria relevante que o engenheiro eletricitista possuísse conhecimentos acerca dos fundamentos do solo e da geofísica, contudo, tais conhecimentos não são compartilhados nas universidades, sendo que a modelagem geométrica é realizada com o auxílio de algum programa de computador, sendo uma atividade conduzida de maneira automática pelo profissional com o auxílio do terrômetro:

“cravam-se no solo hastes com determinados espaçamentos, a cada espaçamento aperta-se um botão do terrômetro e anota-se o valor medido de resistência aparente. Já no escritório, as resistências aparentes obtidas no campo são multiplicadas pelos respectivos fatores de conversão e convertidas em curvas de resistividades aparentes; depois faz-se uma

média dos valores correspondentes a cada espaçamento e a curva média calculada é fornecida para um programa que faz os cálculos e apresenta um modelo de solo” (FREIRE, 2023, p. 20).

Contudo, Freire (2023) frisa que tal modelo pode resultar em um conjunto de equívocos, como a crença no número medido pelo equipamento sem uma visão crítica, ou a ilusão de que o modelo geoeletrico produzido pelo software sempre será representativo da estrutura geoeletrica do terreno. Tais enganos podem resultar em modelos geoeletricos que não possuem compromisso com a geologia do terreno prospectado. Sendo que o autor ainda aponta que a resistividade do solo não é um parâmetro a ser medido, mas sim os parâmetros elétricos na superfície do solo: diferenças de potencial e correntes. Dessa forma, Freire (2023) frisa que caso injete uma corrente no solo, a região pode sofrer influência de uma corrente externa, modificando os parâmetros calculados.

De acordo com a NBR 5419 (2015), para malhas de aterramento em Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA), são geralmente utilizados cabos de cobre trançado. O cobre é um material com boa condutividade elétrica e resistência à corrosão, sendo uma escolha comum para essas aplicações.

Os cabos de cobre trançado proporcionam flexibilidade, o que é importante para facilitar a instalação e a conexão entre os componentes do sistema. Existem diferentes tipos de cabos de cobre trançado que podem ser utilizados nas malhas de aterramento, e a escolha dependerá das especificações do projeto e das condições ambientais. Pode-se citar os cabos de cobre estanhado: o revestimento de estanho ajuda a aumentar a resistência à corrosão, tornando esses cabos adequados para ambientes mais agressivos. Essa opção é frequentemente escolhida para garantir uma vida útil mais longa. Já os cabos de cobre trançados flexíveis são projetados para suportar flexões repetitivas sem quebrar; eles são ideais para aplicações em que a flexibilidade é essencial, como em instalações que envolvem curvas e contornos. Os cabos de cobre com isolamento podem ser recomendados quando é necessária proteção adicional contra influências ambientais, como umidade, produtos químicos ou exposição ao sol (NBR 5419, 2015).

Sobre os cabos de diferentes seções transversais, destaca-se que a escolha da seção transversal do cabo dependerá da corrente que o sistema de aterramento deverá conduzir. Cabos com seções maiores são utilizados em sistemas que exigem maior capacidade de condução de corrente, já cabos de cobre trançado com revestimento anti-chama podem ser utilizados em ambientes onde há risco de incêndio, visando garantir a segurança



adicional (NBR 5419, 2015).

Ao selecionar o tipo de cabo de cobre trançado, é importante considerar não apenas as condições ambientais, mas também a conformidade com as normas locais e regulamentações de segurança. Consultar um profissional qualificado e seguir as diretrizes específicas do projeto ajudará a garantir que o sistema de aterramento seja eficaz e seguro.

Faz-se importante também analisar os tipos de hastes que podem compor um malha de aterramento. De acordo com a NBR 5419 (2015) as hastes de cobre são frequentemente utilizadas devido à boa condutividade elétrica do material. Elas são resistentes à corrosão, mas o custo pode ser mais elevado em comparação com outros materiais. Já as hastes com núcleo de aço e revestidas de cobre combinam a resistência mecânica do aço com a condutividade do cobre, ou seja, oferecem uma boa combinação de durabilidade e condutividade, assim como as hastes de cobre revestidos de aço inoxidável, que buscam equilibrar a resistência do aço com a condutividade do cobre. Já as hastes de aço inoxidável são conhecidas por sua resistência à corrosão em ambientes agressivos e são uma opção durável, mas podem ser mais caras.

Há ainda hastes de ferro galvanizado, em que o ferro galvanizado é revestido com zinco para proporcionar resistência à corrosão. Essas hastes são uma opção mais econômica, mas podem não ser tão duráveis quanto outras escolhas em ambientes corrosivos. Em relação as hastes de alumínio, frisa-se que o alumínio é um material leve e resistente à corrosão; no entanto, a condutividade elétrica do alumínio é inferior à do cobre, o que pode influenciar o desempenho do sistema. Por fim, em alguns casos, as hastes de grafite podem ser utilizadas para melhorar a condutividade do solo, ao redor da haste, essas hastes são especialmente úteis em solos de baixa condutividade; e em situações específicas, hastes feitas de ligas especiais também podem ser utilizadas para atender a requisitos particulares de resistência mecânica e condutividade elétrica (NBR 5419, 2015).

Em relação aos conectores, a norma NBR 5419 (2015) não especifica conectores específicos, pois trata principalmente de diretrizes para a instalação de sistemas de proteção contra raios em estruturas. Todavia, é importante notar que a escolha dos conectores pode depender do tipo de equipamento ou sistema que está sendo protegido e das condições específicas do local.

Tendo em vista, assim, as informações acerca dos materiais que podem compor os Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas, faz-se importante discutir

também acerca da configuração da malha de aterramento em um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) que é um aspecto crucial para garantir a eficácia do sistema. A malha de aterramento desempenha um papel fundamental na dissipação segura da corrente proveniente de uma descarga atmosférica para o solo. Dessa forma, a alteração na configuração da malha de aterramento pode ter impactos significativos no desempenho do SPDA (NBR 5419, 2015). Algumas considerações importantes incluem:

- Resistência do solo: a resistência elétrica entre a malha de aterramento e o solo é crucial. Alterações na configuração da malha podem afetar essa resistência, o que, por sua vez, pode influenciar a capacidade do sistema em proporcionar um caminho eficaz para a corrente da descarga atmosférica atingir o solo.
- Distribuição uniforme: a malha de aterramento deve ser configurada de forma a proporcionar uma distribuição uniforme da corrente. Alterações na configuração que resultem em áreas com correntes concentradas ou desigualdades na distribuição podem comprometer a eficácia do sistema.
- Distância adequada: a distância entre os condutores na malha de aterramento é importante para garantir uma cobertura eficiente. Alterações que resultem em distâncias inadequadas podem afetar a capacidade do SPDA de proteger completamente a área designada.
- Profundidade de enterramento: se a malha de aterramento incluir hastes de aterramento, a profundidade de enterramento das hastes é crucial e alterações nesse aspecto podem afetar a resistência do sistema. Quando uma descarga atmosférica atinge o solo, uma das formas de proteção é permitir que a corrente elétrica seja dissipada de forma segura para o solo. A profundidade da haste influencia a resistência elétrica entre a haste e o solo, afetando assim a capacidade do sistema de drenar a corrente da descarga atmosférica para o solo. De maneira geral, quanto mais profunda a haste, menor a resistência elétrica. Uma resistência elétrica mais baixa é desejável, pois facilita o caminho para a corrente elétrica atingir o solo. No entanto, a profundidade ideal da haste pode depender de vários fatores, incluindo as características do solo, a umidade, a resistividade do solo e as condições específicas do local.

Logo, é fundamental que qualquer alteração na configuração da malha de aterramento seja feita considerando as especificidades do local, incluindo características do solo, topografia e outros fatores ambientais, sendo sempre recomendado consultar a

NBR 5419 (2015) que fornece diretrizes para o projeto e a instalação de SPDA.

Nesse contexto, faz-se importante destacar também a NBR 5410 (2021), que é uma norma brasileira elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas que estabelece as condições mínimas necessárias para o projeto, execução, e instalação de instalações elétricas de baixa tensão, incluindo o aterramento elétrico. Tal norma destaca que em ambientes agressivos, onde condições especiais podem aumentar os riscos elétricos, são necessárias medidas específicas para garantir a segurança e o funcionamento adequado das instalações.

No que diz respeito ao aterramento elétrico, a NBR 5410 (2021) aborda requisitos para o correto dimensionamento e execução do sistema de aterramento, considerando aspectos como a resistência do solo, a distribuição de potenciais, a proteção contra sobretensões e a interligação eficaz dos componentes do sistema. Para ambientes agressivos, onde a presença de substâncias corrosivas ou outras condições adversas afetam os componentes elétricos, a norma inclui diretrizes específicas para proteção contra corrosão e degradação. Ademais, a NBR 5410 (2021) aborda medidas adicionais de segurança e proteção em ambientes com risco de explosão ou incêndio.

Logo, é fundamental, como destacado pelos artigos que compõe essa revisão, que o profissional de engenharia elétrica que atua com descargas elétricas seja qualificado na área de proteção contra descargas elétricas, ou seja, possua conhecimento acerca de instalações elétricas, aterramento elétrico, da importância do SPDA, da relevância de sua execução de forma exitosa e também possua conhecimento acerca da teoria e dos cálculos necessários para realizar uma instalação segura, não confiando somente em softwares e instrumentos. Em resumo, um sistema de proteção contra descargas elétricas é crucial para garantir a operação segura e confiável de sistemas elétricos e equipamentos sensíveis, protegendo vidas, propriedades e operações em diversos setores da sociedade.

### 3 PERCURSO DA DISSERTAÇÃO

Ao longo da graduação o autor pôde ter contato com diversas disciplinas, contudo a disciplina “Instalações elétricas” chamou a atenção devido a importância do conteúdo abordado, dissertando sobre instalações em residências, empresas e instalações de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). O SPDA possui função primordial na proteção de pessoas contra choques elétricos e patrimônios, destacando-se, assim, como uma função primordial da Engenharia Elétrica.

Após sua graduação, o autor fundou uma empresa de Engenharia Elétrica e pôde realizar diversas atividades voltadas à tal área: instalação elétrica residencial e predial, manutenção em residências e empresas, instalação de energia fotovoltaica, automação industrial e residencial, montagem de painéis elétricos, manutenção em média tensão, instalação e manutenção de SPDA, além de experiências em diversas instalações elétricas, inclusive especificamente com aterramentos elétricos, no que tange projeto, instalação, manutenção, medição e averiguação. Ao longo desse percurso foi possível ter contato com grandes empresas que solicitavam a instalação e manutenção dos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas, devido a obrigatoriedade definida pela NBR 5419 (2015): Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.

Para definir se é necessária a construção de SPDA é fundamental realizar um cálculo a partir das tabelas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5), em que se verifica a probabilidade de ocorrer descargas atmosféricas em cada região do território nacional, multiplicando tal valor pelo fator de risco. O fator de risco é definido pelo tipo de conteúdo no interior da construção (como gasolina, ferro, papel, produtos inflamáveis, quantidade de pessoas), tamanho do telhado e altura do edifício. Se tal cálculo resultar em um valor acima de 0,005 é necessário a instalação de SPDA no local, ou seja, onde houver uma probabilidade igual ou maior do que 0,5% de acontecer uma descarga elétrica, faz-se necessário a instalação de SPDA.

Tabela 1. Tipo de ocupação da estrutura

| Tipo de ocupação  | Fator A |
|---|---------|
| Casas e outras estruturas de porte equivalente  | 0,3     |
| Casas e outras estruturas de porte equivalente com antena externa <sup>1)</sup>   | 0,7     |
| Fábricas, oficinas e laboratórios   | 1,0     |
| Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos, e outros edifícios residenciais não incluídos abaixo   | 1,2     |
| Locais de afluência de público (por exemplo: igrejas, pavilhões, teatros, museus, exposições, lojas de departamento, correios, estações e aeroportos, estádios de esportes) | 1,3     |
| Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades   | 1,7     |
| <sup>1)</sup> Para requisitos para instalação de antenas, ver anexo A.  |         |

Tabela 2. Tipo de construção da estrutura

| Tipo de construção  | Fator B |
|---|---------|
| Estrutura de aço revestida, com cobertura não-metálica <sup>1)</sup>  | 0,2     |
| Estrutura de concreto armado, com cobertura não-metálica  | 0,4     |
| Estrutura de aço revestida, ou de concreto armado, com cobertura metálica   | 0,8     |
| Estrutura de alvenaria ou concreto simples, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha   | 1,0     |
| Estrutura de madeira, ou revestida de madeira, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha  | 1,4     |
| Estrutura de madeira, alvenaria ou concreto simples, com cobertura metálica   | 1,7     |
| Qualquer estrutura com teto de palha  | 2,0     |
| <sup>1)</sup> Estruturas de metal aparente que sejam contínuas até o nível do solo estão excluídas desta tabela, porque requerem apenas um subsistema de aterramento. |         |

Tabela 3. Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas

| Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos   | Fator C |
|--|---------|
| Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos  | 0,3     |
| Estruturas industriais e agrícolas contendo objetos particularmente suscetíveis a danos <sup>1)</sup>  | 0,8     |
| Subestações de energia elétrica, usinas de gás, centrais telefônicas, estações de rádio  | 1,0     |
| Indústrias estratégicas, monumentos antigos e prédios históricos, museus, galerias de arte e outras estruturas com objetos de valor especial | 1,3     |
| Escolas, hospitais, creches e outras instituições, locais de afluência de público  | 1,7     |
| <sup>1)</sup> Instalação de alto valor ou materiais vulneráveis a incêndios e às suas conseqüências.   |         |

Tabela 4. Localização da estrutura

| Localização  | Fator D |
|--|---------|
| Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores da mesma altura ou mais altas (por exemplo: em grandes cidades ou em florestas) | 0,4     |
| Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar   | 1,0     |
| Estrutura completamente isolada, ou que ultrapassa, no mínimo, duas vezes a altura de estruturas ou árvores próximas                                   | 2,0     |

Tabela 5. Topografia da região

| Topografia                    | Fator E |
|-------------------------------|---------|
| Planície                      | 0,3     |
| Elevações moderadas, colinas  | 1,0     |
| Montanhas entre 300 m e 900 m | 1,3     |
| Montanhas acima de 900 m      | 1,7     |

Dessa maneira, quando há a necessidade de instalação de SPDA é necessário a utilização de materiais que suportem, sem danificação, os efeitos térmicos e eletrodinâmicos das correntes de descarga atmosférica, suportando também os esforços acidentais previsíveis. Nesse contexto, utiliza-se o cobre para confecção da parte enterrada do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas devido a ser um material possível de ser soldado e ter melhor conexão. Já a parte externa do SPDA pode ser confeccionada utilizando-se o cobre ou o alumínio. Dessa forma, destaca-se que “os riscos de corrosão provocado pelo meio ambiente, ou pela junção de metais diferentes, devem ser cuidadosamente considerados no projeto do SPDA” (NBR 5419, 2015).

Pode-se também fazer uso de outros materiais para confecção de SPDAs, como o aço inoxidável. Algumas vantagens do uso desse material são sua durabilidade, visto que o aço inoxidável é altamente resistente à corrosão, o que o torna uma escolha durável para componentes expostos às intempéries, como as hastes de aterramento e os condutores do SPDA. Isso ajuda a garantir a eficácia contínua do sistema ao longo do tempo. A baixa manutenção devido à resistência do aço inoxidável à corrosão, o aço inoxidável requer menos manutenção em comparação com outros materiais, como o cobre ou o alumínio, porém sua resistência é menor que a de cobre, fazendo-se necessário a utilização de um maior número de hastes. Isso pode resultar em economia de custos a longo prazo, pois reduz a necessidade de substituição frequente de componentes do SPDA. A

compatibilidade química também é uma vantagem do uso do aço inoxidável visto que ele é resistente a uma ampla gama de produtos químicos, o que é importante em ambientes industriais ou áreas onde podem ocorrer exposições a substâncias corrosivas. Já como desvantagens destaca-se que, embora o aço inoxidável seja um bom condutor elétrico, sua condutividade é geralmente um pouco menor do que a do cobre. Isso pode afetar ligeiramente o desempenho do sistema em termos de dissipação de corrente elétrica durante uma descarga atmosférica. Ademais o fato do aço inoxidável ter geralmente um custo inicial mais alto em comparação com outros materiais, como o cobre ou o alumínio também apresenta-se como uma desvantagem. Isso pode tornar a instalação de um SPDA com componentes de aço inoxidável mais dispendiosa no curto prazo. Por fim, nem todos os tipos de aço inoxidável são igualmente adequados para uso em SPDA. A seleção do tipo de aço inoxidável adequado deve levar em consideração fatores como resistência à corrosão, resistência mecânica e compatibilidade com o ambiente específico.

Ao longo da experiência instalando e realizando manutenção de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas, visto que as manutenções devem ser realizadas a cada dois anos (NBR 5419, 2015), pôde-se perceber que quando bem executados, os Sistemas tendiam a ter uma vida longa. Todavia, quando os materiais utilizados para a confecção do Sistema entravam em contato com outros tipos de produtos, como produtos químicos, isto poderia diminuir a vida útil do SPDA.

Ao realizar manutenção no SPDA de uma empresa de produtos químicos no interior do estado de São Paulo pôde-se observar que a interação do cobre – material utilizado para confecção da parte enterrada do SPDA – e os produtos químicos que a empresa utiliza em seus processos acelerou a oxidação do SPDA, levando a diminuição da vida útil do Sistema e à necessidade de alterações de forma mais constante na malha de aterramento, visando, assim, que o SPDA mantivesse seu pleno funcionamento e segurança. Contudo, a necessidade de alterações constantes na malha de aterramento gera um custo elevado para o cliente, que necessitará, a cada dois anos, de realizar modificações no SPDA visando garantir a utilidade do Sistema.

Intrigado com tal situação, e buscando compreender e encontrar soluções que gerassem menor custo ao cliente nas manutenções do SPDA, mas garantindo a segurança do Sistema, surgiu a ideia dessa Dissertação de Mestrado. A ideia de unir a teoria com a prática já realizada na empresa, buscando soluções reais para os clientes, proporciona maior contato da teoria com o mundo operacional, podendo auxiliar, assim, diversas empresas que enfrentam problemas semelhantes.

## 4 OBJETIVO

O objetivo geral do presente estudo é analisar a oxidação da malha de aterramento devido à reação com substâncias químicas em ambientes industriais.

Como objetivos específicos são elencados:

- a) Monitorar a oxidação causada na malha de aterramento,
- b) Identificar as consequências das reações com as substâncias químicas,
- c) Realizar estudos comparativos de sistemas de aterramento,
- d) Analisar diferentes métodos de redução da oxidação das hastes,
- e) Definir método mais adequado para minimização da oxidação em ambientes industriais agressivos.



## 5 MÉTODO

### 5.1 INSTRUMENTOS

Para realização deste estudo foram utilizados dois instrumentos de medição ôhmica: o terrômetro e o alicate terrômetro. Para medir a resistência do solo e calcular o número de hastes é possível utilizar o instrumento chamado terrômetro. Tal instrumento “injeta” pela terra uma corrente elétrica que irá medir a resistência do solo, medindo, assim, a eficiência do aterramento. “O terrômetro digital dispõe de uma fonte de corrente interna além de um *software* que realiza internamente os cálculos necessários para obtenção do valor da resistividade do solo” (DIAS, 2011, p. 40), sendo capaz de armazenar e apresentar as medições realizadas.

Já o alicate terrômetro permite realizar a medição da resistência de terra de uma haste de aterramento sem ser necessário o uso de hastes auxiliares. Ademais, tal instrumento também permite, em sistemas com várias hastes, a leitura da resistência de aterramento, sem desconectar o aterramento em teste (MINIPA, n. d.).

Dessa forma, a utilização dos dois instrumentos permitiu compreender o valor da resistência de aterramento, podendo, assim, realizar, as medições de maneira constante. Ademais, também foram utilizados registros fotográficos para elucidar a oxidação da malha de aterramento ao longo das medições. A partir de tais registros foi possível realizar uma comparação do estado do cobre ao longo do tempo, podendo acompanhar visualmente sua oxidação, visto a mudança de cor que ocorre quando o cobre entra em contato com substâncias químicas que aceleram a oxidação.

### 5.2 PROCEDIMENTOS

#### 5.2.1 Coleta de dados

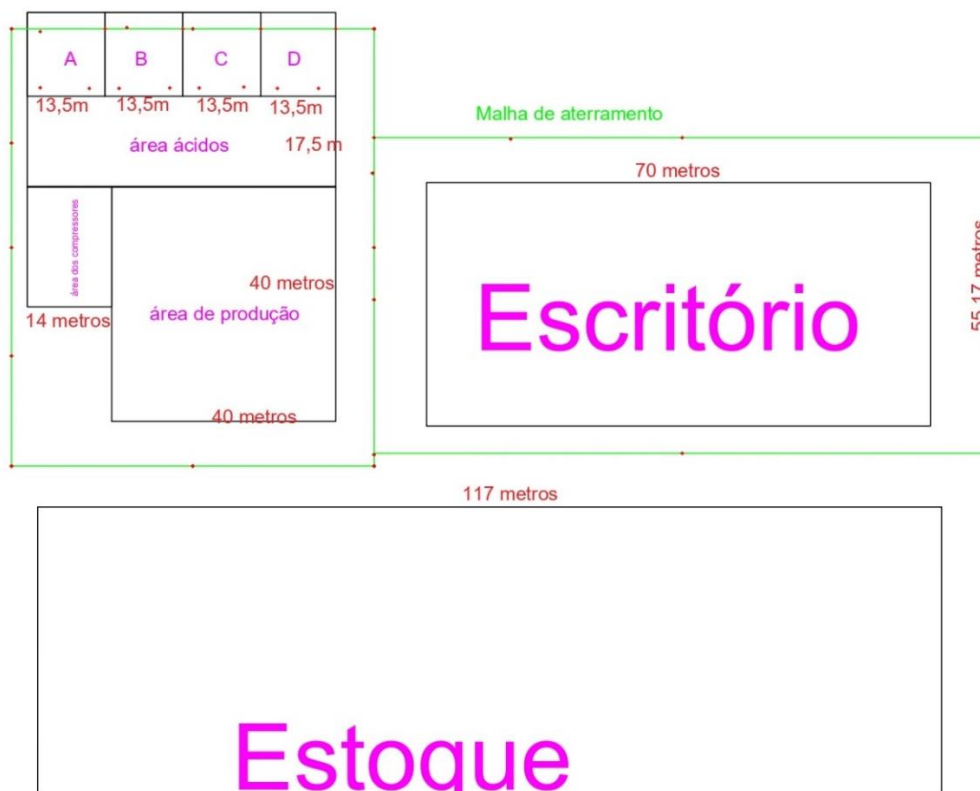
A coleta de dados foi realizada em uma Indústria de Produtos Químicos em uma cidade do interior do estado de São Paulo. A partir de visitas realizadas anualmente à indústria de produtos químicos, e de observações visuais, verificou-se uma oxidação acelerada da malha de aterramento na área localizada próxima aos tanques de produtos químicos e a necessidade de modificações constantes de tal malha. Dessa forma,

vislumbrou-se a necessidade de realizar este estudo em busca de uma solução para tal problema da empresa.

A indústria de produtos químicos foi contatada sobre a realização do estudo e a partir do seu interesse em participar voluntariamente, foram sanadas dúvidas, e então foi assinado o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Apêndice I). Posteriormente foram realizadas visitas periódicas à empresa para medição da malha de aterramento em áreas distintas que foram registradas em um gráfico, visando ilustrar, assim, a variação da resistência de aterramento em função do tempo. Objetivando comparar os níveis de oxidação entre as hastes em contato com produtos químicos e as hastes que não possuem contato com tais componentes, também foram registradas medições da malha de aterramento da empresa de produtos químicos em áreas distantes dos tanques.

A planta da indústria (Figura 1) demonstra que os tanques A, B, C e D possuem paredes de isolamento para conter vazamentos de substâncias químicas; cada um desses tanques possui quatro caixas de inspeção. Na área do escritório há doze caixas de inspeção.

Figura 1 – Planta da Indústria de Produtos Químicas



Dessa forma, foi medida cada uma das hastes de aterramento que tinham caixa de inspeção na empresa. Pretendendo verificar a resistência de aterramento, foram coletadas medições a cada 15 dias por um período de 6 meses. Tais valores foram expostos em um gráfico de ohms por tempo, tencionando obter uma comparação entre as duas diferentes áreas da empresa, podendo, assim, visualizar as hastes mais oxidadas. A partir de tal resultado, será realizado o ensaio de quatro métodos para solucionar a oxidação acelerada da malha de aterramento:

1. Isolar a cabeça da haste e a tampa da caixa de inspeção com massa de vedação, de maneira que nenhum líquido entre em contato com a haste naquela região, visto que há concreto no entorno da caixa de inspeção;
2. Utilizar o ferro como metal de sacrifício. Dessa forma, dentro da mesma caixa de inspeção, iremos introduzir uma barra de ferro 3/8" ao lado da haste de aterramento, interligando as duas, na tentativa de que o ferro oxide ao invés do cobre;
3. Pintar a ponta de uma das hastes com tinta isolante líquida, sem isolar a caixa de inspeção;
4. Substituir a haste de cobre por haste de aço inoxidável.

Faz-se importante frisar que um metal de sacrifício se refere a um material metálico que é utilizado intencionalmente para corroer em vez de outro metal mais valioso ou estruturalmente importante em um sistema eletroquímico. Essa prática é comumente empregada para proteger o metal mais nobre da corrosão (SALOMÃO ET AL., 2019).

O conceito está relacionado à proteção catódica, uma técnica utilizada para evitar a corrosão de metais. No processo de proteção catódica, um metal de sacrifício, muitas vezes chamado de ânodo de sacrifício, é conectado ao metal que se deseja proteger. Esse ânodo é feito de um metal mais reativo e, portanto, propenso a corroer mais facilmente. Quando o sistema está exposto a ambientes corrosivos, o metal de sacrifício é corroído, enquanto o metal que se deseja proteger permanece relativamente intacto. O metal de sacrifício funciona como uma espécie de "escudo sacrificial", protegendo o metal mais nobre (SALOMÃO ET AL., 2019).

Já a tinta isolante líquida é um material utilizado para criar uma camada isolante em superfícies condutoras. Ela é aplicada como um líquido que, ao secar, forma uma camada isolante contínua. Esta tinta é frequentemente usada para isolar componentes elétricos, como enrolamentos de transformadores, conectores elétricos e outros dispositivos eletrônicos, para evitar curtos-circuitos e melhorar a confiabilidade do

sistema (FERREIRA, 2023).

A utilização de tinta isolante líquida é frequentemente guiada por normas e práticas reconhecidas na indústria elétrica. Normas como a NBR 5410 (2021) no Brasil ou a norma internacional IEC 60085 fornecem diretrizes para o isolamento elétrico em diferentes aplicações.

### 5.2.2 Análise de dados

A medição de resistividade do solo foi realizada através do método de Wenner, visto este ser um método amplamente utilizado e que apresenta alta confiabilidade nos resultados obtidos. Contudo, utilizar-se-á o terrômetro digital no lugar do voltímetro e uma fonte de corrente.

O método Wenner foi desenvolvido em 1915 pelo físico norte-americano Frank Wenner. Esse método propõe quatro hastes cilíndricas enterradas em linha sob o solo a uma mesma altura e espaçadas por uma mesma distância, objetivando, assim, obter a resistividade das diversas camadas que compõem o solo (WENNER, 1915 apud NASCIMENTO, et al., 2004). Injeta-se uma corrente elétrica na primeira haste, que retorna pela quarta haste. Tal corrente elétrica passa pelo solo e produz uma diferença de potencial entre a segunda e a terceira haste, que será medida por um voltímetro. Dessa forma, conhecendo-se o valor da corrente injetada e o valor da diferença entre a segunda e a terceira haste é possível calcular a resistência elétrica do solo. Com esse valor conhecido, calcula-se a resistividade elétrica do solo (eq. 1).

$$\rho = \frac{4\pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}}} \quad [\Omega \cdot \text{m}]. \quad (1)$$

Onde:

$\rho$  é a resistividade elétrica do solo (em ohm-metros),

$R$  é a resistência elétrica medida do solo (em ohms),

$a$  é a área da seção transversal do solo (em metros quadrados),

$h$  é a profundidade equivalente,

Alguns pontos para descrever os parâmetros da equação são:

Resistividade ( $\rho$ ):

A resistividade elétrica do solo é uma medida da capacidade do solo em resistir à passagem de corrente elétrica;

Valores mais altos de resistividade indicam solos menos condutivos.

Resistência ( $R$ ):

A resistência elétrica medida é a resistência total encontrada ao passar uma corrente elétrica através do solo;

Valores mais altos de resistência indicam maior dificuldade para a corrente fluir.

Área ( $a$ ):

A área da seção transversal representa a área através da qual a corrente elétrica está passando;

Uma área maior permite uma distribuição mais uniforme da corrente.

Profundidade equivalente ( $h$ ):

A profundidade necessária para estender a haste no solo para chegar no valor da resistência calculada;

Quanto mais profundo menor o valor da resistência do sistema.

Interpretação física:

A resistividade está relacionada à composição do solo, incluindo fatores como umidade, tipo de solo, conteúdo mineral, entre outros;

A resistência e a resistividade refletem a capacidade do solo de conduzir eletricidade, sendo influenciadas pela estrutura e composição do solo.

Caso haja um afastamento relativamente grande entre as hastes ( $a > 20h$ ), utiliza-se uma equação reduzida (eq. 2) que fornece a resistividade média do solo para uma profundidade semelhante ao espaço  $a$  (IEEE-81, 1983). Em determinadas regiões, para se obter a resistividade do solo é necessário efetuar várias medições sucessivas com espaçamentos  $a$  diferentes. Sendo assim, haverá diferentes valores de resistividade para cada valor de  $a$  utilizado, sendo recomendado, de acordo com as dimensões do terreno, a utilização de espaçamento de 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 e assim sucessivamente

(NBR 7117, 2022).

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R \quad [\Omega.m]. \quad (2)$$

Dias (2011) frisa que, a partir dos valores da resistividade e os espaçamentos utilizados na medição, é possível traçar a curva da resistividade elétrica do solo em função dos espaçamentos entre as hastes. A partir da curva traçada, realiza-se a sua modelagem, estratificando-o em camadas horizontais, sendo que a estratificação pode ser realizada por várias metodologias que irão utilizar de conjuntos de curvas auxiliares para a determinação da estratificação do solo. Há também a possibilidade de utilizar *softwares* para realizar a estratificação do solo em camadas horizontais, utilizando-se dos valores de resistividade obtidos em campo, calculando e modelando o solo em camadas horizontais, com suas resistividades e espessuras. “Para o caso de altas resistividades, detectadas a partir dos dados medidos, é possível realizar o tratamento químico do solo visando à diminuição da resistividade e, conseqüentemente, a diminuição da resistência de aterramento” (DIAS, 2011, P. 10).

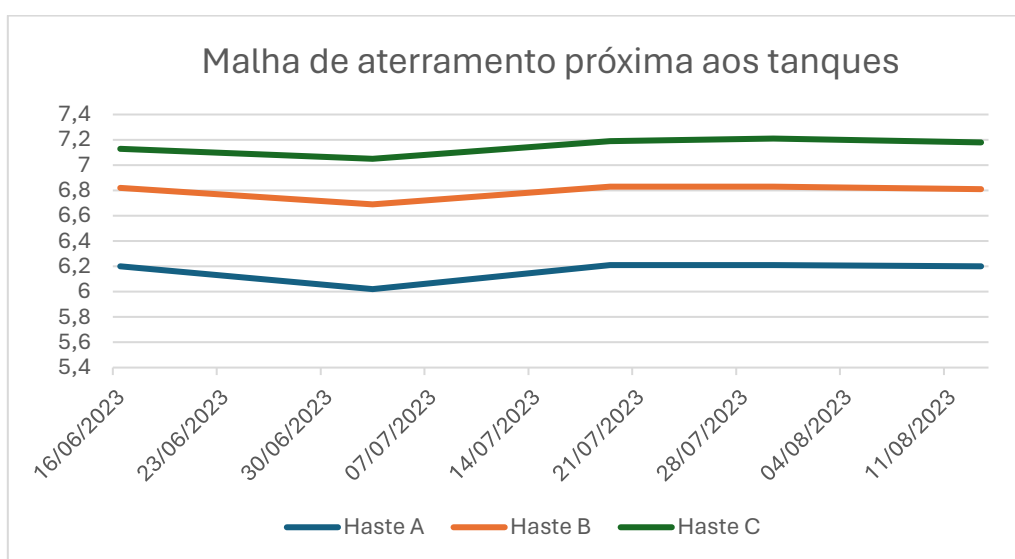
Ademais, no presente estudo, os dados foram coletados a partir das medições da malha de aterramento da indústria química que foram analisados com base em uma comparação da resistência de aterramento em função do tempo, comparando a velocidade da oxidação de duas áreas distintas de tal indústria, tendo uma haste de referência para cada tanque e uma haste de teste, objetivando, assim, visualizar o impacto das substâncias químicas na oxidação da malha de aterramento.

Através dos resultados obtidos, foram realizados os cálculos para análise da velocidade de oxidação das malhas de aterramento, comparando as diferenças de valores entre ambas as áreas da empresa. Dessa maneira, a partir da comparação entre os valores encontrados ao longo dos meses e da verificação da distinção entre elas, foi possível compreender a influência das substâncias químicas na velocidade de oxidação da malha de aterramento. Por fim, a fim de sistematizar a análise dos resultados, foram construídos gráficos de comparação das medições realizadas que estão apresentados nos resultados deste estudo.

## 6 Resultados e discussão

O sistema de aterramento da empresa de produtos químicos é composto por 42 hastes, sendo que 12 hastes se encontram próximas dos tanques contendo produtos químicos. Foram realizadas doze visitas à indústria química para medição das hastes de aterramento próxima aos tanques (Figura 2) e das hastes de aterramento que não estão localizadas próximas aos tanques (Figura 3).

Figura 2 – Resistência de aterramento da empresa de produto químicos em área próxima aos tanques



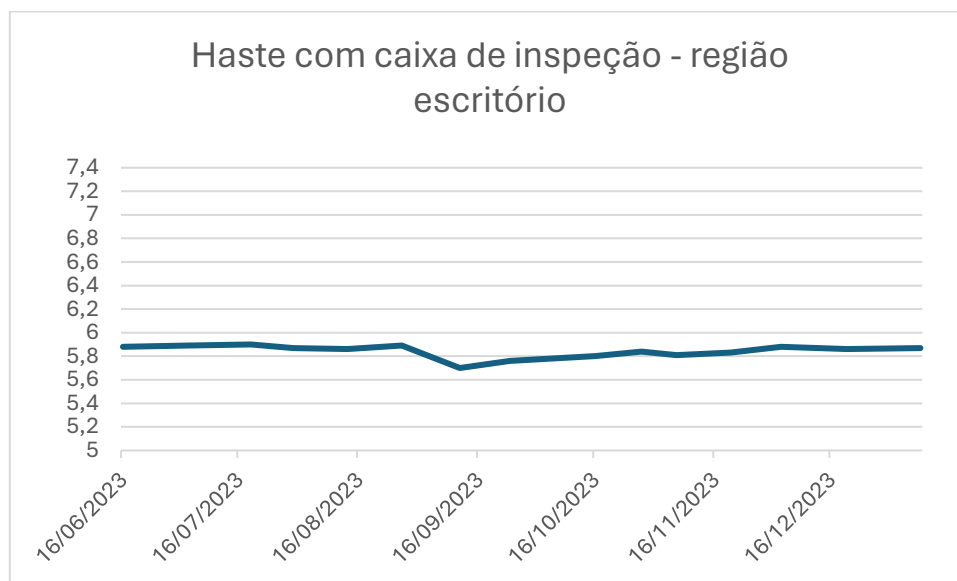
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Tabela 6 – Resistência de aterramento da empresa de produto químicos em área próxima aos tanques

| Data       | Haste A Químicos Resistência [Ω] | Haste B Químicos Resistência [Ω] | Haste C Químicos Resistência [Ω] |
|------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 16/06/2023 | 6,2                              | 6,82                             | 7,13                             |
| 03/07/2023 | 6,02                             | 6,69                             | 7,05                             |
| 19/07/2023 | 6,21                             | 6,83                             | 7,19                             |
| 30/07/2023 | 6,21                             | 6,83                             | 7,21                             |
| 13/08/2023 | 6,2                              | 6,81                             | 7,22                             |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 3 – Resistência de aterramento da empresa de produto químicos em área afastada dos tanques



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Tabela 7 – Resistência de aterramento da empresa de produto químicos em área afastada dos tanques

| Haste com caixa de inspeção - Região escritório |                |
|---|----------------|
| Data  | Resistência[Ω] |
| 16/06/2023                                      | 5,88           |
| 03/07/2023                                      | 5,89           |
| 19/07/2023                                      | 5,9            |
| 30/07/2023                                      | 5,87           |
| 13/08/2023                                      | 5,86           |
| 27/08/2023                                      | 5,89           |
| 11/09/2023                                      | 5,7            |
| 24/09/2023                                      | 5,76           |
| 16/10/2023                                      | 5,8            |
| 28/10/2023                                      | 5,84           |
| 06/11/2023                                      | 5,81           |
| 20/11/2023                                      | 5,83           |
| 03/12/2023                                      | 5,88           |
| 20/12/2023                                      | 5,86           |
| 08/01/2024                                      | 5,87           |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

É possível perceber que no gráfico da Figura 2, referente a malha de aterramento próxima aos tanques de produtos químicos, há um pequeno aumento da resistência de aterramento da haste C. Nesse contexto, faz-se importante frisar que a haste C está



localizada próximo ao local de fabricação dos ácidos sulfônico, fluorídrico e clorídrico na empresa, sendo que estes ácidos entram em contato com a haste durante a limpeza dos tanques em que são fabricados. Ademais, nessa região também conseguimos verificar que a descida do para-raios está oxidada devido ao vapor dos ácidos produzidos, que, ao entrar em contato com o cobre, reagem com este material (Figuras 4 e 5).

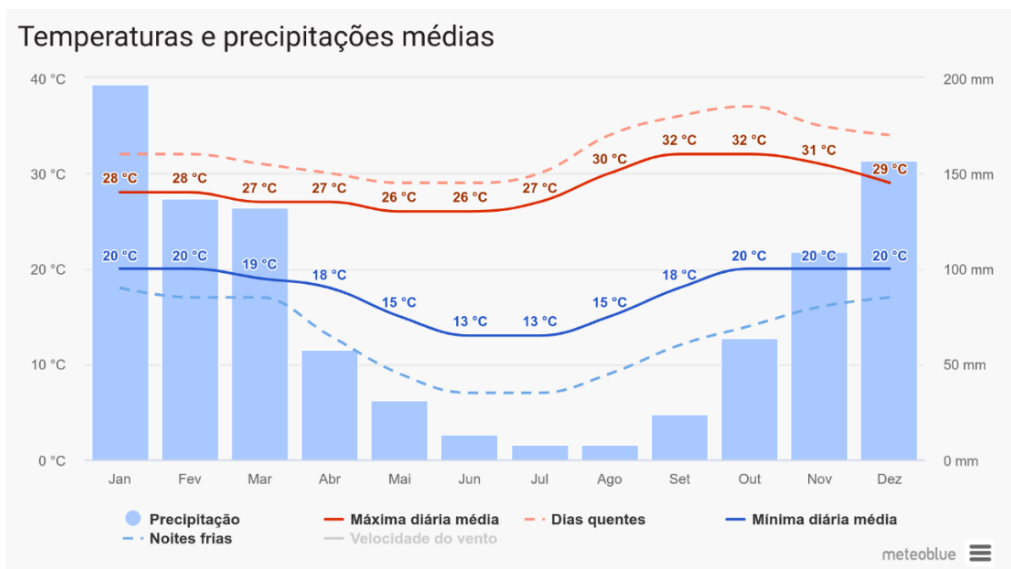
Figuras 4 e 5 – Descida oxidada do para-raios



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

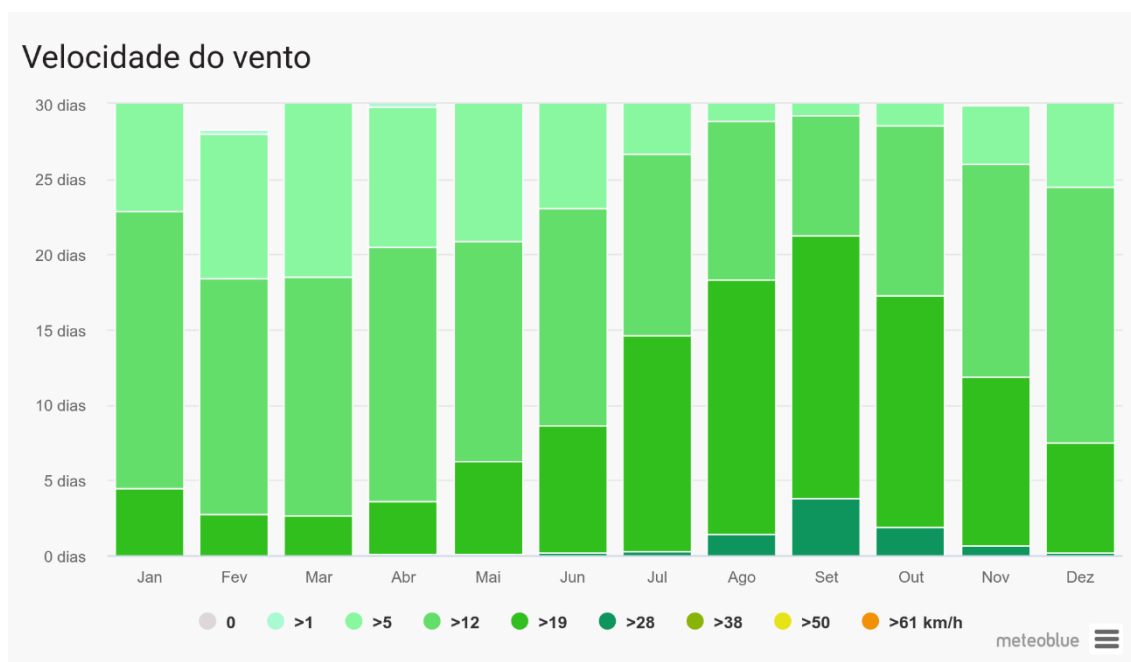
Já no gráfico da Figura 3 não é notado um aumento da resistência do aterramento elétrico, visto que nas hastes de aterramento distantes dos tanques não há contato direto das hastes com nenhuma substância química. Todavia, no dia 03 de julho de 2023 houve precipitação de água na região, sendo possível perceber em ambos os gráficos que a resistência do aterramento elétrico diminuiu na data citada. As figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11 expõem as condições climáticas da região em que está localizada a empresa.

Figura 6 – Temperatura e precipitações médias da região no ano de 2023



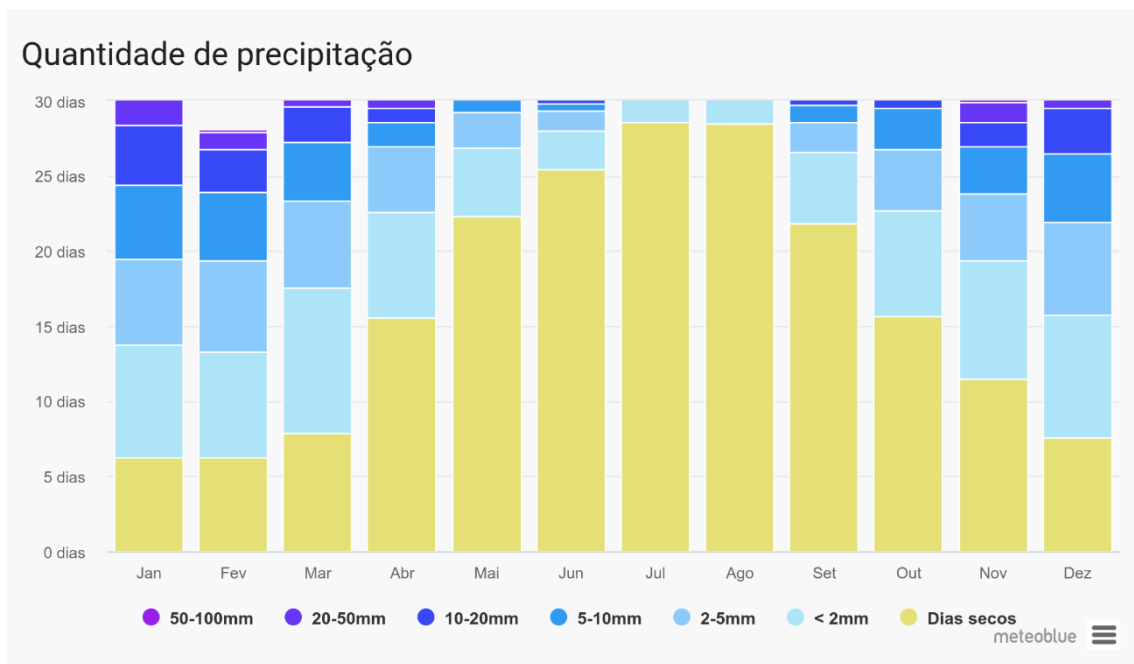
Fonte: [https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u\\_brasil\\_3461954](https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u_brasil_3461954)

Figura 7 – Velocidade do vento da região no ano de 2023



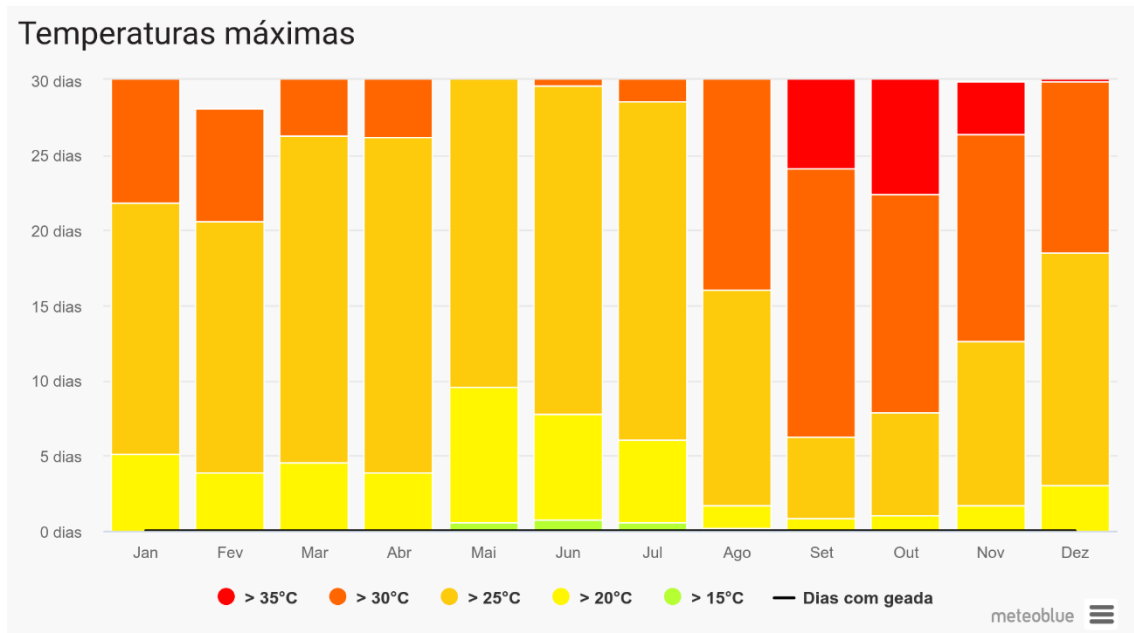
Fonte: [https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u\\_brasil\\_3461954](https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u_brasil_3461954)

Figura 8 – Quantidade de precipitação da região no ano de 2023



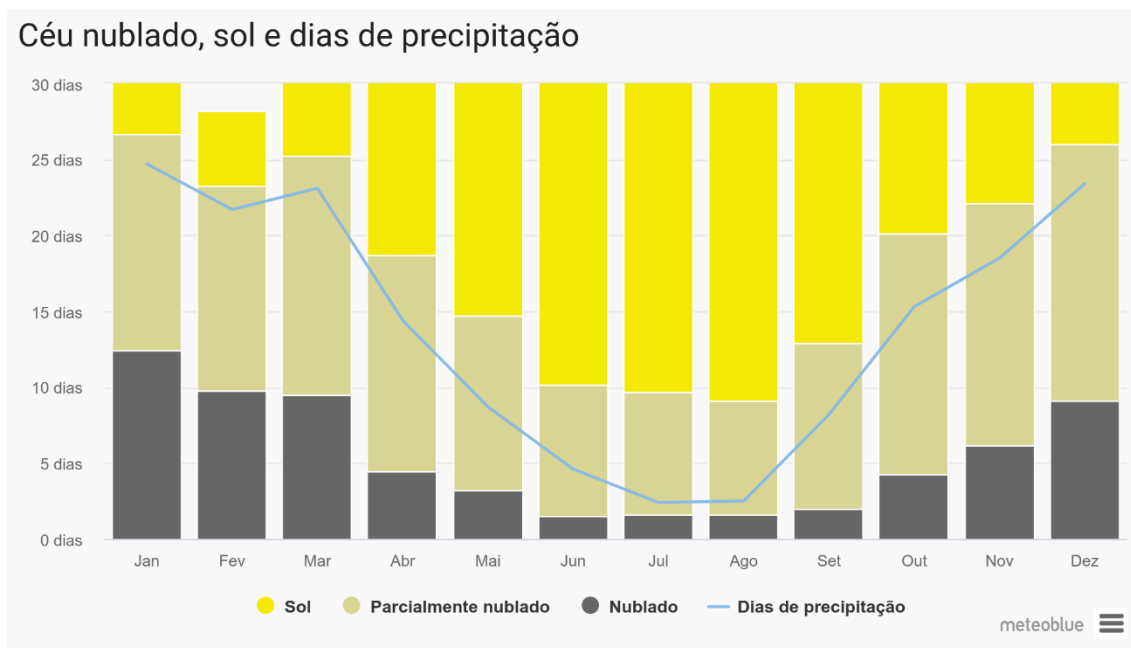
Fonte: [https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u\\_brasil\\_3461954](https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u_brasil_3461954)

Figura 9 – Temperaturas máximas da região no ano de 2023



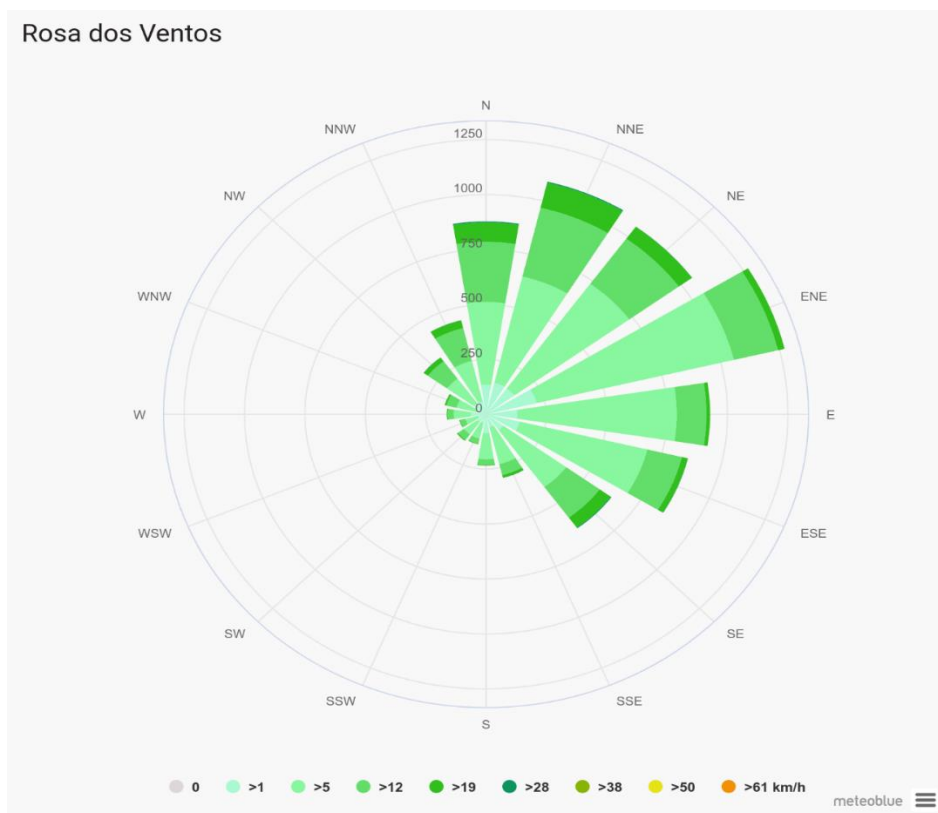
Fonte: [https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u\\_brasil\\_3461954](https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u_brasil_3461954)

Figura 10 - Céu nublado, sol e dias de precipitação da região no ano de 2023



Fonte: [https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u\\_brasil\\_3461954](https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u_brasil_3461954)

Figura 11 – Rosa dos ventos da região no ano de 2023



Fonte: [https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u\\_brasil\\_3461954](https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/guapia%C3%A7u_brasil_3461954)

Quando chove, a resistência de um aterramento elétrico pode diminuir devido ao aumento da condutividade do solo. Entretanto, essa diminuição na resistência não ocorre apenas por causa da chuva em si, mas devido à umidade que a chuva adiciona ao solo. A resistência de um aterramento elétrico depende da resistividade do solo, que é a medida da capacidade do solo de conduzir corrente elétrica (FREIRE, 2023). Solos úmidos têm uma resistência mais baixa do que solos secos, porque a água presente no solo permite que os íons se movam com mais facilidade, aumentando, assim, a condutividade elétrica.

Dessa maneira, os resultados coletados demonstram que as hastes de aterramento localizadas mais próximas aos tanques que contêm produtos químicos tendem a sofrer maiores variações na resistência devido ao contato com substâncias químicas, o que pode acelerar o processo de oxidação. Já as hastes de aterramento que possuem maior distância dos tanques com produtos químicos parecem ter maior constância, não sofrendo grandes variações ao longo do tempo que possa impactar na variação do valor da resistência e na efetividade do sistema. Ou seja, parece ser imprescindível que a empresa de produtos químicos realize manutenções constantes em seu Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, visando garantir a segurança do seu sistema.

Dessa forma, levando em conta a oxidação acelerada e as maiores variações de resistência das hastes de aterramento localizadas próximas aos tanques contendo produtos químicos, e a necessidade constante de manutenções na malha de aterramento devido a essa interação, o presente estudo propôs o ensaio de diferentes métodos visando corrigir os fatores que levavam à oxidação.

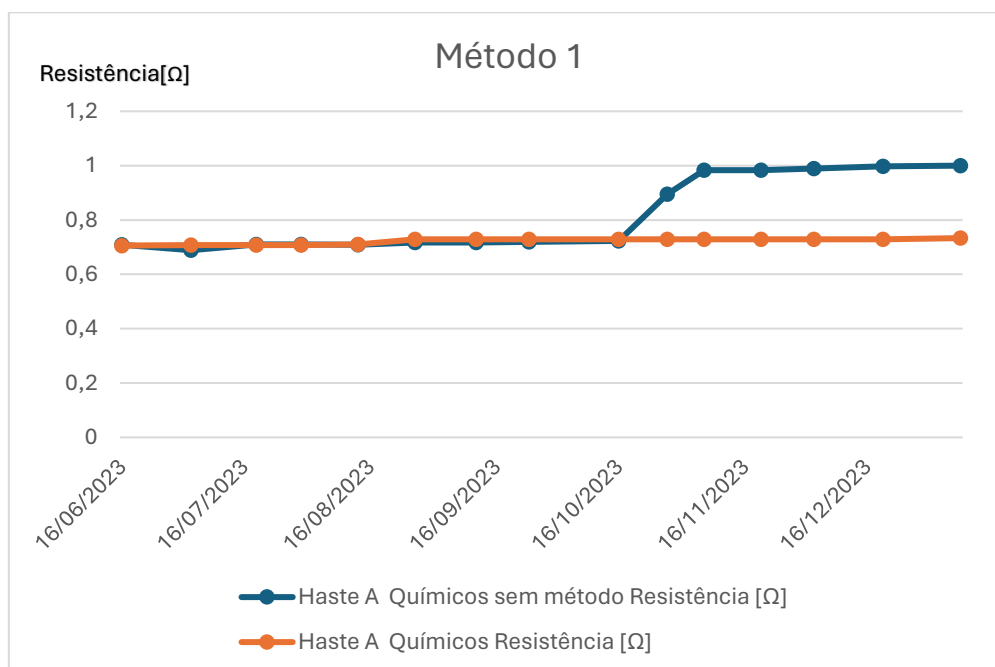
O primeiro método proposto foi isolar a cabeça da haste e a tampa da caixa de inspeção com massa de vedação, de forma que nenhum líquido entrasse em contato com a haste naquela região. Neste caso foi analisado o tanque de contenção A, que possui quatro hastes de aterramento, tendo sido analisadas duas hastes: uma haste em que a caixa de inspeção foi vedada para não ter contato com nenhum líquido e outra haste em que não foi aplicada o método. A tabela abaixo (Tabela 8) elenca os valores encontrados nas medições.

Tabela 8 – Método 1: Isolamento da cabeça da haste e da tampa da caixa de inspeção

|            | Haste sem método para evitar a oxidação (Série 1) | Caixa vedada com concreto (Série 2)       |                               |
|------------|---|---|-------------------------------|
| Data       | Haste A Químicos Resistência [ $\Omega$ ]         | Haste A Químicos Resistência [ $\Omega$ ] |                               |
| 16/06/2023 | 6,2   | 6,17                                      |                               |
| 03/07/2023 | 6,02  | 6,19                                      |                               |
| 19/07/2023 | 6,21  | 6,19                                      |                               |
| 30/07/2023 | 6,21  | 6,19                                      |                               |
| 13/08/2023 | 6,2   | 6,21                                      | Caixa vedada para experimento |
| 27/08/2023 | 6,27  | 6,37                                      | Caixa vedada para experimento |
| 11/09/2023 | 6,27  | 6,37                                      | Caixa vedada para experimento |
| 24/09/2023 | 6,29  | 6,37                                      | Caixa vedada para experimento |
| 16/10/2023 | 6,32  | 6,37                                      | Caixa vedada para experimento |
| 28/10/2023 | 7,82  | 6,37                                      | Caixa vedada para experimento |
| 06/11/2023 | 8,59  | 6,37                                      | Caixa vedada para experimento |
| 20/11/2023 | 8,59  | 6,37                                      | Caixa vedada para experimento |
| 03/12/2023 | 8,65  | 6,37                                      | Caixa vedada para experimento |
| 20/12/2023 | 8,72  | 6,37                                      |                               |
| 08/01/2024 | 8,74  | 6,41                                      |                               |

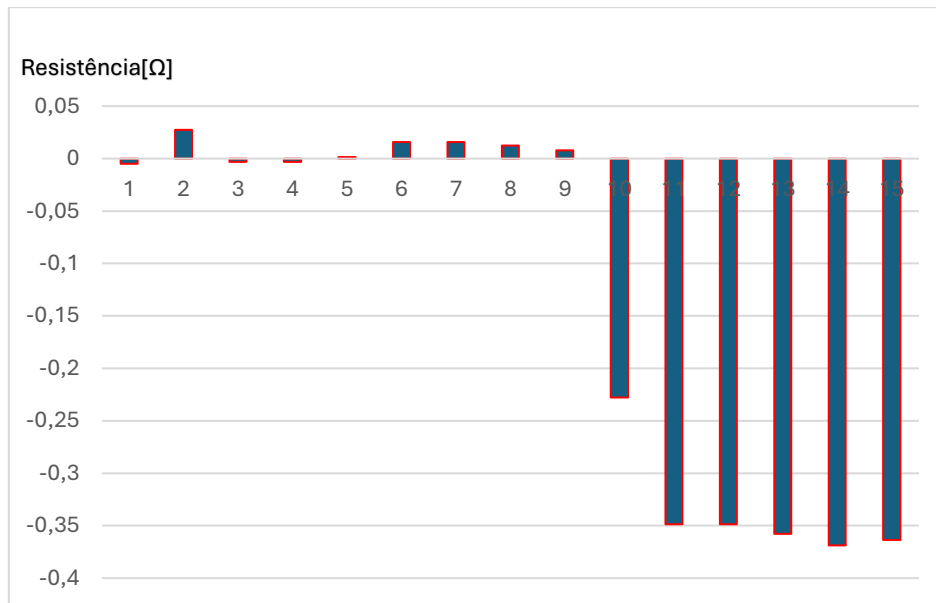
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 12 – Método 1: Isolamento da cabeça da haste e da tampa da caixa de inspeção



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 13 – Método 1: Diferença percentual entre as hastes analisadas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Faz-se importante ressaltar que com a haste que foi isolada e a tampa da caixa de inspeção vedada totalmente, não foi possível realizar medições constantes devido a vedação. Dessa forma, a haste da caixa vedada não foi medida no período entre o dia 13 de agosto e 02 de dezembro de 2023, sendo que a primeira medição foi realizada no dia 03 de dezembro. Destarte, o valor encontrado na primeira medição foi adotado para as datas anteriores em que a caixa se encontrava vedada, visando, assim, a construção da tabela de valores e do gráfico.

Ao analisar a Tabela 8 e as Figuras 12 e 13, referentes ao método 1 empregado no presente estudo, pode-se perceber que o valor da resistência se manteve constante, o que demonstra que o método 1 mostrou-se eficaz na correção dos fatores que levam a oxidação, visto que tal método evitava o contato de substâncias químicas com o cobre, evitando, assim, a oxidação do cobre (Figura 14). É possível perceber também, ao analisar a Figura 12, que a haste em que não foi aplicado o método teve um aumento considerável no valor da sua resistência devido à oxidação.

Figura 14 – Método 1: Haste sem método para evitar a oxidação



Fonte: Do autor, 2024

Todavia, faz-se importante ressaltar a impossibilidade de vedação total da caixa de inspeção devido a necessidade de inspeção a cada dois anos dos Sistemas de Proteção contra Descargas Elétricas (SPDAs). Dessa forma, o método 1 atinge uma solução para o problema da oxidação acelerada das hastes em contato com as substâncias químicas, mas gera outro problema ao estar em desacordo com o que é proposto na NBR 5419 (2015).

A NBR 5419 (2015) não detalha procedimentos específicos de inspeção, mas fornece orientações sobre a necessidade de inspeções regulares e manutenção dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), sendo que a frequência das inspeções pode variar de acordo com fatores como o ambiente, a localização da estrutura e as condições climáticas. A inspeção é uma parte crucial da garantia de que o SPDA esteja em boas condições de funcionamento, proporcionando proteção eficaz. A norma enfatiza que inspeções devem ser realizadas periodicamente para verificar a integridade e eficácia do sistema; sendo que durante as inspeções devem haver uma verificação visual de todos os componentes do SPDA, se os captadores estão em boas condições, avaliando também a conectividade elétrica de todos os componentes do sistema, as malhas de aterramento quanto à integridade e eficácia, verificando o estado e a operacionalidade dos dispositivos de proteção contra surtos (DPS), além de manter registros atualizados de



todas as inspeções e manutenções realizadas no SPDA.

Dessa maneira, o método 1 demonstra que o ideal é que haja uma alteração da posição das caixas de inspeção de aterramento para um local fora da caixa de contenção, evitando, assim, o contato da substância química para com a haste, mas possibilitando, também, que as necessárias inspeções periódicas sejam realizadas.

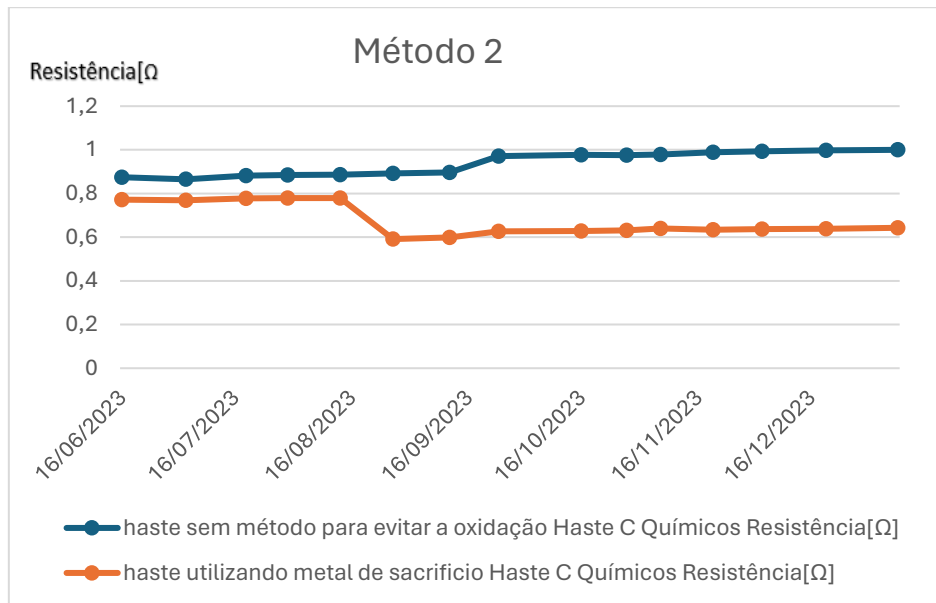
O segundo método proposto para solucionar a oxidação acelerada da malha de aterramento foi utilizar o ferro como metal de sacrifício. Nesse método foi introduzido uma barra de ferro 3/8" ao lado da haste de aterramento, dentro da mesma caixa de inspeção, interligando a barra de ferro e a haste de cobre, na tentativa de que o ferro oxidasse ao invés do cobre (Tabela 9 e Figura 15). Tal método foi aplicado no tanque B, que também conta com quatro hastes de aterramento, tendo sido utilizadas duas hastes para os testes.

Tabela 9 – Método 2: Utilização de um metal de sacrifício

|            | Haste sem método para evitar a oxidação (Série 1) | Haste utilizando metal de sacrifício (Série 2) |  |
|------------|---|--|--|
|            | Haste B Químicos                                  | Haste B Químicos                               |  |
| Data       | Resistência[ $\Omega$ ]                           | Resistência[ $\Omega$ ]                        |  |
| 16/06/2023 | 7,13  | 6,29   |  |
| 03/07/2023 | 7,05  | 6,27   |  |
| 19/07/2023 | 7,19  | 6,34   |  |
| 30/07/2023 | 7,21  | 6,35   |  |
| 13/08/2023 | 7,22  | 6,35   |  |
| 27/08/2023 | 7,27  | 4,82   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 11/09/2023 | 7,31  | 4,88   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 24/09/2023 | 7,92  | 5,11   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 16/10/2023 | 7,96  | 5,12   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 28/10/2023 | 7,95  | 5,15   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 06/11/2023 | 7,97  | 5,21   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 20/11/2023 | 8,06  | 5,17   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 03/12/2023 | 8,09  | 5,19   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 20/12/2023 | 8,13  | 5,2  | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |
| 08/01/2024 | 8,15  | 5,24   | Inserida barra de ferro interligada como metal de sacrifício |

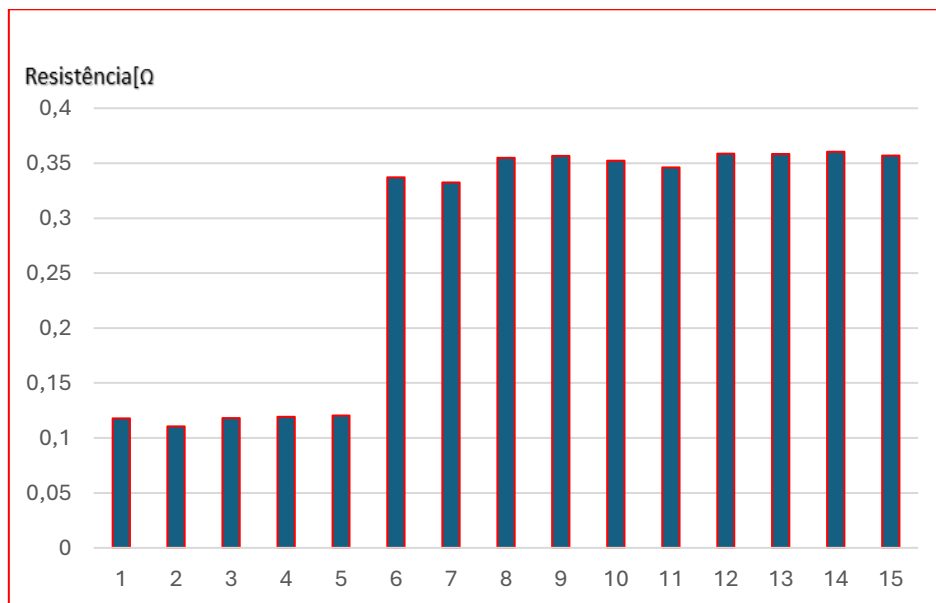
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 15 – Método 2: Utilização de um metal de sacrifício



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 16 – Método 2: Diferença percentual entre as hastes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Um metal de sacrifício é um material que é utilizado para proteger outro metal contra a corrosão. Nesse processo, o metal de sacrifício é mais propenso a corroer-se do que o metal que está sendo protegido (SALOMÃO ET AL., 2019). No método proposto uma barra de ferro foi utilizada como metal de sacrifício visando proteger a haste de cobre. Neste método foi possível realizar a medição constante – a cada quinze dias – nas duas hastes que compuseram o experimento.

O ferro pode ser utilizado como metal de sacrifício em algumas aplicações específicas, embora não seja tão comum quanto outros metais, como o zinco. A ideia é a mesma: o ferro é mais propenso à corrosão do que o metal que está sendo protegido, agindo assim como um ânodo sacrificial para proteger o metal mais valioso. É importante notar que a escolha do metal de sacrifício, incluindo o ferro, depende das condições específicas do ambiente e das características do metal a ser protegido. A eficácia desse método também pode ser influenciada por fatores como a resistividade do solo, a umidade e outros elementos presentes no ambiente (UHLIG; REVIE, 2008).

Quando inserimos o metal de sacrifício – uma barra de ferro com as mesmas dimensões da haste de aterramento – foi possível verificar, a partir dos valores demonstrados na Figura 15, que a resistência de aterramento diminuiu drasticamente, visto que havia duas hastes interligadas, tendo, assim, dois condutores eliminando carga para a terra para equalizar. Contudo, posteriormente o sistema não sofreu alterações, sendo possível perceber visualmente [Figuras 17, 18 (a) e (b)] e através das medições (Tabela 9 e Figuras 15 e 16) que a resistência das duas hastes começaram a sofrer uma oxidação considerável, levando ao aumento do valor da resistência.

Figura 17 – Método 2: Haste sem método para evitar a oxidação



Fonte: Do autor, 2024

Figuras 18 (a) e (b) – Método 2: Haste utilizando metal de sacrifício



Fonte: Do autor, 2024

Ademais, ao analisar a Figura 15, percebe-se a partir da abertura angular do gráfico, que o ângulo da oxidação de cada haste no tanque B de contenção e que a taxa de oxidação de ambas as hastes é aproximadamente a mesma, demonstrando que o método não obteve grandes diferenças. Logo, pôde-se concluir que o método 2 não se mostrou eficiente para evitar a oxidação acelerada das hastes de aterramento.

O terceiro método foi realizado no tanque C, em que foi pintada a ponta de uma das hastes com tinta isolante líquida e utilizado massa plástica (Figura 19), sem isolar a caixa de inspeção. No método 3, assim como no método 1, não foi possível realizar a medição quinzenal da haste isolada devido ao fato do isolamento, impedindo, assim, o uso do terrômetro para aferir a resistência. A tinta e a massa plástica foram retiradas dia 03 de dezembro de 2023, tendo sido realizada a medição utilizando o terrômetro nesta data; o valor encontrado foi utilizado nas medições anteriores visando, assim, a construção da tabela (Tabela 10) e dos gráficos (Figuras 20 e 21).

Figura 19 – Haste pintada com tinta isolante líquida e utilizando massa plástica



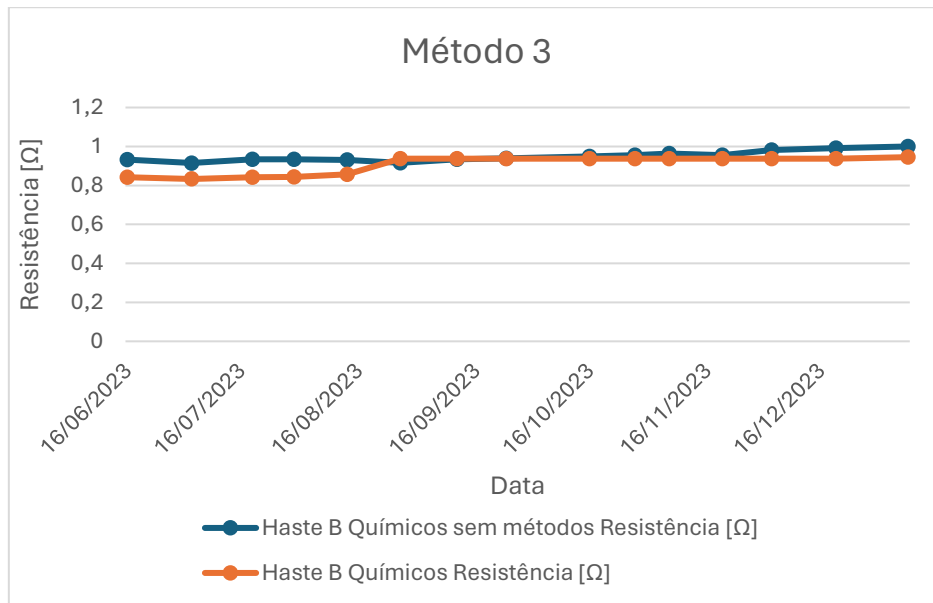
Fonte: Do autor, 2024

Tabela 10 – Método 3: Haste isolada com tinta isolante e massa plástica

|            | Haste sem método para evitar a oxidação (Série 1) | Haste pintada com tinta isolante e massa plástica (Série 2) |                                |
|------------|---|---|--------------------------------|
| Data       | Haste C Químicos Resistência [ $\Omega$ ]         | Haste C Químicos Resistência [ $\Omega$ ]                   |                                |
| 16/06/2023 | 6,82  | 6,16  |                                |
| 03/07/2023 | 6,69  | 6,09  |                                |
| 19/07/2023 | 6,83  | 6,15  |                                |
| 30/07/2023 | 6,83  | 6,17  |                                |
| 13/08/2023 | 6,81  | 6,26  | Caixa isolada para experimento |
| 27/08/2023 | 6,7   | 6,85  | Caixa isolada para experimento |
| 11/09/2023 | 6,83  | 6,85  | Caixa isolada para experimento |
| 24/09/2023 | 6,87  | 6,85  | Caixa isolada para experimento |
| 16/10/2023 | 6,94  | 6,85  | Caixa isolada para experimento |
| 28/10/2023 | 6,99  | 6,85  | Caixa isolada para experimento |
| 06/11/2023 | 7,05  | 6,85  | Caixa isolada para experimento |
| 20/11/2023 | 6,99  | 6,85  | Caixa isolada para experimento |
| 03/12/2023 | 7,18  | 6,85  | Caixa isolada para experimento |
| 20/12/2023 | 7,25  | 6,85  |                                |
| 08/01/2024 | 7,31  | 6,91  |                                |

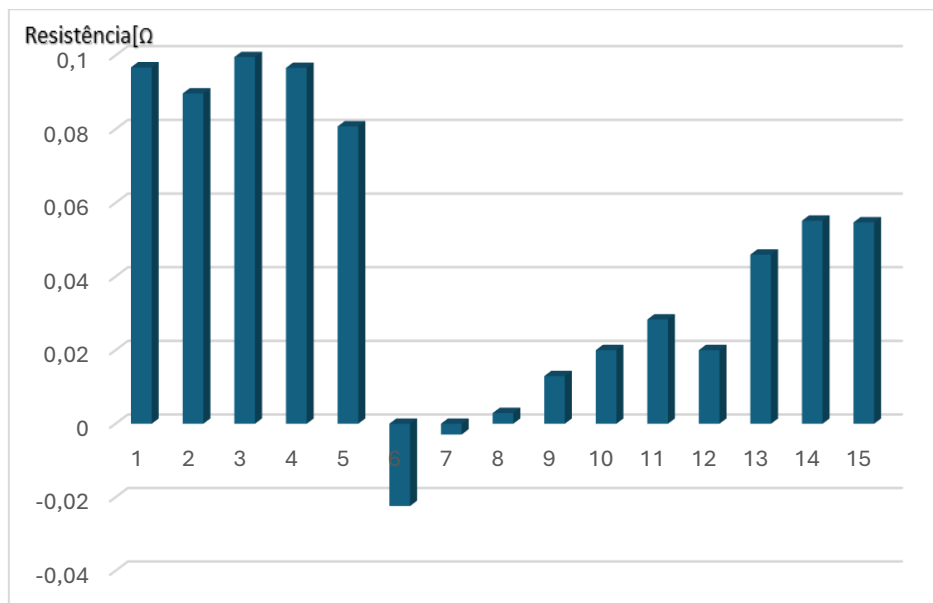
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 20 – Método 3: Haste isolada com tinta isolante e massa plástica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 21 – Método 3: Diferença percentual entre as hastes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Ao analisar as Figuras 20 e 21 verifica-se que o sistema sofreu oxidação considerável, provavelmente devido ao fato do líquido escorrer para dentro da caixa de inspeção e penetrar o solo em contato com a haste, oxidando, assim, a parte abaixo da terra, que não continha tinta isolante – visto a necessidade de funcionamento da haste. A haste em que foi realizada o teste obteve uma resistência menor, mas uma variação maior do que a haste sem utilização do método. Dessa forma, o método 3 também não se

mostrou eficaz para corrigir os fatores que levam à oxidação.

Por fim, o quarto método tratou de substituir a haste de cobre por haste de aço inoxidável (Figuras 22, 23, 24 e 25; Tabela 11).

Figura 22 – Método 4: Haste sem método para evitar a oxidação



Fonte: Do autor, 2024

Figura 23 – Método 4: Haste de aço inoxidável



Fonte: Do autor, 2024

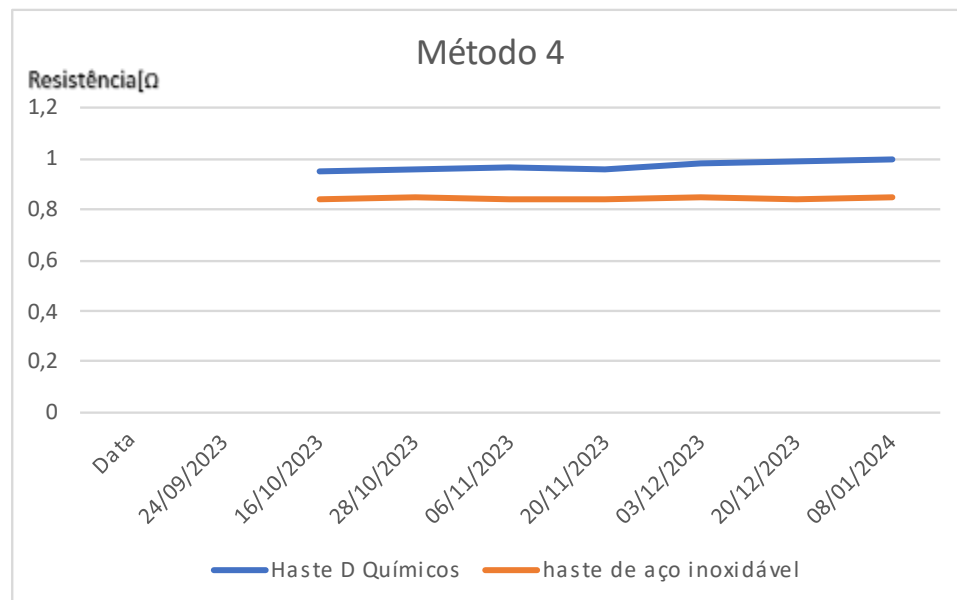


Tabela 11 – Método 4: Substituição por haste de aço inoxidável

| Data       | Haste sem método para evitar a oxidação<br>(Série 1) | Haste de aço inoxidável<br>(Série 2)         |
|------------|--|--|
|            | Haste D Químicos<br>Resistência [ $\Omega$ ]         | Haste D Químicos<br>Resistência [ $\Omega$ ] |
| 24/09/2023 |  |  |
| 16/10/2023 | 6,94   | 6,16   |
| 28/10/2023 | 6,99   | 6,19   |
| 06/11/2023 | 7,05   | 6,14   |
| 20/11/2023 | 6,99   | 6,15   |
| 03/12/2023 | 7,18   | 6,2  |
| 20/12/2023 | 7,25   | 6,15   |
| 08/01/2024 | 7,31   | 6,18   |

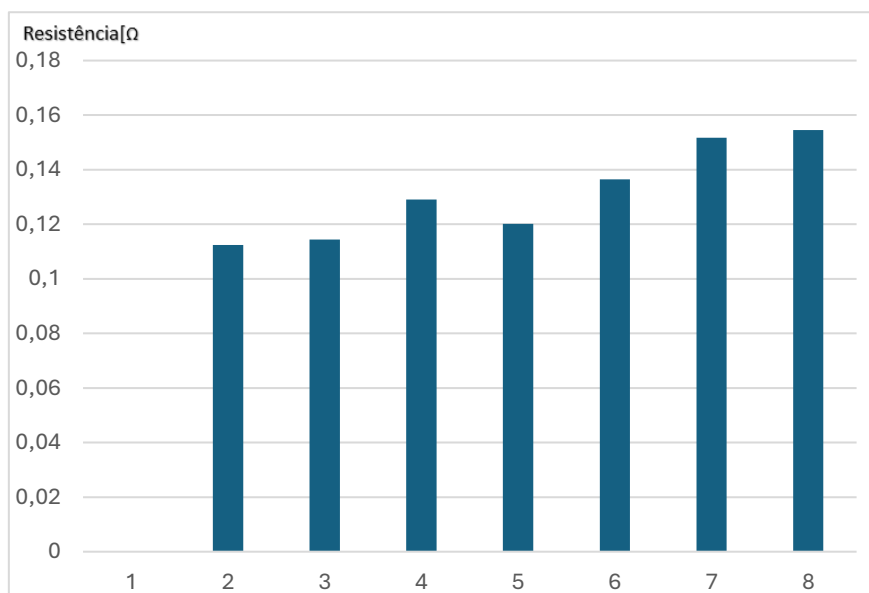
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 24 – Método 4: Substituição por haste de aço inoxidável



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 25 – Método 4: Diferença percentual entre as hastes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Faz-se importante realçar, como é possível observar na Tabela 11 e nas Figuras 24 e 25, que foram realizadas oito medições da proposição do método 4 – do dia 16 de Outubro de 2023 a 08 de Janeiro de 2024 –, visto que tal método foi acrescentado como uma possível solução para a oxidação acelerada da malha de aterramento em contato com produtos químicos a partir da proposição da Banca de Qualificação do presente estudo.

Dessa maneira, ao analisar a Tabela 11 e as Figuras 24 e 25, referentes ao método 4, observa-se que houve pouca oxidação na haste de aço inoxidável e que a resistência manteve-se constante ao compararmos a haste de aço com a haste de cobre presente no tanque. Ademais, observa-se que não foi alterada a condutividade elétrica do aterramento, garantindo, assim, sua eficácia. Logo, a utilização da haste de aço inoxidável para confecção da malha de aterramento em contato com substâncias químicas mostrou-se também um método viável para solucionar o problema da oxidação.

A utilização de hastes de aço inoxidável em Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é uma prática comum em várias aplicações. As hastes de aço inoxidável oferecem diversas vantagens que as tornam atraentes para certos contextos de instalação em comparação com outros materiais: sua ótima resistência à corrosão em ambientes agressivos, sua durabilidade e resistência às condições ambientais adversas ao longo do tempo e sua boa condutividade elétrica (apesar de ser menor do que o cobre). Todavia, o aço inoxidável é um material de custo relativamente mais alto em comparação com algumas alternativas, apesar de sua durabilidade e resistência à corrosão poderem

contribuir para custos menores de manutenção a longo prazo (LEITE; LEITE; 2001).

Dessa forma, ao compararmos e analisarmos os quatro métodos propostos no presente estudo durante o período de tempo analisado (Tabela 12 e Figura 26), pode-se notar que a variação percentual da resistência no método 4, que realizou a substituição da haste de cobre por haste de aço inoxidável, sofreu mínima alteração. Já a variação da resistência no método 1, que tratou de isolar a cabeça da haste e a tampa da caixa de inspeção com massa de vedação, variou em, no máximo, 13%. A variação percentual da resistência no método 2, que utilizou o ferro como metal de sacrifício, foi cerca de 18% e o método 3, que isolou a cabeça da haste com tinta isolante e massa plástica, variou 50%.

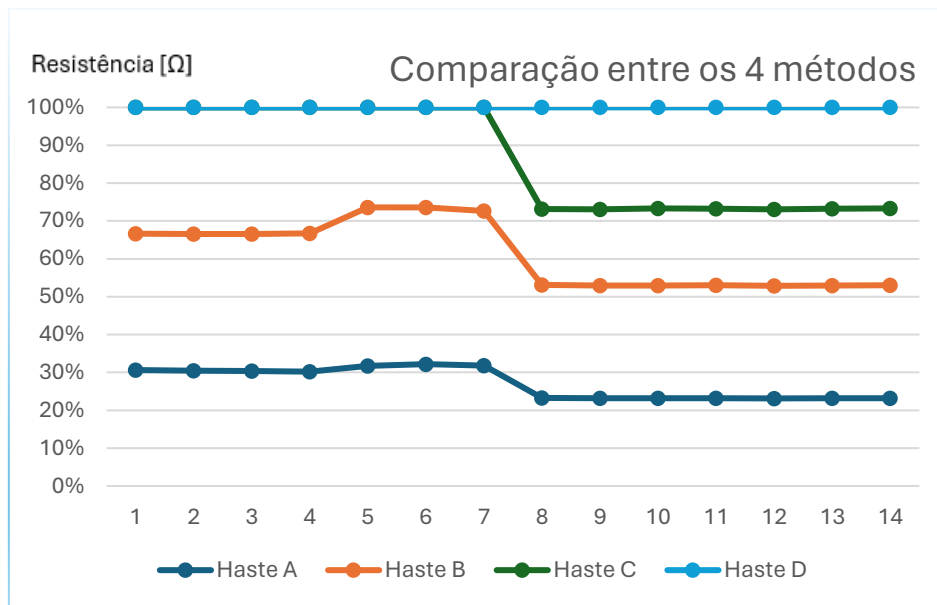
Tabela 12 – Métodos propostos para corrigir fatores que levam à oxidação

|            | Método 1     | Método 2                | Método 3                 | Método 4     |
|------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------|
|            | Haste A      | Haste B                 | Haste C                  | Haste de aço |
|            | Químicos     | Químicos                | Químicos                 | inoxidável   |
| Data       | Resistência  | Resistência[ $\Omega$ ] | Resistência [ $\Omega$ ] | Resistência  |
|            | [ $\Omega$ ] |                         |                          | [ $\Omega$ ] |
| 16/06/2023 | 0            | 0,960784314             | 0,085536585              |              |
| 03/07/2023 | 0,083333333  | 0,947712418             | 0,083256855              |              |
| 19/07/2023 | 0,083333333  | 0,993464052             | 0,07317732               |              |
| 30/07/2023 | 0,083333333  | 1                       | 0,097560976              |              |
| 13/08/2023 | 0,166666667  | 1                       | 0,207317073              |              |
| 27/08/2023 | 0,083333333  | 0                       | 0,926829268              |              |
| 11/09/2023 | 0,083333333  | 0,039215686             | 0,926829268              |              |
| 24/09/2023 | 0,083333333  | 0,189542484             | 0,926829268              |              |
| 16/10/2023 | 0,083333333  | 0,196078431             | 0,926829268              | 0,333333333  |
| 28/10/2023 | 0,083333333  | 0,215686275             | 0,926829268              | 0,833333333  |
| 06/11/2023 | 0,083333333  | 0,254901961             | 0,926829268              | 0            |
| 20/11/2023 | 0,083333333  | 0,22875817              | 0,926829268              | 0,166666667  |
| 03/12/2023 | 0,083333333  | 0,241830065             | 0,926829268              | 1            |
| 20/12/2023 | 0,083333333  | 0,248366013             | 0,926829268              | 0,166666667  |
| 08/01/2024 | 1            | 0,274509804             | 1                        | 0,666666667  |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

A tabela 12 foi criada a partir de valores normalizados, ou seja, os valores apresentados na tabela são valores comparados as hastes sem método presentes em cada tanque, tais valores deram origem também ao gráfico da Figura 26.

Figura 26 – Variação da resistência em porcentagem dos métodos propostos para corrigir os fatores que levam à oxidação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Tais dados demonstram que o método 4 obteve o melhor resultado, com a menor variação da resistência, ou seja, menor oxidação. Contudo, faz-se relevante destacar que o método 4 foi analisado por um período menor em relação aos outros três métodos propostos, o que impossibilita que se possa afirmar categoricamente que ele seria o método mais adequado para minimização da oxidação em ambientes industriais agressivos, visto que seria necessário que esse método pudesse ser analisado por um período maior.

Dessa maneira, apesar do método 4 ter se mostrado promissor, é necessário um estudo de tempo por um período maior. Nesse contexto, faz-se fundamental comparar os outros três métodos propostos, que foram analisados por um período maior.

Dentre as três proposições, o método 1, que isolou a cabeça da haste e a tampa da caixa de inspeção com massa de vedação, foi o método que obteve a menor variação da resistência, mostrando-se, assim, o método mais adequado para minimizar a oxidação em ambientes industriais agressivos.

## 7 Considerações finais

Os resultados do presente estudo apontam para as suas contribuições às investigações científicas acerca da oxidação da malha de aterramento devido à reação com substâncias químicas em ambientes industriais. Os dados coletados a partir do uso de terrômetro, alicate terrômetro e registros fotográficos apontam maiores variações em relação a área onde se encontram os tanques de produtos químicos da empresa na resistividade de sua malha de aterramento. Ao compararmos os resultados da área próxima aos tanques de produtos químicos com a área distante dos produtos químicos torna-se perceptível que o gráfico de resultados das medições da área próxima aos tanques sofreu maiores variações enquanto o gráfico da área distantes dos tanques tendeu a manter-se mais constante ao longo do tempo.

Dessa forma, foi possível notar que as substâncias químicas produzidas pela empresa alteram consideravelmente a resistência da malha de aterramento na região próxima aos tanques, acelerando sua oxidação e podendo gerar impactos sobre a segurança do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas de tal indústria. Tal constatação destaca a necessidade de manutenções e reparações constantes à malha de aterramento desta empresa, o que pode gerar custos elevados ao cliente. Esses dados apontam para a necessidade de ampliação da compreensão acerca dos impactos das substâncias químicas à malha de aterramento e a busca de possíveis soluções que possam amenizar o impacto da reação entre o cobre – material muito utilizado nas malhas de aterramento – e as substâncias químicas.

Foi possível, ainda, observar que a resistência de aterramento varia de acordo com a resistência de solo, sendo que muitos fatores influenciam no valor da resistência de um aterramento, sendo a umidade do solo um dos principais itens que levam a essa variação. No presente estudo pôde-se verificar que no dia em que houve precipitação de água os valores medidos em relação a resistência do aterramento sofreram variação em ambas as áreas, tendo sido encontrado um menor valor de resistência.

Tendo em vista, então, a reação do cobre ao entrar em contato com as substâncias químicas, que aceleravam sua oxidação e levavam o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas a ter uma menor durabilidade e à necessidade de manutenções mais constantes, buscou-se propor um método para minimizar a oxidação a partir da experimentação de quatro diferentes proposições.

Os métodos propostos que obtiveram os melhores resultados para corrigir os fatores que levam à oxidação foram os métodos 1 e 4 (Figura 26). O método 4, que realizou a substituição da haste de cobre por haste de aço inoxidável, demonstrou resultados promissores nas medições realizadas para corrigir os fatores que levam à oxidação, visto que obteve a menor variação, permanecendo, assim, praticamente constante (dentro da escala utilizada não é perceptível a variação, todavia, se houvesse uma escala menor, seria possível observar uma variação de quase 8%) – apesar de ter sido realizado o teste por um tempo menor se comparado aos outros métodos. Todavia faz-se importante ressaltar que o uso de hastes de aço inoxidável para compor um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas apresenta um custo mais elevado para o cliente, sendo que pode haver clientes que não estejam dispostos a despender maiores recursos financeiros para confecção do SPDA; nesse contexto, é importante que o profissional possa ressaltar os benefícios a longo prazo da utilização do aço inoxidável como material.

O método 1 – isolamento da cabeça da haste e da tampa da caixa de inspeção com massa de vedação, impedindo, assim, que qualquer líquido entre em contato com a haste naquela região – demonstrou também um excelente resultado em relação a redução da oxidação da haste. Entretanto, como ressaltado, é impossível vedar a caixa de inspeção visto que isto impediria a manutenção periódica do SPDA. Dessa maneira, é necessário, então, que haja alteração da posição das caixas de inspeção.

Os métodos 2 e 3 apresentados neste estudo não se mostraram propostas tão eficazes para corrigir os fatores que levam à oxidação. No método 2, no início das medições houve uma diminuição significativa da resistência de aterramento, entretanto, posteriormente, os valores encontrados nas medições se igualaram, ou seja, o sistema não sofreu alterações e as duas hastes – a de cobre e a haste de cobre interligada ao ferro – sofreram oxidação. Ou seja, a utilização do metal de sacrifício não foi capaz de conter a oxidação acelerada do cobre em contato com produtos químicos. No método 3, em que a haste foi isolada com tinta isolante e massa plástica, devido a impossibilidade de isolar a haste da parte abaixo da terra, presume-se que o líquido possa ter penetrado o solo e entrado em contato com o cobre, levando, assim, a oxidação do sistema; dessa forma, a proposição do método 3 não foi capaz de evitar o contato com os líquidos químicos e, conseqüentemente, minimizar a oxidação acelerada.

Logo, tendo em vista a constatação da oxidação acelerada da malha de aterramento devido ao contato com substâncias químicas e os métodos propostos para a correção desses fatores, pôde-se concluir que, dentre os métodos avaliados por maior tempo, o

método 1 mostrou-se o mais eficaz – impedindo qualquer contato da haste com a substância química – e econômico financeiramente, visto que não despenderia de altos custos para o cliente. Contudo, como já citado, para que essa proposta seja viável e siga as normas da NBR 5419 (2015), é necessário realizar modificações na localização da caixa. Dessa forma, tal solução apresenta-se viável, sem despende de grandes recursos financeiros ou dificuldades de execução. O método 4 também se mostrou muito eficaz, sendo necessário, contudo, que estudos futuros possam analisá-lo por um período maior.

Dessa forma, o presente estudo destacou a importância da execução correta dos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas e das manutenções constantes, frisando também que em ambientes onde há contato do SPDA com substâncias químicas, tal relação pode interferir na eficácia do Sistema e gerar maiores custos ao proprietário visto a necessidade constante de manutenções devido a oxidação acelerada. Visando, então, manter a segurança do SPDA, o presente estudo também propôs alguns métodos na busca por minimizar os fatores que levavam a oxidação acelerada, mantendo a segurança do Sistema e evitando custos elevados ao proprietário.

Nesse sentido, salienta-se também a necessidade de novos estudos sobre Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas em ambientes agressivos, buscando maiores compreensões de como diferentes interações nesses ambientes podem impactar na eficácia da malha de aterramento, além de buscar também diversas soluções as diferentes interações que podem ocorrer.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2021. 209 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5419**: **proteção de estruturas contra descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro, 2015. 48 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7117**: medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012. 64 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2kV. Rio de Janeiro, 2004. 65 p.

CATANHEDE, Marco Aurelio Silva; MAGNO, Rui Nelson Otoni. Padronização de aterramento em equipamentos elétricos móveis em canteiro de obras. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 46552-46589, 2021.

DIAS, André Dantas. **Malhas de aterramento em subestações energizadas**: medições e análises, 2011. 132 p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Elétrica) – Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

FEITOSA, Jackson Nogueira; GUERRA, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella. Análise da inserção de SPDA em Sistemas Fotovoltaicos (2020). Disponível em: <https://repositorio-homologacao.ufersa.edu.br/dspacev7/api/core/bitstreams/80342b76-ee28-4229-b5df-7b5b062d8dcd/content>

FERREIRA, Barbara Romão. **Avaliação de corrosão sob tinta de isolamento térmico por termografia assistida por simulação computacional**, 2023. 139 p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

FREIRE, Paulo Edmundo. A modelagem geométrica para projetos de sistemas de



aterramento. **Eletricidade Moderna**, n. 570, 2023.

GENNARI, Rodrigo. **Malha de aterramento de subestações**. 2017. 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2017.

GONEN, Turan. *Electric Power Distribution Engineering*. CRC Press, 2014.

JULIATE, Viviane Macedo de Oliveira; LAGE, Eduardo Gouveia Santiago. Avaliação do impacto de correntes elétricos em estruturas de concreto armado. **Technology Science**, v. 1, n. 2, 2019.

JUNIOR, Moacir Mariana de Souza et al. Análise do sistema de proteção contra descargas atmosféricas de ensino superior em Manaus. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 105554-105568, 2021.

KINDERMANN, Jorge Mario; CAMPAGNOLO, Geraldo. *Aterramento Elétrico*. Florianópolis, 1995.

LEITE, Duílio Moreira; LEITE, Carlos Moreira. *Proteção contra descargas atmosféricas*. 5. ed. São Paulo: Oficina de Mydia, 2001

MEIER, Alexandra. *Electric Power Systems: A Conceptual Introduction*. Wiley-IEEE Press, 2006.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR10**: Segurança em instalações e serviços de eletricidade. 2004, 18 p.

MINIPA. Alicate terrômetro ET-4310. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/ferramentas-eletricas/alicate-terometro/68-et-4310>. Acesso em 01 ago. 2023.

NASCIMENTO, C. T. C.; PIRES, A. C. B.; MORAES, R. A. V. Reconhecimento de Solos por Meio de Resistividade Elétrica e Radiação Gama. **Revista Brasileira de**

**Geociências**, v. 34, n. 3, p. 383-392, 2004.

PAUL, Clayton A. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Wiley-Interscience, 2006.

PURCELL, Edward M. **Electricity and Magnetism**. Cambridge University Press; 2ª edição, 2011.

RANDO, Ricardo. **Aterramento em atmosferas explosivas: práticas recomendadas**. São Paulo: Blucher, 2021.

SALOMÃO, Pedro Emílio Amador et al. Estudo de proteção contra corrosão em armaduras de aço da construção civil. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 1, p. 1-16, 2019.

SANTOS, Natã Braga Kelly *et al.* Aterramento elétrico: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação-REASE**, São Paulo, v. 9, n. 5, p. 1-17, maio 2023.

SILVA, Bárbara Duarte et al. Desenvolvimento de Software para elaboração de projetos de aterramento elétrico. **Projeto de Iniciação Científica desenvolvido na Universidade FUMEC**, Belo Horizonte.

UHLIG, Hebert H., RIVIE, Robert W. **Corrosion and Corrosion Control: Na Introduction to Corrosion Science and Engineering**. John Willey & Sons, 2008.

VISACRO FILHO, Silvério. **Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber, 2002. 159 p.

## APÊNDICE A – Autorização da instituição co-participante

### AUTORIZAÇÃO

Esta instituição está ciente de suas co-responsabilidades como instituição co-participante do presente projeto de pesquisa intitulado “**Análise de Instalações Elétricas em Ambientes Industriais Agressivos**”, desenvolvido pelo engenheiro eletricista e aluno do Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) Douglas Goulart Lopes, sob orientação do Prof. Dr. David Calhau Jorge e co-orientação do Prof. Dr. Marcus Vinicius B. Mendonça, e de seu compromisso no resguardo da segurança e bem-estar da empresa, permitindo que a coleta de dados ocorra nas dependências da empresa e autorizando o uso de imagens necessárias.

Uberaba, 22 de Abril de 2023.

