

IMPACTO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO COMPROMETIDOS DE REDES ELÉTRICAS SOB DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Douglas Gabriel Dos Santos e Silva¹ e Victor Emanuel Correia De La Rosa²

RESUMO

A análise da integridade dos sistemas de aterramento constituiu-se como um fator determinante na engenharia elétrica, sendo essencial para garantir a proteção de ativos e a conformidade com os índices de qualidade da energia elétrica, especialmente em eventos transitórios críticos como descargas atmosféricas. Reconhecendo o aterramento como elemento vital para a segurança e estabilidade operativa, este trabalho apresenta um estudo sobre os impactos da degradação da malha de terra na rede elétrica, com o objetivo de demonstrar, por meio de modelagem computacional, os riscos associados à elevação da impedância de aterramento. A metodologia empregada incluiu a simulação em ambiente *MATLAB/Simulink* de dois cenários distintos — um sistema com aterramento adequado e outro com inserção de resistência espúria entre neutro e terra — submetidos a correntes de surto. Os resultados obtidos evidenciaram que a deficiência no escoamento das correntes para o solo resulta em picos elevados de tensão, contrastando com a estabilidade observada no cenário normativo. Dessa forma, as simulações reforçam a importância de um sistema de aterramento projetado e mantido adequadamente, oferecendo uma comprovação empírica da necessidade de mecanismos eficientes para a preservação da integridade dos equipamentos e da garantia da qualidade da energia elétrica.

Palavras-chave: aterramento elétrico; qualidade de energia; descargas atmosféricas; transitórios elétricos; simulação computacional.

¹ Unisenai; andrenagaokatec@gmail.com

² Unisenai; victor.rosa@sistemafiep.org.br

IMPACT OF COMPROMISED GROUNDING SYSTEMS ON ELECTRICAL NETWORKS UNDER ATMOSPHERIC DISCHARGES.

ABSTRACT

The analysis of grounding system integrity constitutes a determining factor in electrical engineering, being essential to ensure asset protection and compliance with power quality indices, especially during critical transient events such as atmospheric discharges. Recognizing grounding as a vital element for operational safety and stability, this work presents a study on the impacts of grounding grid degradation on the electrical network, aiming to demonstrate, through computational modeling, the risks associated with increased grounding impedance. The methodology employed included the simulation in a MATLAB/Simulink environment of two distinct scenarios — a system with effective grounding and another with the insertion of spurious resistance between neutral and ground — subjected to surge currents. The results obtained evidenced that the deficiency in current dissipation to the soil results in high voltage peaks, contrasting with the stability observed in the normative scenario. Thus, the simulations reinforce the importance of an adequately designed and maintained grounding system, offering empirical evidence of the need for efficient mechanisms to preserve equipment integrity and guarantee power quality.

Key words: electrical grounding; power quality; lightning discharges; electrical transients; computer simulation.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a busca pela elevação da qualidade da energia elétrica tem se intensificado em função do avanço tecnológico e da crescente dependência de sistemas eletrônicos sensíveis. De acordo com a ANEEL (2023) no Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) , a qualidade de energia é caracterizada por três pilares fundamentais:

continuidade, tensão e frequência. Especificamente, a qualidade do produto "tensão" refere-se à conformidade com padrões de amplitude, forma de onda e variações permitidas, visto que desvios significativos nesses parâmetros podem resultar no mau funcionamento ou em danos severos a equipamentos (ANEEL, 2023).

Nesse contexto, um sistema de aterramento eficiente é pressuposto básico para a manutenção da qualidade de energia. Este consiste na conexão de condutores de baixa impedância entre circuitos, equipamentos e a terra, influenciando diretamente a estabilidade da tensão de referência. Conforme aponta Fluke (2025), o dimensionamento e a manutenção adequada do aterramento são imperativos para a operação segura, devendo o sistema suportar correntes de falta elevadas sem comprometer sua integridade ao longo do ciclo de vida da instalação.

A literatura técnica ressalta que um aterramento comprometido é capaz de induzir oscilações de tensão que prejudicam a potência ativa e reduzem a eficiência de maquinários industriais. Simultaneamente, pode ocorrer um aumento indesejado na potência reativa, degradando o fator de potência e elevando a potência aparente do sistema, o que resulta em perdas elétricas acentuadas (FLUKE, 2025). Adicionalmente, a Token Engenharia (2025) observa que a instabilidade energética em operações industriais acarreta paradas não programadas, redução da vida útil de componentes e aumento dos custos operacionais. Sob a ótica da segurança, falhas no escoamento de correntes podem provocar incêndios e acidentes graves, pondo em risco a integridade física de trabalhadores e o patrimônio das instalações.

Para mitigar tais riscos, a simulação computacional consolidou-se como uma ferramenta indispensável na engenharia elétrica, especialmente para o projeto de subestações e sistemas de alta tensão. Essa prática permite a previsão de tensões de passo, toque e transferência, em conformidade com a ABNT NBR 15749:2019 e a IEEE Std 80:2013. A precisão dessas análises está estritamente vinculada à modelagem fidedigna do solo e ao uso de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite Element Method*) e o Método dos Momentos (MoM – *Method of Moments*).

Atualmente, o mercado dispõe de simuladores avançados, como o (*Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis*), amplamente reconhecido por sua precisão na modelagem eletromagnética e na análise de malhas de aterramento, e o *ETAP Ground Grid*, bastante utilizado em projetos de subestações, possibilitam simular o comportamento do solo, calcular resistências de aterramento e avaliar potenciais de toque, passo e transferência. Tais tecnologias permitem antecipar riscos e garantir à conformidade normativa antes da implementação física. Alinhado a essa tendência, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar, por meio de simulações em ambiente *MATLAB/Simulink*, as consequências de um aterramento comprometido na qualidade da energia elétrica, identificando as causas de anomalias e propondo diretrizes para a prevenção de problemas técnicos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Moreno (s.d., p. 4), “o termo aterramento se refere à terra propriamente dita ou a uma grande massa que se utiliza em seu lugar”. O objetivo de aterrar o sistema é regular a tensão em relação à terra, permitindo que, em caso de uma descarga indesejada, essa sobretensão seja conduzida ao ponto de menor resistência — neste caso, à terra.

Um sistema de aterramento bem dimensionado pode evitar a queima de equipamentos, bem como proteger os usuários contra choques elétricos. Embora sua aplicação seja obrigatória tanto em ambientes residenciais quanto industriais, sua importância muitas vezes é subestimada. O aterramento pode ser classificado em três tipos: funcional, de proteção e de trabalho, cada um com finalidades específicas dentro do sistema elétrico.

2.1 Aterramento

O sistema de aterramento representa um componente crítico para a segurança operacional e o desempenho técnico de instalações elétricas, tendo como finalidade principal estabelecer um referencial de potencial elétrico com o solo. Essa configuração permite a condução controlada de correntes de fuga ou de surtos transitórios provenientes de descargas atmosféricas, falhas de isolamento ou desequilíbrios sistêmicos. De acordo com a NBR 5410 (2004), a correta implementação deste sistema é obrigatória tanto em instalações residenciais quanto industriais, visando garantir a integridade de dispositivos eletroeletrônicos, minimizar riscos de choques elétricos e assegurar a atuação eficiente de dispositivos de proteção, como disjuntores e dispositivos diferenciais residuais (DR).

Sob a ótica normativa, o aterramento pode ser classificado conforme sua aplicação funcional, de proteção ou de trabalho. O aterramento funcional garante a operação correta do sistema, permitindo esquemas de aterramento distintos como o TT, onde o neutro não é ligado diretamente ao aterramento, ou as variações do sistema TN (TN-S, TN-C e TN-C-S), que definem diferentes níveis de separação ou combinação entre os condutores de neutro e de proteção. Já o aterramento de proteção foca na ligação das massas à terra para mitigar riscos de contatos diretos, enquanto o aterramento de trabalho possui caráter provisório, sendo restritos a manutenções em partes energizadas.

Para assegurar que o condutor de proteção suporte as solicitações térmicas durante um evento de falta, seu dimensionamento deve considerar a condição de curto-circuito. Matematicamente, a seção transversal do condutor S é determinada pela integral de Joule, expressa pela relação:

$$\int i^2 \cdot dt \leq K^2 \cdot S^2. \quad (1)$$

Onde:

i é a corrente de curto-circuito instantânea [A];

dt é a taxa de variação do tempo de duração do curto [s];

K é o coeficiente térmico do material [$A \cdot s^{1/2} / mm^2$];

S é a seção transversal do condutor [mm^2].

O condutor terra tem que suportar a corrente de curto-circuito, no mínimo, até que o dispositivo de proteção atue. Para atuações de dispositivos de proteção em tempos inferiores a cinco segundos, a expressão (1) simplifica-se para (2)

$$I^2 \cdot t \leq K^2 \cdot S^2. \quad (2)$$

Onde:

I é a corrente de curto-circuito [A].

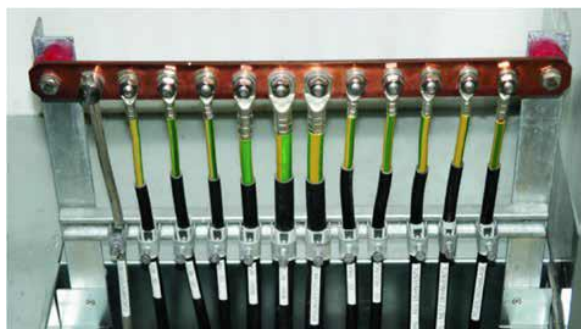
Além do escoamento da corrente, a equipotencialização surge como conceito fundamental para igualar o potencial elétrico entre elementos condutores distintos, prevenindo diferenças de potencial perigosas. Segundo a NBR 5410, este procedimento pode ser realizado de forma principal, abrangendo toda a edificação, ou localmente. O Barramento de Equipotencialização Principal (BEP) apresentado na Figura 1 atua como o ponto central desta interligação, conectando os elementos de proteção ao subsistema de aterramento através de condutores de baixa impedância e trajetórias retilíneas, conforme preconizado pela NBR 5419:2015.

A eficácia desse sistema depende diretamente dos eletrodos de aterramento, geralmente hastes de aço ou cobre de alta condutividade, cuja função é redirecionar correntes indesejadas para o solo através do caminho de menor resistência, conforme apresentado na Figura 2. Contudo, a resistência global do sistema é influenciada por variáveis como o diâmetro, a quantidade, a geometria e, primordialmente, a profundidade de inserção dos eletrodos, que deve respeitar o limite mínimo de 2,5 metros em contato com o solo conforme normas internacionais como o *National Electrical Code* (1987).

Historicamente, as diretrizes brasileiras evoluíram de uma exigência rígida de resistência de terra inferior a 10Ω , estabelecida pela NBR 5419:1977, para uma abordagem mais sistêmica na versão de 2015 da mesma norma. Atualmente, reconhece-se que o arranjo geométrico e as dimensões do subsistema de aterramento são mais cruciais para a dispersão de correntes de alta frequência (como

raios) do que o valor isolado da resistência em baixa frequência. Embora o valor de 10Ω permaneça como uma recomendação para reduzir gradientes de potencial e riscos de centelhamento. A prioridade técnica reside no aprimoramento da geometria do sistema em consonância com a topologia e a resistividade específica do solo local.

Figura 1 – Barramento de Equipotencialização Principal



Fonte: O Setor Elétrico (2021)

Figura 2 – Haste de Aterramento



Fonte: Fluke (2025)

2.1 Qualidade de energia

A qualidade da energia elétrica está intrinsecamente relacionada à conformidade do fornecimento energético em relação aos parâmetros normativos que asseguram o funcionamento adequado das cargas conectadas (MEMT, 2025). De forma abrangente, a degradação da qualidade de energia manifesta-se por meio de

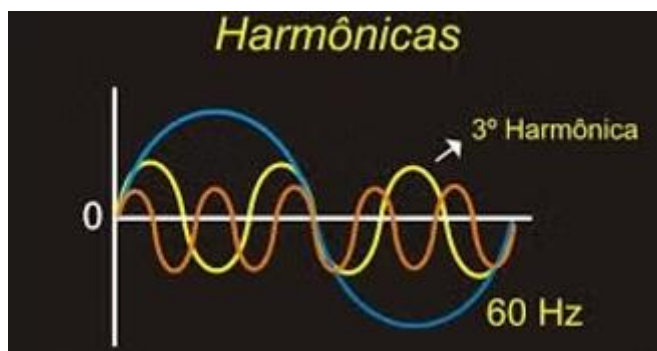
distúrbios que afetam a magnitude, a forma de onda ou a frequência da tensão e da corrente, resultando em falhas operacionais ou danos em máquinas elétricas. Conforme aponta Paulillo (2025), a estabilidade de uma barra do sistema elétrico pode ser adversamente afetada por uma ampla diversidade de fenômenos eletromagnéticos, entre os quais se destacam os transitórios. Estes são caracterizados por alterações repentinas de curta duração, sendo classificados como impulsivos, quando originados por fenômenos atmosféricos como raios, ou oscilatórios, decorrentes de manobras de chaveamento na rede.

Adicionalmente, as variações de tensão de curta duração, classificadas como instantâneas, momentâneas ou temporárias, exercem impacto significativo nos sistemas. Estes fenômenos, causados por partidas de cargas elevadas ou conexões deficitárias, resultam em afundamentos momentâneos de tensão (SAG), elevações momentâneas de tensão (SWELL) ou interrupções totais. Diferentemente destas, as variações de longa duração perduram por períodos superiores a três minutos, geralmente motivadas pela perda de fase ou saída de grandes blocos de carga. Outro distúrbio relevante são os desequilíbrios, definidos pelo desvio percentual das grandezas trifásicas em relação à sua média, frequentemente causados pela distribuição irregular de cargas monofásicas, o que induz tensões de sequência negativa no circuito.

No que tange às distorções da forma de onda, Teixeira (2025) as define como o desvio em regime permanente do sinal em relação à senoidal pura. Tais anomalias reduzem a eficiência energética de equipamentos industriais e podem ser agravadas pela ausência de um sistema de aterramento adequado para a dissipação de correntes indesejáveis. Dentre as distorções, as harmônicas destacam-se como componentes de frequência múltiplas da fundamental (60 Hz no Brasil), apresentada na Figura 3, que se somam à corrente padrão. Guimarães (2024) ressalta que as harmônicas de ordem ímpar são as mais frequentes e intensas, sendo capazes de reduzir a vida útil de transformadores e causar interferências em sistemas de comunicação. Em sistemas com aterramento comprometido, tais efeitos são

amplificados, especialmente em cargas não lineares como inversores e retificadores, podendo gerar ressonâncias prejudiciais a capacitores e filtros.

Figura 3 - Onda de corrente 60Hz



Fonte: Guimarães (2024).

A precariedade do sistema de aterramento também agrava os cortes e afundamentos de tensão devido à elevação da impedância no percurso de falta. Durante esses eventos, reduções entre 10% e 90% da magnitude nominal podem provocar o desligamento abrupto de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), paralisando processos automatizados. Dados da ANEEL e relatórios industriais corroboram que quedas de tensão abaixo de 70% por períodos superiores a 200 ms são suficientes para interromper operações críticas. Somam-se a isso os ruídos, distorções de alta frequência que se superpõem ao sinal original. Um aterramento ineficiente pode atuar como antena, captando ou irradiando interferências de modo comum (entre neutro e terra) ou modo normal (entre fase e neutro), afetando instrumentos de precisão e equipamentos médicos. Por fim, as flutuações de tensão, ou *flicker*, caracterizam-se por variações de amplitude causadas por cargas de ciclo variável, resultando em modulações perceptíveis em sistemas de iluminação e automação.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho utilizou-se o software *MATLAB/Simulink*, para a realização de simulações computacionais e a modelagem de um sistema de aterramento comprometido, com o objetivo de analisar os impactos na qualidade da energia elétrica, comparando-o com um aterramento adequado.

A modelagem do problema foi embasada no estudo de caso apresentado pela *Copper Development Association* (2009), onde foi apresentado problemas reais relacionados a descargas elétricas no Centro de Segurança Municipal de *Jackson Township* no qual são detalhadas as consequências de sistemas de aterramento mal dimensionados, evidenciando falhas críticas e danos a equipamentos.

3.1 Desenvolvimento

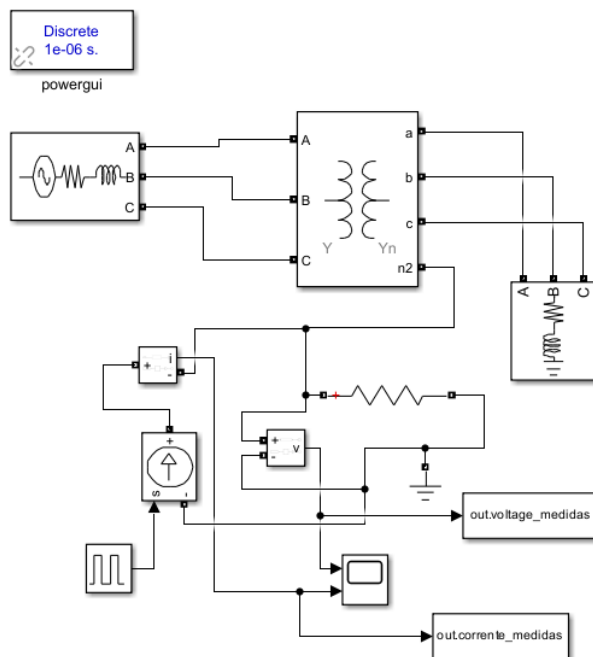
Foi utilizada a *toolbox Simscape Electrical – Specialized Power Systems*, do ambiente *MATLAB/Simulink*, a qual permite a modelagem detalhada de sistemas elétricos, contemplando fenômenos transitórios eletromagnéticos, distúrbios de qualidade de energia e simulações de falhas.

O sistema foi modelado com os seguintes parâmetros:

- Fonte trifásica 13,8kV / 60Hz;
- Transformador trifásico Y/Yn sendo Y 13,8kV e Yn 380V;
- Carga trifásica RLC simulando consumo de potência ativa e reativa;
- Sistema de aterramento.

A Figura 4 mostra o diagrama geral do sistema, onde estão representados todos os componentes principais, incluindo a fonte trifásica, o transformador, a carga industrial, o modelo de aterramento e o gerador de surto atmosférico.

Figura 4 - Diagrama do Modelo Simulink



Fonte: O autor.

O aterramento utilizado na simulação seguiu dois cenários:

- Aterramento adequado:

Neutro do secundário é diretamente aterrado utilizando o *Ground* do Simulink. Neste cenário foi representado uma resistência ideal próxima a zero ohms.

- Aterramento comprometido:

Através do bloco *RLC Branch*, onde ele foi configurado como resistor de 50 Ω , ele foi colocado entre o neutro do transformador e o terra. Essa resistência simula sistemas de aterramento com problemas, podendo ser hastes corroídas, conexões ruins com o solo ou até mesmo solo de baixa condutividade.

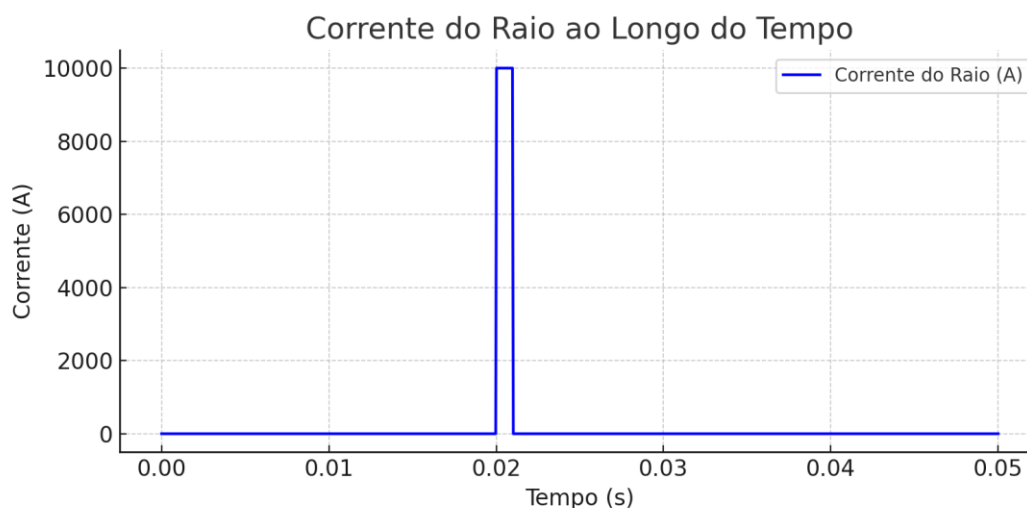
Para simular uma descarga atmosférica foi utilizado dois blocos:

- *Pulse Generator*:

Ele gerou um pulso de corrente de curta duração, com amplitude de 10kA e largura de 1ms representado na **Erro! Fonte de referência não e**

ncontrada., conforme indicado na IEEE Std C62.41.2-2002, que estabelece que surtos provocados por descargas atmosféricas diretas ou indiretas podem atingir picos de corrente entre 8 kA e 20 kA, com tempos típicos de frente de 1 a 2 ms.

Figura 5 - Corrente do Raio



Fonte: O autor.

- **Current Source:**

Injetou a corrente do raio no neutro do transformador, simulando o impacto diretamente no sistema de aterramento.

Foram realizadas simulações com o objetivo de comparar o comportamento de um aterramento elétrico ideal e um aterramento elétrico comprometido. Nas simulações, foi aplicado um pulso de corrente de 10kA, simulando um raio, com duração de 1ms.

Primeiramente foi simulado um sistema com resistência de de aterramento de 5 Ω e 10 Ω , onde o neutro do transformador secundário foi diretamente conectado à terra, idealizando um aterramento eficiente com resistência desprezível.

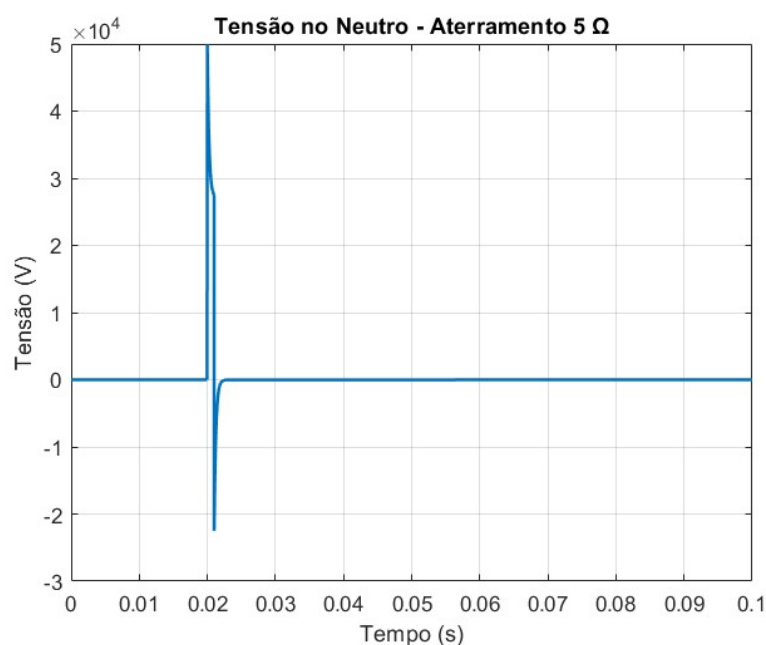
Posteriormente, foi simulado sistemas com o aterramento comprometido, no qual foram inseridos três valores de resistência: 16,9 Ω , 42,5 Ω e 50 Ω entre o neutro do transformador e o ponto de terra, representando uma alta impedância e configurando

uma situação realista de falha. Esses valores de resistências foram obtidos a partir do estudo apresentado em *Copper Development Association* (2009).

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 6 ilustra o comportamento da tensão no ponto de neutro durante a incidência de um surto atmosférico, considerando um sistema de aterramento com resistência de 5Ω . Nota-se que a tensão apresenta uma elevação transitória, atingindo um pico de aproximadamente 50 kV seguida de um rápido restabelecimento às condições de regime permanente. Este comportamento evidencia a eficácia do dimensionamento do aterramento na dissipação da energia do surto, mitigando riscos de danos severos aos componentes da rede e assegurando a continuidade operacional da instalação elétrica.

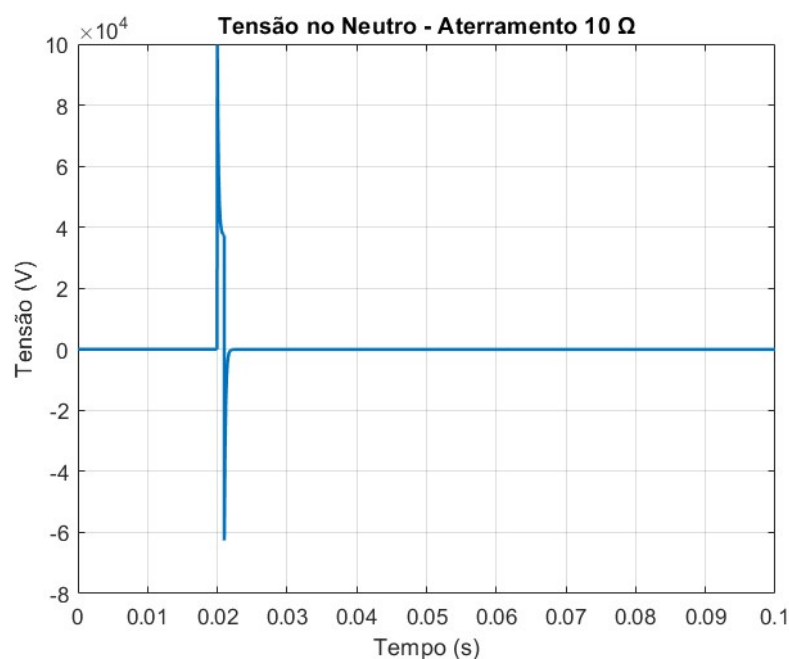
Figura 6 - Tensão no Neutro - Aterramento Adequado 5 ohms



Fonte: O autor.

A Figura 7 apresenta o comportamento do sistema sob uma resistência de aterramento 10Ω . Observa-se que este aumento na impedância resulta em uma elevação sensível no potencial de neutro durante a ocorrência do surto, evidenciando a sensibilidade da regulação de tensão às variações na malha de aterramento.

Figura 7 - Tensão no Neutro - Aterramento Adequado 10 ohms

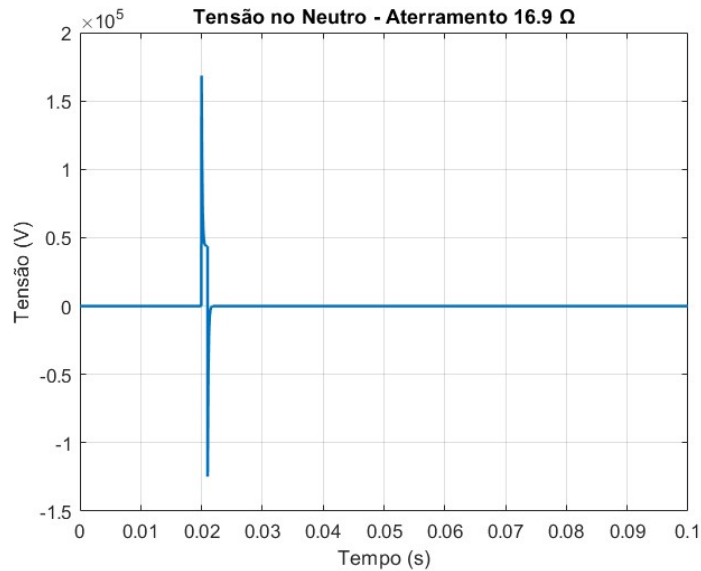


Fonte: O autor.

No cenário em que o sistema de aterramento apresenta-se comprometido, foram realizadas três simulações com resistências elevadas de $16,9 \Omega$, $42,5 \Omega$ e 60Ω . Conforme ilustrado nas Figura 8 a 10, observa-se uma elevação progressiva e acentuada da tensão no ponto de neutro durante a incidência do surto. Nessas condições, os picos de tensão ultrapassaram os patamares de 160 kV, 420 kV e 580 kV, respectivamente. Tal comportamento demonstra a correlação direta entre o aumento da resistência de aterramento e a redução da capacidade de dissipação da energia de surto para o solo. Em última análise, os dados evidenciam o risco crítico

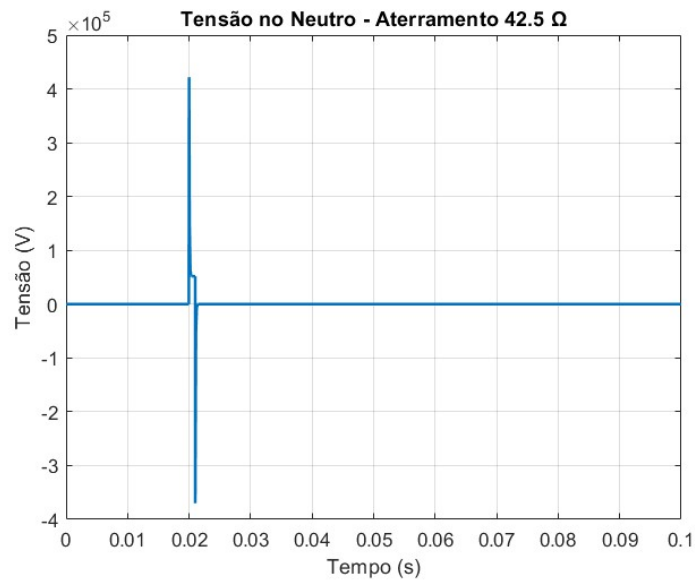
que a inadequação da malha representa, comprometendo a integridade dielétrica dos equipamentos e a segurança operacional da instalação elétrica.

Figura 8 - Tensão no Neutro - Aterramento Comprometido 16,9 ohms



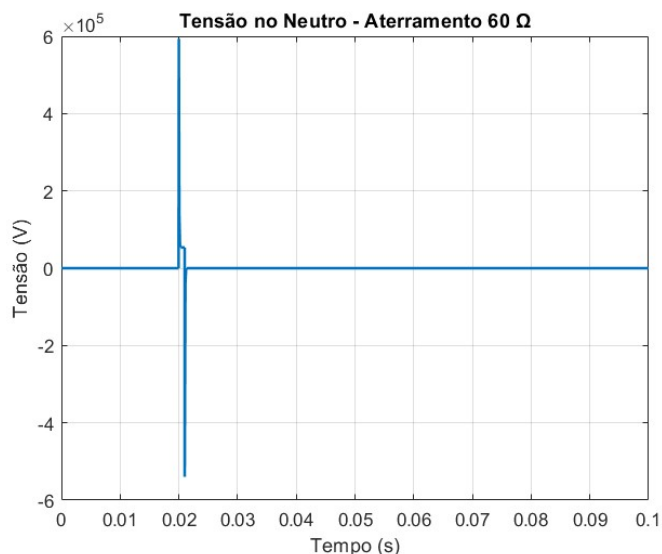
Fonte: O autor.

Figura 9 - Tensão no Neutro - Aterramento Comprometido 42,5 ohms



Fonte: O autor.

Figura 10 - Tensão no Neutro - Aterramento Comprometido 60 ohms



Fonte: O autor.

Após a incidência do surto, observa-se que a tensão no neutro não converge imediatamente para o equilíbrio, apresentando uma inversão de polaridade com valores negativos residuais. Esse fenômeno é característico da resposta transitória de sistemas elétricos que, diante de eventos impulsivos, comportam-se como circuitos subamortecidos de natureza RLC (Resistiva, Indutiva e Capacitiva). A energia armazenada nos campos magnéticos dos elementos indutivos e nos campos elétricos dos elementos capacitivos do sistema desencadeia uma resposta oscilatória amortecida. O sistema permanece nesse estado transitório até que a energia excedente seja integralmente dissipada pelos componentes resistivos, permitindo o retorno ao estado de equilíbrio estável.

A Tabela 1 sintetiza a comparação entre os distintos valores de resistência de aterramento e os respectivos picos de tensão registrados no ponto de neutro durante a simulação do surto atmosférico. Observa-se uma correlação positiva entre o incremento da resistência ôhmica e a magnitude da sobretensão, atingindo o patamar crítico de 580 kV quando a malha apresenta uma resistência de 60 Ω. Tais dados evidenciam o impacto severo que a elevação da impedância de aterramento impõe à

estabilidade e à segurança do sistema elétrico, exacerbando a vulnerabilidade da instalação diante de descargas atmosféricas.

Tabela 1 - Comparação de resistências e tensões

Resistência de aterramento (Ω)	Pico de Tensão no Neutro (kV)
5	≈ 50
10	≈ 100
16.9	≈ 160
42.5	≈ 420
60	≈ 580

Fonte: O autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste estudo, demonstrou-se que o sistema de aterramento desempenha um papel fundamental na proteção de instalações elétricas e na manutenção da qualidade da energia. Através das simulações computacionais realizadas, evidenciou-se que um aterramento adequadamente projetado e executado transcende à conformidade normativa, configurando-se como uma barreira essencial contra fenômenos transitórios que podem comprometer a operação e a integridade do sistema elétrico.

Nos cenários analisados, observou-se que a vulnerabilidade do aterramento intensifica significativamente os efeitos destrutivos de descargas atmosféricas. No caso mais crítico simulado, a tensão no ponto de neutro atingiu valores superiores a 580 kV, o que representa um risco direto de danos severos aos equipamentos conectados à rede. Em contrapartida, o cenário com aterramento adequado apresentou resultados substancialmente mais seguros, nos quais a tensão foi contida dentro de limites operacionais aceitáveis, permitindo o rápido restabelecimento do equilíbrio do sistema após a incidência do surto. Tais resultados não apenas validam o modelo simulado, mas reforçam a importância de tratar o aterramento como parte

central da estratégia de segurança e confiabilidade, exigindo rigor desde a etapa de projeto até a execução e manutenção periódica.

Contudo, este trabalho apresenta limitações inerentes ao escopo da pesquisa, visto que as análises foram fundamentadas exclusivamente em simulações computacionais. O modelo adotado também contou com simplificações, desconsiderando variáveis ambientais dinâmicas, como a variação da resistividade do solo e interações climáticas. Apesar dessas restrições, os dados obtidos demonstram de forma inequívoca a influência crítica da resistência de aterramento na qualidade da energia, especialmente durante surtos de tensão.

Como continuidade desta pesquisa, recomendam-se análises sobre distorções harmônicas e transitórios de tensão sob diferentes condições operacionais. Investigações futuras poderão incluir a avaliação do impacto de cargas não lineares, a modelagem de solos estratificados, interação com sistemas de proteção coordenados e verificação experimental em ambiente controlado.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em: 02 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: **Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419-1: **Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 1: Princípios gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419-3: **Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 3: Danos físicos a estruturas e riscos à vida**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15749: **Aterramento elétrico em subestações – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION. **Inadequate Grounding System Allows Costly Lightning Damage at Municipal Safety Center**. 2009. Disponível em: <https://www.copper.org>. Acesso em: 30 mar. 2025.

ETAP. ETAP Ground Grid – **Grounding System Analysis Software**. Irvine, EUA: Operation Technology Inc., 2024. Disponível em: <https://etap.com/products/ground-grid>. Acesso em: 22 abr. 2025.

FLUKE. **Como o aterramento afeta a qualidade da energia elétrica.** 2025. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/saiba-mais/blog/analísadores-da-qualidade-de-energia/aterramento-energia-qualidade>. Acesso em: 11 mar. 2025.

FLUKE. **Noções básicas sobre aterramento.** Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/saiba-mais/blog/aterramento/noco-es-basícas-sobre-aterramento>. Acesso em: 30 mar. 2025.

FLUKE. **Registradores de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 1736 e 1738.** [S.l.]: Fluke. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analísadores-da-qualidade-de-energia/1736-1738>. Acesso em: 8 jun. 2025.

GUIMARÃES, Pablo. **O que são harmônicas em instalações elétricas?** Disponível em: <https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/o-que-sao-harmonicas-em-instalacoes-eletricas>. Acesso em: 8 jun. 2025.

IEEE. IEEE Std C62.41.2-2002: **Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage AC Power Circuits.** New York: IEEE, 2002.

IEEE. IEEE Std 80-2013: **Guide for Safety in AC Substation Grounding.** New York: IEEE Standards Association, 2013.

MEMT. **O que é qualidade de energia elétrica (QEE)?** Disponível em: <https://memt.com.br/o-que-e-qualidade-de-energia-eletrica-quee/>. Acesso em: 30 mar. 2025.

MORENO, Hilton. **Instalações elétricas de baixa tensão conforme a NBR 5410.** Aula Power Week. [S.l.]: Potência Educação, 2022.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **National Electrical Code – NEC 1987.** Quincy: NFPA, 1987.

PAULILLO, Gilson. **Qualidade da energia elétrica – Conceitos gerais.** In: Qualidade da Energia Elétrica. Ed. 84, Capítulo I. Revista O Setor Elétrico. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SETOR ELÉTRICO. **Flutuação de tensão (flicker): causas e efeitos.** Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/flutuacao-de-tensao-flicker/>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SETOR ELÉTRICO. **Sua majestade, o BEP.** Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/sua-majestade-obep/>. Acesso em: 30 mar. 2025.

TEIXEIRA, Mateus Duarte. **Distorções de forma de onda.** In: Tópicos em Qualidade de Energia Elétrica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. Apostila TE-991.

TOKEN ENGENHARIA. **Impacto da qualidade da energia elétrica nas operações industriais.** Disponível em: <https://tokenengenharia.com.br/impacto-da-qualidade-da-energia-eletrica-nas-operacoes-industriais/>. Acesso em: 30 mar. 2025.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Abril 30, 2023; Aceito/Accepted: Agosto 29, 2023]