UNIVESIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS DANIEL DE AZEVEDO ARRUDA

Avaliação de terrômetros comerciais em condições controladas: Medição da resistência de aterramento

Recife
2024

CARLOS DANIEL DE AZEVEDO ARRUDA

Avaliação de terrômetros comerciais em condições controladas: Medição da resistência de aterramento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexander Barros Lima

Coorientador: Eng. M.Sc. Ericles Mauricio Barbosa

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Arruda, Carlos Daniel de Azevedo.
Avaliação de terrômetros comerciais em condições controladas: Medição da resistência de aterramento / Carlos Daniel de Azevedo Arruda. - Recife, 2024.
62 p. : il., tab.

Orientador(a): Alexander Barros Lima
Cooorientador(a): Ericles Mauricio Barbosa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2024.
Inclui referências.

1. Aterramentos elétricos. 2. terrômetro. 3. malha de aterramento. 4. resistência de aterramento. 5. tensão de toque-passo. I. Lima, Alexander Barros. (Orientação). II. Barbosa, Ericles Mauricio. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

CARLOS DANIEL DE AZEVEDO ARRUDA

AVALIAÇÃO DE TERRÔMETROS COMERCIAS EM CONDIÇÕES CONTROLADAS: Medição da Resistência de Aterramento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 21/10/2024

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Alexander Barros Lima (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Eng. M.Sc. Ericles Mauricio Barbosa (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Antônio Gustavo Evangelista Muniz Santos (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

A todos que contribuíram em minha trajetória acadêmica. Em especial aos meus pais, que nunca mediram esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

RESUMO

Os aterramentos elétricos são recursos relevantes nas questões relacionadas à segurança, proteção e desempenho de sistemas elétricos. Para garantir que o aterramento desempenhe adequadamente suas funcionalidades, é necessário que suas condições regulares sejam verificadas com alguma regularidade. Neste sentido, um dos critérios utilizados é a medição da resistência de aterramento, utilizando-se um equipamento do tipo terrômetro. Portanto, é fundamental que esse equipamento apresente resultados confiáveis. As normas atualmente disponíveis orientam apenas sobre os aspectos relacionados à segurança dos operadores, não tratando, por exemplo, dos níveis de corrente e sua adequação para aplicações específicas. Diante disso, nesse trabalho, foram realizados ensaios com dois terrômetros comerciais visando verificar a efetividade dos resultados produzidos. Os ensaios foram baseados no Método da Queda de Potencial e foram realizados em um ambiente controlado. Durante os ensaios foi utilizada uma ampla faixa de resistências com valores representativos tanto para a resistência de aterramento, como para a resistência associada à haste do circuito de corrente. Os resultados indicaram que ambos os equipamentos apresentam erros significativos, inclusive ultrapassando a marca de 100% em um dos casos ensaiados, cada um dentro de condições específicas.

Palavras-chave: Aterramentos elétricos; terrômetro; malha de aterramento; resistência de aterramento; tensão de toque-passo

ABSTRACT

Grounding systems are essential for safety, protection, and performance in electrical systems. To ensure that grounding performs its functions properly, it is necessary to regularly verify its condition. One of the criteria is the measurement of grounding resistance using an earth resistance tester. Therefore, it is crucial that this equipment provides reliable results. The current standards only provide guidance on operator safety aspects, without addressing, for example, current levels and their suitability for specific applications. In this context, this study conducted tests with two commercial earth resistance testers to verify the accuracy of the results. The tests were based on the Fall of Potential Method and were carried out in a controlled environment. A wide range of resistances, representing both grounding resistance and the resistance associated with the current circuit rod, was used during the tests. The results indicated that both equipment exhibited significant errors, with one of them exceeding 100% in one of the tested cases, each under specific conditions.

Keywords: Electrical grounding; earth resistance tester; grounding grid; grounding resistance; touch and step voltage

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de um segmento de eletrodo e suas as componentes de corrente. 18
Figura 2 – Segmento de eletrodo submetido a uma corrente de baixa frequência. ..18
Figura 3 – Impedância x frequência. Resistividade de $100\ \Omega\mathrm{m}$. 20
Figura 4 – Tensão desenvolvida em pontos diferentes da malha. 20
Figura 5 – Distribuição de potencial em uma malha reticulada: a) vista superior; b) vista tridimensional. 22
Figura 6 – Distribuição de potencial considerando a dimensão dos retículos. 22
Figura 7 – Tipos de tensão presentes numa SE 23
Figura 8 – Método da queda de potencial. 24
Figura 9 – Curva de resistências aparentes versus distância 26
Figura 10 – Curvas de resistências aparentes vs posicionamento do eletrodo de corrente. 27
Figura 11 – Malha de aterramento conectada ao cabo para-raios através da proteção contra descargas atmosféricas....28
Figura 12 – Distribuição da corrente de medição em subestações com CPR conectada à malha. 29
Figura 13 – Vista aérea da SE Joairam. 32
Figura 14 – Vista aérea da SE Janaúba III. 33
Figura 15 – Arranjo considerado nas simulações. 34
Figura 16 – Curva de resistências aparentes, (a) em 80 Hz e (b) em 500 Hz. 35
Figura 17 – Resistência aparente considerando a variação da frequência. 35
Figura 18 – Tempo máximo admissível para interrupção de medição em caso de descumprimento do critério de máxima tensão de saída de circuito aberto e máxima corrente injetada no solo. 38
Figura 19 – Representação esquemática do Método da Queda de Potencial. 40
Figura 20 – Representação esquemática do arranjo montado em bancada. 41
Figura 21– Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 1. 44
Figura 22 – Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 2. 47
Figura 23 – Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 3. 49
Figura 24 – Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 4. 51

Figura 25 – Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 5. 54
Figura 26 – Forma de onda gerada pelo equipamento A. 55
Figura 27 – Forma de onda gerada pelo equipamento B. 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo do erro de funcionamento. 37
Tabela 2 – Modelos comerciais de terrômetros e suas principais características. 39
Tabela 3 – Características dos equipamentos utilizados. 41
Tabela 4 – Resultados obtidos com EqA: Caso 1. 42
Tabela 5 – Resultados obtidos com EqB: Caso 1. 43
Tabela 6 – Resultados obtidos com o equipamento A: Caso 2. 45
Tabela 7 – Resultados obtidos com o equipamento B: Caso 2. 46
Tabela 8 – Resultados obtidos com EqA e EqB: Caso 3. 48
Tabela 9 – Resultados obtidos com EqA e EqB: Caso 4. 50
Tabela 10 – Resultados obtidos com EqA e EqB: Caso 5. 53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AST	Aterramento sob teste
CPR	Cabo para-raios
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância
d	Distância de afastamento entre o terra remoto e o eletrodo de corrente
$E(\%)$	Erro entre as resistências medidas e o valor tido como de referência
E_m	Diferença de potencial entre o centro e a borda de um retículo
E_{mm}	Tensão de toque de metal para metal
E_s	Tensão de passo
E_t	Tensão de toque
G	Condutância
H	Eletrodo de corrente
I	Corrente Injetada no sistema de aterramento
I_g	Corrente efetivamente direcionada para o solo através do aterramento
I_m	Corrente de medição injetada pelo terrômetro
I_{sw}	Parcela da corrente de medição que sai da SE por meio dos cabos para-raios
L	Indutância
R	Resistência
R_A	Resistência medida pelo equipamento A
R_B	Resistência medida pelo equipamento B
R_{hc}	Resistência do eletrodo de corrente
R_g	Resistência de aterramento
R_n	Resistência nominal apresentada no corpo do resistor
R_{ref}	Resistência medida pela ponte
S	Eletrodo de potencial
V	Elevação de potencial desenvolvida no aterramento (teórica)
V_g	Elevação de potencial desenvolvida no aterramento (medida)
Z	Impedância de aterramento vista do ponto de injeção de corrente
ω	Frequência angular da corrente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

1.1 OBJETIVOS 15

1.1.1 Geral 15

1.1.2 Específicos 15

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 15

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17

2.1 CONCEITO GERAL 17

2.2 ATERRAMENTOS EM SUBESTAÇÕES 21

2.2.1 Equipotencialização 21

2.2.2 Medição da resistência de aterramento 24

2.2.3 Condições adversas 27

2.2.3.1 Cabo para-raios conectado à malha de aterramento 27

2.2.3.2 Presença de correntes espúrias 30

2.2.3.3 Baixos valores da resistência de malha 30

2.2.3.4 Alta resistência associada ao eletrodo do circuito de corrente 31

2.2.3.5 Acoplamento entre os circuitos de corrente e de tensão 31

2.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO 36

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO 40

3.1 CASO 1: RG COM VALORES VARIADOS E $\mathrm{RHC} = 0$ 42

3.2 CASO 2: $\mathrm{RG} = 30\ \Omega$ E RHC COM VALORES VARIADOS 44

3.3 CASO 3: $\mathrm{RG} = 200\ \Omega$ E RHC COM VALORES VARIADOS 47

3.4 CASO 4: RG COM VALORES VARIADOS E $\mathrm{RHC} = 470\ \Omega$ 49

3.5 CASO 5: RG COM VALORES VARIADOS E $\mathrm{RHC} = 1960\ \Omega$ 51

3.6 AVALIAÇÃO DA FORMA DE ONDA 54

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 57

REFERÊNCIAS 60

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) desempenham um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social das sociedades modernas. Inicialmente compostos por pequenos sistemas isolados, esses evoluíram para redes que hoje estão interligadas em nível nacional. Há, portanto, a necessidade de os sistemas operarem dentro de padrões de qualidade e continuidade mais rigorosos. Nesse cenário, as subestações (SE) exercem uma função relevante e estratégica, conectando as linhas de transmissão às redes de distribuição, visando garantir o fornecimento seguro e ininterrupto de energia aos consumidores finais [1,2]. É importante destacar, também, que, nesses locais, as malhas de aterramento desempenham a função primordial de proteção dos equipamentos que asseguram a continuidade da operação do Sistema. Asseguram, também, a segurança dos trabalhadores locais. É evidente, portanto, a necessidade de se monitorar o estado de conservação das malhas visando a garantia de sua continuidade funcional.

Os projetos das malhas de aterramento de SEs são baseados em normas e padrões visando o controle das tensões de passo e toque. Para atingir esse objetivo, as malhas devem cobrir toda a área de interesse, geralmente correspondendo a quase que totalidade da área ocupada pela SE. Como resultado, devido às dimensões envolvidas, a resistência de aterramento da malha, R_g, tende a ser relativamente baixa [1,2]. É importante destacar que as normas e padrões atuais não estabelecem um limite máximo para o valor dessa resistência. No entanto, costuma-se assumir que esse valor não ultrapasse 10 Ω [3]. Na verdade, a norma nacional vigente apenas orienta no sentido de que "o projeto de aterramento deve garantir níveis de corrente de curto-circuito fase-terra suficientes para permitir a atuação da proteção de retaguarda" [1]. Disso decorre a necessidade de se avaliar as condições funcionais da malha, na perspectiva de sua resistência, com alguma regularidade. O objetivo, neste caso, é verificar se essa orientação está sendo atendida, já que a malha pode apresentar degradações devido, por exemplo, a processos de corrosão e possíveis atos de vandalismo.

Dentre as técnicas utilizadas para a medição da resistência de aterramento, destaca-se o Método da Queda de Potencial [4], apresentado com detalhes mais adiante. Aplicada ao aterramento de uma SE, ressaltam-se os seguintes aspectos práticos: i)

as instalações energizadas estão sujeitas a correntes espúrias de naturezas diversas, tais como desequilíbrios e harmônicas. Essas correntes produzem elevações de potencial na malha que podem prejudicar a relação sinal/ruído durante as medições e/ou causar danos ao equipamento; ii) as malhas das SEs, normalmente, apresentam grandes dimensões. Consequentemente, a resistência de aterramento tende a ser relativamente pequena, podendo chegar a valores menores que 1 Ω. Valores tão baixos, precisam ser adequadamente tratados pelo equipamento de medição; iii) a resistência da haste de corrente do circuito de medição pode apresentar valores bastante elevados, o que pode limitar ou até mesmo inviabilizar a medição. É fundamental, portanto, que o equipamento de medição apresente características que o tornem adequado por ocorrência dessa condição.

Para avaliar a malha de aterramento na perspectiva da sua resistência, são utilizados equipamentos do tipo terrômetro. De modo geral, os equipamentos atualmente disponíveis no mercado operam em consonância com critérios de segurança estabelecidos pela norma ABNT NBR 15749, que trata da “medição da resistência de aterramento e de potenciais do solo em sistemas de aterramento”, e/ou por padrões internacionais. Contudo, as normas e padrões atualmente disponíveis não estabelecem critérios específicos para ensaios em equipamentos voltados para essa aplicação. Considerando que os dados fornecidos pelos equipamentos balizam as decisões tomadas pelas equipes de manutenção responsáveis pela malha, julga-se que tal avaliação seja essencial. Este trabalho está inserido neste contexto, sendo avaliados dois modelos de terrômetros disponíveis comercialmente, um com frequência de medição de 25 kHz e o outro de frequência igual a 800 Hz, na perspectiva de operarem em condições adversas relativas à resistência de aterramento e, também, em relação à resistência da haste de corrente do circuito de medição. Busca-se com isso, avaliar a confiabilidade dos dados produzidos considerando as margens de erro indicados pelos fabricantes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Avaliar, comparando com um instrumento de referência, a qualidade dos dados produzidos por terrômetros comercialmente disponíveis quando submetidos a valores variados da resistência de aterramento e da resistência da haste de corrente em ambiente controlado.

1.1.2 Específicos

Em relação aos terrômetros, serão avaliados os seguintes parâmetros:

- Forma de onda e frequência utilizadas;
- Qualidade dos resultados obtidos quando o equipamento é submetido a valores diversos associados à resistência de aterramento e à resistência da haste de corrente do circuito de medição;
- Avaliar a adequação dos dados obtidos em um equipamento que opera em alta frequência.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado em 4 capítulos.

O Capítulo 1, introdução, onde é apresentada a importância dos sistemas de aterramento, da sua verificação periódica e a relevância da compatibilização do equipamento de medição ao aterramento sob teste.

O Capítulo 2 apresenta a base teórica acerca dos sistemas de aterramento em subestações, detalhando o principal método utilizado para a sua medição, o equipamento utilizado para esta finalidade e as possíveis condições adversas associadas à medição de resistência de aterramento nas subestações.

O Capítulo 3 apresenta os testes de bancada realizados com dois modelos de terrômetros vendidos comercialmente, de diferentes características técnicas. No capítulo é apresentada uma breve introdução de como foram realizados os testes e em seguida os resultados coletados, bem como a discussão e comparação acerca dos equipamentos.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta as conclusões relacionadas ao estudo realizado neste trabalho.

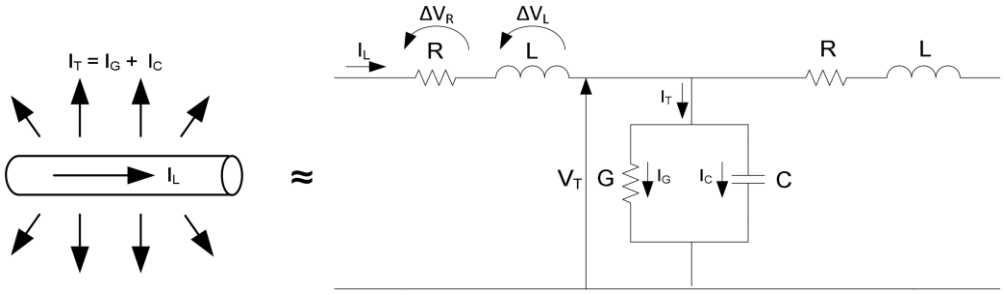
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceito Geral

O aterramento é definido em norma como a ligação intencional de parte eletricamente condutiva à terra, através de um condutor elétrico [1]. Ele é basicamente composto por três partes: as conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos, o eletrodo de aterramento e a terra que envolve o eletrodo [2]. Contudo, o mais comum é considerar o aterramento como sendo constituído apenas pelo eletrodo e a terra.

O eletrodo de aterramento, pode assumir configurações diversas dependendo da aplicação. Para analisar a resposta de um aterramento a correntes elétricas, é comum usar um modelo conceitual simplificado baseado na teoria de circuitos. Nesse modelo, considera-se que o aterramento apresenta efeitos com características resistivas, indutivas e capacitivas [2]. A Figura 1 apresenta o circuito equivalente de um segmento de eletrodo, evidenciando que a corrente possui uma componente transversal que se dispersa no solo e uma componente longitudinal que propaga ao longo do eletrodo. Em relação à componente longitudinal, são observadas perdas internas no condutor e a formação de um campo magnético ao redor dos caminhos de corrente, modelados respectivamente, por uma resistência (R) e uma indutância (L). Esses elementos causam uma queda de potencial ao longo do eletrodo conforme a corrente se propaga. A componente transversal, que se dispersa no solo, está associada a correntes que apresentam características condutivas e capacitivas. Segundo Alípio [3], essas correntes não dependem da geometria do eletrodo, mas apenas da frequência e da condutividade/permissividade elétrica do solo. Os efeitos transversais devido a essas correntes são modeladas por uma condutância (G) e uma capacitância (C) em paralelo.

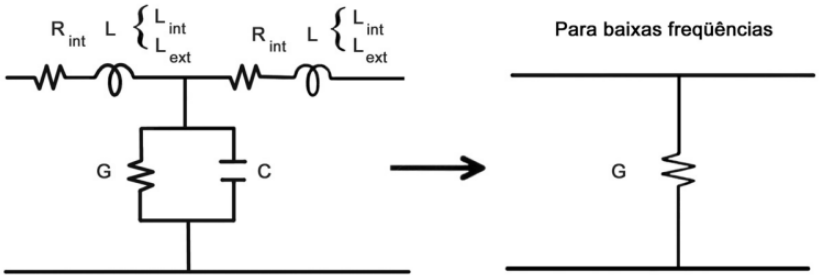
Figura 1 – Representação de um segmento de eletrodo e suas as componentes de corrente.



Fonte: adaptado de [3].

Para correntes de baixas frequências, como é o caso dos sistemas elétricos de potência, as componentes longitudinais são consideradas desprezíveis. Contudo, é importante ressaltar que essa condição é dependente da geometria e das dimensões do aterramento, como é o caso das malhas de aterramento das SEs. Além disso, em baixas frequências, a componente de corrente de natureza capacitiva é desprezível. Nessas condições, o aterramento é modelado apenas por uma condutância, conforme ilustrado na Figura 2. Dessa forma, a entrada e dispersão de corrente no solo é caracterizada apenas pela componente resistiva, chamada resistência de aterramento. Segundo Visacro [2], a resistência de aterramento é dependente da geometria dos eletrodos e da resistividade do solo.

Figura 2 – Segmento de eletrodo submetido a uma corrente de baixa frequência.



Fonte: retirado de [2].

Para situações em que a corrente elétrica apresenta frequências mais elevadas o aterramento é caracterizado pelo modelo completo. Neste caso, o aterramento apresenta não mais uma resistência, mas sim uma impedância, conforme apresentado na

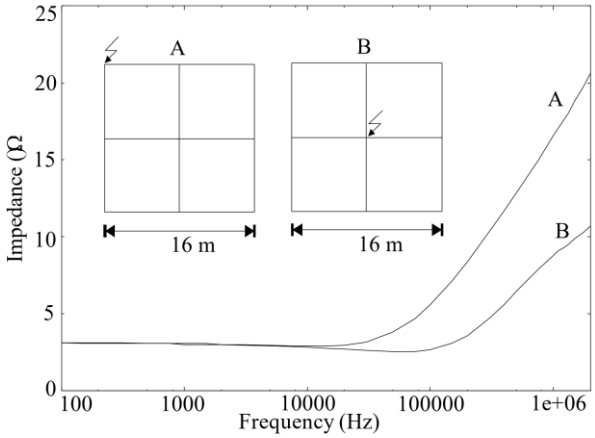
equação (2.1), que é definida para cada componente de frequência da corrente na qual é submetida, onde [4,5]

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \tag{2.1}$$

sendo, Z a impedância “vista” do ponto de injeção da corrente [Ω], V a elevação de potencial desenvolvida [V], I a corrente injetada [A] e ω a frequência angular da corrente [rad/s]. Essa impedância também é chamada impedância harmônica [6].

Neste caso, a dificuldade é determinar a frequência a partir da qual os efeitos reativos necessitam ser considerados. Como exemplo, cita-se a situação em que o aterramento é submetido à corrente de uma descarga atmosférica. Nessa condição, o aterramento é submetido a um espectro de frequências associado a esse fenômeno natural. Estudos sobre o tema revelam que não há uma maneira simples de determinar essa frequência de transição, devido a sua dependência de fatores como a geometria e a dimensão do eletrodo ou da malha, além da resistividade do solo. Além disso, para aterramentos reticulados, como os utilizados em SEs, há, ainda, a dependência da posição em que a corrente é injetada [7,8,9]. Grcev [10] apresenta resultados de um estudo onde se avalia a resposta em frequência de um aterramento reticulado com dimensões de 16m x 16m (ver Figura 3). Visando uma maior generalidade nos resultados, a corrente é injetada na malha em diferentes posições. Os dados mostram existir diferenças nos valores das impedâncias, dependendo do ponto de injeção de corrente. As curvas relativas aos casos A e B mostram impedâncias muito próximos quando as frequências são mais baixas (<15 kHz). Verifica-se, também, que as características resistivas preponderam nessa região do espectro. Em frequências mais altas (>15 kHz), há um aumento crescente no valor da impedância no caso A (corrente na quina da malha). Em relação ao ponto B, também em frequências mais altas, a impedância apresenta uma tendência de redução, mas aumenta rapidamente a partir de ~100 kHz. Como a resistividade do solo, nos casos avaliados, não varia com a frequência, o aumento da impedância ocorre em razão do aumento da parcela reativa.

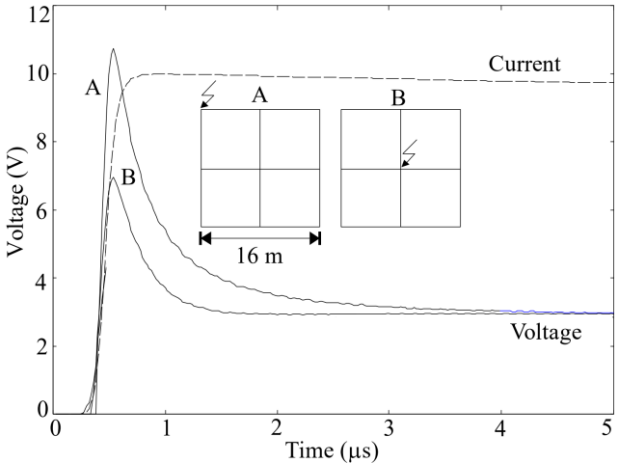
Figura 3 – Impedância x frequência. Resistividade de $100\ \Omega m$.



Fonte: adaptado de [10].

Neste trabalho também foi avaliada a situação em que a corrente impulsiva é injetada nos pontos A e B. Na Figura 4, são apresentadas as curvas das tensões desenvolvidas, para uma mesma corrente, verificando-se que a tensão no ponto A é significativamente maior que a tensão no ponto B. Fica evidente, portanto, que as impedâncias são diferentes e, portanto, dependentes do ponto de injeção.

Figura 4 – Tensão desenvolvida em pontos diferentes da malha.



Fonte: adaptado de [10].

2.2 Aterramentos em Subestações

Devido à sua importância, as SEs necessitam operar dentro de padrões de qualidade, continuidade e segurança bastante rigorosos. Para alcançar tais objetivos, a malha de aterramento é um dos principais elementos a serem considerados. Na ocorrência de correntes de falhas, como as de curto-circuito, o sistema de aterramento atua realizando o escoamento dessas correntes para o solo de modo a mitigar a ocorrência de danos ao sistema elétrico e aos trabalhadores locais [2]. O aterramento também tem a função de limitar a corrente de falta que passa pelo neutro de um gerador aterrado, evitando que correntes mais elevadas degradem os enrolamentos do equipamento [11].

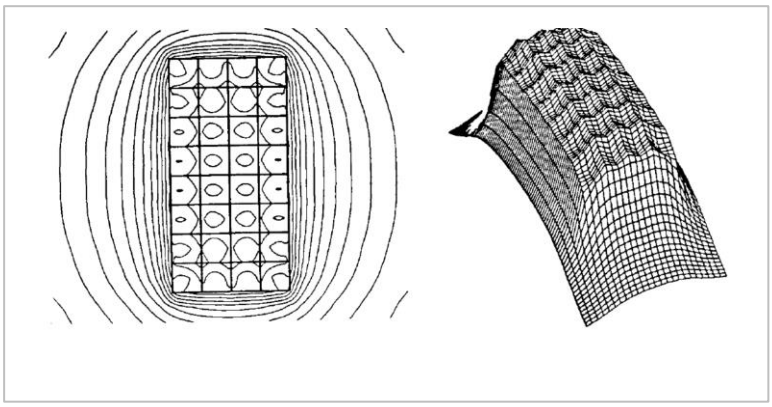
Outro aspecto relacionado à resistência de aterramento é a sua estreita associação com a devida sensibilização dos relés de proteção e, consequentemente, com a adequada operação do sistema de retaguarda. A parametrização e coordenação de relés é realizada considerando valores de curto fase-terra, e para que a proteção atue da forma esperada é necessário que seja realizada uma verificação periódica da resistência de aterramento, visando-se garantir que o sistema seja sempre submetido aos níveis de corrente de curto para os quais foi projetado [12]. Portanto, em uma SE, a orientação é que a malha de aterramento apresente características construtivas que limitem os potenciais de passo e de toque a valores permissíveis, além de favorecer a ocorrência de correntes de curto-circuito em níveis adequados para a efetiva atuação da proteção de retaguarda [13].

2.2.1 Equipotencialização

As malhas de aterramento direcionam para o solo, correntes como as resultantes de curtos-circuitos e de descargas atmosféricas [14]. Nessas condições, sempre haverá uma elevação de potencial na superfície do solo. Contudo, se a malha for devidamente dimensionada, as tensões desenvolvidas não excederão os limites máximos de segurança [15]. Para isso, as malhas são projetadas segundo um arranjo baseado em retículos de forma que a distribuição de potencial seja melhor equilibrada. Na Figura 5 é apresentada uma ilustração da distribuição das curvas de potencial produzidas por uma corrente elétrica na malha de uma SE. Nela, verifica-se que a variação

de potencial é relativamente pequena dentro dos retículos. Para além dos limites da malha, isso já não acontece, sendo o decaimento bastante abrupto.

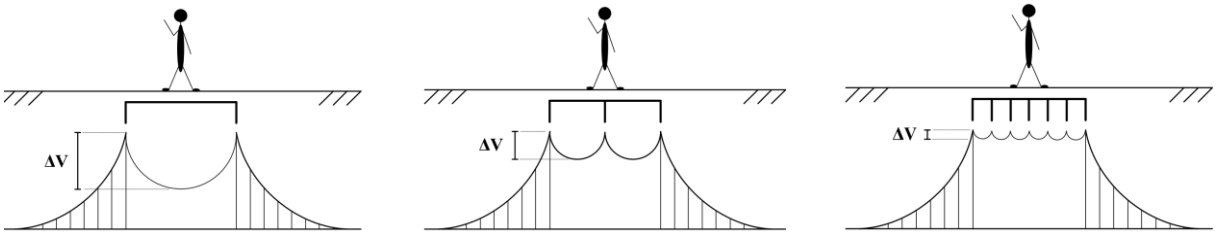
Figura 5 – Distribuição de potencial em uma malha reticulada: a) vista superior; b) vista tridimensional.



Fonte: adaptado de [16].

Dentro da SE, onde há circulação de pessoas e equipamentos instalados, a distribuição de potencial deve estar dentro dos limites aceitáveis, conforme estabelecido por normas e padrões internacionais. Esse controle é alcançado através do dimensionamento adequado dos retículos, de modo que quanto maior a dimensão dos retículos, maior será a distribuição de potencial em seu interior [16]. Na Figura 6 é apresentada uma ilustração da variação de potencial em relação à dimensão dos retículos, onde se verifica que a diferença de potencial entre dois pontos tende a se tornar menor à medida que os retículos diminuem.

Figura 6 – Distribuição de potencial considerando a dimensão dos retículos.

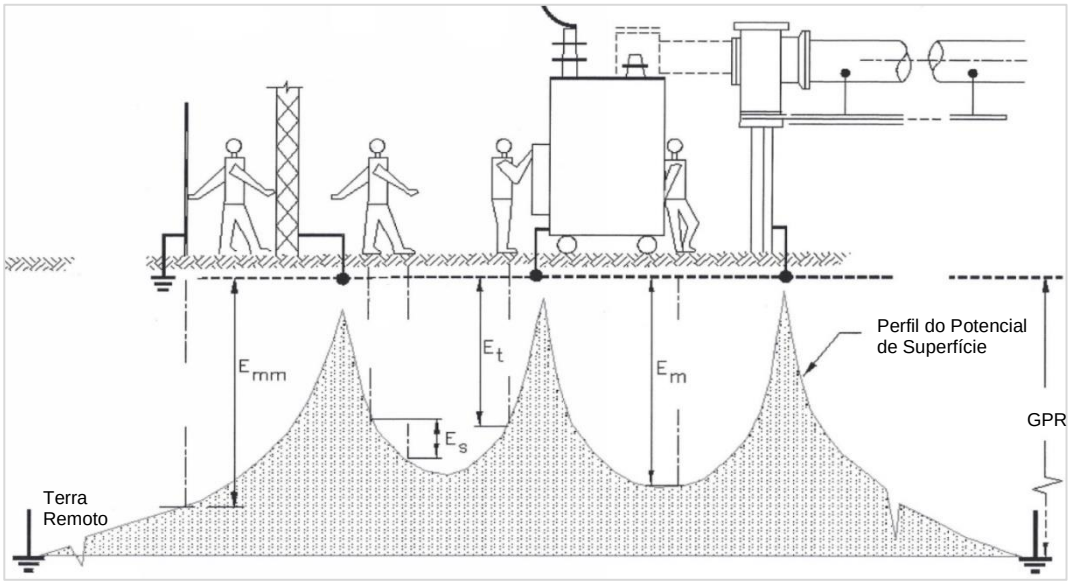


Fonte: retirado de [17].

A passagem de corrente elétrica pelo solo resulta em uma distribuição de potencial que leva a formação de superfícies equipotenciais. Com isso, quando uma pessoa se encontra sobre duas linhas de contorno dessas superfícies, ela está sujeita a uma diferença de potencial. Disso decorre o conceito de *tensão de passo*. Conceitualmente, a tensão de passo é definida como a diferença de potencial entre dois pontos do solo, separados por 1 metro, causada pela passagem de uma corrente elétrica [18,16]. Dependendo do percurso da corrente no corpo e do uso equipamentos de segurança, como botas e luvas, os danos tendem a ser atenuados [1,19,20].

O fato de as partes metálicas internas a uma SE estarem aterradas, também leva a necessidade de se avaliar os riscos associados à diferença de potencial que é desenvolvida entre tais partes metálicas e a superfície do solo por ocasião do escoamento de uma corrente elétrica para o aterramento. Essa condição dá origem ao conceito de *tensão de toque,* definida como sendo a diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa. Por definição, considera-se essa distância como sendo de 1 m [13,16]. Na Figura 7 é apresentada uma ilustração indicando a tensão de toque (E_t), a tensão de passo (E_s), a tensão de *mesh* (E_m, diferença de potencial entre o centro e a borda de um retículo), e a tensão de toque de metal-para-metal (E_{mm}).

Figura 7 – Tipos de tensão presentes numa SE

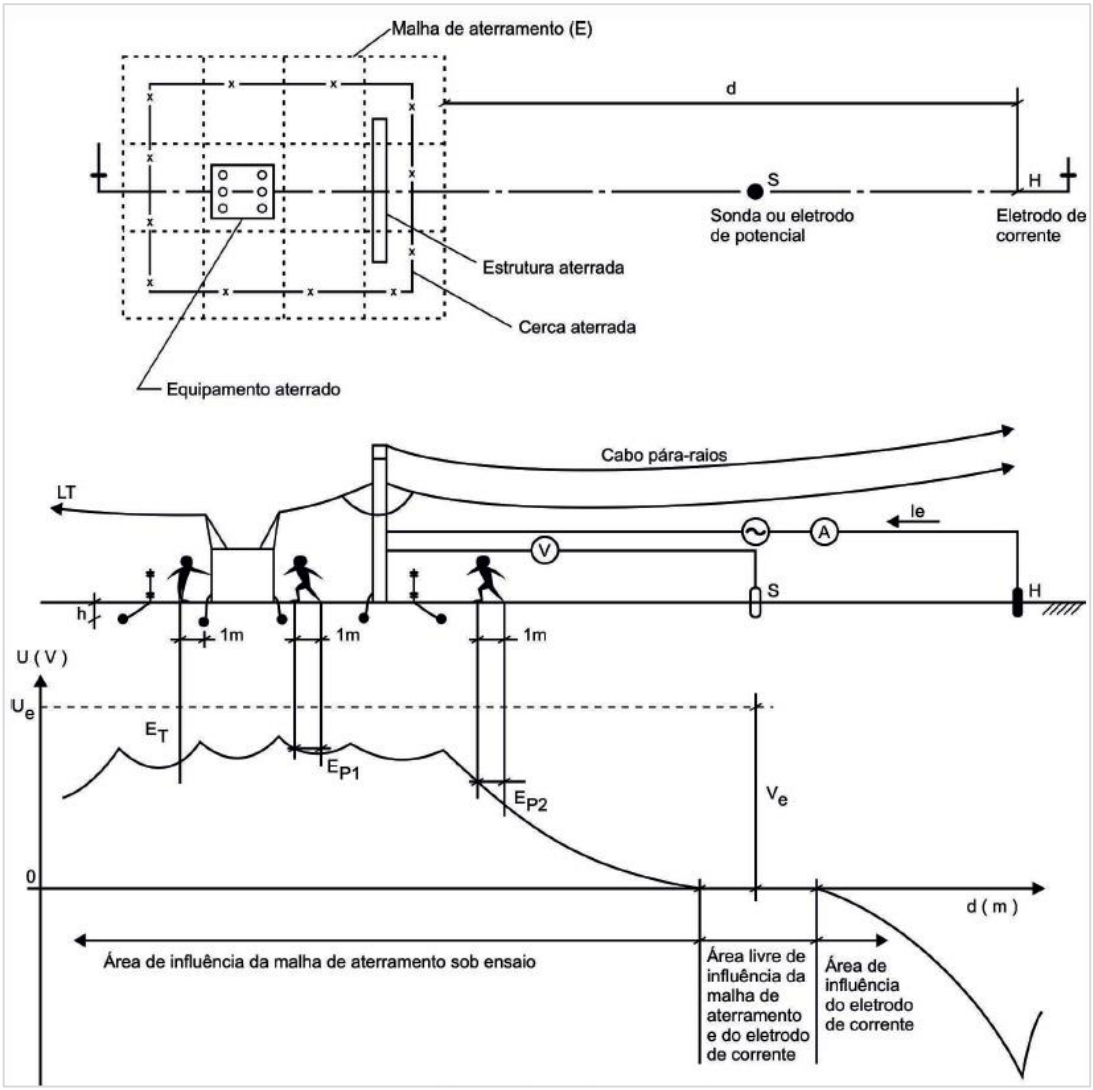


Fonte: Adaptado de [16].

2.2.2 Medição da resistência de aterramento

O Método da Queda de Potencial é a técnica mais utilizada para se determinar a resistência de aterramento das malhas das SEs. O método consiste em fazer circular uma corrente no circuito constituído pelo aterramento sob teste (AST), o equipamento de medição (terrômetro) e o eletrodo de corrente, H (ver Figura 8). A corrente que é dissipada nas proximidades do AST produz uma elevação de potencial no solo que é medida entre o AST e o terra remoto (circuito de potencial), através do eletrodo de potencial, S. A relação entre a tensão desenvolvida e a corrente injetada pelo terrômetro determina a resistência do aterramento [1,18].

Figura 8 – Método da queda de potencial.

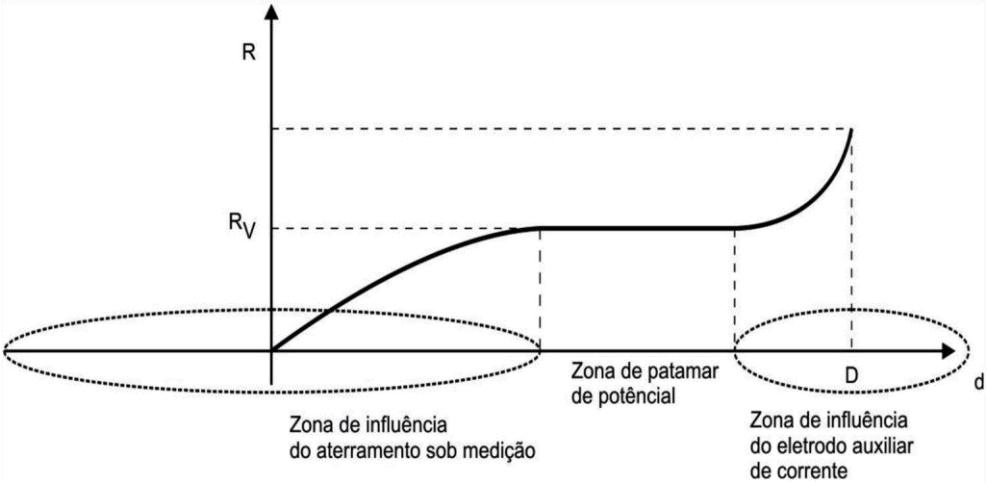


Fonte: adaptado de [1].

Ainda em relação àFigura 8, o eletrodo H do circuito de corrente é constituído por uma ou mais hastes que devem ser firmemente cravadas no solo, de modo que a resistência de aterramento desse conjunto seja pequena. Esse eletrodo deve ser posicionado a uma distância, *d*, que seja de 3 a 5 vezes o valor da maior dimensão linear da malha. No circuito de potencial, normalmente, utiliza-se uma única haste. Isso porque, não há circulação de corrente através desse circuito, sendo sua função apenas de transferir para o terrômetro o potencial do solo da região de referência (terra remoto).

Durante a medição, o eletrodo de potencial, S, é deslocado ao longo de uma direção específica a partir de uma posição próxima ao AST, em intervalos regulares correspondentes a ~5% da distância *d* e na direção do eletrodo H [1,18]. A partir dos dados obtidos em cada uma das posições definidas para o eletrodo S, é possível plotar a curva de resistências aparentes versus distância, como a apresentada na Figura 9 [1]. As zonas de influência indicadas nessa figura, referem-se à região na qual o aterramento sob teste e o eletrodo auxiliar de corrente, individualmente, produzem uma elevação de potencial no solo. É importante destacar que essa região é dependente da dimensão física do aterramento, onde quanto maior é o aterramento, maior será sua zona de influência. A região da curva onde já não ocorrem variações das resistências aparentes, é chamada “patamar”. Nessa região, a resistência aparente caracteriza, de fato, a resistência do aterramento sob teste. Portanto, durante as medições, o objetivo é determinar os valores associados à região do patamar [1].

Figura 9 – Curva de resistências aparentes versus distância

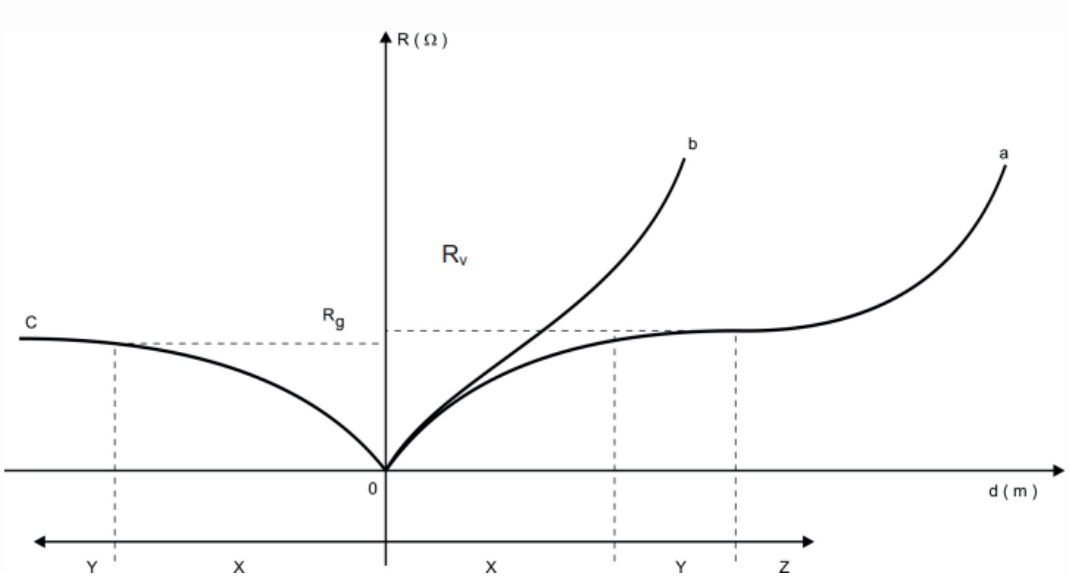


Fonte: Retirado de [1]

Para a situação em que o AST e o eletrodo de corrente não estão suficientemente afastados, haverá sobreposição das suas regiões de influência, de forma que a região de patamar não fica bem caracterizada, como mostra a curva "*b"* da Figura 10. Para contornar essa situação é necessário posicionar o eletrodo auxiliar de corrente em um local ainda mais distante em relação ao AST. Assim, dependendo das dimensões do AST, as distâncias requeridas durante as medições podem ser bastante significativas [1,18].

Ainda na Figura 10, a curva "*a*" representa a situação em que os cabos dos circuitos de tensão e de corrente são lançados na mesma direção e sentido, garantindo-se um distanciamento adequado entre o AST e o eletrodo do circuito de corrente. A curva "*c*", representa o caso em que os circuitos de tensão e de corrente estão na mesma direção, mas em sentidos opostos. Essa prática é recomendada com o objetivo de se mitigar o acoplamento entre os circuitos de medição. Caso haja o acoplamento, a região de patamar apresentará um valor de resistência maior do que aquele que, de fato, caracteriza o aterramento [1,21].

Figura 10 – Curvas de resistências aparentes vs posicionamento do eletrodo de corrente.



Fonte: Retirado de [1]

2.2.3 Condições adversas

2.2.3.1 Cabo para-raios conectado à malha de aterramento

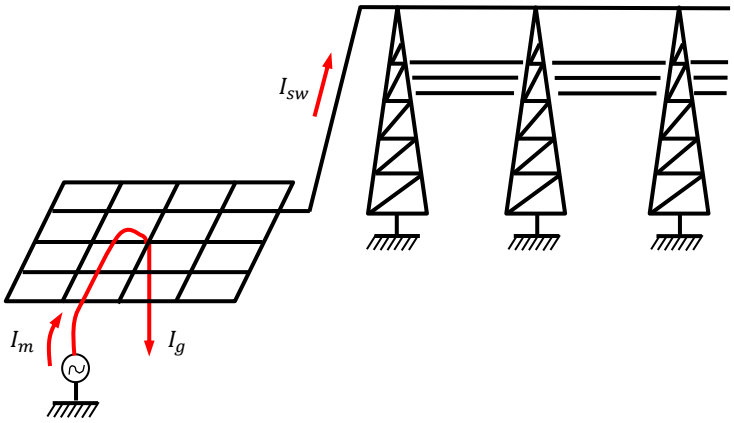
Em certos casos, a malha de aterramento da SE está conectada ao cabo para-raios (CPR) de uma ou mais linhas de transmissão, como ilustrado na Figura 11. Em termos práticos, essa condição pode trazer benefícios, como na ocorrência de uma falta para a terra, de modo que parte da corrente de curto-circuito é direcionada para fora da subestação através do CPR. Consequentemente, há uma redução dos efeitos térmicos nos condutores do aterramento e das tensões de toque e de passo desenvolvidas dentro da subestação [22,23].

Figura 11 – Malha de aterramento conectada ao cabo para-raios através da proteção contra descargas atmosféricas

Fonte: Retirado de [24]

Contudo, durante a medição da resistência de aterramento essa conexão favorece o desvio de parte da corrente injetada pelo terrômetro para fora da SE, seguindo para o aterramento das torres da linha de transmissão. Na Figura 12 essa condição é apresentada, onde I_m é a corrente de medição injetada pelo terrômetro, I_g é a corrente que efetivamente é direcionada para o solo através do aterramento e I_{sw} é a parcela da corrente de medição que sai da SE. É importante ressaltar que a parcela da corrente que sai da SE será proporcionalmente maior, dependendo da quantidade de linhas com CPR conectadas à malha.

Figura 12 – Distribuição da corrente de medição em subestações com CPR conectada à malha



Fonte: adaptado de [13]

Durante a medição da resistência de aterramento, a corrente que se dispersa no solo através do aterramento da SE, produz uma elevação de potencial V_g. Os terrômetros, de modo geral, processam a relação V_g/I_m na perspectiva de que toda a corrente I_m é direcionada para o aterramento da SE. Assim, o tratamento inadequado desta condição pode levar a erros grosseiros [25,26]. Particularmente, a ABNT NBR 15749 [1], descreve alguns métodos aplicáveis em subestações energizadas. Contudo, seu uso exige a desconexão da malha de aterramento dos demais componentes do sistema de aterramento, como o CPR e neutros, procedimento esse pouco viável na prática.

Na perspectiva de, talvez, contornar essa dificuldade, a Norma menciona, de forma bastante sucinta, a possibilidade de se utilizar equipamentos que operem em frequências mais altas. Nesse caso, “o instrumento deve possuir um módulo gerador de sinal de alta frequência (algumas dezenas de kHz)”. Além disso, o instrumento deve operar em uma frequência que torne a impedância indutiva do CPR suficientemente alta para mitigar a parcela da corrente de medição que tenderia a sair da subestação. Atualmente, o uso da frequência de 25 kHz tem sido comum. No entanto, estudos recentes indicam que correntes de frequência mais alta destacam os efeitos reativos associados não apenas ao CPR, mas também à geometria reticulada dos condutores utilizados na construção das malhas [9,27]. Portanto, o uso de correntes em frequências mais baixas, próximas à frequência da rede, mostram-se mais adequadas.

2.2.3.2 Presença de correntes espúrias

Nas subestações, as correntes espúrias podem atingir valores relativamente altos, de modo que a tensão medida pelo terrômetro pode estar sobreposta à componente gerada pela corrente injetada pelo equipamento de medição. Naturalmente, conforme a componente da rede aumenta, há uma degradação da relação sinal/ruído [28]. De fato, essas correntes podem produzir tensões que são elevadas o bastante para danificar os equipamentos de medição que não estejam preparados para essa condição de severidade. Além disso, os equipamentos que operam com níveis baixos de corrente de medição, usualmente inferiores a 15 mA, ficam sujeitos a uma relação sinal/ruído bastante desfavorável, o que pode inviabilizar o processamento das grandezas tensão-corrente medidas ou produzir resultados errôneos, o que seria ainda mais sério. Portanto, para se ter uma relação sinal/ruído que favoreça o adequado processamento das grandezas elétricas medidas, é necessário que o terrômetro opere com níveis de correntes mais elevadas. É importante destacar que a ABNT NBR 15749 não indica um valor mínimo de corrente para aplicação em malhas de subestações. Adicionalmente, deve ser dotado de um sistema de filtros bastante seletivos, visando garantir que os sinais de interesse sejam processados adequadamente [1].

2.2.3.3 Baixos valores da resistência de malha

Dependendo das condições do solo e das dimensões da malha, não raramente o valor da resistência de malha é pequeno, menor que 1 ou 2 ohms. Nestes casos, a medição requer um cuidado especial, de modo que o equipamento convencional medindo a 3 fios, com baixas correntes e sistema de filtros aquém do necessário, tornam-se inapropriados. Para valores de resistência tão baixos, é necessária uma ação conjunta que envolve uma medição a quatro fios baseada na técnica da Ponte de Kelvin, correntes em níveis adequados (potência) e filtros bastante seletivos [29].

2.2.3.4 Alta resistência associada ao eletrodo do circuito de corrente

Em pesquisa realizada em manuais, verificou-se que, no geral, os equipamentos atualmente disponíveis no mercado são projetados para operarem dentro das recomendações de segurança presentes na Norma ABNT NBR 15749 [1]. O item C.3.5 dessa Norma, apresenta a seguinte orientação:

> Durante as medidas, não devem aparecer tensões de contato perigosas. Este objetivo pode ser alcançado através de um projeto adequado da fonte de tensão de saída mediante as seguintes providências: limitar o valor da tensão de saída de circuito aberto a um valor eficaz de 50 V ou um valor de pico de 70 V; quando o valor da tensão de saída de circuito aberto exceder 50 V eficazes ou 70 V de pico, o equipamento deve limitar o valor máximo da corrente injetada no terreno a 7 mA eficazes, ou 10 mA valor de pico.

Contudo, quando a medição ocorre em locais onde a resistividade do solo é elevada, a resistência associada ao eletrodo do circuito de corrente também pode ser bastante elevada, ainda que sejam utilizadas várias hastes para compor tal eletrodo. Nessas situações, a tensão aplicada pelo equipamento precisa ser elevada o bastante para impor uma corrente de medição que seja adequada para esta aplicação (boa relação sinal/ruído). Portanto, faz-se necessário que tanto a tensão como a corrente apresentem níveis significativamente maiores que os praticados pelos equipamentos comuns. Neste mesmo item da Norma, inclusive, há uma nota que alerta:

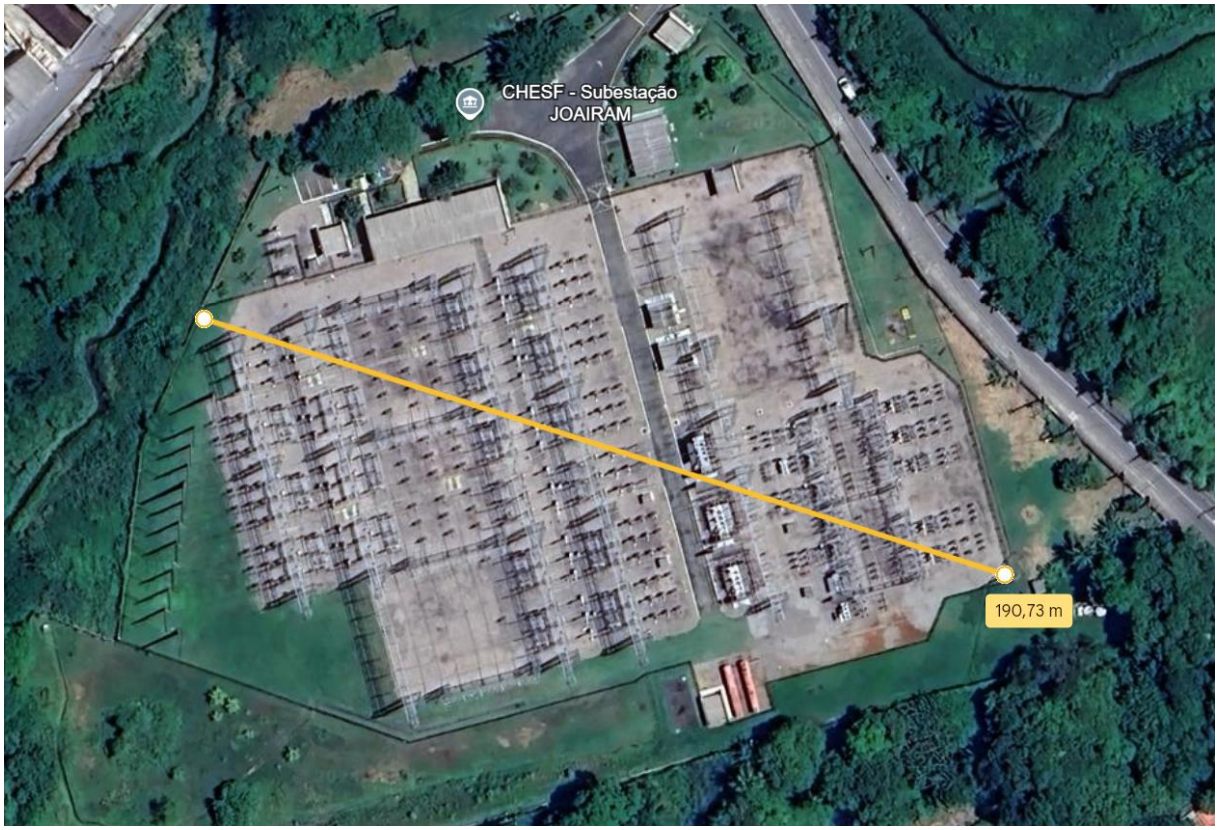
> “Esta Norma aplica-se ao projeto e fabricação de equipamentos dedicados à medição da resistência de aterramento das instalações de baixa tensão (até 1000 Vca ou 1500 Vcc)”. “...Portanto os equipamentos destinados à medição da resistência de aterramento de subestações ou torres de linhas de transmissão de energia ficam fora do escopo deste Anexo”.

2.2.3.5 Acoplamento entre os circuitos de corrente e de tensão

Para a medição da resistência de aterramentos de grandes dimensões, como as malhas em subestações, pode ser necessário o uso de cabos longos tanto para os circuitos de potencial quanto para os de corrente, o que pode resultar em efeitos significativos de acoplamento entre esses circuitos. É válido destacar que o acoplamento entre cabos pode ter característica indutiva e/ou capacitiva, a depender da frequência utilizada. Ademais, a malha de aterramento em teste pode estar situada em um local

onde a disposição espacial dos cabos de medição é desfavorável, intensificando o acoplamento e potencialmente causando erros nos resultados obtidos. Esses efeitos de acoplamento são especialmente importantes em aterramentos com resistência de aterramento (R_g) inferiores a 1 Ω. No entanto, é importante destacar que é preciso redobrar a atenção e o cuidado nos procedimentos de medição quando o valor de R_g estiver entre 1 Ω e 10 Ω [1]. Como exemplo da dimensão da malha, na Figura 13 é apresentada a vista superior da SE Joairam 230/69 kV, na cidade de Jaboatão dos Guararapes, PE, com ~184m de diagonal. Neste caso, o eletrodo do circuito de corrente precisaria ser posicionado a uma distância que varia entre ~570 m (3x) e ~950 m (5x) em relação a malha da SE.

Figura 13 – Vista aérea da SE Joairam



Fonte: retirado do Google Earth [30]

Outro exemplo é apresentado na Figura 14, com vista aérea da SE Janaúba III 500/230 kV, na cidade de Janaúba, MG. Como se pode observar, a diagonal da SE tem ~816 m. Neste caso, o eletrodo do circuito de corrente precisaria ser posicionado

a uma distância que varia entre ~2.448 m (3x) e ~4.080 m (5x) em relação a malha da SE.

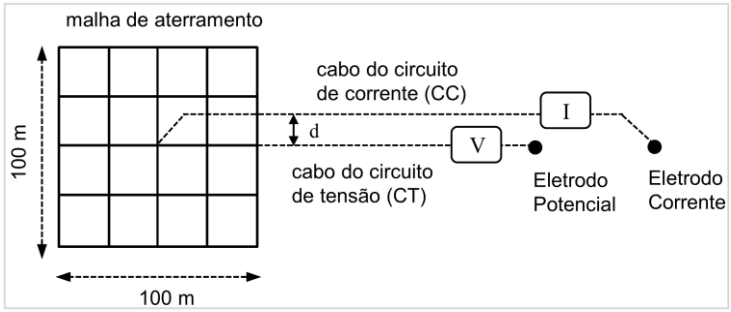
Figura 14 – Vista aérea da SE Janaúba III

Fonte: retirado do Google Earth [31]

Em situações com características semelhantes, o comprimento dos cabos utilizados nos circuitos de medição torna a componente indutiva relevante, podendo haver interferência nos resultados obtidos durante a medição [32]. Ma e Dawalibi [33,34] investigaram os efeitos do acoplamento durante medições utilizando o Método da Queda de Potencial. Suas pesquisas foram realizadas por meio de simulações computacionais, focando na obtenção da impedância de malhas reticuladas instaladas em solos uniformes e multicamadas. A análise do acoplamento levou em conta fatores como a variação na distância de separação dos condutores, a frequência de operação do equipamento de medição, as dimensões da malha de aterramento e a resistividade

do solo. A Figura 15 ilustra o arranjo simulado, onde *d* representa a distância de separação entre os circuitos de medição.

Figura 15 – Arranjo considerado nas simulações



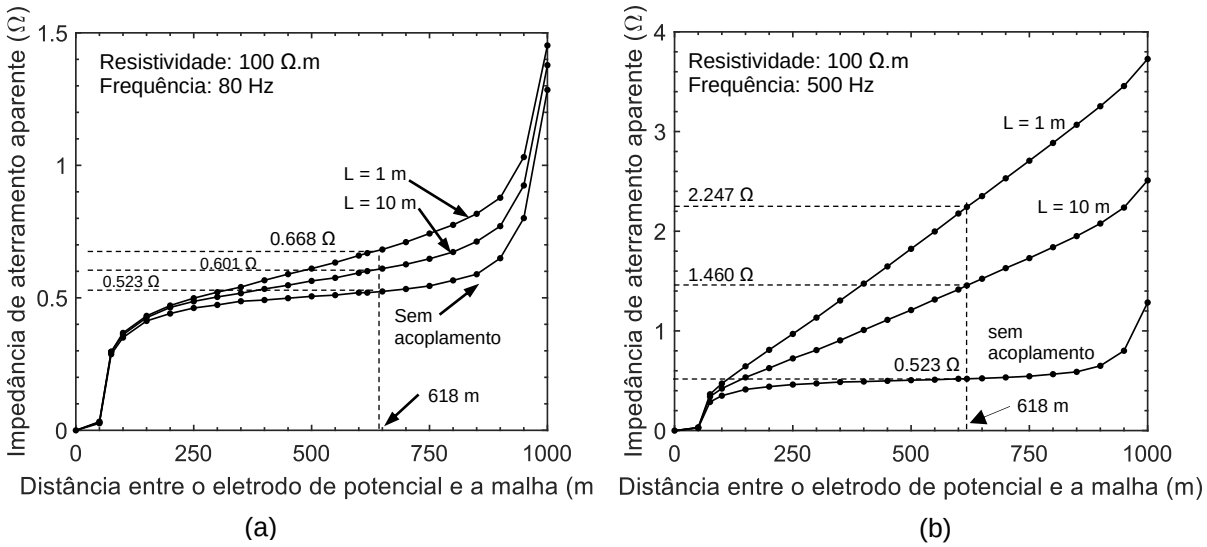
Fonte: adaptado de [34]

Na Figura 16 são apresentadas as curvas obtidas a partir dos valores de resistência de aterramento em um solo com resistividade de 100 Ωm, considerando frequências de 80 Hz e 500 Hz, e distâncias de 1 m e 10 m entre os cabos CT e CC. É importante notar que a "região distante" está localizada a 618 m da malha de aterramento em teste. Nesse caso, em condição ideal, o valor real da resistência de aterramento é de 0,523 Ω. Além disso, os gráficos evidenciam dois aspectos: *i*) para uma mesma frequência, o aumento da distância entre os cabos reduz o acoplamento; *ii*) o aumento da frequência resulta em um acoplamento maior entre os cabos, o que, por sua vez, eleva o valor da impedância. No entanto, o gráfico da Figura 16a revela erros relativos de 15% e 28% para afastamentos de 10 m e 1 m, respectivamente. Já na Figura 16b, os erros relativos são de 179% e 330% para as mesmas distâncias, indicando que o acoplamento entre circuitos é um fator relevante e crucial a ser considerado durante as medições.

Nesse mesmo trabalho, também foi avaliada a influência das dimensões do aterramento. Nesse novo cenário, a malha de aterramento foi reduzida para 50 m × 50 m, mantendo-se os 16 retículos. A Figura 17 mostra que, neste caso, a resistência de aterramento é caracterizada uma distância 309 m da malha de aterramento, no valor de 0,998 Ω, sendo essa uma distância menor do que a observada anteriormente. Além disso, o acoplamento entre os cabos CT e CC é significativo apenas para a frequência

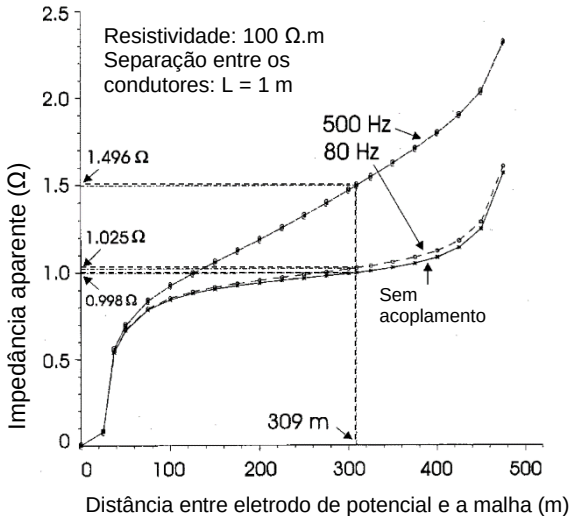
de 500 Hz. Isso indica que, conforme mencionado inicialmente, quanto menor a dimensão do aterramento, menor será o acoplamento devido ao menor comprimento dos cabos CT e CC.

Figura 16 – Curva de resistências aparentes, (a) em 80 Hz e (b) em 500 Hz



Fonte: Adaptada de [34]

Figura 17 – Resistência aparente considerando a variação da frequência



Fonte: Adaptada de [34]

2.3 Equipamentos de medição

De acordo com a norma ABNT NBR 15749 [1], os equipamentos utilizados para medição de resistência de aterramento e potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento em instalações de baixa tensão, até 1000 V c.a. ou 1500 V c.c., devem atender os seguintes requisitos:

- A tensão aplicada deve ser alternada, de frequência e forma de onda definidas de forma que as interferências advindas da rede não afetem os resultados das medições significativamente;
- O máximo erro percentual, calculado de acordo com a Tabela 1, não dever ser maior que 30% do valor tido como convencional. Esse erro deve ser aplicável para situações de injeção de tensões de interferência alheias ao sistema, de até 3 V eficazes, nas frequências de 50 Hz, 60 Hz, ou tensão contínua, que se superpõem à tensão medida, e utilizando eletrodo de corrente e sonda de potencial de resistência inferior ou igual a 100 vezes a resistência medida, ou 50 kΩ. O manual do equipamento deve informar se a influência das tensões c.c. e c.a. na frequência da rede excede estes requisitos;

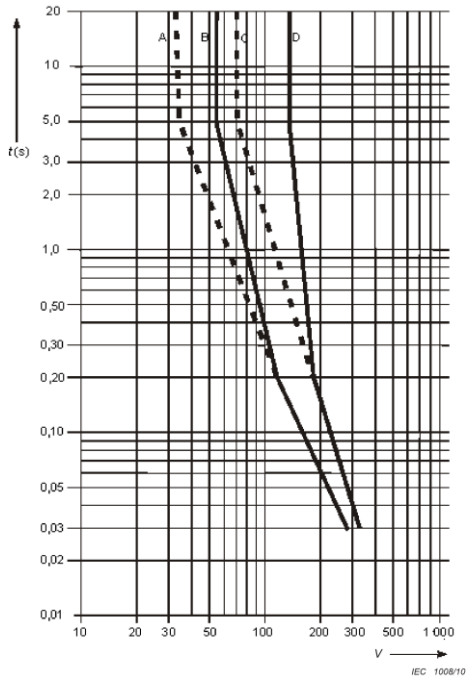
Tabela 1 – Cálculo do erro de funcionamento

Erro intrínseco ou de magnitude de influência	Condições de referência ou campo de funcionamento especificado	Código de designação	Requisitos ou ensaios segundo seções ou subseções correspondentes da IEC 61557-5	Tipo de ensaio
Erro intrínseco	Condições de referência	A	5, 6.1	R
Posição	Posição de referência $\pm 90°$	E_1	1, 4.2	R
Tensão de alimentação	Nos limites indicados pelo fabricante	E_2	1, 4.2, 4.3	R
Temperatura	0 °C e 35 °C	E_3	1, 4.2	T
Tensão parasita de modo série	Ver 4.2 e 4.3	E_4	5, 4.2, 4.3	T
Resistência das hastes auxiliares	0 a 100 x RA; porém ≤ 50 kΩ	E_5	5, 4.3	T
Frequência da rede	99% a 101% da frequência nominal	E_6	5, 4.3	T
Tensão da rede	85% a 110% da tensão nominal	E_7	5, 4.3	T
Erro de funcionamento	$B = \pm\left(\lvert A\rvert + 1{,}15\sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 + E_5^2 + E_6^2 + E_7^2}\right)$		5, 4.3	R
A = erro intrínseco B = variações R = ensaio de rotina T = ensaio de tipo		$B(\%) = \pm\frac{B \times 100\%}{valor\ convencional}$		

Fonte: retirado de [1].

- O equipamento deve ser capaz de avaliar se a resistência dos eletrodos auxiliares está dentro dos requisitos citados no tópico anterior;
- Controle de tensões de contato perigosas por meio da regulagem da tensão de saída de circuito aberto. Em terrenos secos o limite superior deve ser de 50 V eficazes e em terrenos úmidos 25 V eficazes, nos casos em que esses limites sejam excedidos, o equipamento deve limitar a corrente injetada no terreno a 7 mA eficazes. Em caso de não cumprimento de ambos os critérios, o equipamento deve interromper a medição nos tempos definidos de acordo com a Figura 18, onde a curva *A* se refere a medições em terrenos úmidos e com tensão c.a.; a curva B está associada à medições em terrenos secos e com tensão c.a.; curva “C” em medições com terrenos úmidos e tensão c.c. e a curva D em medições com terrenos secos e tensão c.c.

Figura 18 – Tempo máximo admissível para interrupção de medição em caso de descumprimento do critério de máxima tensão de saída de circuito aberto e máxima corrente injetada no solo



Fonte: retirado de [35]

- O dispositivo não deve expor o usuário a tensões de contato acima da faixa admissível e o equipamento deve suportar, sem sofrer danos, até 120% da tensão nominal nos seus bornes de tensão disponíveis para conexão à rede, sem que a sua proteção atue dentro dessa faixa.

Em uma pesquisa realizada, verificou-se a existência de uma ampla disponibilidade de equipamentos que realizam a medição da resistência de aterramento. Na Tabela 2 são apresentadas algumas das informações disponíveis nos respectivos manuais, onde se verifica significativa variabilidade da frequência de operação, assim como na faixa de valores de resistência. Outras informações não são disponibilizadas, como a forma de onda da tensão/corrente.

Tabela 2 – Modelos comerciais de terrômetros e suas principais características

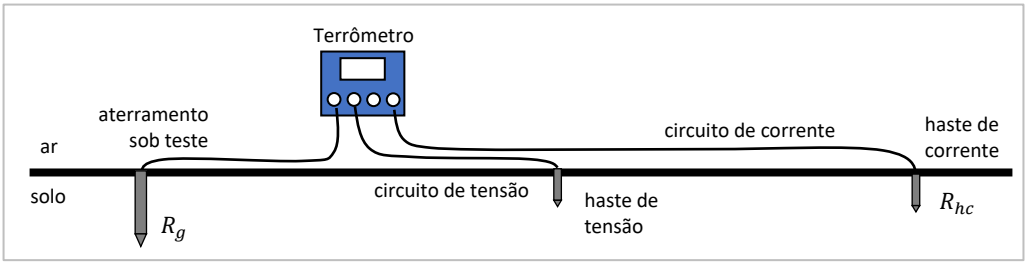
Fabricante	Modelo	Frequência [Hz]	Corrente injetada [mA]	Mínima Tensão Medida [mV]	Faixa de Resistências Medidas [Ω]
AEMC	6472	41 - 513	>200	10	0,09 - 99,9k
Highmed	HMTR-30	94/105/111/128	-	100	0,01 - 30
Hikari	HTE-770	40 - 400	-	100	0,01 - 2000
Instrump	ITTMD 20 kW	150	7 - 10	-	0,01 - 19,99 k
Megabras	EM4058	270/570/870/1170/1470	20	100	0,01 - 20 k
	MTD 20 kWe	1470	10,6	100	0,01 - 20 k
	TM25R	25 k	20	-	0 - 300
Minipa	MTR-1520D	40 - 500	2	100	0,01 - 2000
	MTR-1530	820	2	100	0,01 - 4000
	MTR-1540	820	2	100	0,01 - 2000
	MTR-2300	94/105/111/128	250	100	0,02 - 150
Victor-Ruoshui	4108	94/105/111/128	250	40000	0,02 - 199,9 k

Fonte: elaborado pelo autor

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir de ensaios realizados com alguns terrômetros comerciais. Os ensaios foram realizados em bancada, sob condições controladas, sendo utilizados resistores para simular as resistências de aterramento, R_g, e a resistência associada ao eletrodo do circuito de corrente, R_{hc}. É importante mencionar que seus valores foram verificados utilizando-se uma ponte RLC. Ao longo deste trabalho, esses resistores são utilizados como referência, sendo referidos como resistências de referência, R_{ref}. Os ensaios simulam o uso do Método da Queda de Potencial (ver Figura 19), amplamente utilizado no meio técnico.

Figura 19 – Representação esquemática do Método da Queda de Potencial



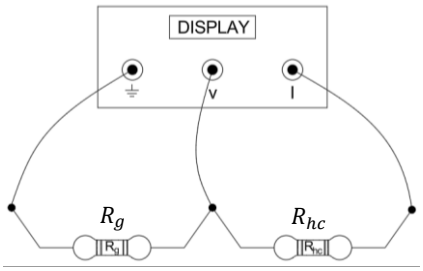
Fonte: feito pelo autor

A primeira sequência de testes foi realizada mantendo R_{hc} nula (condição ideal) e variando R_g. Em seguida foram realizadas medições mantendo o valor de R_g fixo e variando o valor de R_{hc} em uma ampla faixa de valores. Esse teste foi repetido para diferentes valores de R_g. Por fim, foram realizadas medições mantendo a resistência R_{hc} com um valor fixo e não nulos, variando-se os valores R_g. Essa condição foi aplicada para diversos valores de R_g. Foram verificados, também, os tipos de formas de ondas utilizados pelos equipamentos.

A ABNT 15749 menciona que usualmente R_{hc} deve estar abaixo de 500 Ω, e cita, como regra prática, que a razão entre R_{hc} e R_g não deve exceder 1000:1, devendo manter-se, preferencialmente, abaixo de 100:1.

A Figura 20 apresenta uma representação genérica do circuito montado em bancada para a realização dos testes, onde V representa o borne de tensão e I o borne de corrente.

Figura 20 – Representação esquemática do arranjo montado em bancada



Fonte: feito pelo autor

Para os ensaios, foram utilizados dois aparelhos de fabricantes e características distintas. Estes terrômetros serão referidos apenas como equipamento A (EqA) e equipamento B (EqB), considerando que este trabalho não tem como objetivo realizar nenhum tipo de julgamento ou juízo sobre marcas e modelos de equipamentos. As características gerais de cada equipamento, disponíveis em seus respectivos manuais, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos equipamentos utilizados

Especificações Técnicas		
	A	B
Frequência	25 kHz	800 Hz
Faixas de Resistência para R_g	0 – 300 Ω	20 Ω, 200 Ω, 2000 Ω
Resolução	Não indicada	0,01 Ω, 0,1 Ω, 1 Ω
Resistência máxima para R_{hc}	2000 Ω para a haste de corrente 2000 Ω para a haste de tensão	Não infomado
Tensão AC	Não informado	200 V
Corrente de medição	20 mA	2 mA

Fonte: feito pelo autor

3.1 Caso 1: R_g com valores variados e $R_{hc} = 0$

Nesse teste, é avaliada a capacidade dos equipamentos determinarem o valor da resistência de aterramento na situação em que a resistência da haste de corrente é nula, condição essa que seria a ideal. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5, onde R_n se refere ao valor nominal de cada resistor, R_{ref} é a resistência medida com a ponte RLC, R_A e R_B são as resistências medidas com os equipamentos EqA e EqB respectivamente, e $E(\%)$ o erro relativo.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos com EqA, onde se verifica que equipamento realizou medições dentro da faixa de valores assegurada pelo fabricante (até 300 Ω). Verifica-se, também, que os valores apresentados são bem próximos dos valores de referência (R_{ref}), apresentando erros que podem ser considerados aceitáveis para toda a faixa avaliada, mantendo-se sempre abaixo de 2,5%.

Tabela 4 – Resultados obtidos com EqA: Caso 1

$R_n[\Omega]$	$R_{ref}[\Omega]$	$R_A[\Omega]$	$E(\%)$
1	1,11	1,12	0,89
1,2	1,27	1,26	0,79
2,2	2,23	2,26	1,33
4,7	4,74	4,78	0,84
10	10,22	10,26	0,39
12	12,07	12,13	0,49
15	15,02	15,12	0,66
18	17,76	17,89	0,73
22	21,82	21,9	0,37
33	32,88	33	0,36
68	67,31	67,2	0,16
100	98,2	98,7	0,51
180	178	180,5	1,39
200	195,9	199,1	1,61
220	218,6	222	1,53
260	265,7	272	2,32
330	327	-	-
390	387,3	-	-
470	468,3	-	-

Fonte: feito pelo autor

O equipamento B também processou e apresentou resultados dentro da faixa para a qual foi projetado (até 2 kΩ). Contudo, os resultados relacionados aos valores nominais de 1 Ω, 1,2 Ω e 2 Ω apresentaram erros mais significativos (16,84%, 17,59%, 8,25%, respectivamente). Nas demais situações o erro foi aceitável, mantendo-se sempre abaixo de 2,15%. Esses resultados indicam que o uso desse equipamento para realizar medições de baixos valores como, por exemplo, em subestações requer que o usuário fique atento. Isso porque é relativamente comum a resistência de aterramento de uma subestação ser menor que 2 Ω.

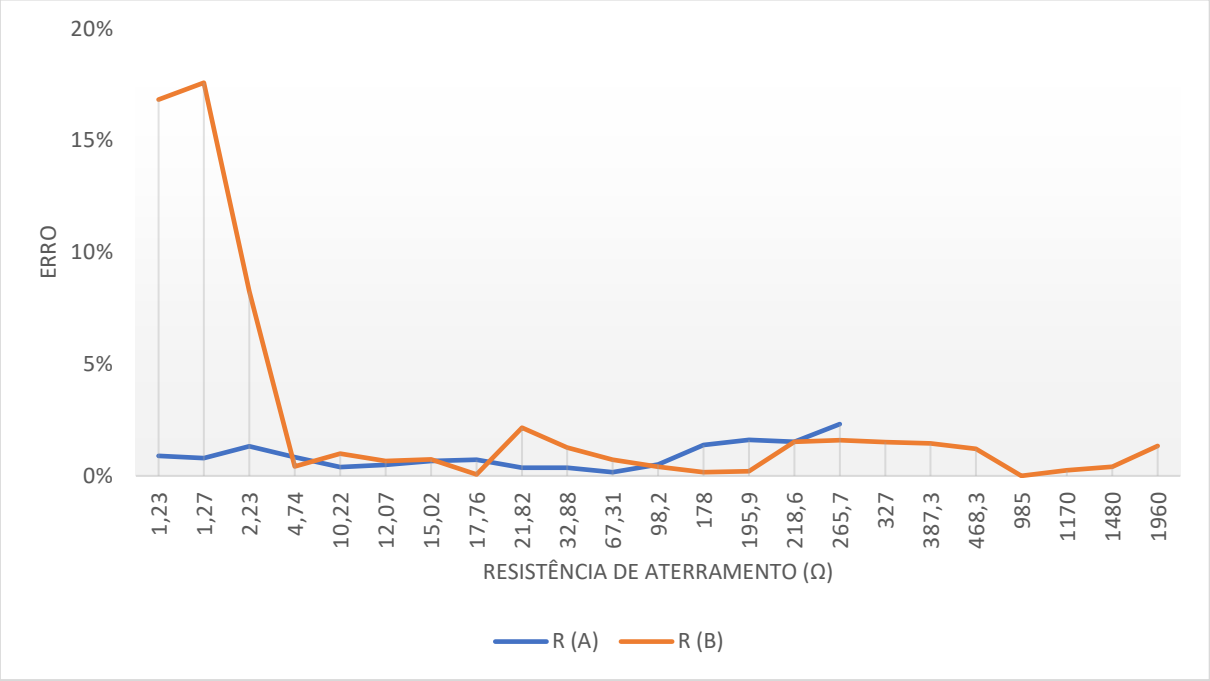
Tabela 5 – Resultados obtidos com EqB: Caso 1

$R_n[\Omega]$	$R_{ref}[\Omega]$	$R_B[\Omega]$	$E(\%)$	$R_n[\Omega]$	$R_{ref}[\Omega]$	$R_B[\Omega]$	$E(\%)$
1	1,11	0,95	16,84	180	178	177,7	0,17
1,2	1,27	1,08	17,59	200	195,9	195,5	0,20
2,2	2,23	2,06	8,25	220	218,6	222	1,53
4,7	4,74	4,76	0,42	260	265,7	270	1,59
10	10,22	10,12	0,99	330	327	332	1,51
12	12,07	11,99	0,67	390	387,3	393	1,45
15	15,02	14,91	0,74	470	468,3	474	1,20
18	17,76	17,75	0,06	1000	985	985	0,00
22	21,82	22,3	2,15	1200	1170	1173	0,26
33	32,88	33,3	1,26	1500	1480	1474	0,41
68	67,31	67,8	0,72	2000	1960	1934	1,34
100	98,2	98,6	0,41	2200	2160	-	-

Fonte: feito pelo autor

Na Figura 21 são apresentadas as curvas relativas os erros associados aos equipamentos A e B. Nela, fica evidente a discrepância ocorrida com os valores obtidos com o EqB na condição em que a resistência R_g é menor que ~2 Ω. Esse não é o caso equipamento A. Já em relação aos valores maiores que ~2 Ω, ambos equipamentos apresentaram um desempenho adequado.

Figura 21– Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 1



Fonte: feito pelo autor

3.2 Caso 2: $R_g = 30\ \Omega$ e R_{hc} com valores variados

Neste caso, a resistência R_g foi fixada em 30 Ω e R_{hc} apresenta valores variados. Essa é uma condição que representa as situações em que a resistência pode estar associada ao aterramento do pé-de-torre de linhas de transmissão. Este é um valor de projeto bastante comum. Adicionalmente, devido a variabilidade das condições de solo onde as torres são instaladas, a resistência associada a haste do circuito de corrente pode variar bastante. Portanto, são consideradas resistências R_{hc} em uma ampla faixa de valores. Este ensaio teve tais premissas para a sua execução.

Os resultados obtidos com o EqA são apresentados na Tabela 6. Nela, verifica-se que, apesar do fabricante informar que o valor máximo para R_{hc} é de 2 kΩ, o equipamento realizou medições com valores que chegaram a ~5,5 kΩ. Apesar de essa ser uma condição desejável e necessária em muitas situações de campo, é importante que alguns aspectos de ordem prática sejam ressaltados. Nesse sentido, considerando as informações do manual do equipamento, a expectativa seria a de que os valores de R_A não deveriam apresentar erros significativos para qualquer valor de R_{hc}

dentro da faixa limite de 2 kΩ definida pelo fabricante. Entretanto, o que se verificou foi um erro crescente para o valor de R_g, à medida que se aumentou R_{hc}.

É importante observar que, na condição limite para a resistência da haste de corrente ($R_{hc} = 2\ k\Omega$) o erro já é de ~40%. Entretanto, essa condição é ainda mais crítica. Isso porque o equipamento continua apresentando resultados mesmo quando $R_{hc} > 2k\Omega$. Nessa condição, o erro chegou a ~108% ($R_g = 68{,}5\ \Omega$) para R_{hc}, aproximadamente, igual 5,5 kΩ. Isso é particularmente preocupante, pois o usuário, em condições de campo, não sabe quais são as condições locais para R_g e R_{hc} em cada uma das torres que serão avaliadas.

Tabela 6 – Resultados obtidos com o equipamento A: Caso 2

$R_{hc}[\Omega]$	$R_A[\Omega]$	$E(\%)$	$R_{hc}[\Omega]$	$R_A[\Omega]$	$E(\%)$
10,2	33,1	0,67	736,5	35,9	9,18
12,1	33,1	0,67	797,8	36,1	9,79
15,0	33,1	0,67	857,3	36,4	10,71
17,8	33,2	0,97	985,0	36,9	12,23
21,8	33,2	0,97	1170,0	37,7	14,66
67,3	33,3	1,28	1480,0	39,1	18,92
98,2	33,4	1,58	1960,0	40,8	24,09
178,0	33,7	2,49	2160,0	42,0	27,74
195,9	33,8	2,80	2660,0	44,3	34,73
217,6	33,9	3,10	3145,0	47,8	45,38
265,7	34,0	3,41	4670,0	60,4	83,70
327,0	34,3	4,32	5516,0	68,5	108,33
386,5	34,5	4,93	6501,0	-	-
470,8	34,8	5,84	7676,0	-	-
569,0	35,2	7,06	8110,0	-	-
666,7	35,6	8,27	-	-	-

Fonte: feito pelo autor

Os resultados obtidos com o equipamento B são apresentados na Tabela 7, onde se verifica a boa qualidade dos resultados, sendo o erro máximo menor que ~3,6% em toda a faixa avaliada. Apesar do manual do equipamento não informar o valor limite para R_{hc}, chamou a atenção o fato das medições terem sido executadas adequadamente com valores bastante elevados para R_{hc}, chegando a ~26,7 kΩ. Esse é um cenário muito diferente do verificado com o EqA. Entretanto, é importante destacar

que a corrente de medição do EqB é de apenas 2 mA. Essa pode ser uma condição limitante para o uso desse equipamento. Isso é particularmente verdadeiro nos casos em que as torres estejam instaladas em locais com a presença de correntes espúrias. A baixa amplitude da corrente, produzirá tensões no solo também de baixa amplitude. Neste caso, a relação sinal ruído pode levar a erros grosseiros. A despeito dessa condição, ainda que não existam correntes espúrias, as tensões desenvolvidas poderão ser muito baixas, sendo de 60 mV para $R_g = 30\ \Omega$, o que exige que o equipamento apresente um sistema de processamento de sinais relativamente sofisticado.

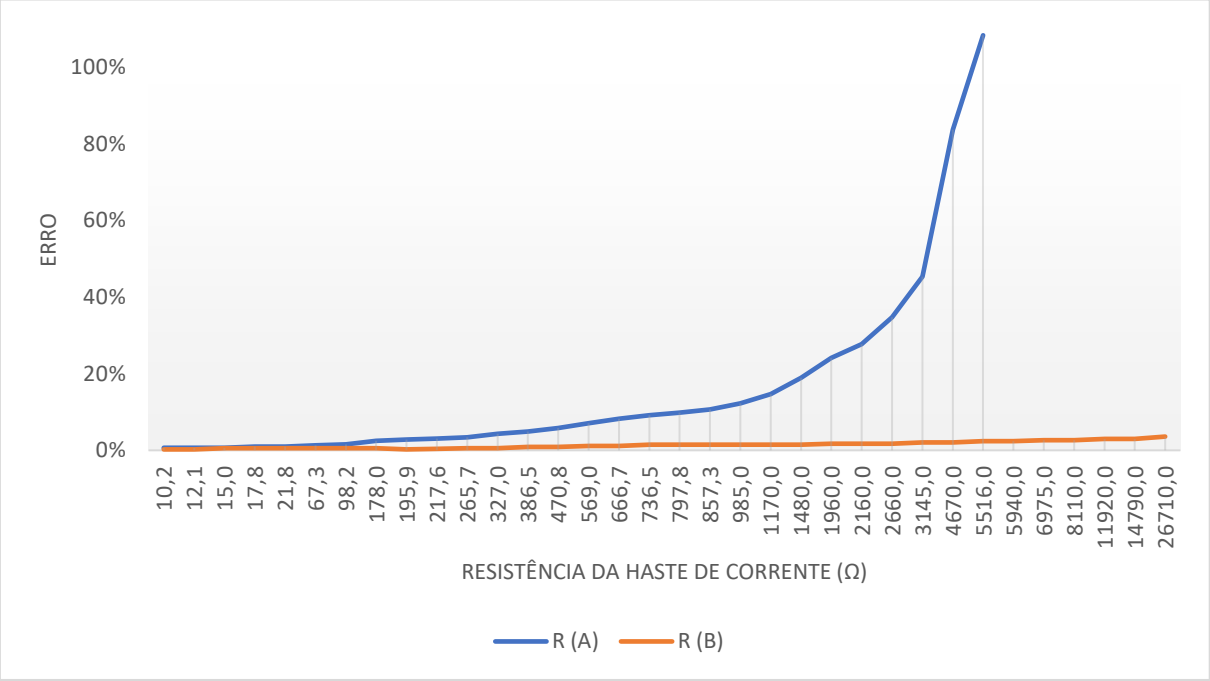
Tabela 7 – Resultados obtidos com o equipamento B: Caso 2

$R_{hc}[\Omega]$	$R_B[\Omega]$	$E(\%)$	$R_{hc}[\Omega]$	$R_B[\Omega]$	$E(\%)$
10,22	32,8	0,24	840,20	32,4	1,46
12,07	32,8	0,24	985,00	32,4	1,46
15,02	32,7	0,55	1170,00	32,4	1,46
17,76	32,7	0,55	1480,00	32,4	1,46
21,82	32,7	0,55	1960,00	32,3	1,76
67,31	32,7	0,55	2160,00	32,3	1,76
98,20	32,7	0,55	2660,00	32,3	1,76
178,00	32,7	0,55	3373,00	32,2	2,07
195,90	32,8	0,24	4670,00	32,2	2,07
218,60	33,0	0,36	5540,00	32,1	2,37
265,70	32,7	0,55	5940,00	32,1	2,37
327,00	32,7	0,55	6975,00	32,0	2,68
387,30	32,6	0,85	8110,00	32,0	2,68
468,30	32,6	0,85	11920,00	31,9	2,98
560,30	32,5	1,16	14790,00	31,9	2,98
655,20	32,5	1,16	26710,00	31,7	3,59
723,00	32,4	1,46	29700,00	-	-
781,90	32,4	1,46	-	-	-

Fonte: feito pelo autor

Na Figura 22 são apresentadas as curvas relativas os erros associados aos equipamentos A e B. Nela, fica evidente o rápido crescimento do erro associado ao EqA, sobretudo quando $R_{hc} \geq 1\ k\Omega$. É importante destacar, contudo, que os valores de R_g podem ser considerados adequados quando avaliados dentro da faixa em que se tem $R_{hc} \leq 500\ \Omega$, sugerido por norma. Já o EqB apresentou um bom desempenho ao longo de toda a faixa de valores considerada.

Figura 22 – Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 2



Fonte: feito pelo autor

3.3 Caso 3: $R_g = 200\ \Omega$ e R_{hc} com valores variados

Neste caso, a resistência R_g foi fixada em 200 Ω e R_{hc} tem valores variados. Esse cenário pode representar situações em que o aterramento é constituído por um pequeno arranjo de hastes. Em alguns casos, podem ser encontradas em aterramentos de linhas de subtransmissão. Adicionalmente, devido a variabilidade das condições de solo onde as estruturas são instaladas, a resistência associada a haste do circuito de corrente pode variar bastante. Portanto, são consideradas resistências R_{hc} em uma ampla faixa de valores.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8. Como no caso anterior, os valores de R_g obtidos com o EqA apresentaram uma tendência de aumento à medida que R_{hc} também aumentou, chegando a ~55%. Além disso, o EqA, mais uma vez, realizou medições na condição em que R_{hc} é maior que 2 kΩ, com o erro aumentando muito rapidamente a partir desse valor. Isso pode ser verificado no gráfico apresentado na Figura 23. Já em relação ao EqB, a resistência medida não apresentou variação significativa (~194 Ω) para toda faixa de valores de R_{hc}. Os resultados para esse

equipamento também são apresentados na Tabela 8. A Figura 23 também evidencia essa quase constância em relação ao erro, estando sempre de ~2%.

Conclusivamente, os resultados apresentados no caso 2 e no caso 3 mostram que os valores medidos pelo EqA possuem erros com uma tendência de crescimento que podem estar associados à resistência série do circuito de medição. Nos ensaios, verificou-se empiricamente que o erro passa a ser maior que ~10% quando R_s é maior que ~1 kΩ. Além disso, o erro aumenta muito rapidamente à medida que R_{hc} também aumenta para além desse valor. Já o EqB apresentou bons resultados para toda a faixa de valores utilizadas em R_{hc}, com erros sempre menores que ~2%.

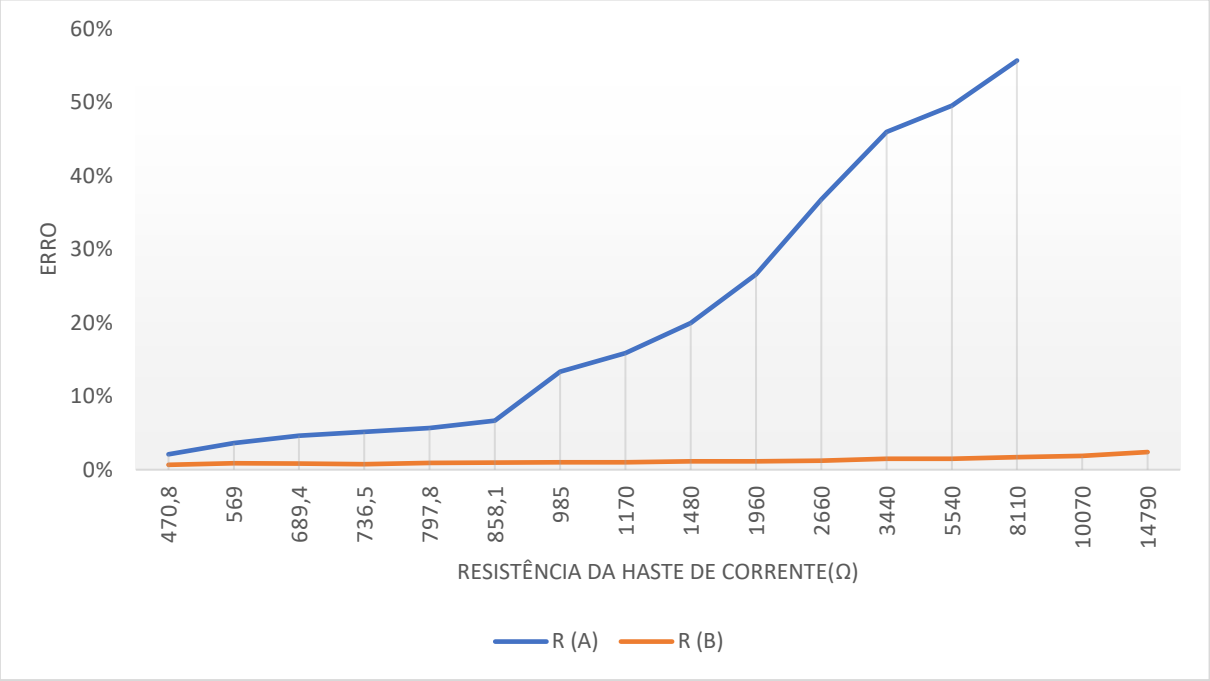
Tabela 8 – Resultados obtidos com EqA e EqB: Caso 3

EQUIPAMENTO A			EQUIPAMENTO B		
$\boldsymbol{R_{hc}}[\Omega]$	$\boldsymbol{R_A}[\Omega]$	$\boldsymbol{E}(\%)$	$\boldsymbol{R_{hc}}[\Omega]$	$\boldsymbol{R_B}[\Omega]$	$\boldsymbol{E}(\%)$
470,8	200	2,09	470,8	194,6	0,66
569,0	203	3,62	569,0	194,2	0,87
688,4	205	4,65	689,4	194,3	0,82
736,5	206	5,16	736,5	194,4	0,77
797,8	207	5,67	797,8	194,1	0,92
857,3	209	6,69	858,1	194,0	0,97
985,0	222	13,32	985,0	193,9	1,02
1170	227	15,88	1170	193,9	1,02
1480	235	19,96	1480	193,7	1,12
1960	248	26,60	1960	193,7	1,12
2660	268	36,80	2660	193,5	1,23
2945	286	45,99	3440	193,0	1,48
3130	293	49,57	5540	193,0	1,48
3440	305	55,69	8110	192,6	1,68
3640	-	-	10070	192,2	1,89
-	-	-	14790	191,2	2,40
-	-	-	26710	-	-

Fonte: feito pelo autor

A partir do gráfico apresentado na Figura 23 é possível verificar que ambos os equipamentos apresentam resultados adequados para valores de R_{hc} menores que ~500 Ω. Contudo, à medida que os valores se aproximam de 1 kΩ, os erros produzidos pelo EqA aumentam muito rapidamente, chegando a índices superiores a 50%. Isso não ocorre com o EqB, que mantém o erro sempre dentro de índices aceitáveis.

Figura 23 – Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 3



Fonte: O feito pelo autor

3.4 Caso 4: R_g com valores variados e $R_{hc} = 470\ \Omega$

Neste caso, a resistência R_g tem seus valores variados e a resistência R_{hc} foi fixada em 470 Ω. Este ensaio não expressa uma condição específica. A variação dos valores de R_g abrange uma variedade bastante ampla de aplicações. Contudo, os resultados devem demostrar capacidade dos equipamentos lidarem com essa variabilidade de valores quando a haste de corrente é submetida a resistências relativamente baixa. Os valores de referência (R_{ref}) e os obtidos com os equipamentos são apresentados na Tabela 9. Os resultados, no geral, apresentaram boa concordância. Contudo, os seguintes aspectos chamam a atenção: *i*) no geral, EqA apresenta erros maiores que os de EqB; *ii*) EqB apresentou erros expressivos para valores R_B menores que ~2 Ω, tal como ocorreu no caso 1. Isso pode estar relacionado com a baixa qualidade do equipamento em lidar com o processamento de sinais de pequena amplitude. Isso porque, como a corrente é de apenas 2 mA, a tensão desenvolvida é, consequentemente, também muito pequena. Ressalta-se, também, que as medições foram realizadas em um ambiente controlado, portanto, livre de distúrbios eletromagné-

ticos, como correntes espúrias. Diante disso, reforça-se a suspeita de existir uma possível deficiência do equipamento em lidar com o processamento de sinais de baixa amplitude.

Tabela 9 – Resultados obtidos com EqA e EqB: Caso 4

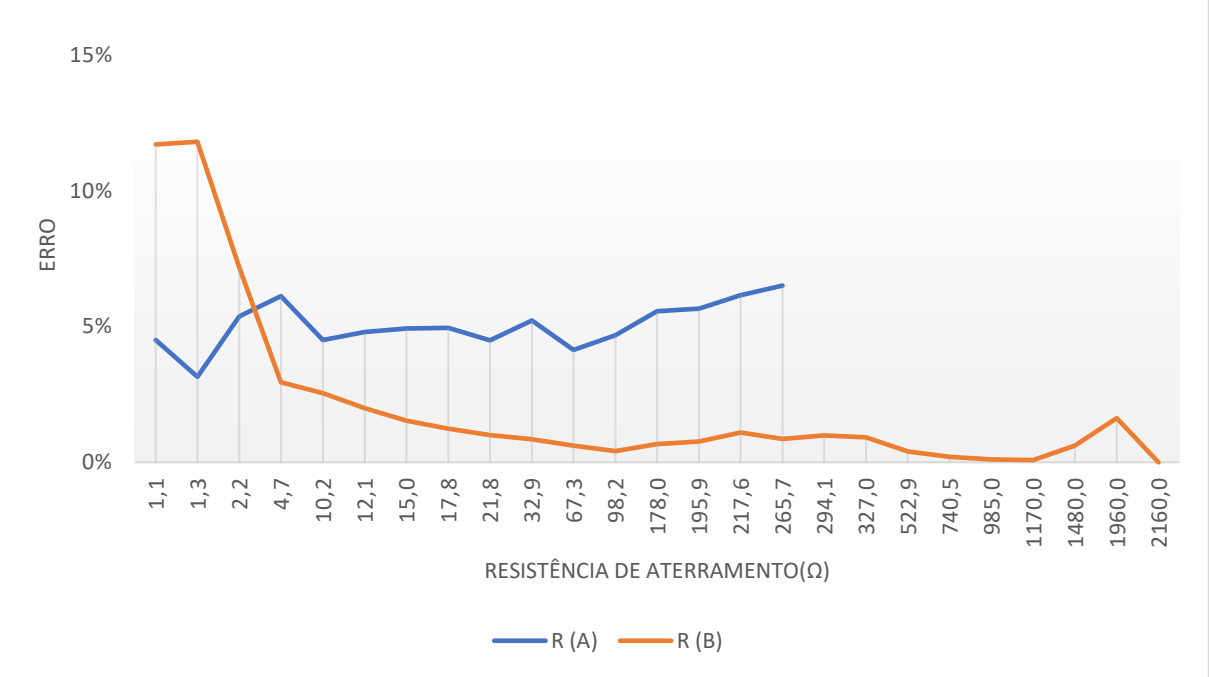
Valores de referência	Equipamento A		Equipamento B	
$\boldsymbol{R_{ref}}[\Omega]$	$\boldsymbol{R_A}[\Omega]$	$\boldsymbol{E}(\%)$	$\boldsymbol{R_B}[\Omega]$	$\boldsymbol{E}(\%)$
1,11	1,16	4,50	0,98	11,71
1,27	1,31	3,15	1,12	11,81
2,23	2,35	5,38	2,07	7,17
4,74	5,03	6,12	4,6	2,95
10,22	10,68	4,50	9,96	2,54
12,07	12,65	4,81	11,83	1,99
15,02	15,76	4,93	14,79	1,53
17,76	18,64	4,95	17,54	1,24
21,82	22,80	4,49	21,6	1,01
32,88	34,60	5,23	32,6	0,85
67,31	70,10	4,15	66,9	0,61
98,2	102,80	4,68	97,8	0,41
178	187,90	5,56	176,8	0,67
195,9	207,00	5,67	194,4	0,77
217,6	231,00	6,16	220	1,10
265,7	283,00	6,51	268	0,87
294,1	-	-	297	0,99
327	-	-	330	0,92
522,9	-	-	525	0,40
740,5	-	-	742	0,20
985	-	-	984	0,10
1170	-	-	1171	0,09
1480	-	-	1471	0,61
1960	-	-	1928	1,63
2160	-	-	-	-

Fonte: O feito pelo autor

O gráfico apresentado na Figura 24, evidencia que os erros associados ao EqA são aceitáveis, sendo de ~5% para toda a faixa avaliada. Essa é uma condição diferente da verificada nos casos 2 e 3, onde os erros chegaram a valores superiores a 100%. Tal condição sugere que o EqA pode estar com alguma deficiência na sua capacidade em processar os sinais tensão e corrente quando a resistência total do

circuito de corrente ($R_T = R_g + R_{hc}$) é maior que 1 kΩ (ver casos 2 e 3). Como os resultados apresentados foram obtidos para à resistências R_T menores que 1 kΩ, os erros se mantiveram aceitáveis. Em relação ao EqB, essa restrição já não acontece, qualquer que seja o caso considerado. Isso porque EqB mantem o erro sempre dentro de índices aceitáveis.

Figura 24 – Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 4



Fonte: O feito pelo autor

3.5 Caso 5: R_g com valores variados e $R_{hc} = 1960\ \Omega$

Neste caso, a resistência R_g tem seus valores variados e a resistência R_{hc} foi fixada em 1960 Ω. Esse valor foi escolhido pela proximidade com o limite indicado pelo fabricante do EqA. Este ensaio não expressa uma condição específica. Contudo, esse valor de R_{hc} foi escolhido por já estar muito próximo do limite máximo informado no manual de EqA. Assim, este ensaio visa, fundamentalmente, verificar se a tendência de erros observados nos casos 2 e 3 se repete. Isso porque, o valor de 1960 Ω já garante que a resistência total do circuito de corrente será maior que 1 kΩ, em todos os casos. É importante mais uma vez ressaltar que, segundo o manual de EqA, esse equipamento deveria entregar resultados confiáveis dentro da faixa em que se tem

$R_g \leq 300\ \Omega$ e $R_{hc} \leq 2\ k\Omega$. Contudo, os resultados apresentados na Tabela 10 indicam algo bem diferente. Nela, verifica-se que o erro é da ordem de 20% em toda a faixa avaliada (ver Figura 25). Esse percentual está em concordância com o que foi obtido nos casos 2 e 3, na condição em que a resistência total do circuito de corrente, R_T, apresenta valores semelhantes. Portanto, os resultados reforçam a possibilidade de EqA apresentar algum tipo de deficiência ou dificuldade em lidar operacionalmente com medições que tenham R_T maior que 1 kΩ. Já EqB, apresentou a mesma tendência verificada nos casos 1 e 4, apresentando erros mais significativos para R_g menores que ~1 kΩ. Para valores maiores, os erros apresentaram índices aceitáveis. Como já mencionado, isso pode estar relacionado com a baixa qualidade do equipamento em lidar com o processamento de sinais de pequena amplitude.

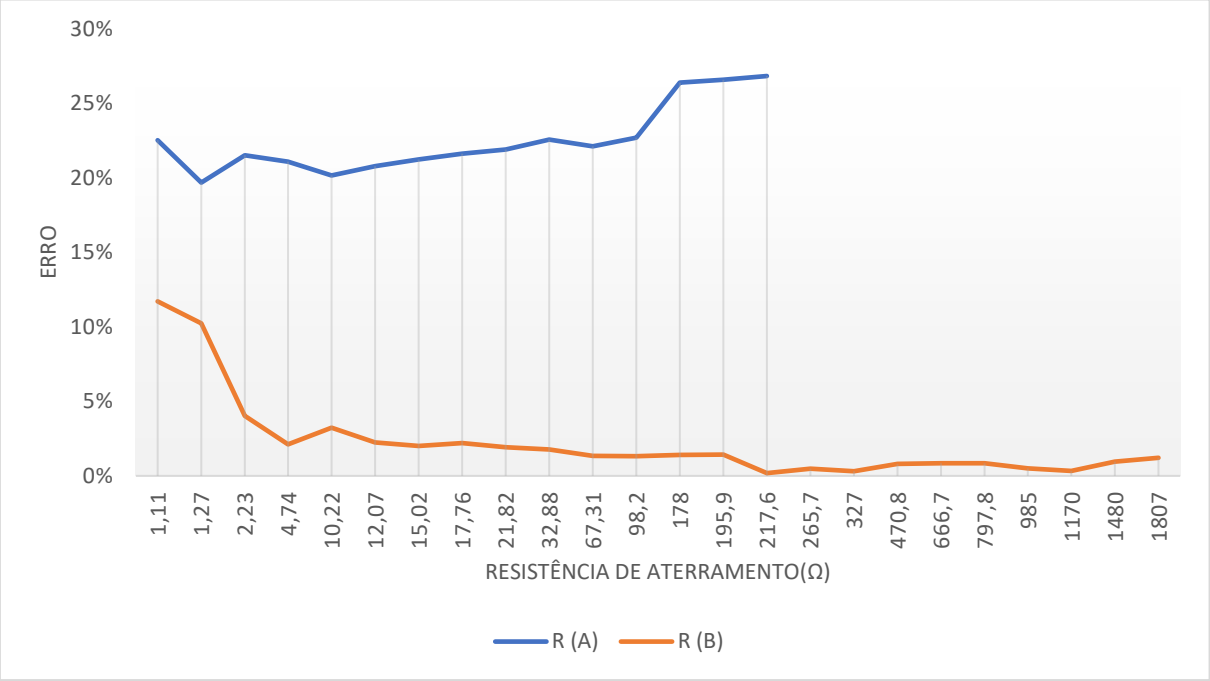
Tabela 10 – Resultados obtidos com EqA e EqB: Caso 5

Valores de referência	Equipamento A		Equipamento B	
$R_g[\Omega]$	$R_A[\Omega]$	$E(\%)$	$R_B[\Omega]$	$E(\%)$
1,11	1,34	20,72	0,98	11,71
1,27	1,51	18,90	1,14	10,24
2,23	2,70	21,08	2,14	4,04
4,74	5,92	24,89	4,64	2,11
10,22	12,03	17,71	9,89	3,23
12,07	14,22	17,81	11,8	2,24
15,02	17,67	17,64	14,72	2,00
17,76	20,90	17,68	17,37	2,20
21,82	25,60	17,32	21,4	1,92
32,88	38,70	17,70	32,3	1,76
67,31	78,60	16,77	66,4	1,35
98,20	115,30	17,41	96,9	1,32
178,0	211,00	18,54	175,5	1,40
195,9	232,00	18,43	193,1	1,43
217,6	259,00	19,03	218,0	0,18
265,7			267,0	0,49
327,0			328,0	0,31
470,8			467,0	0,81
666,7			661,0	0,85
797,8			791	0,85
985			980	0,51
1170			1166	0,34
1480			1466	0,95
1807			1785	1,22
2160			-	-

Fonte: O feito pelo autor.

O gráfico apresentado na Figura 25, evidencia que os erros associados ao EqA são significativos para toda a faixa avaliada (~20%). Essa é uma condição coerente com o que foi verificado nos casos 2 e 3 e pode estar associado, como já mencionado, ao fato da resistência R_T ser maior que 1 kΩ. Em relação ao EqB, os erros são significativos para baixos valores de R_g (≤ 1Ω), tal como ocorreu nos casos 1 e 4. Nas demais situações, os erros mantiveram-se dentro de índices aceitáveis.

Figura 25 – Comparação dos erros apresentados por EqA e EqB: Caso 5

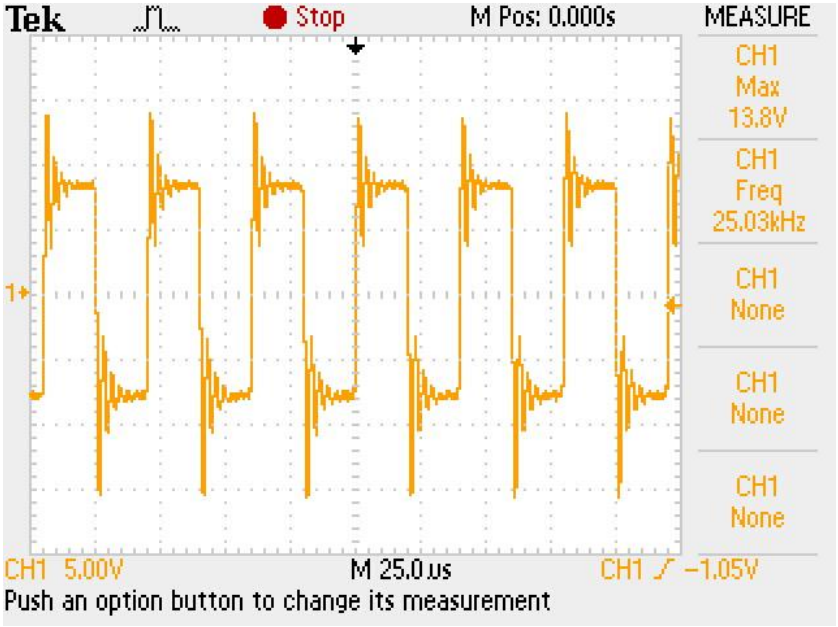


Fonte: O feito pelo autor

3.6 Avaliação da forma de onda

Com o auxílio de um osciloscópio digital, foram capturadas as formas de onda de corrente fornecidas pelos equipamentos A e B, apesar da informação não ser fornecida pelos fabricantes nos respectivos manuais. A forma de onda gerada pelo equipamento A é apresentada na Figura 26, onde se verifica que ela é alternada e do tipo quadrada. Além disso, a presença de oscilações transitórias pode ser decorrente do arranjo de medição, onde indutâncias e/ou capacitâncias submetidas a alta frequência (25,03 kHz) pode estar causando esse efeito.

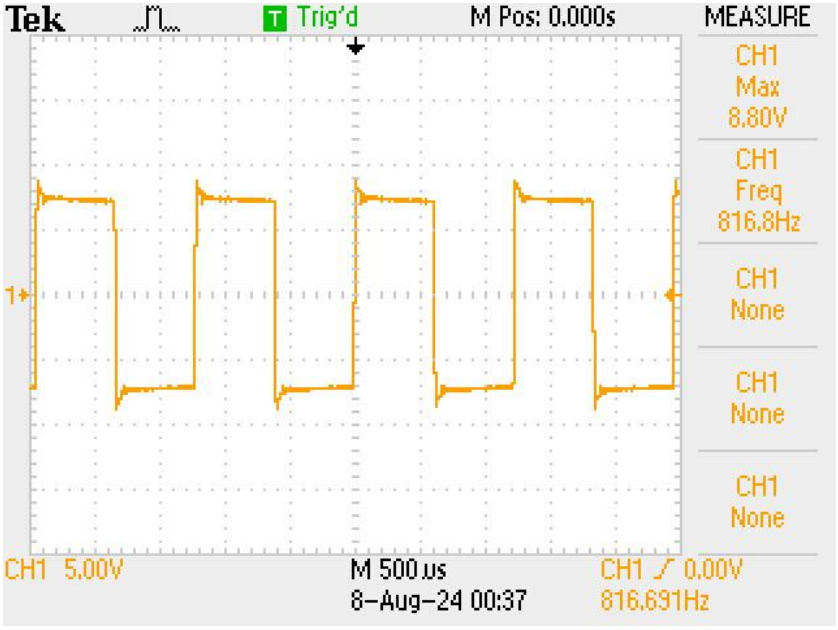
Figura 26 – Forma de onda gerada pelo equipamento A



Fonte: O feito pelo autor

A forma de onda gerada pelo equipamento B é apresentada na Figura 27, onde se verifica que ela, também, é alternada e do tipo quadrada. Como no caso anterior, as oscilações transitórias estão presentes, contudo, em uma proporção bem menor. Isso porque, possivelmente, as indutâncias e/ou capacitâncias associadas ao arranjo de medição são submetidas a uma frequência de 816,8 kHz (operação do equipamento), que é significativamente menor que a do caso anterior.

Figura 27 – Forma de onda gerada pelo equipamento B



Fonte: O feito pelo autor

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Os aterramentos elétricos desempenham papel relevante nas questões relacionadas à segurança, proteção e desempenho de sistemas elétricos. Para garantir que um aterramento desempenhe adequadamente as funcionalidades para as quais foi projetado, é importante que inspeções regulares sejam realizadas. Neste caso, um dos critérios utilizados é a medição da resistência de aterramento. Em geral, essas medições são executadas utilizando-se um terrômetro e o Método da Queda de Potencial.

Apesar de atualmente existirem normas que tratem do tema, as informações direcionadas ao equipamento de medição limitam-se, basicamente, aos critérios relacionados à segurança dos operadores. Assim, deixam de lado aspectos práticos relevantes, como, por exemplo, indicar os níveis de corrente mínimos para aplicações específicas, como em medições de aterramentos de linhas de transmissão e em subestações. Além disso, não estão disponíveis informações que permitam avaliar as condições de operacionalidade do equipamento por meio de procedimentos normalizados. Nesse sentido, as normas poderiam exigir que os manuais apresentassem uma relação mínima de itens que deveriam ser disponibilizados nos manuais dos equipamentos, tais como nível da corrente de operação e o tipo de forma de onda, potência, frequência(s) de operação, valor máximo medido para o aterramento sob teste (R_{g_max}), valor máximo associado à haste de corrente (R_{hc_max}) e erros percentuais existentes nos resultados obtidos. Isso permitiria que ensaios direcionados especificamente à equipamentos de medição da resistência de aterramento, normalmente terrômetros, pudessem ser, também, normatizados.

A falta desses cuidados, ao que parece, abre espaço para a ocorrência das discrepâncias verificadas nos resultados obtidos neste trabalho. Em relação ao equipamento A, os erros apresentaram uma taxa de crescimento bastante expressiva à medida que a resistência total do circuito de corrente aumentou, alcançando índices superiores a 100%. Isso ocorreu nas situações em que a resistência série total foi maior que 1 kΩ. Diante disso, nas situações em que resistência série total foi menor que 500 Ω, condição essa recomendada pela ABNT NBR 15749, os erros foram relativamente

pequenos. Já para o equipamento B, os erros mais significativos ocorreram nas situações em que a resistência representativa para o aterramento sob teste foi de baixo valor, menores que ~2 Ω.

De modo geral, portanto, este trabalho evidenciou a necessidade de se ampliar os cuidados em relação as informações e critérios necessários para que os equipamentos sejam disponibilizados no mercado. Nesse sentido, o alinhamento por meio de normas e padrões pode dar direcionamento aos fabricantes, de maneira que os equipamentos possam ser avaliados com alguma regularidade, recebendo, por exemplo, um certificado de conformidade. Tais ações podem contribuir significativamente na garantia da qualidade das informações que são apresentadas, aumentando, portanto, a segurança e a confiabilidade.

É importante, também, destacar que os aspectos críticos detectados nos equipamentos ensaiados são preocupantes. Isso porque em condições de campo, o usuário sempre confiará naquilo que é apresentado pelo equipamento. Considerando as margens de erro obtidas, pode-se criar uma falsa expectativa sobre condições operacionais da malha de uma subestação, por exemplo. Tal condição pode levar a gastos desnecessários, se forem detectadas anomalias inexistentes. Pode, também, gerar problemas de segurança ou lavar a falhas do sistema elétrico, caso anomalias reais não sejam adequadamente detectadas pelas medições (resultados falseados).

Por fim, destaca-se que ambos os equipamentos utilizados neste trabalho apresentaram erros, cada um com as suas características específicas. No entanto, ambos estão de acordo com as orientações presentes na ABNT NBR 15749. Não foram encontradas, também, exigências específicas para terrômetros junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade industrial (INMETRO), órgão responsável pela certificação de qualidade dos equipamentos comercializados no Brasil. Essa ausência junto ao INMETRO sugere que a certificação dos aparelhos considera apenas as características comuns exigidas de qualquer equipamento de medição, como as características elétricas voltadas para a segurança, desconsiderando totalmente as condições adversas encontradas em campo. Sugere-se, portanto, que as entidades competentes ampliem as discussões sobre o tema.

Como proposta de continuidade, são apresentadas as seguintes sugestões:

- Avaliar a confiabilidade da ferramenta de compensação de reativo disponibilizada por alguns modelos de terrômetro que operam em alta frequência;
- Realizar estudo comparativo entre terrômetros de alta e baixa frequência frente a situações de acoplamento dos circuitos de medição.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro. 2009.

2. FILHO, S. V. **Aterramentos Elétricos**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2002.

3. ALÍPIO, R. S. **Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional)**. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educacao Tecnologica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2008.

4. LINS POMPEU, J.; DE CAMARGO WITT, R. N. **Análise da distribuição de corrente em malhas de aterramento ante a utilização de terrômetros de alta frequência**. UFPR. Curitiba, p. 81. 2018.

5. BARROS LIMA, A. **Método para o cálculo da impedância de aterramento de torres de linhas de transmissão**. UFMG. Belo Horizonte, p. 124. 2010.

6. SEGANTINI, R. C. **Comportamento de Malhas de Aterramento de Subestação de Energia frente a Descargas Atmosféricas:** Ênfase na Avaliação de Técnicas de Melhoria do Desempenho Impulsivo por meio de Múltiplos Pontos de Injeção de Corrente. Belo Horizonte-MG: CEFET-MG, 2018.

7. PANICALI, A. R.; BARBOSA, C. F. Criteria for using 25 kHz grounding meters to measure grounding grids. **Ground 2020/2021 & 9th LPE**, Belo Horizonte/Brazil, jun. 2021.

8. PANICALI, A. R.; BARBOSA, C. F. Effect of the integration path on grounding measurements. **Electric Power Systems Research**, v. 194, mai. 2021.

9. BARBOSA, E. et al. Analysis of substation grounding grids response to currents at frequencies of 100 Hz and 25 kHz. **Ground2023 & 10th LPE**, Belo Horizonte/Brazil, May 2023.

10. GRCEV, L. Improved earthing system design practices for reduction of transient voltages. **CIGRE**, Macedonia, 1998. 6.

11. KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. [S.l.]: [s.n.], 1997.

12. KINDERMANN, G. **Proteção de Circuitos Elétricos de Potência:** Volume 1. [S.l.]: [s.n.], 1999.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15751: Sistemas de aterramentos de subestações - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, p. 47. 2013.

14. TELLÓ, M. et al. **Aterramento elétrico impulsivo em baixa e alta frequências com apresentação de casos**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017.

15. YU, C. et al. Configuration Detection of Substation Grounding Grid Using Transient Electromagnetic Method. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 8, p. 6475-6483, Aug. 2017.

16. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. **IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)**, p. 1-226, 15 May 2015.

17. DIAS, A. D. **Malhas de aterramento em subestações energizadas: medições e análises**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). [S.l.], p. 132. 2011.

18. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. **IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)**, p. 1-86, 28 Dec. 2012.

19. FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. [S.l.]: [s.n.], 2017.

20. LOURENÇO, S. R.; SILVA, T. A. F.; FILHO, S. C. D. S. Um estudo sobre os efeitos da eletricidade no corpo humano sob a égide da saúde e segurança no trabalho. **Exacta**, v. 5, n. 1, p. 135-143, 2007.

21. MODENA, J.; SUETA, H. Capítulo VI. Métodos normalizados para medição de resistência de aterramento. **O Setor Elétrico**, 25 Julho 2011. 40-44. Disponivel em: <https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-vi-metodos-normalizados-para-medicao-de-resistencia-de-aterramento/>. Acesso em: 06 Maio 2024.

22. GATTA, F. et al. An Equivalent Circuit for the Evaluation of Cross-Country Fault Currents in Medium Voltage (MV) Distribution Networks. **Electric Power Systems Research - Electrical Energy Systems**, v. 8, n. 2, p. 81-90, April 1998.

23. GATTA, F. M. et al. Performance of the Common Grounding System during ground faults. **CIRED 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution**, Turin, Italy, 2005. pp. 1-5.

24. E-REDES. Disponivel em: <https://www.e-redes.pt/pt-pt/noticias/2023/01/05/nova-subestacao-da-e-redes-em-arganil-entra-em-funcionamento>. Acesso em: 9 ago. 2024.

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

26. SOBRAL, S. T.; SANTOS, J. J. H.; MUKHEDKAR, D. A proposal for ground measurement techniques in substations fed exclusively by power cables. **A proposal for ground measurement techniques in substations fed exclusively by power cables**, v. 3, n. 4, p. 1403-1409, Oct. 1988.

27. BARBOSA, E. M. **Avaliação do uso de Correntes de 25 kHz na Medição da Resistência de Aterramento de Malhas de Subestações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2023.

28. MOURA, M. A. M. S. Resistência de aterramento de malhas reticuladas submetidas a correntes elétricas nas frequências de terrômetros comerciais, Recife, 2023.

29. LIMA, A. B. **Relatórios 10.1 e 10.2 – Testes de campo com os equipamentos construídos. Etapa Lote Pioneiro**. Projeto PD 0043-0120/2020 – Lote Pioneiro Sistema de Medição da Resistência de Aterramento em Subestações Usando Fonte de Injeção de Corrente. [S.l.]. 2021, 2022.

30. GOOGLE EARTH. **CHESF - Subestação Joairam**. Disponivel em: <https://earth.google.com/web/search/chesf+-+subesta%c3%a7%c3%a3o+joairam/@-

8.08129568,-34.98078274,22.1907284a,347.83916669d,35y,-0h,0t,0r/data=CigiJgokCTKqgCdjoTZAETCqgCdjoTbAGfNmes1rKidAIf7wZW3cYFfAOgMKATA>. Acesso em: 10 ago. 2024.

31. GOOGLE EARTH. **SE Janúba III**. Disponivel em: <https://earth.google.com/web/search/Jana%c3%baba+III/@-15.92279467,-43.32674395,596.50628736a,2089.42906075d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCT0koJcw0S_AEU8yYAZ_3S_AGV4aVzY-pkXAIcbuOPZVrEXAOgMKATA>. Acesso em: 10 ago. 2024.

32. BARBOSA, E. M. Método para medição da resistência de aterramento baseado no fluxo de cargas elétricas, Recife, 2020.

33. MA, J.; DAWALIBI, F. P. **Effects of inductive coupling between leads in ground impedance measurements using the fall-of-potential method**. 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333). New Orleans: [s.n.]. 1999. p. 266-271.

34. MA, J.; DAWALIBI, F. P. Influence of inductive coupling between leads on ground impedance measurements using the fall-of-potential method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 4, p. 739-743, out. 2001.

35. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 61010-1 - Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use - Part 1: General requirements**. Switzerland, p. 322. 2010.