



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Alexandro Santa Rosa

**Monitoramento em tempo real do estado de  
conexão temporária de aterramento durante a  
rotina de manutenção em subestações e linhas  
de transmissão**

Campinas

2023

Alexandro Santa Rosa

**Monitoramento em tempo real do estado de conexão  
temporária de aterramento durante a rotina de  
manutenção em subestações e linhas de transmissão**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Pissolato Filho

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Alexandro Santa Rosa, e orientada pelo Prof. Dr. José Pissolato Filho

---

Campinas

2023

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R71m Rosa, Alexandro Santa, 1990-  
Monitoramento em tempo real do estado de conexão temporária de aterramento durante a rotina de manutenção em subestações e linhas de transmissão / Alexandro Santa Rosa. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: José Pissolato Filho.  
Coorientador: Ricardo Augusto de Araujo.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Correntes elétrica - Aterramento. 2. Subestações elétricas. 3. Segurança do trabalho. 4. Linhas elétricas. I. Pissolato Filho, José, 1951-. II. Araujo, Ricardo Augusto de, 1982-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

#### Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Real-time monitoring of the temporary grounding connection status during maintenance routine in substations and transmission lines

**Palavras-chave em inglês:**

Electrical current - Grounding

Electrical substations

Occupational safety

Power lines

**Área de concentração:** Energia Elétrica

**Titulação:** Mestre em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

José Pissolato Filho [Orientador]

Jaimis Sajid Leon Colqui

Valter Souza Blande

**Data de defesa:** 25-01-2024

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-0628-6471>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1593057777189003>

## COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato(a): Alexandro Santa Rosa RA: 232205

Data de defesa: 25/01/2024

Título da Dissertação: "Monitoramento em tempo real do estado de conexão temporária de aterramento durante a rotina de manutenção em subestações e linhas de transmissão"

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Presidente)

Dr. Valter Souza Blande

Dr. Jaimis Sajid Leon Colqui

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

*Sinto-me muito feliz pela conquista e pelo amigo que fiz ao longo da jornada.*

# Agradecimentos

Expresso inicialmente minha profunda gratidão a Deus por estar ao meu lado em todos os desafios enfrentados e por ter proporcionado as glórias das conquistas. Reconheço que sem ele, eu não teria chegado a nenhum lugar. À minha família, sou imensamente grato. À minha mãe, Marisa Ferreira da Silva, que sempre me incentivou a olhar para o futuro e a extrair aprendizados de todas as situações, sem se deixar guiar por interesses pessoais. Ao meu pai, agradeço por me guiar pelo caminho da racionalidade e do árduo trabalho, pois somente assim alcancei e continuo percorrendo o caminho da vida. Por fim, à minha companheira Giovanna Andresa Beliero, que sempre esteve ao meu lado em todos os desafios. Jamais esqueceria da minha filha, Stella Marchesin Santa Rosa, a quem dedico e sempre dedicarei o mais puro amor que posso oferecer. Você me fez e faz uma pessoa melhor a cada dia. Amo-te! Agradeço também aos membros do Laboratório de Alta Tensão (LAT) pela amizade e toda a assistência proporcionada durante o tempo em que estive com eles. Ao meu orientador, Prof. Dr. José Pissolato Filho, e ao Dr. Ricardo Augusto de Araujo, expresso minha gratidão pela oportunidade e pelos ensinamentos na realização da pesquisa e desta dissertação. Em relação ao Ricardo, gostaria de enfatizar a imensa felicidade e parceria que construímos a partir deste desenvolvimento. Sem dúvida, é uma pessoa muito especial e significativa em minha vida, e desejo mantê-lo como amigo para sempre. O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil - Processo 162883/2021-8.

*Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte, não temeria mal algum, porque tu  
estás comigo  
(Salmo 23:4)*

# Resumo

A importância das técnicas de aterramento é indiscutível no que se refere à salvaguarda da integridade dos trabalhadores envolvidos em sistemas de alta tensão. Durante as atividades de manutenção, é comum a utilização de múltiplos cabos de aterramento; contudo, verificar individualmente se cada cabo está devidamente conectado pode se revelar um desafio. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma proposta inovadora visando controlar e certificar o estado de conexão dos cabos de aterramento relacionados a uma determinada rotina de manutenção, num ponto previamente estabelecido. A solução proposta se vale de dispositivos eletrônicos que estabelecem redes em malha, resultando numa melhoria substancial nos níveis de segurança. Através do monitoramento em tempo real, o sistema permite uma identificação ágil e precisa de possíveis falhas ou desconexões nos cabos de aterramento. Tal funcionalidade desempenha um papel crucial na proteção da equipe de manutenção, prevenindo a ocorrência de acidentes relacionados a questões de aterramento. Testes de campo realizados em ambientes de subestação e torre de transmissão confirmaram a resiliência do sistema, evidenciando a sua eficácia no gerenciamento de interferências de comunicação. Os resultados demonstraram que o sistema é altamente confiável, fornecendo informações essenciais e precisas à equipe de manutenção. A implementação desse sistema de monitoramento em tempo real do estado de conexão temporária de aterramento representa um avanço significativo na segurança das operações de manutenção em subestações e linhas de transmissão. Ao oferecer uma visão abrangente do estado de cada cabo de aterramento, o sistema possibilita tomadas de decisão mais apropriadas e intervenções rápidas em caso de problemas. O objetivo primordial é a minimização dos riscos e a garantia de um ambiente de trabalho mais seguro para a equipe encarregada da manutenção dos sistemas de alta tensão.

**Palavras-chaves:** Correntes elétrica - Aterramento; Subestações elétricas; Segurança do trabalho; Linhas elétricas.

# Abstract

The importance of grounding techniques is undeniable in ensuring the safety of workers involved in high-voltage systems. During maintenance routines, using multiple grounding cables is common; however, individually verifying if each cable is correctly connected can be challenging. This work presents an innovative proposal to control and check the connection state of grounding cables listed in a maintenance routine at a predefined point. The proposed solution employs electronic devices that create mesh networks, significantly improving safety levels. Through real-time monitoring, the system allows quick and accurate identification of potential failures or disconnections in the grounding cables. This feature plays a pivotal role in safeguarding the maintenance team averting accidents linked to grounding issues. Field tests performed in real substation and transmission tower environments validated the system's resilience, showcasing its adeptness in managing communication interferences effectively. The results showed that the system is highly reliable, providing essential and precise information to the maintenance team.

Implementing this real-time monitoring system for the temporary grounding connection status represents a significant advancement in the safety of maintenance operations at substations. By offering a comprehensive view of the status of each grounding cable, the system enables more appropriate decision-making and swift interventions in case of issues. The goal is to minimize risks and ensure a safer working environment for the high-voltage team that maintains the systems.

**Keywords:** Grounding; Electrical Substation; Occupational Safety; Transmission Lines.

# Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Instalação: 1 - conectar primeiramente ao ponto de terra; 2 - conectar, em seguida, ao barramento, linha ou equipamento desenergizado. . . .	19
Figura 2.2 – Remoção: 1 - remover primeiramente do barramento, linha ou equipamento desenergizado; 2 - remover, em seguida, do ponto de terra. . . . .	19
Figura 3.1 – Rede mesh sem fio. . . . .	22
Figura 3.2 – Kit de desenvolvimento SmartMesh. . . . .	23
Figura 3.3 – Módulo de avaliação da Analog Devices. . . . .	23
Figura 3.4 – Diagrama de blocos do NMU - $\alpha$ . . . . .	24
Figura 3.5 – Diagrama de blocos do NSS - $\alpha$ . . . . .	25
Figura 3.6 – Programas que compõem software da NMU - $\alpha$ . . . . .	25
Figura 3.7 – NMU-TL e NSS. . . . .	27
Figura 3.8 – Montagem da NMU-TL ( $\alpha$ ). . . . .	27
Figura 3.9 – NMU-S. . . . .	29
Figura 3.10 – Detalhe da montagem do NMU-S. . . . .	29
Figura 3.11 – NMU-TL. . . . .	30
Figura 3.12 – Teste em bancada da NMU-TL. . . . .	30
Figura 3.13 – Estojo para comportar o NSS. . . . .	31
Figura 3.14 – Estojo acoplado ao cabo de aterramento - 3D. . . . .	31
Figura 3.15 – Estojo acoplado ao cabo de aterramento - real. . . . .	31
Figura 3.16 – Estojo acoplado ao cabo de aterramento - em corte. . . . .	31
Figura 3.17 – Layout eletrônico do NSS. Vista Isométrica. . . . .	32
Figura 3.18 – Layout eletrônico do NSS. Vista Superior. . . . .	32
Figura 3.19 – Layout eletrônico do NSS. Vista Inferior. . . . .	32
Figura 3.20 – Cadastro web. . . . .	34
Figura 3.21 – Tela de importação de dados. . . . .	34
Figura 3.22 – Opção listar. . . . .	35
Figura 3.23 – Funcionalidades disponíveis para planos de aterramento. . . . .	35
Figura 3.24 – Cadastramento e listagem de planos de aterramento. . . . .	36
Figura 3.25 – Diagrama simplificado do sistema proposto. . . . .	38
Figura 3.26 – Conexão entre os dispositivos. . . . .	39
Figura 4.1 – Subestação de Assis/SP. . . . .	41
Figura 4.2 – Torre de um trecho utilizada - Assis/SP. . . . .	42
Figura 4.3 – Taxa de sucesso - área livre e energizada. . . . .	43

Figura 4.4 – Subestação real - testes de distância máxima de comunicação (área energizada).	44
Figura 4.5 – Posição final da NMU-S e raio de comunicação confiável ( $SR = 1$ ).	44
Figura 4.6 – Instalação do NMU-S em rack dentro da área energizada da SE.	45
Figura 4.7 – NMU-S instalado em rack dentro da área energizada da SE.	46
Figura 4.8 – ATP - manutenção em disjuntor.	47
Figura 4.9 – ATP - manutenção em torre de transmissão.	47

# Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Objetivo principal relacionado aos trabalhos revisados e ao trabalho proposto. . . . .	16
---	----

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivo	16
1.2	Estrutura do Trabalho	16
<b>2</b>	<b>Aterramento Temporário</b>	<b>17</b>
2.1	Procedimento geral - instalação e retirada	17
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento e funcionamento</b>	<b>20</b>
3.1	Visão geral do sistema	20
3.1.1	Tecnologia Smartmesh	21
3.2	Sistema proposto e desenvolvimento	23
3.2.1	Versão $\alpha$	24
3.2.2	Versão $\beta$	27
3.2.2.1	NMU - versão $\beta$	29
3.2.2.2	NSS - versão $\beta$	31
3.2.2.3	Página web	33
3.2.3	Rotina de utilização do sistema proposto	36
3.2.4	Procedimento de inserção e retirada do ATP considerando o sistema proposto	39
<b>4</b>	<b>Testes e resultados</b>	<b>41</b>
4.1	Versão - $\alpha$	42
4.2	Versão - $\beta$	43
4.2.1	Teste Operacional	46
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Trabalhos submetidos</b>	<b>51</b>
6.1	Trabalho publicados em congressos e simpósios	51
6.2	Trabalho aceito em revista	51
	<b>Referências</b>	<b>52</b>

# 1 Introdução

Com um foco primordial na segurança dos trabalhadores e equipamentos, o aterramento temporário de proteção (ATP) emerge como uma salvaguarda essencial durante atividades de manutenção, reparo ou modificações (1, 2, 3). Essa prática é uma linha de defesa vital, prevenindo potenciais acidentes elétricos que poderiam resultar em ferimentos graves ou até mesmo em fatalidades (4, 5). Além disso, protege equipamentos valiosos dos efeitos prejudiciais de surtos de voltagem, minimizando interrupções prolongadas e perdas financeiras substanciais. O objetivo central do ATP é estabelecer uma conexão segura e de baixa impedância entre equipamentos elétricos e a terra. Essa conexão cria um caminho controlado para a dissipação de cargas elétricas residuais, garantindo que qualquer energia remanescente nos componentes, como capacitores, seja descarregada com segurança após o desligamento do equipamento. Esse processo diminui significativamente o risco de choques elétricos que poderiam surgir dessas cargas residuais, contribuindo para a segurança geral das pessoas que trabalham em proximidade com sistemas de alta tensão. Além das cargas residuais, o ATP aborda outros perigos potenciais durante atividades de manutenção. Efeitos de indução, frequentemente gerados por circuitos energizados no ambiente circundante, podem representar ameaças significativas para os trabalhadores (6). Essas tensões induzidas podem criar desequilíbrios elétricos e riscos no ambiente de trabalho.

Além disso, a reenergização inadvertida de equipamentos, sem a remoção adequada do ATP, pode levar a consequências catastróficas, incluindo curtos-circuitos, explosões e incêndios, colocando em perigo trabalhadores e equipamentos. Considerando que acidentes ou erros humanos podem ocorrer, ter procedimentos adequados de ATP ajuda a prevenir a ativação acidental de equipamentos, eliminando o potencial de liberações de energia perigosas. Devido à sua importância inegável, vários estudos têm sido dedicados à exploração do tema do ATP, levando à formulação de padrões específicos ((3, 7, 8)) para sua implementação. No entanto, uma parte significativa desses esforços de pesquisa se concentra em aspectos particulares do ATP, como estudos de casos (9, 10, 11), estes em componentes de equipamentos (12, 13, 14, 15), esquemas de conexão (2, 5, 16, 17, 18, 19), ou simulações (5, 6, 20, 21, 22). Poucos estudos têm se concentrado na gestão abrangente dos aterramentos, como a referência (4). Nesta referência, o sistema utiliza tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID) para registrar a entrada e saída dos cabos de aterramento temporários do depósito de armazenamento. Adicionalmente, utiliza GPS para transmitir informações de posicionamento via GSM/GPRS para um servidor central, especialmente se a equipe falhar em registrar o retorno do ATP. No entanto, é essencial

reconhecer que essa solução tem algumas limitações. Ela exige um número de telefone dedicado (rede GSM/GPRS) para cada dispositivo conectado ao cabo de aterramento, e suas capacidades estão atualmente restritas a fornecer dados de posicionamento, em vez de indicar o status ativo do aterramento. Embora esses trabalhos ofereçam informações valiosas sobre os vários aspectos do ATP, a lacuna na abordagem da gestão eficaz em sistemas de grande escala, como subestações e linhas de transmissão, é evidente. O monitoramento em tempo real do status do ATP e a gestão centralizada das conexões surgem como aspectos cruciais para garantir a segurança operacional, mitigar os riscos de acidentes e otimizar a manutenção em ambientes elétricos complexos.

Nesse contexto, informações em tempo real sobre o estado de cada ATP são imperativas. Isso inclui a confirmação de que os pontos de aterramento designados estão conectados de forma eficaz e a verificação de que o ATP foi removido antes da reenergização. Para essa gestão sistemática do estado do ATP, recomenda-se que essas informações sejam acessíveis a toda a equipe de manutenção. Uma solução eficiente para esse cenário é a implementação de dispositivos eletrônicos que monitorem o estado em tempo real de cada ATP e se os cabos estão corretamente conectados e aterrados em pontos determinados. Isso garante que anomalias relacionadas ao estado do ATP sejam identificadas imediatamente, permitindo ações corretivas imediatas. Além disso, a incorporação dessas informações no sistema supervisor oferece uma visão abrangente do estado da instalação, facilitando a coordenação entre equipes diferentes. Portanto, esta pesquisa apresenta uma solução inovadora ao desenvolver dispositivos eletrônicos para o monitoramento em tempo real do estado do ATP.

A Tabela 1.1 fornece uma visão abrangente dos objetivos abordados (✓) e aqueles não abordados (−) nos trabalhos revisados em comparação com o escopo deste trabalho de pesquisa. Notavelmente, como ilustrado na Tabela 1.1, o foco principal deste trabalho de pesquisa é abordar uma lacuna crítica, enfatizando especificamente o monitoramento e gerenciamento simultâneo do status do ATP em subestações e linhas de transmissão. Consequentemente, a pesquisa proposta busca aprimorar as medidas de segurança durante os procedimentos de manutenção dentro de subestações e linhas de transmissão, integrando a tecnologia de rede de malha com dispositivos inteligentes.

Tabela 1.1 – Objetivo principal relacionado aos trabalhos revisados e ao trabalho proposto.

Referência	ATP Estudo de caso	ATP Equipamentos e dimensionamento	ATP - estado		ATP Gerenciamento	ATP Simulação	ATP Esquemas
			Subestação	Transmissão			
(9, 10, 11)	✓	-	-	-	-	-	-
(6, 20)	✓	-	-	-	-	✓	-
(4)	-	-	-	-	✓	-	-
(23)	-	-	✓	-	-	-	-
(5)	-	✓	-	-	-	✓	✓
(21, 22)	-	-	-	-	-	✓	-
(2, 16, 17, 18, 19)	-	-	-	-	-	-	✓
(12, 13, 14, 15)	-	✓	-	-	-	-	-
<b>Este trabalho</b>	✓	-	✓	✓	✓	-	-

## 1.1 Objetivo

O propósito desta dissertação é descrever o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico voltado para o monitoramento em tempo real de aterramentos temporários aplicados em procedimentos de manutenção nas subestações de energia e nas linhas de transmissão. Os objetivos imediatos desta pesquisa são:

- Aprimorar significativamente a segurança dos trabalhadores envolvidos nessas operações.
- Prevenir danos aos equipamentos e à infraestrutura elétrica.

Com isso, busca-se proporcionar um ambiente de trabalho mais seguro e eficaz, enquanto garante a integridade dos ativos elétricos.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

A dissertação é organizada da seguinte forma. O capítulo 2 traz uma breve discussão sobre aterramento temporário e procedimento de inserção e remoção. Já no capítulo 3, a dissertação entra no núcleo do trabalho, detalhando o desenvolvimento da solução proposta. Descreve o processo de concepção, o uso da tecnologia e as inovações implementadas para aprimorar a segurança e a eficácia do aterramento temporário. No capítulo 4 são apresentados os resultados dos testes realizados para validar a solução proposta. Os dados coletados, as análises realizadas e as conclusões extraídas dos testes são discutidos em detalhes, oferecendo uma visão crítica do desempenho da solução. No capítulo 5, são apresentadas as conclusões abrangentes do trabalho, destacando as realizações, as contribuições e os aprendizados obtidos ao longo da pesquisa. Por fim, são fornecidas recomendações para futuros trabalhos e pesquisas.

## 2 Aterramento Temporário

Os aterramentos temporários de proteção desempenham um papel crucial ao conectar um barramento de energia de subestação e equipamentos, ou linhas de transmissão, visando a salvaguardar os trabalhadores contra as altas tensões que podem ser induzidas ou aplicadas devido a falhas do equipamento ou erros operacionais. É imperativo que esses aterramentos de proteção temporários sejam dimensionados e instalados de maneira apropriada (8), garantindo a segurança dos trabalhadores, tanto durante operações normais quanto em situações anormais no sistema de energia.

Uma montagem típica de um aterramento temporário em subestações e linhas de transmissão consiste no seguinte:

- a) Grampos condutores – prendem os cabos de aterramento ao equipamento ou à estrutura que está sendo aterrada. Eles são projetados para garantir uma conexão firme e segura, permitindo que a corrente flua do equipamento para o cabo de aterramento;
- b) Trapézio de suspensão – usado para elevar e suspender os cabos de aterramento em locais onde a conexão com o terra é necessária, mas não diretamente acessível. Ele é frequentemente usado em subestações ou locais com estruturas metálicas, como torres de transmissão;
- c) Cabos de aterramento - de cobre, flexível e isolado. É importante observar que o material isolante deve ser transparente para permitir inspeção visual. Isso significa que a cobertura isolante do cabo deve ser feita de um material que seja claro ou translúcido, de modo que os inspetores possam verificar a integridade do cabo, procurando por danos, desgaste ou qualquer outra condição que possa comprometer a segurança.

### 2.1 Procedimento geral - instalação e retirada

Os procedimentos exatos para aplicação de conjuntos ATP podem diferir dependendo do tipo, classificação e configuração do equipamento que está sendo isolado e aterrado e das políticas específicas de cada concessionária de energia. No entanto, os seguintes procedimentos gerais devem ser seguidos (8).

#### **A. Instalação:**

- a) Identificação dos Pontos de Aterramento: Comece identificando os pontos específicos que requerem aterramento temporário, como equipamentos, circuitos ou áreas de intervenção.
- b) Seleção dos Componentes Adequados: Escolha os componentes necessários, incluindo cabos de aterramento de cobre, grampos condutores e ferramentas apropriadas.
- c) Isolamento da Seção a ser Aterrada: Isole a seção específica que será aterrada para evitar energização acidental durante o procedimento.
- d) Sinalização e Identificação: Utilize placas de alerta e etiquetas visíveis para indicar claramente que o aterramento temporário está ativo, garantindo que todos os envolvidos estejam cientes do status de segurança.
- e) Verificação de Desenergização: Antes de realizar qualquer conexão, verifique novamente a desenergização completa da área a ser aterrada. Certifique-se de que não há tensão elétrica presente e que o local está seguro para trabalhos de manutenção.
- f) Conexão aos Equipamentos ou Estruturas: Conecte os cabos de aterramento de cobre de forma segura aos equipamentos que estão sendo aterrados. Primeiro, conecte o grampo do cabo de aterramento ao ponto de terra. Em seguida, conecte a outra extremidade do cabo ao equipamento, linha ou barramento que precisa ser aterrado.
- g) Realização das Atividades de Manutenção: Com o aterramento temporário em vigor e a desenergização verificada, a equipe pode realizar as atividades de manutenção com segurança, sabendo que estão protegidos contra possíveis riscos elétricos.

## **B. Remoção:**

- a) Verificação de Desenergização: Antes de começar a remover o aterramento temporário, repita o processo de verificação de desenergização para garantir que o equipamento ou área aterrada esteja completamente sem tensão elétrica.
- b) Remoção dos Cabos e Conexões: Comece retirando o grampo que está conectado ao equipamento, barramento ou linha desenergizada. Isso é feito primeiro para garantir que a estrutura ou equipamento seja desconectado do aterramento antes de remover o ponto de terra. Somente após a desconexão do equipamento, barramento ou linha, remova o grampo que está conectado ao ponto de terra.
- c) Sinalização de Remoção: Durante a remoção, a sinalização que indica que o aterramento temporário está ativo é retirada para evitar confusões.

- d) Inspeção Visual: Antes de guardar os componentes, realize uma inspeção visual para verificar a integridade dos cabos de aterramento e dos grampos condutores, bem como verificar se há algum cabo conectado.
- e) Armazenamento Adequado: Armazene os componentes adequadamente para que estejam prontos para uso futuro, mantendo sua integridade e funcionalidade.

Resumidamente, ao conectar um aterramento a um barramento, linha de entrada ou equipamento, o grampo da extremidade a ser conectada ao ponto de aterramento deve ser o primeiro, seguida pela outra extremidade (grampo a ser inserido no ponto desenergizado) usando uma ferramenta adequada para linhas energizadas. Da mesma forma, ao retirar um aterramento temporário de proteção, o conjunto ATP deve ser removido do barramento, linha ou equipamento usando uma ferramenta apropriada para linhas energizadas antes de desfazer a conexão de aterramento. As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram a ordem de inserção e retirada do ATP.

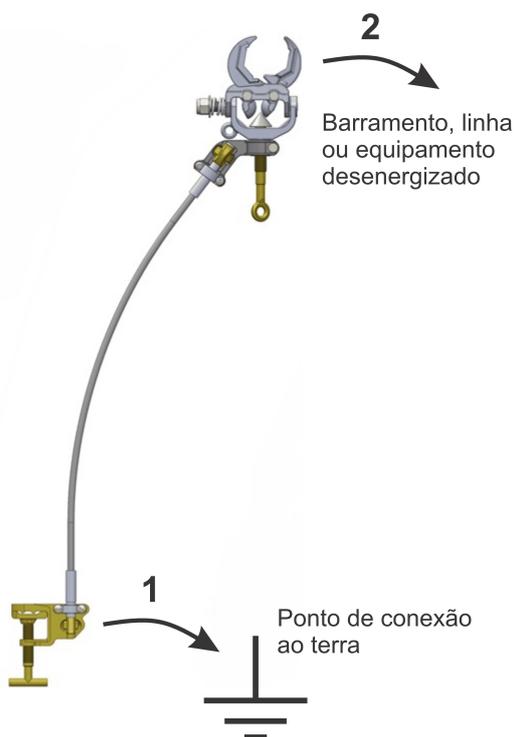


Figura 2.1 – Instalação: 1 - conectar primeiramente ao ponto de terra; 2 - conectar, em seguida, ao barramento, linha ou equipamento desenergizado.

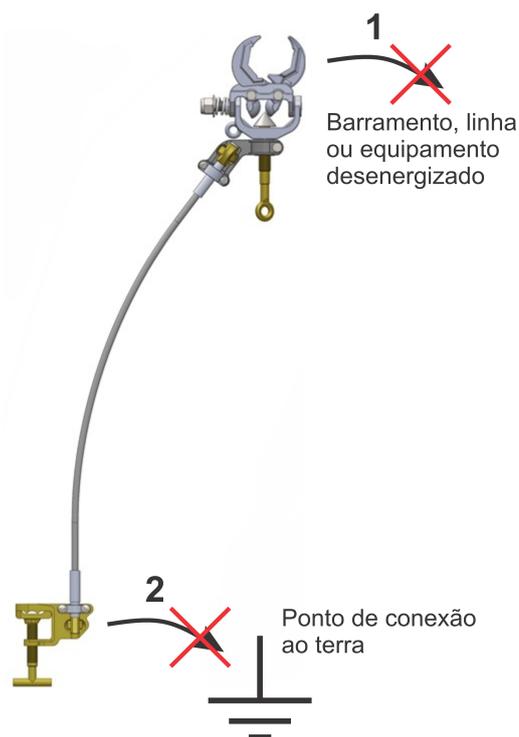


Figura 2.2 – Remoção: 1 - remover primeiramente do barramento, linha ou equipamento desenergizado; 2 - remover, em seguida, do ponto de terra.

## 3 Desenvolvimento e funcionamento

No início do processo de desenvolvimento, a principal ênfase recaiu sobre a investigação de tecnologias apropriadas para ambientes industriais altamente poluídos por interferência eletromagnética. Compreendeu-se a importância de garantir que qualquer solução proposta fosse capaz de operar com eficácia e confiabilidade mesmo em condições desafiadoras, onde a interferência eletromagnética é uma preocupação constante.

Além disso, uma análise cuidadosa foi conduzida para identificar e avaliar as possíveis arquiteturas do projeto. Cada arquitetura foi minuciosamente examinada em termos de sua capacidade de atender aos requisitos de monitoramento em tempo real do estado do aterramento temporário, ao mesmo tempo em que garantia a robustez e a confiabilidade necessárias em ambientes de alta complexidade eletromagnética. Essas análises críticas desempenharam um papel vital na definição da direção do projeto, resultando em um sistema adequado para a implementação, discutido na seção 3.2.

### 3.1 Visão geral do sistema

A escolha da tecnologia adequada para o projeto de pesquisa baseou-se em características intrínsecas relevantes para operação em ambiente de alta complexidade, que incluem:

- Rede Mesh Auto-Organizável: A topologia mesh auto-organizável oferece comunicação eficaz entre dispositivos, mesmo em ambientes complexos e em constante mudança.
- Sincronização de tempo: A sincronização precisa entre dispositivos é crucial para coletar e transmitir dados com precisão, permitindo uma análise confiável do status de aterramento temporário.
- Autoconfiguração e Automação: O recurso de autoconfiguração simplifica a implantação da rede, enquanto a automação permite que os dispositivos executem tarefas de forma independente.
- Eficiência Energética: A eficiência energética garante a operação contínua do dispositivo, mesmo em locais de acesso remoto ou desafiador.
- Redundância e tolerância a falhas: Os recursos de redundância e tolerância a falhas garantem a robustez do sistema, mesmo em condições adversas.

- **Segurança:** Os mecanismos de segurança protegem a integridade dos dados transmitidos e garantem o acesso apenas aos dispositivos autorizados.
- **Escalabilidade:** A capacidade de expandir a rede para acomodar muitos dispositivos é essencial para lidar com sistemas complexos.
- **Aplicações Industriais:** A tecnologia deve se adequar a ambientes industriais com condições variadas.
- **Gerenciamento Centralizado:** Um sistema centralizado permite controle e monitoramento eficiente de todos os dispositivos da rede.
- **Alcance ajustável:** A flexibilidade para ajustar o alcance de comunicação é essencial para acomodar diferentes distâncias entre dispositivos.

Assim, foram adotados módulos smartmesh da *Analog Devices* (24) entre diversas opções existentes que atendem a essas características, como os módulos Xbee (Zigbee) e WirelessHART.

### 3.1.1 Tecnologia Smartmesh

A tecnologia adotada permite uma comunicação bidirecional entre dispositivos, coletando e retransmitindo dados de forma a garantir um fluxo contínuo e consistente de informações. A precisão na sincronização desempenha um papel fundamental na arquitetura da rede, que é organizada em intervalos de tempo distintos. Essa organização baseada no tempo facilita a troca de pacotes e saltos de canal sem colisões durante a transmissão, um fator crítico para garantir uma comunicação de dados confiável e livre de interferências.

Uma característica essencial deste sistema é a ênfase na redundância (25). Cada dispositivo possui um ou mais nós pais, fornecendo rotas alternativas para superar interrupções de comunicação causadas por interferências, obstruções físicas ou perda de sinal. Se a transmissão falhar em uma rota, as retransmissões subsequentes automaticamente exploram diferentes caminhos e canais de RF.

Com base nesses princípios fundamentais, o gerenciador de rede (*Network manager*) supervisiona o estabelecimento da malha. Este componente instrui os dispositivos de ponto de acesso a enviar anúncios contendo informações vitais de sincronização, permitindo que os dispositivos se integrem e se tornem parte da rede. Esse processo também envolve um handshake de segurança, estabelecendo canais de comunicação criptografados entre o gerenciador (ou aplicativo) e os dispositivos individuais. Uma vez integrados, es-

ses dispositivos mantêm uma sincronização precisa, trocando mensagens de correção de tempo entre os nós conectados.

A adaptabilidade também é crucial para o projeto. A rede identifica continuamente novos caminhos de comunicação à medida que as condições de RF evoluem. Isso permite que a rede mesh se ajuste para incluir novos dispositivos de forma automática. Quando introduzido na rede, um novo nó é assimilado ao sistema mesh existente sem intervenção manual. Essa capacidade de assimilação simplifica a expansão da rede, garantindo comunicação ininterrupta à medida que novos dispositivos são integrados.

Além disso, cada dispositivo da rede monitora continuamente as estatísticas de desempenho, avaliando a qualidade dos caminhos utilizados e mantendo listas de alternativas potenciais. Esses dados são comunicados periodicamente ao Network Manager por meio de relatórios de integridade, permitindo otimização constante para manter taxas de alta confiabilidade superiores a 99,999% (24) mesmo em ambientes de RF desafiadores.

A tecnologia emprega o Time Slotted Channel Hopping (TSCH) para eficiência energética. Neste modo, os dispositivos entram em estado de suspensão entre as comunicações programadas, resultando em uma operação com eficiência energética (26, 27). Os dispositivos ficam ativos apenas durante horários designados de transmissão ou recepção, resultando em menos de 1% do ciclo de trabalho eficiente (24). A automatização e coordenação desse agendamento são realizadas pelo software de otimização do Network Manager, garantindo um consumo de energia simplificado e eficaz.

A Figura 3.1 mostra a estrutura da malha e o relacionamento entre os nós e o gerenciador da rede.

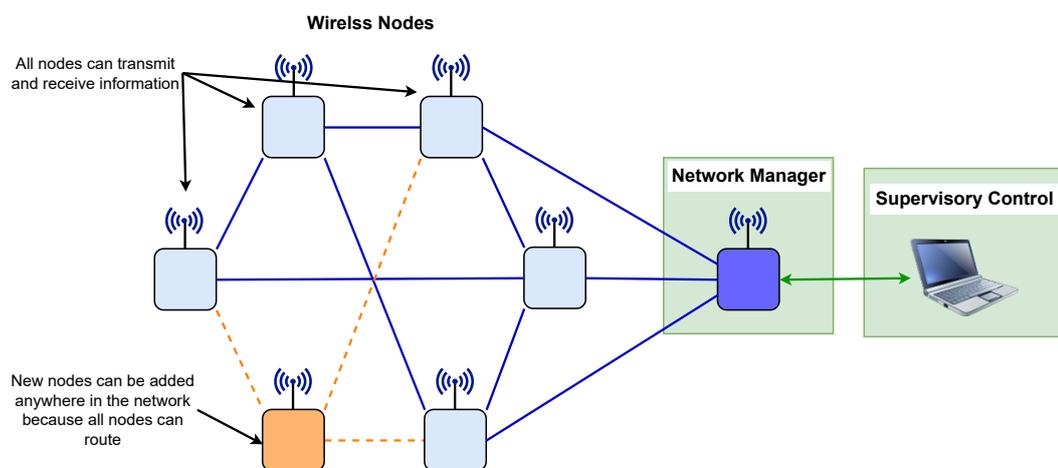


Figura 3.1 – Rede mesh sem fio.

As Figuras 3.2 e 3.3, apresentam o kit de desenvolvimento SmartMesh e o módulo de avaliação da Analog Devices, respectivamente. O kit de desenvolvimento Smart-

Mesh é empregado nos dispositivos que compõem a rede mesh, desempenhando um papel fundamental nessa infraestrutura de comunicação. Por outro lado, o módulo de avaliação é essencialmente uma plataforma que inclui componentes de hardware e software de suporte que permite a compreensão da forma como a tecnologia funciona em condições do mundo real. Ou seja, o módulo de avaliação é uma plataforma para a experimentação e avaliação antes de investir em uma implementação completa.

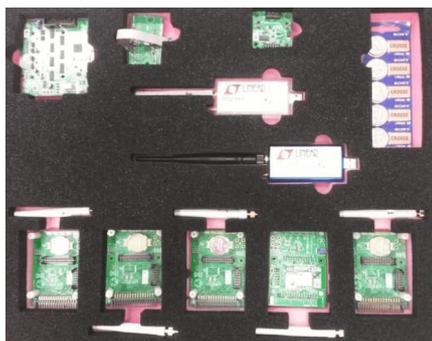


Figura 3.2 – Kit de desenvolvimento SmartMesh.



Figura 3.3 – Módulo de avaliação da Analog Devices.

## 3.2 Sistema proposto e desenvolvimento

O sistema consiste em três equipamentos eletrônicos diferentes: i) Unidade Gerenciadora de Rede - Subestação (NMU-S), ii) Unidade Gerenciadora de Rede - Linhas de Transmissão (NMU-TL), e iii) Unidade de Sinalização do Estado (NSS-ATP). A NMU-S é o dispositivo central responsável por gerenciar a rede mesh e estabelecer comunicação com o sistema supervisor. Instalada como componente estático dentro da subestação, a NMU-S ocupa uma posição permanente, enquanto a NMU-TL é uma alternativa portátil. Em subestações que não possuem uma NMU-S configurada, uma NMU-TL pode operar em seu lugar, assumindo a função de gerenciador de rede.

Cada NSS-ATP, equipado com um endereço MAC exclusivo, é fixado em cada cabo de aterramento usado durante intervenções de manutenção, indicando o estado ativo ou inativo do aterramento temporário. A NMU recebe e registra os dados de estados transmitidos relacionados ao aterramento programado para a intervenção. Essa funcionalidade capacita equipes de supervisão a iniciar ações, como autorizar a manutenção de equipamentos e confirmar a presença de todos os aterramentos necessários. Localmente, a NMU fornece monitoramento visual por meio de um visor, indicando os estados de aterramento (ativo ou inativo). Simultaneamente, em nível de sistema, essas informações são integradas ao sistema supervisor. Como resultado, a supervisão do aterramento temporário, anteriormente limitada às equipes de campo, se expande para abranger uma variedade mais ampla de agentes locais e remotos.

É fundamental destacar que a equipe de manutenção deve aderir rigorosamente aos procedimentos de aterramento temporário. Portanto, o sistema apresentado neste estudo não contempla ações negligentes, como deixar de conectar o NSS-ATP ao cabo de aterramento. O sistema proposto minimiza situações potencialmente perigosas decorrentes de negligências, como o esquecimento de remover o ATP.

Durante o processo de desenvolvimento deste projeto, foram concebidos essencialmente dois dispositivos eletrônicos fundamentais: o gerenciador de rede e o sinalizador de estado. O desenvolvimento desses dispositivos passou por duas fases distintas, cada uma marcada por um protótipo específico. As duas etapas, a do protótipo  $\alpha$  e a do protótipo  $\beta$ , desempenharam papéis cruciais na evolução e aprimoramento do sistema, como discutido a seguir.

### 3.2.1 Versão $\alpha$

A versão  $\alpha$  teve como objetivo validar estudos teóricos e implementar requisitos essenciais para o monitoramento temporário. Os equipamentos foram desenvolvidos, construídos e testados em condições reais. Durante os testes, a equipe de manutenção da concessionária participou ativamente, identificando melhorias cruciais para otimizar o sistema. A colaboração resultou na validação das funcionalidades essenciais e na implementação de ajustes para garantir eficiência e confiabilidade no monitoramento temporário.

Estruturalmente, os dispositivos desenvolvidos (NMU e NSS) podem ser representados através dos seguintes diagramas de blocos:

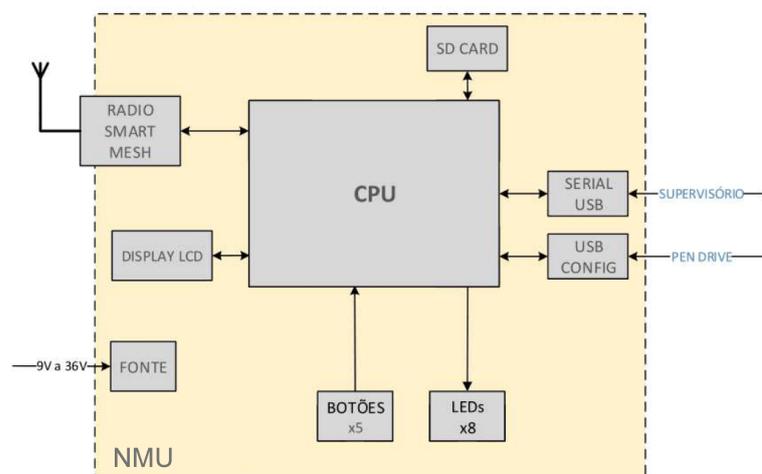


Figura 3.4 – Diagrama de blocos do NMU -  $\alpha$ .

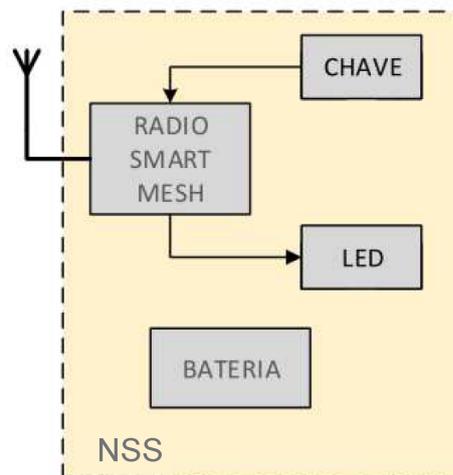


Figura 3.5 – Diagrama de blocos do NSS -  $\alpha$ .

O software incorporado na NMU de aterramento foi criado utilizando a linguagem Python. Esses programas operam no sistema operacional Linux, que está integrado ao processador. Eles funcionam simultaneamente, interagindo de forma eficiente por meio de um arquivo CSV para comunicação. A estrutura é ilustrada na Figura 3.6.

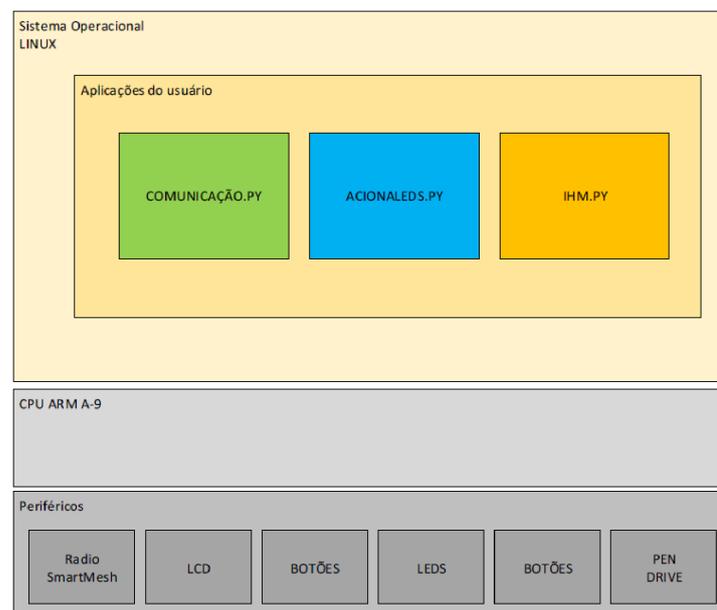


Figura 3.6 – Programas que compõem software da NMU -  $\alpha$ .

A seguir, os programas que compõem esse software são brevemente discutidos a seguir.

**Comunicação serial (COMUNICAÇÃO.PY):** Um canal de comunicação serial é estabelecido entre o NMU e um sistema supervisor. O NMU, sendo um dispositivo passivo, permanece em modo de espera para receber requisições do supervisor.

Como exemplo, considere a leitura do estado dos NSS. O programa inicia a comunicação pela porta serial e aguarda os comandos de requisição, identificados pelas letras "A", "B" ou "C". Quando o supervisor envia o comando "A", o NMU retorna o estado dos NSS no formato CSV:

```
"ESTADO/n"
"ESTADO/n"
"ESTADO/n"
```

Onde o campo ESTADO pode assumir o valor 0 (desligado) ou 1 (ligado). Já o comando "B" retorna toda a tabela CSV que se encontra dentro do NMU:

```
"NSS;LOCAL;ESTADO/n"
"NSS;LOCAL;ESTADO/n"
"NSS;LOCAL;ESTADO/n"
```

Onde o campo NSS vai assumir o valor correspondente ao identificador do NSS (número serial de fábrica). O campo LOCAL assume o local de aterramento selecionado pelo usuário. O comando final, marcado como "C", requer a inclusão dos três últimos dígitos do identificador do NSS. Esse comando é designado para recuperar o estado de um NSS específico:

```
Comando: "C+IDENTIFICADOR_NSS".
Resposta: "ESTADO/n".
```

**Acionamentos de LEDs (ACIONALEDS.PY):** O programa opera lendo um arquivo linha por linha através do CSV *reader*. Com base no valor contido no último campo (índice 2), ele realiza a tradução para determinar quais LEDs devem ser acesos ou apagados. Esse estado reflete se o NSS está ativo (LED aceso) ou inativo (LED apagado).

**IHM para execução (IHM.PY):** O código abrange toda a máquina de estados do LCD, considerando tanto o acionamento de botões quanto o *feedback* dos NSS. Este programa possui um loop infinito que avalia o estado, isto é, a posição indicada no *menu*, exibindo informações na tela ou executando funções específicas. A execução inicia-se com a seleção do local da anilha NSS, repetindo o processo até que todas os NSS sejam identificados. Posteriormente, é possível verificar o estado atual, que indica a situação dos aterramentos. Ao pressionar o botão "left" para sair da tela do estado atual, ocorre o retorno ao *menu* inicial, permitindo que o operador revise ou ajuste as configurações, se necessário.

Adicionalmente, o IHM.PY desempenha a função de efetuar escritas no LCD, seguindo a máquina de estados do fluxo de aterramento. Em momentos específicos, a máquina percorre os botões utilizados na navegação do *menu* apresentado no LCD. Além disso, o IHM.PY estabelece comunicação com os NSS por meio do rádio SmartMesh, utilizando uma porta USB para essa interação.

A Figura 3.7 mostra o NMU-TL montado e os dispositivos NSS desenvolvidos na versão  $\alpha$  e utilizados nos testes em campo, descritos na seção 4. Já a Figura 3.8 ilustra a montagem do NMU-TL.



Figura 3.7 – NMU-TL e NSS.

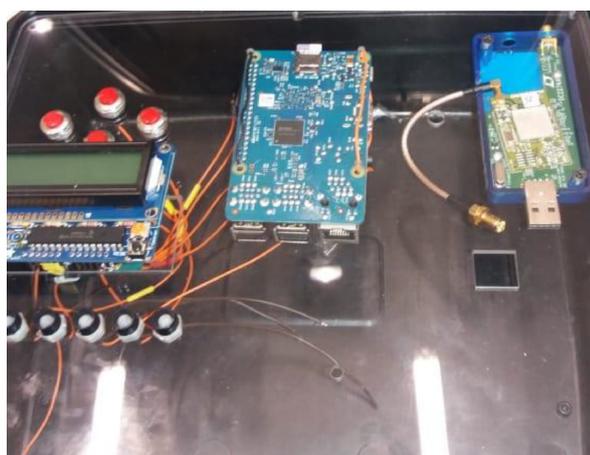


Figura 3.8 – Montagem da NMU-TL ( $\alpha$ ).

### 3.2.2 Versão $\beta$

A construção do protótipo  $\beta$  foi orientada pela análise crítica dos resultados do protótipo  $\alpha$ , visando aprimorar e otimizar as funcionalidades fundamentais do sistema. Componentes, em especial o NSS, foram refinados e novos ajustes foram incorporados

para assegurar um desempenho mais eficaz e confiável, com mínimo impacto na rotina da equipe de manutenção, sendo:

- Ajustes no esquema elétrico e no layout eletrônico do NMU;
- Ajustes no esquema elétrico, no layout eletrônico e design do NSS;
- Modificações na programação do protótipo;
- Ajustes e definições na lógica de programação relacionada à entrega de dados para o sistema supervisorio;
- Desenvolvimento (programação) e implementação do Web-Server (necessário para o armazenamento em nuvem);

O fluxo de configuração do sistema permanece o mesmo em relação ao protótipo anterior. Significa que o operador continua utilizando uma planilha do tipo CSV (Comma-Separated Values) para montar a configuração. Porém a organização dessa tabela difere da versão anterior. Agora o operador deve entrar com os dados da seguinte maneira:

- Cada linha representa um NSS;
- Cada NSS deve ser atrelada a um local de aterramento e a fase de rede;
- O formato da linha deve ser respeitado conforme modelo: NSS, LOCAL, FASE:
  - Em que "NSS" deve conter o identificador do NSS (ID);
  - Em que "LOCAL" deve ser o código do equipamento;
  - Em que "FASE" deve ser a fase A ou B ou V.

Essa tabela deve ser copiada para um PENDRIVE e levada até o NMU (inserir na porta USB disponível). Através da navegação pelo menu, escolher "CARREGAR CONFIGURAÇÃO" e pressionar o botão "ENTRA". Em seguida uma mensagem deve aparecer informando se a configuração foi aplicada com sucesso ou não (caso em que o sistema não reconhece o formato da tabela de configuração). Para realizar um procedimento de teste da configuração do NMU e o SUPERVISÓRIO, basta acessar o menu no NMU e selecionar "TESTAR CONFIGURAÇÃO". Nesta seleção o SUPERVISÓRIO recebe a o status de teste, podendo assumir uma lógica própria para este procedimento. O modo de execução do NMU, se "EM TESTE" ou "NORMAL", estará disponível em um registrador da interface MODBUS. Para retornar ao modo "NORMAL", basta o operador navegar no menu do NMU e selecionar o modo.

### 3.2.2.1 NMU - versão $\beta$

O hardware passou por algumas modificações em relação à versão  $\alpha$ . Na  $\beta$ , foi adicionada uma antena de comunicação adicional, totalizando uma antena para a comunicação com os dispositivos NSS e outra para a comunicação GSM. Também foi incorporado um botão que permite à equipe encerrar o procedimento de aterramento, uma melhoria em relação à  $\alpha$ , onde a finalização era possível apenas desligando o equipamento. Além disso, os LEDs indicadores de NSS ativos foram retirados, considerando que o número de dispositivos pode ser maior do que o número de LEDs disponíveis.

Na versão  $\beta$ , foram incluídos LEDs indicadores de sincronização web, dados web e o LED indicador de execução de aterramento. Outros sete LEDs foram reservados para futuras funcionalidades, como, por exemplo, indicadores de comunicação satelital.

Um aspecto diferente da  $\alpha$  é a introdução do NMU-S na versão  $\beta$ , o qual foi instalado na subestação. As figuras a seguir ilustram os dispositivos NMU-TL e NMU-S. É crucial enfatizar que o NMU-TL e o NMU-S compartilham as mesmas funcionalidades, sendo a principal distinção que o NMU-TL é estacionário na subestação, enquanto o NMU-S é móvel. Quando uma subestação é equipada com um NMU-S, este dispositivo assume sempre o papel de NMU principal.



Figura 3.9 – NMU-S.

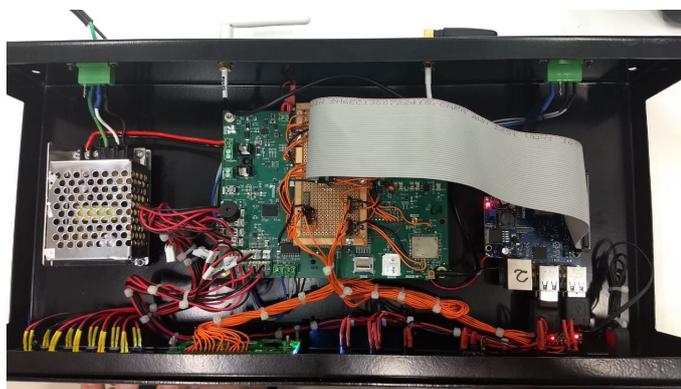


Figura 3.10 – Detalhe da montagem do NMU-S.



Figura 3.11 – NMU-TL.

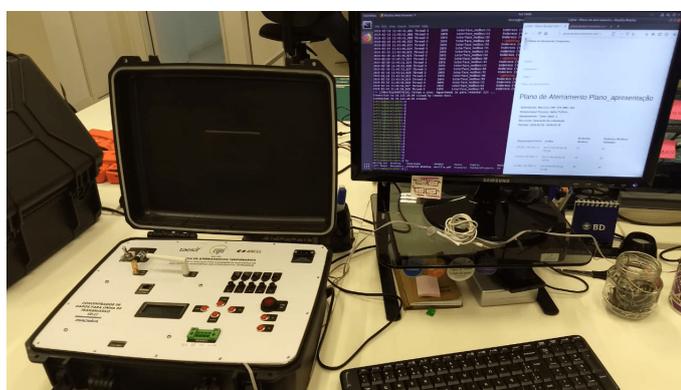


Figura 3.12 – Teste em bancada da NMU-TL.

A comunicação com o sistema supervisor ocorre por meio do protocolo MODBUS, utilizando a interface RS485. Os dados transmitidos podem ser verificados em tempo real, dependendo da tecnologia Smartmesh.

O NMU realiza a verificação do estado dos dispositivos sinalizadores cadastrados nos planos de aterramento para a execução segura da operação. Os principais componentes empregados incluem:

- Hardware - Placa NMU.
- Sistema operacional - Raspbian.
- Modbus - Freemodbus C++.
- Firmware - Python.
- Banco de dados - sqlite3.

### 3.2.2.2 NSS - versão $\beta$

Para comportar a placa eletrônica do dispositivo sinalizador NSS um projeto mecânico foi desenvolvido exclusivamente para esta aplicação. Um estojo prático e simples é utilizado para fixar o dispositivo (módulo eletrônico) aos cabos de aterramento. As Figuras a seguir oferecem uma representação visual do estojo.

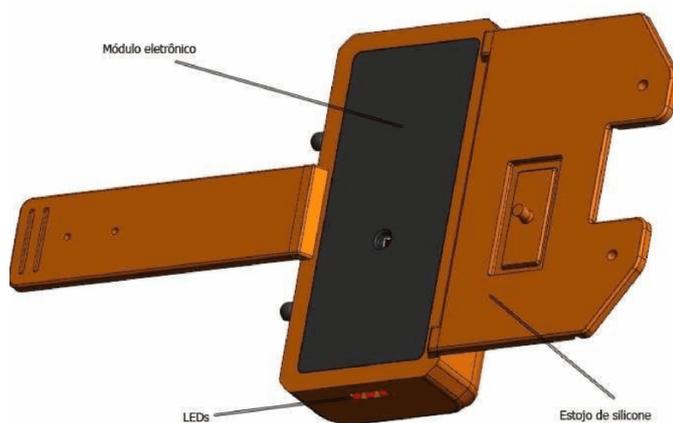


Figura 3.13 – Estojo para comportar o NSS.

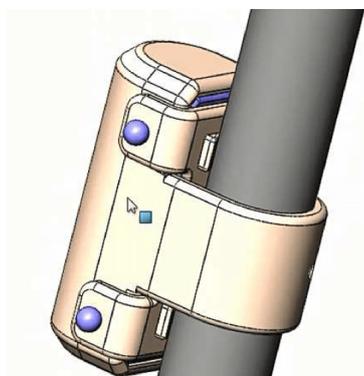


Figura 3.14 – Estojo acoplado ao cabo de aterramento - 3D.



Figura 3.15 – Estojo acoplado ao cabo de aterramento - real.

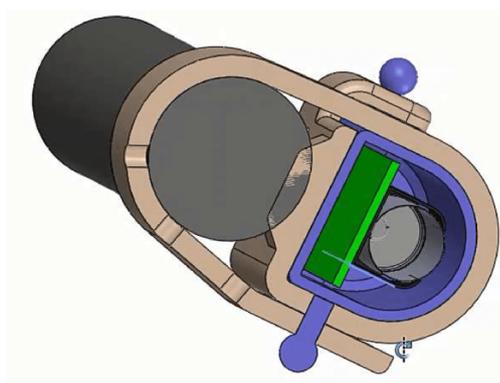


Figura 3.16 – Estojo acoplado ao cabo de aterramento - em corte.

O NSS apresenta o layout eletrônico ilustrado nas figuras a seguir:

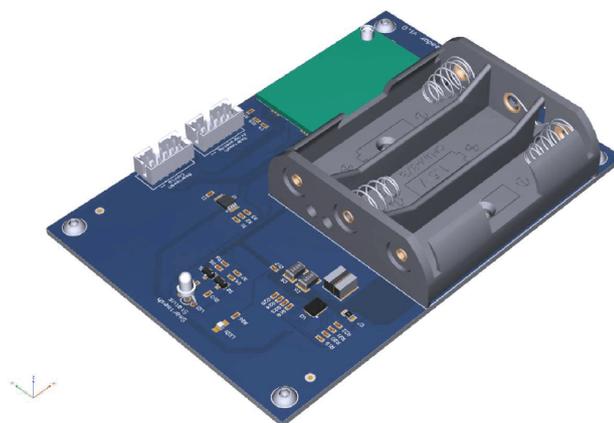


Figura 3.17 – Layout eletrônico do NSS. Vista Isométrica.

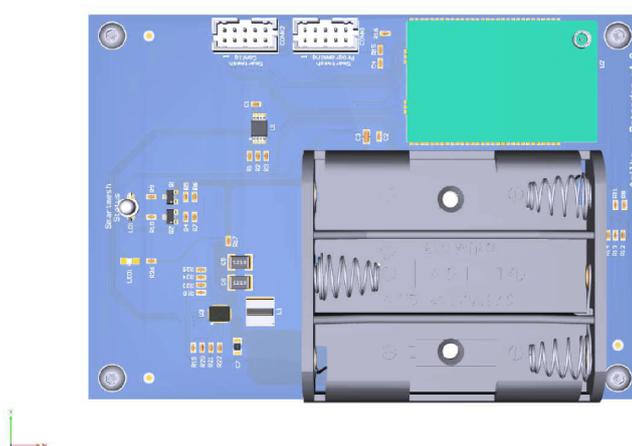


Figura 3.18 – Layout eletrônico do NSS. Vista Superior.

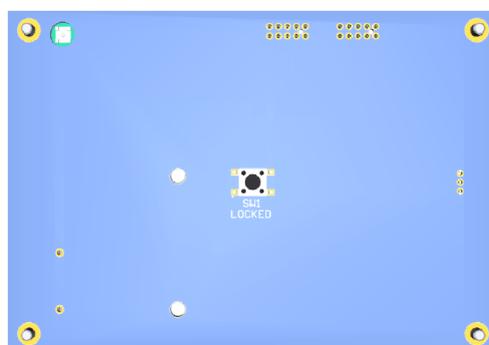


Figura 3.19 – Layout eletrônico do NSS. Vista Inferior.

Cabe salientar que o suporte da bateria mostrado foi alterado para um suporte de baterias tipo "botão" (Cr2032). O Push-Button (Botão de pressão) apresentado na vista inferior (Figura 3.19) tem a finalidade de, ao ser pressionado contra o cabo de

aterramento, indicar que o aterramento está ativo. Este método foi utilizado durante os testes em campo, uma vez que, no desenvolvimento do projeto, o foco estava na eficácia da identificação do aterramento e na comunicação entre os dispositivos. Técnicas mais avançadas de fixação do NSS nos cabos de aterramento serão concebidas e discutidas em projetos posteriores, como por exemplo, o uso de parafusos especiais.

Adicionalmente, o protótipo beta foi submetido a uma série de testes rigorosos em condições reais de operação. Essas avaliações incluíram ensaios em campo, nos quais o sistema foi implantado em ambientes simulados para verificar sua performance em situações práticas.

### 3.2.2.3 Página web

Para a versão  $\beta$  foi criada uma página web para cadastro e manutenção dos planos de aterramento. Este recurso web contribui na gestão centralizada e na atualização contínua dos planos de aterramento, proporcionando uma abordagem ágil e integrada para a otimização do sistema. As principais tecnologias empregadas para viabilizar essa funcionalidade incluem:

- Serviço - AWS E2C.
- Autenticação - OAuth basic.
- Proxy reverso - Nginx com wsgi
- DNS - Freenom.
- Linguagem - Python 3.7.
- Linguagem periféricos de comunicação - C++.
- Banco de dados - sqlite3.
- Servidor HTTP - Gunicorn.
- Controle de sessão - session package python.

No sistema web, ao acessar a opção "Cadastrar", Figura 3.20, os usuários têm a capacidade de registrar equipamentos, dispositivos NSS e NMU.



Figura 3.20 – Cadastro web.

A funcionalidade de cadastro para "Equipamento - Torre" requer a inserção do nome de referência, lado, fase e a especificação se o cadastro está associado a um equipamento ou a uma torre de transmissão. Por outro lado, a opção de registro para 'Anilha' (dispositivo NSS) exige o preenchimento do nome de referência do dispositivo sinalizador e do endereço MAC. É fundamental utilizar o endereço MAC impresso na etiqueta do dispositivo.

Quanto ao cadastramento do "Concentrador de dados"(dispositivo NMU), é necessário fornecer o nome de referência e o endereço MAC. Para acessar o endereço MAC do NMU, basta seguir para a opção "Configurações" no dispositivo físico. Adicionalmente, a opção "Importar dados" possibilita a importação automática de um volume maior de dados. Para essa última opção, a seguinte tela é mostrada:



Figura 3.21 – Tela de importação de dados.

Dentro do sistema web, ao acessar a opção "Listar", Figura 3.22, é possível visualizar de maneira organizada todos os equipamentos registrados, incluindo dispositivos NSS e cNMU que foram previamente cadastrados.



Figura 3.22 – Opção listar.

Além disso, há a possibilidade de habilitar a utilização de plano de aterramento, verificar o registro, modificar o registro, excluir o registro e importar os dados do plano de aterramento, respectivamente ilustrados através dos números de 1 a 5 na Figura 3.23.



Figura 3.23 – Funcionalidades disponíveis para planos de aterramento.

A opção listar "Equipamento - Torre" mostra o nome referência, o lado, a fase e o tipo de cada registro, além disso possibilita excluir ou atualizar o dispositivo. A opção listar "Anilha" (dispositivo NSS) mostra o nome referência e o endereço MAC de cada registro, também possibilita excluir os dispositivos. A opção listar "Concentrador de dados" (dispositivo NMU) mostra o nome referência e o endereço MAC de cada registro, possibilitando também excluir NMU. A opção listar "Plano de aterramento" mostra o nome referência, subestação, equipamento, concentrador de dados, responsável técnico e data de execução de cada registro. Permite ainda excluir, atualizar, verificar, habilitar o uso e importar o plano em formato csv.

Na aba principal "Plano de aterramento" é possível cadastrar um novo plano de aterramento e listar os planos cadastrados, Figura 3.24.



Figura 3.24 – Cadastramento e listagem de planos de aterramento.

A funcionalidade "Cadastrar" oferece uma interface para a criação de novos planos de aterramento, solicitando informações cruciais como o nome do plano, o equipamento associado, a OM (Ordem de Manutenção), o NPL (Número de Plano), o responsável técnico, uma descrição detalhada do plano, e as datas inicial e final de sua execução. Além disso, é possível vincular um NMU específico ao plano. Após a adição dessas informações, é permitido criar os pontos de aterramento, associando os equipamentos correspondentes, os quais são automaticamente listados a cada nova escolha. Para finalizar o processo, basta clicar em "Finalizar". Na opção "Listar", são apresentados de forma organizada os detalhes de cada plano de aterramento, incluindo nome de referência, subestação, equipamento, NMU, responsável técnico e data de execução. Essa funcionalidade não só possibilita habilitar a utilização do plano, como também oferece as opções de verificar, modificar, excluir e importar o plano em formato CSV.

### 3.2.3 Rotina de utilização do sistema proposto

Para garantir a implementação bem-sucedida da solução, a integração, ativação e desativação dos dispositivos NSS-ATP devem ter o mínimo impacto nos procedimentos operacionais realizados pelas equipes de intervenção. Portanto, todo o processo deve ser eficiente e direto. Nesse contexto, a equipe de manutenção é responsável por determinar os pontos específicos de aterramento e associá-los a um ID único do NSS-ATP. Esse processo pode se desdobrar de duas maneiras distintas: i) manutenção de rotina e ii) intervenções de emergência. Durante a manutenção programada, o departamento designado delimita as zonas destinadas ao aterramento e especifica os dispositivos NSS-ATP necessários para cada caso. Por outro lado, a equipe local é encarregada de identificar os

pontos de aterramento aplicáveis e selecionar os dispositivos apropriados durante intervenções de emergência. Em ambos os cenários, o tempo necessário para a configuração do dispositivo tem um impacto mínimo no andamento das tarefas de manutenção. Isso ocorre porque a documentação abrangente que detalha o número de cabos de aterramento a serem utilizados e o equipamento específico a ser aterrado é obrigatória antes da execução da tarefa. Essa prática de documentação permanece consistente, independentemente de a organização ter adotado os dispositivos de sinalização de aterramento introduzidos neste estudo. A incorporação de dispositivos NSS-ATP agora é uma parte integral desse processo de documentação. Os resultados desse processo de documentação, uma tabela enumerando os pontos de aterramento designados, são posteriormente transmitidos por meio de um serviço da web para a Unidade Gerenciadora de Rede (NMU). Após essa etapa, a equipe local tem acesso à NMU, onde o plano de aterramento apropriado é selecionado e executado. Somente nesse momento o dispositivo NSS-ATP é conectado aos cabos de aterramento temporário. O estado operacional do NSS-ATP é refletido por seu estado ativo ou inativo. No estado ativo, o NSS-ATP está conectado e envolvido ativamente com o cabo de aterramento, enquanto o estado inativo indica que o NSS-ATP não está em operação/conectado. A fixação do NSS-ATP ao cabo de aterramento utiliza, nesse primeiro momento, uma abraçadeira que tem também a função de ativar o interruptor On/Off do NSS-ATP.

A Figura 3.25 ilustra a estrutura simplificada do sistema proposto. Por meio de uma interface de usuário dedicada em uma página da web, o usuário mapeia os dispositivos e formula o plano de aterramento. Após concluir esse processo, o usuário ativa a Unidade de Gerenciamento de Rede (NMU), onde solicita e inicia a configuração. Posteriormente, a NMU interage com os dispositivos de sinalização NSS-ATP designados, conforme listado no plano, transmitindo o estado (ativo ou inativo) de cada NSS-ATP para o sistema supervisorio em tempo real. O método desenvolvido neste trabalho abrange três cenários de uso: i) ATP exclusivamente na subestação, ii) ATP exclusivamente nas linhas de transmissão e iii) ATP em ambos os locais. É essencial observar que a NMU-S também é usada no cenário ii, pois é responsável por acessar os dados armazenados no Cloud Data Hub e encaminhá-los para o sistema supervisorio.

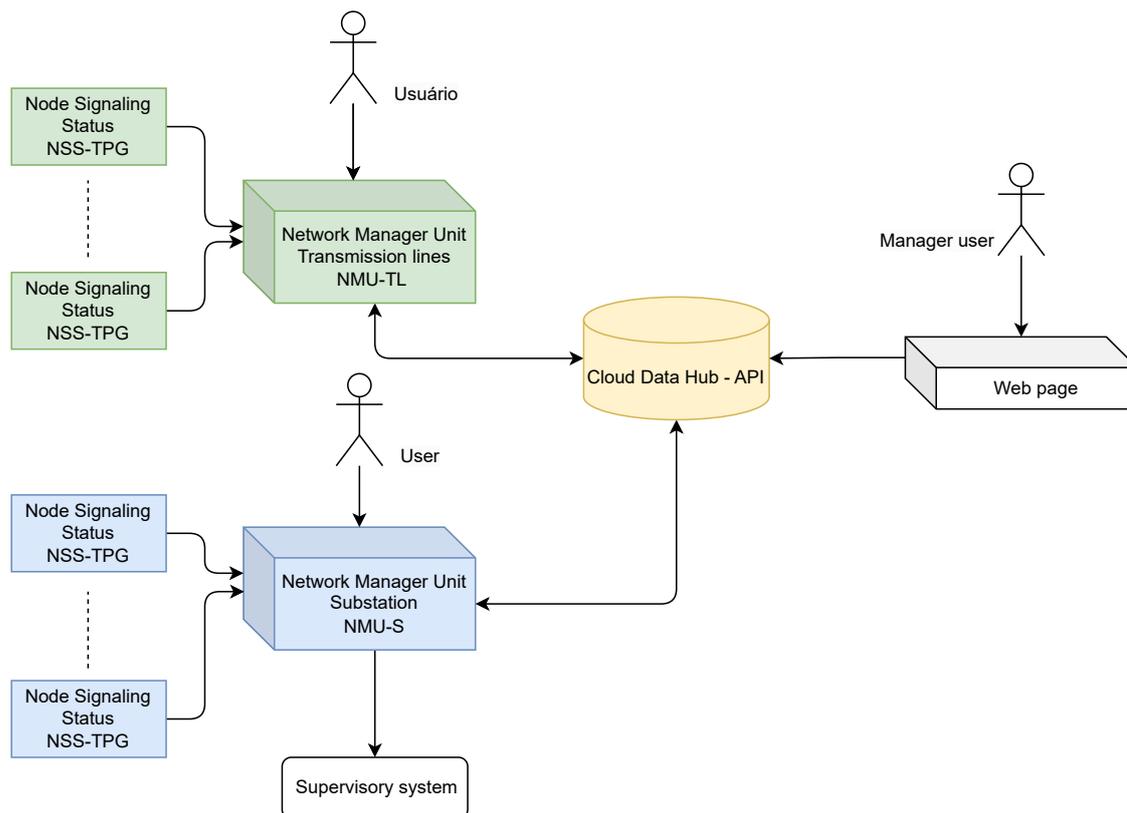


Figura 3.25 – Diagrama simplificado do sistema proposto.

A Figura 3.26 apresenta um exemplo de aplicação. Nesse cenário, uma intervenção ocorre em três locais distintos: a subestação e dois pontos ao longo da linha de transmissão. Uma vez que todos os planos são armazenados na Nuvem, cada NMU, acessada por um membro da equipe, recupera seu respectivo plano, permitindo que os dispositivos NSS-ATP sejam conectados aos cabos de aterramento. Após a conexão, os dispositivos NSS-ATP fornecem estado ativo ou inativo às suas respectivas NMUs. As unidades NMU-TL transmitem esses estados para o Cloud Data Hub, enquanto a NMU-S consulta e encaminha as informações para o sistema supervisório.

Além disso, a NMU-S recebe informações de estado dos dispositivos NSS-ATP na subestação e as repassa para o sistema supervisório. A comunicação entre as NMUs e o Cloud Data Hub utiliza principalmente a tecnologia GPRS/GSM. No entanto, em áreas sem cobertura dessas tecnologias, a equipe de manutenção pode conectar dispositivos de comunicação via satélite já utilizados pela empresa de serviços públicos, garantindo a disponibilidade de comunicação em qualquer região coberta pela empresa de serviços públicos.

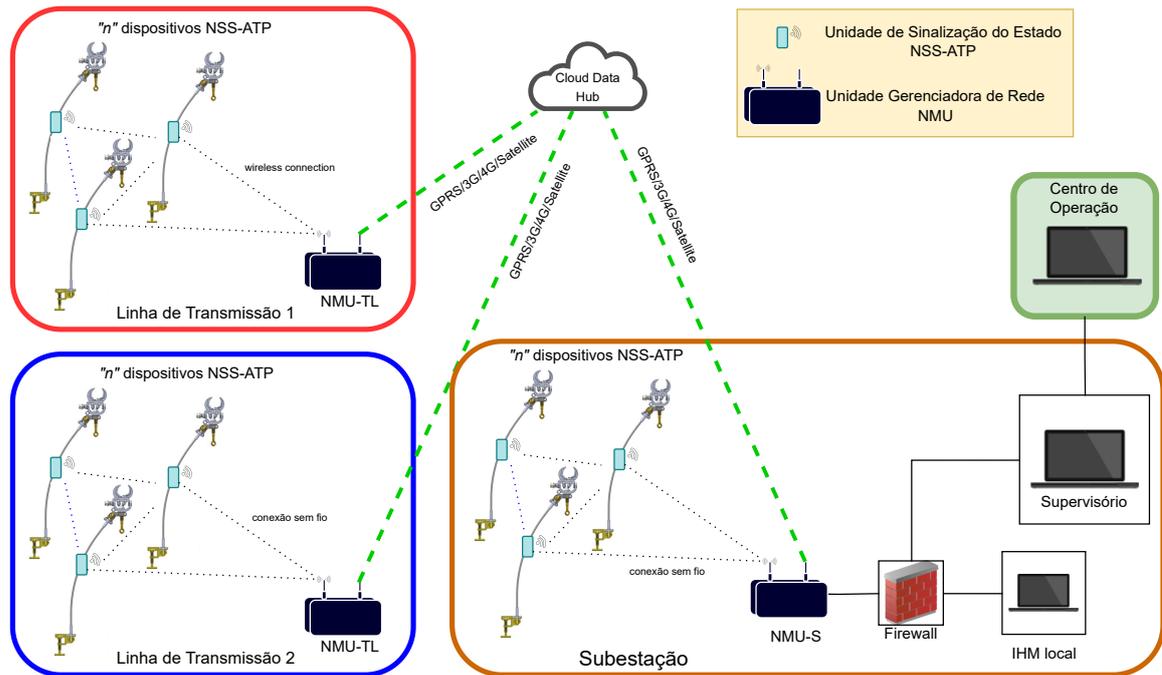


Figura 3.26 – Conexão entre os dispositivos.

### 3.2.4 Procedimento de inserção e retirada do ATP considerando o sistema proposto

Instalação do ATP com o sistema desenvolvido no projeto:

1. Identificação do equipamento ou linha de transmissão que passará por manutenção e necessitará de ATP.
2. Definição do plano de ATP utilizando uma página web específica, que faz parte da solução do projeto. Nesta página, são inseridos o plano de ATP e cadastradas as NSS, NMU-S e NMU-LT, que são dispositivos desenvolvidos no projeto e compõem o plano de ATP.
3. Teste de comunicação das NSS, NMU-S e NMU-LT. Cada NSS possui um número serial que funciona como chave de identificação do dispositivo.
4. Após os testes de comunicação aprovados, o plano de ATP e os dispositivos NSSs, NMU-S e NMU-LT são transferidos para a nuvem com os inputs necessários que darão visibilidade aos cabos de ATP.
5. Com a área isolada para a execução do serviço de ATP, o técnico responsável conecta as NSSs nos cabos correspondentes. Por exemplo, se houver 03 cabos, cada um representando uma fase (I, II, III) e cada cabo receberá uma NSS.

6. Com as NSSs conectadas aos cabos, o Centro de Operações já visualiza no supervi-sório as sinalizações dos cabos conectados. A partir desse instante, a equipe realiza o procedimento de instalação do cabo de aterramento conforme já descrito em 2.1.

Retirada do ATP com o sistema desenvolvido no projeto:

1. Após a conclusão do serviço de ATP, o operador avisa o Centro de Operações e inicia o processo de retirada dos cabos do ATP. A partir desse instante, a equipe realiza o procedimento de remoção do cabo de aterramento seguindo o procedimento descrito em 2.1.
2. Em seguida, o operador informa o Centro de Operações e retira as NSSs dos cabos, fazendo com que as sinalizações sejam removidas do supervi-sório. Após a conclusão desse processo, o operador informa ao Centro de Operações para reenergizar o equipamento, pois não haverá mais nenhum cabo conectado ao equipamento ou torre.
3. O operador remove a sinalização da área onde foi realizado o serviço de ATP e novamente informa ao Centro de Operações.
4. Todo o processo de retirada segue estritamente o

É importante destacar que o sistema desenvolvido permite a inclusão de muitos dispositivos sinalizadores, limitado apenas pela tecnologia SmartMesh (centenas de dispositivos). Esse grande volume de dispositivos possibilita que várias equipes de trabalho possam realizar procedimentos de aterramento em pontos diferentes da subestação ou linhas de transmissão simultaneamente.

## 4 Testes e resultados

Este capítulo abrange os ensaios conduzidos em uma subestação real, representando uma etapa crucial na validação e aprimoramento dos dispositivos desenvolvidos. Tanto a versão  $\alpha$  quanto a  $\beta$  foram submetidas a testes, visando avaliar a eficácia operacional em condições reais de aterramento temporário. Durante os testes, foram observados diversos cenários operacionais para garantir a capacidade dos dispositivos em lidar com situações diversas. Essa abordagem não apenas assegurou a robustez dos equipamentos, mas também permitiu a identificação de oportunidades de aprimoramento para garantir uma integração eficaz durante atividades reais de aterramento temporário.

Um trecho de uma linha de transmissão brasileira de 525 kV e uma subestação conectada a esta linha foram utilizados para a realização dos testes. As figuras a seguir mostram, respectivamente a subestação e o trecho da linha utilizada.



Figura 4.1 – Subestação de Assis/SP.

A área destacada lilás corresponde ao trecho livre fora da região chamada de energizada da SE, enquanto a área em vermelho é a área energizada utilizada nos testes.

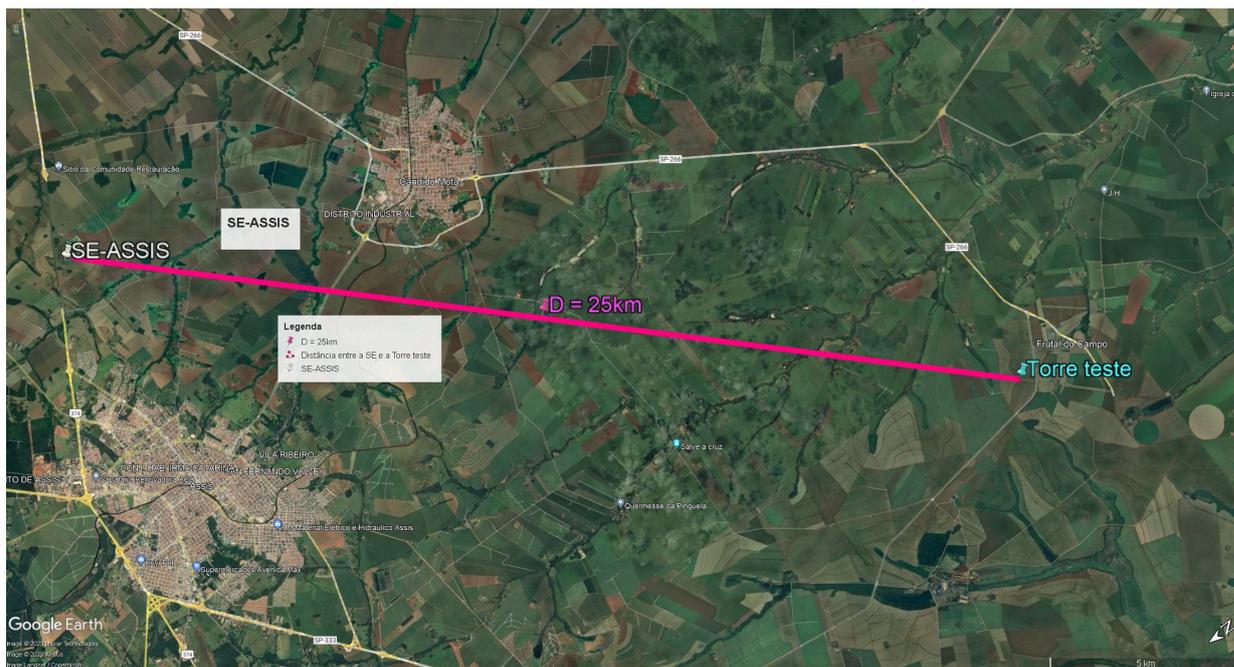


Figura 4.2 – Torre de um trecho utilizada - Assis/SP.

A torre utilizada para testes está localizada a aproximadamente 25 km da subestação de Assis.

## 4.1 Versão - $\alpha$

Os objetivos dos testes do protótipo  $\alpha$  incluíram:

- Verificar o comportamento da tecnologia de comunicação Smartmesh diante dos ruídos (interferências eletromagnéticas) presentes na subestação;
- Medir a distância máxima de comunicação entre NSS e NMU, considerando o ambiente com intensa interferência eletromagnética na subestação;

Ao longo da etapa de testes, um dos objetivos principais foi estabelecer o alcance máximo de comunicação entre o NMU e o NSS, tanto em ambientes livres quanto energizados. A Figura 4.3 ilustra os resultados derivados de dez dispositivos NSS distintos. Em intervalos de 10 metros, até uma distância de 200 metros, o NMU realizou 20 solicitações de comunicação com cada NSS. Em uma área livre (sem obstáculos físicos), a distância máxima de comunicação, onde todos os pedidos de comunicação com todos os dispositivos NSS foram bem sucedidos, foi de 170 metros. Em área energizada, a distância mais significativa alcançada foi de 90 metros.

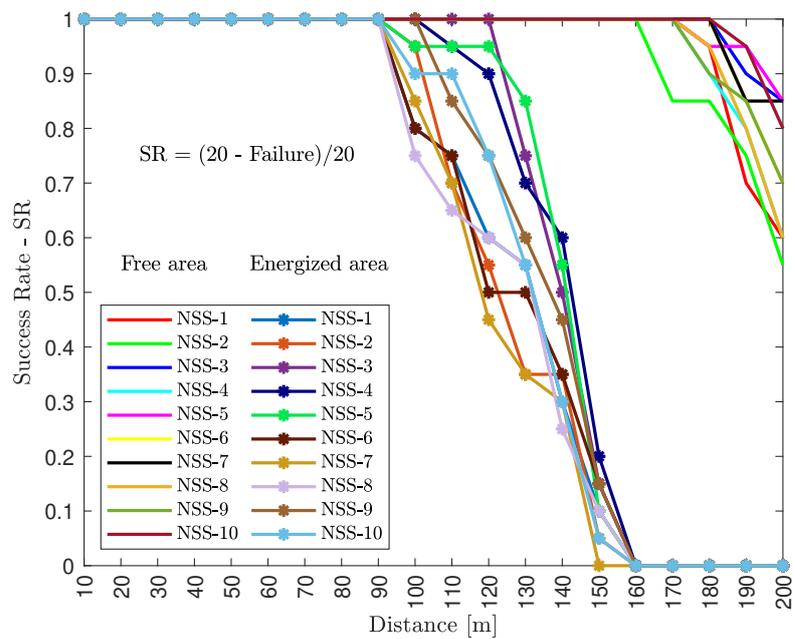


Figura 4.3 – Taxa de sucesso - área livre e energizada.

Os resultados confirmaram a hipótese inicial de que obstáculos físicos e o intenso campo eletromagnético reduziram a distância máxima de comunicação. Portanto, recomenda-se a utilização dos NSS em posições intermediárias exclusivamente como roteadores, contribuindo para a criação de uma malha SmartMesh. Isso assegura que as informações provenientes de um NSS mais distante possam ser recebidas de forma confiável pelo NMU. A criação da malha SmartMesh proporciona a cada dispositivo caminhos redundantes, permitindo superar problemas de comunicação decorrentes de interferência ou obstrução física. Em caso de falha na transmissão de dados em um determinado caminho, os nós da rede automaticamente buscam alternativas disponíveis, utilizando canais diferentes. Ao contrário de outras tecnologias mesh, não é necessária nenhuma redescoberta de caminho demorada e onerosa.

É relevante mencionar que a altura dos dispositivos (NMU e NSS) não se mostrou um fator que altere a confiabilidade dos resultados.

## 4.2 Versão - $\beta$

O segundo ensaio em campo representa a evolução do protótipo  $\alpha$ . Após as melhorias implementadas, como adequação do procedimento de aterramento e alteração do painel do NMU, o protótipo  $\beta$  passou por testes práticos em campo, abrangendo subestações e torres de transmissão. Além disso, foi integrado a uma versão emulada do sistema supervisor, simulando as condições operacionais em um computador.

A Figura 4.4 representa a disposição da Unidade de Monitoramento de Rede (NMU) na área energizada, destacando a categorização das regiões em relação à comunicação. A escolha da localização da NMU para este teste foi deliberadamente feita na área com maiores obstáculos físicos entre a NMU e os dispositivos NSS.

Na representação, a região verde indica onde a comunicação atingiu 100% de sucesso ( $SR = 1$ ), enquanto a área amarela evidencia falhas ocasionais ( $0 < SR < 1$ ). Por outro lado, a área vermelha sinaliza que nenhuma tentativa de comunicação direta foi bem-sucedida ( $SR = 0$ ).

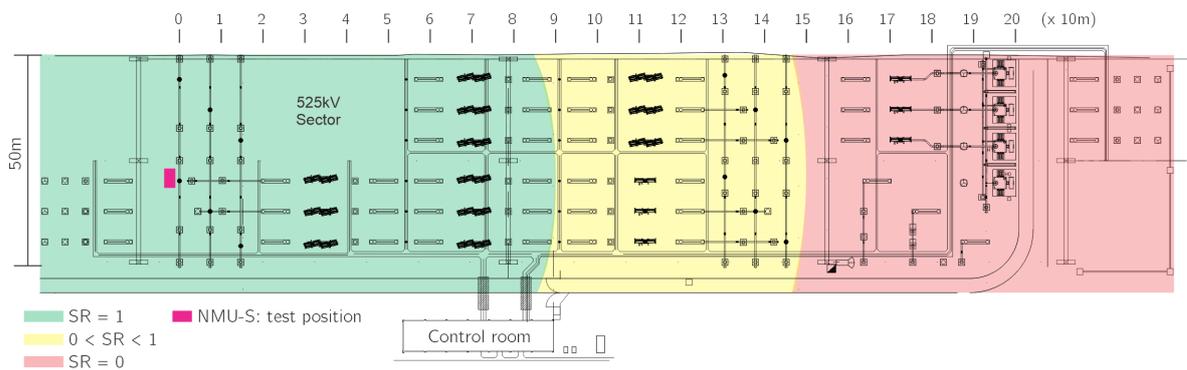


Figura 4.4 – Subestação real - testes de distância máxima de comunicação (área energizada).

Por fim, foi determinada a posição final NMU-S, conforme representado na Figura 4.5, de tal forma que abrangesse a maior quantidade de equipamentos dentro da área de comunicação e ao mesmo tempo fosse o mais próximo da sala de controle. A área destacada em azul indica onde um dispositivo NSS pode manter uma comunicação contínua e direta com a NMU. Qualquer local além desse limite exige a configuração de um NSS adicional como repetidor em um ponto intermediário. É relevante observar que, embora o alcance máximo de comunicação seja de 90 metros, o departamento de manutenção geralmente opta por distâncias menores ao implementar um repetidor NSS. Essa estratégia visa assegurar uma comunicação ainda mais consistente e confiável no ambiente operacional.

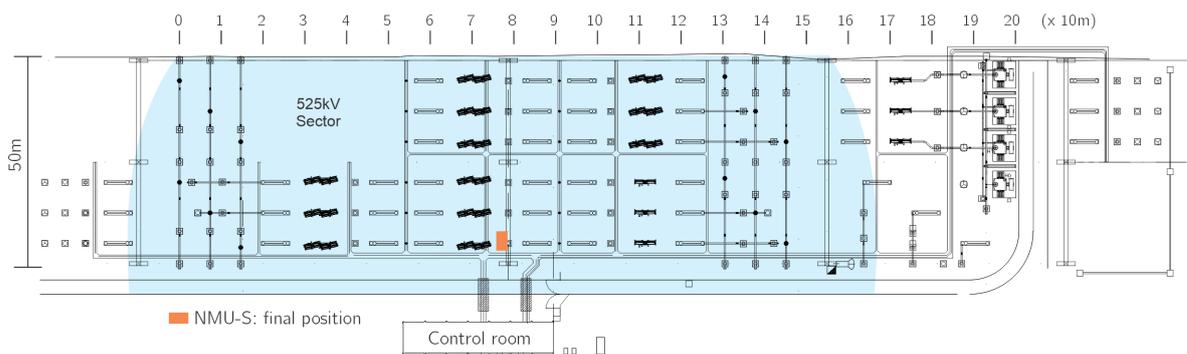


Figura 4.5 – Posição final da NMU-S e raio de comunicação confiável ( $SR = 1$ ).

Na posição final, o NMU-S foi alocado em um rack dentro da área energizada, Figuras 4.6 e 4.7. A comunicação efetiva entre o NMU e o sistema supervisorio foi estabelecida por meio de uma conexão de fibra ótica. O NMU instalado na área energizada desempenhou o papel crucial de receber informações não apenas dos dispositivos NSS internos à subestação, mas também dos NSS posicionados na torre de transmissão (linhas de transmissão).



Figura 4.6 – Instalação do NMU-S em rack dentro da área energizada da SE.



Figura 4.7 – NMU-S instalado em rack dentro da área energizada da SE.

A Figura 4.4 retrata a posição da NMU na área energizada e como as regiões foram categorizadas em relação à comunicação. A localização da NMU para este teste foi escolhida como o local com maiores obstáculos físicos entre a NMU e os dispositivos NSS-TPG. A parte verde indica onde a comunicação alcançou 100% de sucesso ( $SR = 1$ ), enquanto a área amarela apresentou falhas ocasionais ( $0 < SR < 1$ ). A área vermelha significa que nenhuma tentativa de comunicação direta foi bem-sucedida ( $SR = 0$ ).

#### 4.2.1 Teste Operacional

Testes adicionais foram realizados após confirmação da robustez do sistema no ambiente da subestação, incluindo intervenções ao longo da linha de transmissão (LT). As Figuras 4.8 e 4.9 retratam como o Aterramento de Proteção Temporário é gerenciado de forma eficiente dentro do sistema de supervisão em subestações e linhas de transmissão.

A tela principal do sistema supervisório apresenta o diagrama unifilar da subestação, delineando claramente as linhas de transmissão conectadas. Sempre que ocorre uma operação de aterramento temporário na subestação, o sistema imediatamente destaca o ponto de inserção do ATP correspondente com um ícone de terra, complementado por uma letra de cor verde significando a associação de fase, conforme mostrado na Figura 4.8. Neste exemplo há uma intervenção simultânea em dois disjuntores. Especificamente, o disjuntor 4552-53 é equipado com ATPs nas três fases e em ambos os lados, refletindo a configuração do disjuntor 4552-55. Em contrapartida, o disjuntor 4552-54 permanece inalterado, evidente pela ausência de qualquer destaque no símbolo de aterramento.

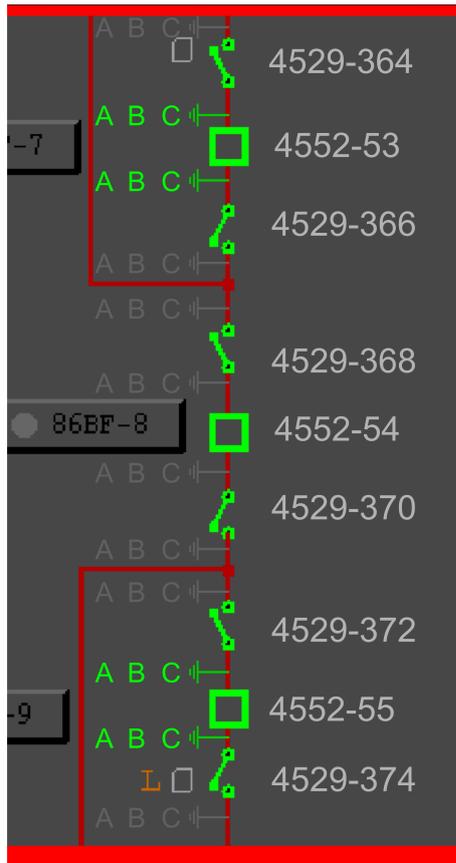


Figura 4.8 – ATP - manutenção em disjuntor.

No entanto, quando um ATP é implantado dentro de uma seção da linha de transmissão, um botão visível de "Torres", acompanhado por um ícone de terra, chama a atenção. Ativar este botão abre uma janela com informações completas sobre o estado de aterramento das torres nas linhas de transmissão, conforme demonstrado na Figura 4.9. Nesta ilustração, a torre ID T4010 está marcada com um aterramento temporário ativo em todas as três fases.

The highlighted symbol indicates TPG in transmission tower

Name	ID	State	Last Update
TOWER SUBSTATION-1 SIDE  TEMPORARY GROUNDING PHASE A	T4010	ATM. TOWER. SUBSTATION-1. A	13/04/2023 10:14:16
TOWER SUBSTATION-1 SIDE  TEMPORARY GROUNDING PHASE B	T4010	ATM. TOWER. SUBSTATION-1. B	13/04/2023 10:14:16
TOWER SUBSTATION-1 SIDE  TEMPORARY GROUNDING PHASE C	T4010	ATM. TOWER. SUBSTATION-1. C	13/04/2023 10:14:16

Phase with TPG      Transmission Tower ID      TPG State

Figura 4.9 – ATP - manutenção em torre de transmissão.

Durante esta fase de teste, todas as intervenções foram conduzidas simultane-

amente, alinhando-se ao cenário representado na Figura 3.26. Os dispositivos NSS foram inseridos e removidos repetidamente para avaliar potenciais problemas de comunicação. Ao longo desses testes, o sistema demonstrou consistência ao fornecer informações precisas e confiáveis sobre a presença ou ausência de um NSS na posição designada. Esses resultados validam a confiabilidade do sistema, desempenhando um papel importante no fortalecimento das medidas de segurança durante as operações de aterramento temporário.

A solução proposta efetivamente minimiza práticas inseguras, proporcionando insights em tempo real e estabelecendo uma comunicação confiável. Isso contribui significativamente para a execução segura de tarefas críticas de manutenção no sistema de energia. A reenergização de um dispositivo é proibida se um ATP ativo permanecer no local. Além disso, nos casos em que um ATP ativo não seja detectado durante uma manutenção previamente agendada, a equipe de manutenção remota tem a prerrogativa de solicitar uma avaliação dos motivos que impedem o início da manutenção.

## 5 Conclusão

O aterramento temporário desempenha um papel fundamental na segurança das equipes que realizam a manutenção do sistema elétrico de potência. Sua importância reside em garantir a segurança dos trabalhadores em casos de energização acidental do circuito e em relação aos diferentes tipos de indução presentes. O procedimento limita a tensão de choque nos trabalhadores a níveis seguros e permite uma rápida atuação da proteção para desligar o circuito, reduzindo o tempo de exposição ao risco. Portanto, é essencial saber se os cabos de aterramento estão conectados corretamente nos pontos pré-definidos da subestação.

Neste contexto, o presente trabalho propôs um sistema de gerenciamento de aterramento temporário que utiliza dispositivos eletrônicos para indicar a presença de aterramento temporário em um ponto específico da subestação. Essas informações estão disponíveis tanto para a equipe local quanto para a supervisão remota, melhorando significativamente a segurança dos trabalhadores e evitando desligamentos indevidos causados por esquecimento de remoção dos cabos de aterramento.

Foram realizados testes em uma subestação real, demonstrando a robustez da tecnologia de comunicação SmartMesh adotada, que se mostrou resistente a ruídos (interferências eletromagnéticas) e obstáculos físicos. Isso indica o potencial dos dispositivos no contexto da segurança durante o uso de aterramentos temporários. Ao integrar os dispositivos eletrônicos com o sistema de gerenciamento, é possível monitorar de forma eficiente e confiável o status dos aterramentos temporários, garantindo a conformidade com os procedimentos de segurança e reduzindo os riscos para os trabalhadores. A tecnologia SmartMesh utilizada na comunicação dos dispositivos se mostrou adequada para ambientes desafiadores, garantindo a confiabilidade das informações transmitidas.

É importante ressaltar que o uso desses dispositivos eletrônicos não se limita apenas às transmissoras de energia, mas pode ser aplicado em diversos contextos dentro do setor elétrico. Empresas de geração, distribuição e outras áreas da indústria elétrica também podem se beneficiar dessas soluções. A integração com o sistema supervisor possibilita uma visão mais abrangente e centralizada do estado dos aterramentos temporários em todo o sistema elétrico, promovendo uma gestão mais eficiente e segura. Dessa forma, a utilização desses dispositivos e a integração com o sistema supervisor representam um avanço significativo no monitoramento e controle dos aterramentos temporários. Essas soluções contribuem para a elevação da segurança, minimizando riscos e garantindo a integridade dos trabalhadores e equipamentos envolvidos nas operações do

sistema elétrico de potência. Além disso, proporcionam uma maior eficiência operacional e aprimoramento contínuo dos procedimentos de aterramento temporário, resultando em um sistema elétrico mais confiável e seguro como um todo.

## Perspectivas Futuras

Como trabalhos futuros a serem realizados, destaca-se a necessidade de ensaios em laboratório certificado para atestar a robustez dos equipamentos frente as perturbações eletromagnéticas. Também, faz-se necessário o desenvolvimento e aprimoramento do invólucro dos dispositivos sinalizadores, ou seja, melhoramento mecânico e de material, visando garantir toda a proteção contra choques mecânicos e intempéries.

Por fim, destaca-se a possibilidade de melhoria no sistema web de cadastramento das operações de manutenção e a inclusão de uma trava mecânica no cabo de aterramento, garantindo que o operador não consiga inverter a ordem dos passos de conexão do aterramento temporário.

## 6 Trabalhos submetidos

Durante a execução do projeto foram publicados/submetidos os seguintes trabalhos em congressos e simpósios nacionais e internacionais.

### 6.1 Trabalho publicados em congressos e simpósios

- de ARAUJO, R. A.; ROSA, A. S. ; BARNABE, A. B. ; ALVES, E. F. . Dispositivo para monitoramento em tempo real do estado da conexão do aterramento temporário em subestações de energia e linhas de transmissão. In: XVIII ERIAC - Encontro Regional Ibero-Americano do Cigré, 2019, Foz do Iguaçu. XVIII ERIAC DÉCIMO OITAVO ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE, 2019.
- de ARAUJO, R. A.; CALLEGARI, R. H. M.; PISSOLATO, JOSE ; ROSA, A. S.; ALVES, E. F. . SmartMesh technology used for real-time monitoring of temporary grounding connection state during maintenance routine in substations. In: IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2022, Denver, CO, USA. 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2022.

### 6.2 Trabalho aceito em revista

- de Araujo, R. A.; Santa Rosa, A.; Azevedo, W. L. M., Pissolato Filho, J.. Dynamic monitoring of temporary protective grounding state in power system routines. e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, v. 7, p. 100431, 2024.

# Referências

- 1 DINIZ, W. E. *Aterramento temporário para linhas de transmissão: análise da segurança humana*. Dissertação (Mestrado) — PUC-MINAS, 2008. Citado na página 14.
- 2 PRATT, A. Prevention of electrical accidents with safe personal protective bonding and earthing. University of Southern Queensland, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 3 WHITE, J. R.; JAMIL, S. Do's and don'ts of personal protective grounding. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 52, n. 1, p. 677–683, 2016. Citado na página 14.
- 4 LI, X.; ZHANG, J.; SONG, J.; HAN, X. Design of security management system based on rfid temporary grounding wire borrowing. In: *2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 832–836. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 5 PODA, A. B.; RILEY, C. M.; PERKEL, J.; HAMPTON, R.; PATEL, S.; LANCASTER, T. A simulation model to analyze current split distribution of multiple temporary protective grounds (tpgs). In: *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 6 ATWATER, P. L.; DEHAAN, J. M. Temporary protective ground cable impedance k-factors for predicting worker touch voltage—basic single-point grounding (1 of 2). *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, v. 3, n. 4, p. 179–184, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 7 IEEE Guide for Protective Grounding of Power Lines. *IEEE Std 1048-2016 (Revision of IEEE Std 1048-2003)*, p. 1–54, 2016. Citado na página 14.
- 8 IEEE Guide for Temporary Protective Grounding Systems Used in Substations. *IEEE Std 1246-2020 (Revision of IEEE Std 1246-2011)*, p. 1–70, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.
- 9 DREWISKE, G. An effective means of tracking temporary safety grounds. In: *2022 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–3. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 10 LEBLANC, S. Are you safe with your temporary protective grounds? (case study). In: *2014 IEEE IAS Electrical Safety Workshop*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 11 MUELLER, R.; RICHARDS, E. Temporary protective grounding of distribution circuits-revisit ten years later. In: *The Proceedings of the Twenty-First Annual North American Power Symposium*. [S.l.: s.n.], 1989. p. 270–280. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 12 FACTORS in sizing protective grounds-IEEE engineering in the safety, maintenance and operation of lines subcommittee report. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 3, p. 1549–1569, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.

- 13 KOLCIO, N.; BROWN, K.; PAGE, W. Electrical resistance data from fault tests for 2/0 and 4/0 temporary grounding jumpers. In: *2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2003. 2003 IEEE ESMO*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 128–133. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 14 JUNIOR, F. de C. Temporary grounding: considerations on the electrical and mechanical sizing of the set (in portuguese). Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 15 THOMAS, J. R. *In-service testing of temporary grounding jumper assemblies using time domain reflectometry*. Tese (Doutorado) — University of Kansas, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 16 LEE, C.-H.; HSU, T.-C. Test results of grounding methods on distribution transformers during maintenance of overhead distribution lines. In: *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 807–812 vol.2. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 17 LEE, C.-H.; HSU, T.-C. Evaluation of grounding schemes used for maintenance of overhead distribution lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 2211–2218, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 18 LEE, C.-H.; HSU, T.-C. Ground method analysis of maintained distribution transformers considering reverse energy from end users. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 2, p. 831–836, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 19 WALLACE, K.; GARRETT, L.; PATEL, S. Protective grounding methods and requirements on distribution line wood pole construction. In: *ESMO 2006 - 2006 IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 20 ATWATER, P. L.; DEHAAN, J. M. Temporary protective ground cable impedance k-factors for predicting worker touch voltage—bracket grounding (2 of 2). *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, v. 3, n. 4, p. 185–190, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 21 ZHANG, B.; LI, Y.; HUANG, H.; WANG, X.; DONG, Z.; ZHANG, Z. Detection and location method of distribution network grounding line based on loop impedance method. In: *2021 4th International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 40–45. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 22 CHENG, L. F.; YIN, L. F.; JIANG, J.; YU, T. Temporary grounding lines detection method for distribution network and its emtdc simulation. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, v. 971, p. 1361–1367, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- 23 THOMAZELLA, R.; ANNA, C. J.; MARCHI, M.; IANHES, J. M.; NETO, J. B.; CASTANHO, J. E.; DOTTO, F. R.; SANTOS, D. J. D. Dispositivo microcontrolado para detecção de aterramento móvel temporário (amt) instalados na subestação. Citado na página 16.
- 24 DEVICES, A. *SmartMesh IP application notes*. [S.l.]: Datasheet, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

- 
- 25 BRUN-LAGUNA, K.; DIEDRICHS, A. L.; DUJOVNE, D.; TAFFERNABERRY, C.; LEONE, R.; VILAJOSANA, X.; WATTEYNE, T. Using smartmesh ip in smart agriculture and smart building applications. *Computer Communications*, Elsevier, v. 121, p. 83–90, 2018. Citado na página 21.
- 26 WATTEYNE, T.; DOHERTY, L.; SIMON, J.; PISTER, K. Technical overview of smartmesh ip. In: *2013 Seventh International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2013. p. 547–551. Citado na página 22.
- 27 HUYNH, N. T.; ROBU, V.; FLYNN, D.; ROWLAND, S.; COAPES, G. Design and demonstration of a wireless sensor network platform for substation asset management. *CIREC-Open Access Proceedings Journal*, IET, v. 2017, n. 1, p. 105–108, 2017. Citado na página 22.