CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WENDEL ARKELL BEZERRA DE MENEZES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aterramento em linha de transmissão 500 kV – Estudo de Caso

Campina Grande
2025

WENDEL ARKELL BEZERRA DE MENEZES

ESTUDO DE ATERRAMENTO EM LINHA DE TRANSMISSÃO 500 KV

Relatório de Estágio Integrado submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrotécnica

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2025

WENDEL ARKELL BEZERRA DE MENEZES

RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Relatório de Estágio Integrado submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Data de aprovação:

_____

Professor Célio Anésio da Silva, D. Sc.

Orientador

_____

Professor Washington Luiz Araújo Neves, D. Sc.

Examinador

Dedico este trabalho a todos que me apoiam e acreditam no meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as graças e bençõe que ele me deu durante toda minha vida.

Aos meus pais, Valderi Alves e Aderlânia Mendes, que me incentivaram a não desistir do curso durante todos esses anos, sem o apoio deles não poderia ter chegado tão longe.

A minha irmã, Tawannya Matilde, que, mesmo não parecendo, ela sempre me incentivou a ser uma pessoa melhor, sempre me apoiando e, às vezes, acreditando no meu potencial.

Ao meu Avô, meu falecido avô Damião Alves, que partiu durante o período de estagio, que deus o tenha.

Aos meus amigos da graduação, em especial Emanuel Lima e Felipe Cabral, agradeço por todas as conversas diárias e pela ajuda durante as atividades do curso, e, principalmente, por me ajudar a nunca cair nas mãos da famosa prime.

A Empresa HWM, por possibilitar a realização desse trabalho, com as documentações necessárias.

Aos funcionários da HWM, em destaque a equipe responsável pela Fundação, por me ajudarem nas medições da resistividade e resistência do aterramento.

Ao mangaká Masashi Kishimoto, que criou o personagem Naruto, pois toda vez que pensei em desistir me lembrei que ele nunca desistiu.

Aos colegas do Discord, que conheço há bastante tempo e serviam como pilares de apoio durante todos esses anos de curso.

RESUMO

Essa pesquisa tem como propósito apresentar e analisar a necessidade da utilização de aterramento em torres de transmissão, abordando seus princípios, modelagem e implementação. Utilizando-se de conceitos básicos sobre aterramento, apresentados durante o curso de Instalações elétricas, o estudo se focará em explorar sua aplicação especifica em linhas de transmissão, destacando sua importância para garantir a confiabilidade e segurança no funcionamento dessas torres. O presente trabalho apresentará como referência os valores de resistência de aterramento e procedimentos adotados em uma linha de transmissão de 500 kV localizada na Bahia.

Palavras-chave: Aterramento, Contrapeso, Linha de transmissão, Importância Aterramento, LT 500kV.

ABSTRACT

This research aims to present and analyze the necessity of grounding in transmission towers, addressing its principles, modeling and implementation. Using basic grounding concepts introduced during the Electrical Installations course, the study will focus on exploring specific application in transmission lines, highlighting its importance in ensuring the reliability and safety of these towers' operation. This work will reference the grounding resistance values and procedures adopted in a 500 kV transmission line located in Bahia, Brazil.

Keywords: Grounding, Transmission Line, Importance of Grounding, 500kV TL.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Relação entre Umidade e Resistividade do solo Arenoso. 19
Figura 2: Relação de resistividade x Temperatura. 20
Figura 3: Estratificação do solo em duas camadas. 21
Figura 4: Relação da resistência em relação a distância. 23
Figura 5: Relação entre a resistência de aterramento com quantidade de hastes. 24
Figura 6: Relação da resistência com a profundidade da haste em solos diferente. 24
Figura 7: Representação Tensão de Passo. 27
Figura 8: Representação Tensão de Toque. 28
Figura 9: Representação projeto de aterramento em estruturas. 29
Figura 10: Conexão do cabo contrapeso com a estrutura. 30
Figura 11: Aparelho utilizado para medição. 31
Figura 12: Modelo de medição de resistividade. 32
Figura 13: Aplicação de haste para medição. 33
Figura 14: Aplicação de cabo Contrapeso. 36
Figura 15: Reaterro e Compactação do cabo Contrapeso. 36
Figura 16: Modelo de medição da resistência de aterramento. 38
Figura 17: Conexão entre os pés da estrutura. 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistividade de alguns solos 18
Tabela 2: Resistividade do solo pela variação de temperatura 20
Tabela 3: Valores medidos de resistividade na estrutura 36/1 34
Tabela 4: Especificação do contrapeso em relação a resistividade 34
Tabela 5: Valores medidos de resistividade na estrutura 1/3 35
Tabela 6: Medição de Resistência de Aterramento estrutura 36/1 40
Tabela 7: Medição de Resistência de Aterramento estrutura 1/3 40

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Resistividade do solo 18
Equação 2: Equação resistividade medida 33

SUMÁRIO

1 Introdução 12
1.1 Objetivos 13
1.1.1 Objetivo Geral 13
1.1.2 Objetivos Específicos 13
1.2 Organização do Relatório 14
2 Fundamentação Teórica 15
2.1 Sistema de Aterramento Elétrico 15
2.2 Formas de conexão com o solo 16
2.2.1 Sistema Isolado 16
2.2.2 Sistema Solidamente Aterrado 16
2.2.3 Sistema Aterrado por Impedância 16
2.3 Aplicações do Sistema de Aterramento 17
2.4 Resistividade do Solo 18
2.4.1 Umidade do Solo 19
2.4.2 Temperatura do solo 19
2.4.3 Estratificação do solo 21
2.4.4 Compacidade do solo 22
2.5 Resistência do Solo 22
2.5.1 Técnicas mais comuns para Melhoria da resistência de aterramento 23
3 Conceitos Básicos de Segurança em Aterramentos 26
4 Considerações para o projeto de aterramento em uma estrutura metálica de 500 kV 29
5 Estudo de Caso 31
5.1 Medição da Resistividade do Solo 31
5.1.1 Procedimento de Medição 32
5.1.2 Apresentação de Resultados 33
5.2 Aplicação de Cabo Contrapeso 35
5.3 Medição da Resistência de Aterramento 37
5.3.1 Procedimento de Medição 37
5.3.2 Apresentação de Resultados 39
5.3.3 Analise de Resultados 40
6 Conclusão 42
7 Referências 43

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário do setor elétrico brasileiro, a interrupção no fornecimento de energia em linhas transmissão representa uma das grandes preocupações das empresas de energia elétrica, visando a mitigação desse problema foram analisadas as causas mais frequentes para a interrupção do fornecimento, sendo as queimadas, vandalismo, vegetação próxima a linha e descargas atmosféricas.

O Brasil é um dos países com maior incidência de raios no mundo, chegando a ocorrer mais de 77,8 milhões de descargas atmosféricas anualmente (ELAT, 2025), sendo estas responsáveis por cerca de 70% dos desligamentos nas linhas de transmissão e 40% nas linhas de distribuição (INPE, 2025). Além dos transtornos operacionais causados pela queda de energia também ocorrem grandes prejuízos financeiros para as concessionárias, sendo penalizados com grandes multas por conta da indisponibilidade da Parcela Variável, que podem chegar até 150 vezes o valor recebido pela transmissão de energia em condições normais (fator K150), sendo esses valores descontados no Pagamento Base recebido pelas concessionarias mensalmente após apuração de ocorrências pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) (AQUINO, 2010).

Neste sentido, a interrupção do fornecimento por conta de descargas atmosféricas é um problema que precisa ser combatido, a mitigação dos seus efeitos torna-se estratégica para a estabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN). O Relatório de Análise de Desligamentos Forçados da ANEEL (2018), aponta que as descargas atmosféricas constituem a segunda maior causa de interrupção do fornecimento de energia da rede, tanto básica quanto do SIN. Dessa forma, garantir uma resistência de aterramento baixa em relação a impedância das torres de transmissão torna-se importante para a melhora do desempenho das linhas de transmissão no Brasil (CAETANO et al., 2018).

A execução de um projeto de aterramento correto é fundamental para garantir a segurança e confiabilidade exigidas pelos órgãos brasileiros. Para o dimensionamento de um sistema de aterramento é necessário considerar alguns parâmetros como a resistividade do solo e as tensões de torque e de passo, que são importantes para assegurar a segurança das pessoas que moram em áreas próximas as linhas de transmissão.

O estudo utiliza como referência o sistema de aterramento de uma linha de transmissão de 500 kV, utilizando-se os dados medidos em campo, observando-se a limitação do terrômetro utilizado para a coleta dos resultados. Assim, foram utilizadas como referência as Normas Brasileiras Regulamentadora (NBR) 15749:2009 e 7117-1:2020, as normas destinadas à realização de medição de resistividade do solo e resistência de aterramento utilizando aparelhos de medição.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo do trabalho é apresentar a importância do sistema de aterramento em linhas de transmissão, além de analisar e mostrar como são executados os sistemas de aterramento em uma linha de transmissão de 500 kV.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a qualidade do sistema de aterramento das torres que compõem a linha de transmissão de 500 kV do trecho Sobradinho - Paulo Afonso, por meio de medições de campo e levantamento das características do solo;
- Comparar os métodos de medição utilizados em campo com os estabelecidos pelas normas NBR 15749:2009 e NBR 7117-1:2020, verificando a adequação do sistema aos requisitos técnicos e de segurança previstos;
- Identificar possíveis não conformidades no desempenho do sistema de aterramento e propor melhorias que contribuam para a redução da resistência de aterramento e precisão das medições;
- Investigar a influência das condições e estrutura do solo e da estrutura das torres sobre o valor de resistência de aterramento medidos;
- Comparar os valores medidos em campo com os valores requeridos pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF);

1.2 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos, incluindo este introdutório, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 1, apresenta-se em uma breve introdução, os objetivos do trabalho e uma descrição da estrutura de organização do relatório.

No Capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica sobre o efeito do tipo de solo na resistência de aterramento, sobre os fatores que são responsáveis pela modificação dos valores de resistividade do solo.

No Capitulo 3, detalha-se a importância da utilização do aterramento para a segurança, a redução de acidentes e como o sistema contribui para a proteção dos seres vivos.

No Capítulo 4, apresenta-se detalhes específicos sobre o projeto de aterramentos de estruturas metálicas presentes em linhas de transmissões de 500 kV.

Por fim, no Capítulo 5 apresenta-se a medição da resistividade do solo e resistência de aterramento, a forma como essas medições são realizadas e, com os dados obtidos, foram realizadas comparações com os valores das normas vigentes que limitam o valor da resistência de aterramento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMA DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

Sendo definido como uma ligação proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo (Visacro Filho, 2005), o aterramento elétrico é o principal responsável pela proteção contra surtos ou curto-circuito no sistema. O aterramento não possui um ponto de conexão fixo, variando de acordo com a sua aplicação no sistema, podendo ser utilizado tanto para pequenos sistemas eletrônicos quanto para a carcaça de motores. No entanto, sua finalidade é sempre a mesma, a segurança e proteção dos seres vivos e dos equipamentos envolvidos no sistema.

O sistema de aterramento elétrico é constituído por três componentes principais: o eletrodo de aterramento, o solo que envolve o eletrodo e a conexão elétrica. Esse eletrodo de aterramento varia de acordo com a aplicação, comumente são utilizadas hastes de cobre, malhas de cobre, cabos contrapesos e estruturas metálicas presentes nas fundações de concreto.

O aterramento deve ser projetado para que possua capacidade de dispersão da corrente elétrica para o solo, sem que a superfície comprometa a segurança das pessoas por motivo de energização. Dessa forma, o aterramento é classificado em duas maneiras: “aterramento de segurança”, tendo como finalidade evitar riscos a vida local, e “aterramento de serviço”, tendo como finalidade desempenhar sua função elétrica.

Para determinar o tipo de aterramento deve-se levar em consideração algumas variáveis, pois a conexão do solo apresenta resistência, capacitância e indutância. No entanto como as componentes capacitivas e indutivas são muito pequenas em comparação a resistência, normalmente utiliza-se apenas a resistência do aterramento.

2.2 FORMAS DE CONEXÃO COM O SOLO

Faz-se necessário distinguir-se entre o “sistema de aterramento” e o “aterramento do sistema” em si. O primeiro termo está relacionado ao sistema físico, o segundo termo se refere a forma como o sistema se conecta ao solo, sendo classificadas em três modalidades, a quais serão detalhadas adiante.

2.2.1 SISTEMA ISOLADO

O sistema é dito como isolado quando não existe uma conexão condutiva proposital do sistema elétrico com o solo. Para esse tipo de sistema, o acoplamento responsável pela ligação é fraco e atua de forma capacitiva, possuindo níveis máximos de sobretensão elevados e dificuldade na localização de faltas que envolvam a terra. Comumente utilizado quando a prioridade é a continuidade do serviço.

2.2.2 SISTEMA SOLIDAMENTE ATERRADO

Nesse caso, alguns pontos do sistema são conectados diretamente ao solo, buscando o caminho de menor impedância frente a passagem da eventual corrente de falta para o solo. Como os valores dessa corrente resultante são elevados, resulta na sensibilidade dos equipamentos de proteção, responsáveis pelo desligamento da localidade onde ocorreu a falta. Entretanto, dependendo da intensidade dessas correntes, elas se tornam danosas aos equipamentos, encurtando a vida útil. Apesar disso, casos de sobretensão são facilmente controlados, motivo pelo qual esse é o método mais utilizado no Brasil.

2.2.3 SISTEMA ATERRADO POR IMPEDÂNCIA

Nesta forma de aterramento, insere-se propositalmente uma impedância (reatância ou resistência) entre o aterramento e o sistema elétrico, com o objetivo de limitar a intensidade da corrente de falta, sem eliminar a ligação que existe entre o sistema e solo. Com o avanço tecnológico e a capacidade de captação de correntes de faltas mínimas, atualmente esse sistema vem ganhando espaço, sendo utilizado com maior frequência nas indústrias.

Mesmo apresentando os pontos positivos das alternativas anteriores, essa alternativa possui como desvantagem a necessidade de pleno funcionamento dos dispositivos do sistema. Caso ocorra algum rompimento nos bancos de resistores, os dispositivos não operam, devido a abertura do circuito, impossibilitando assim o retorno da corrente.

2.3 APLICAÇÕES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

Existem diversas aplicações que o sistema de aterramento pode desempenhar, no entanto, todas estão associadas a dois fatores fundamentais, o foco no desempenho do sistema e na segurança dos envolvidos.

Quando se foca no desempenho do sistema, pode-se citar a utilização do solo como condutor do retorno. Quando se foca na segurança dos seres envolvidos, o aterramento permite o escoamento das cargas ou descargas para a terra e assim promover a distribuição segura dos potencias presentes na superfície do solo, protegendo os seres vivos de serem afetados quando ocorrem descargas para o solo. Alguns exemplos dessas aplicações são:

- Uma ligação à terra se constitui como um fator de segurança, pois permite um escoamento para mesma carga ou descarga, conseguindo assim evitar ou minimizar os efeitos indesejáveis de energização de partes metálicas expostas as pessoas, carregamento de estática em corpos ou equipamentos ou até em descargas atmosféricas;
- O uso do aterramento como um condutor de retorno, utilizado em sistemas de distribuição rural ou sistemas MRT (Monofásico com Retorno para Terra).

O aterramento em pontos específicos do sistema também influencia no desempenho, sendo utilizado em circuitos eletrônicos como o ponto referencial ou *grid*. Apresenta diversos pontos interessantes, quando aparecem correntes no solo, se baseando na detecção dessas mesmas correntes, sensibilizando os dispositivos de proteção e permitindo a isolação dos circuitos e de equipamentos defeituosos.

2.4 RESISTIVIDADE DO SOLO

Um dado bastante importante para a elaboração de um projeto de aterramento, é o conhecimento das características apresentadas pelo solo que será utilizado, principalmente sua resistividade elétrica.

A resistividade do solo possui a unidade "Ω/m", sendo calculada em função da área da secção transversal e a distância percorrida pela corrente, podendo ser representada pela **Equação 1**.

$$R = \rho \, x \, \frac{1}{A}$$

Equação 1: Resistividade do solo

A resistividade depende do tipo de solo, em condições normais o solo atua como um mau condutor elétrico, podendo ser considerado como um isolante elétrico. No entanto, essa afirmação funciona apenas para o solo em suas condições normais, alguns aspectos como umidade, mistura de solos, compactação e pressão, são responsáveis por modificar a resistividade do solo. Na **Tabela 1**, apresenta-se o valor da resistividade para alguns tipos de solo.

Tipo de Solo	Resistividade (Ω.m)
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1500 a 5000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1300
Areia seca	3000 a 8000
Calcário compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000

Tabela 1: Resistividade de alguns solos (Fonte: Kindermann)

Dessa forma, pode-se notar a diferença da resistência apresentada pelo solo em função de suas condições. Por isso, são apresentadas, a seguir, algumas características que influenciam na resistividade do solo.

2.4.1 UMIDADE DO SOLO

Como demostrado pela **Tabela 1,** a umidade do solo possui influência sobre a resistividade apresentada pelo solo, devido a predominância iônica nas cargas elétricas, fazendo com que a condutividade do solo seja sensível à quantidade de água contida. Assim, a resistividade se comporta inversamente proporcional à quantidade de umidade presente no solo, com a água se comportando como principal elemento condutivo de corrente. Para manter a umidade no solo, em virtude de manter a resistividade, são utilizadas camadas de britas no solo, para diminuir o processo de evaporação.

Na **Figura 1**, representa-se a relação entre a umidade e a resistividade do solo, para o caso de um solo arenoso.

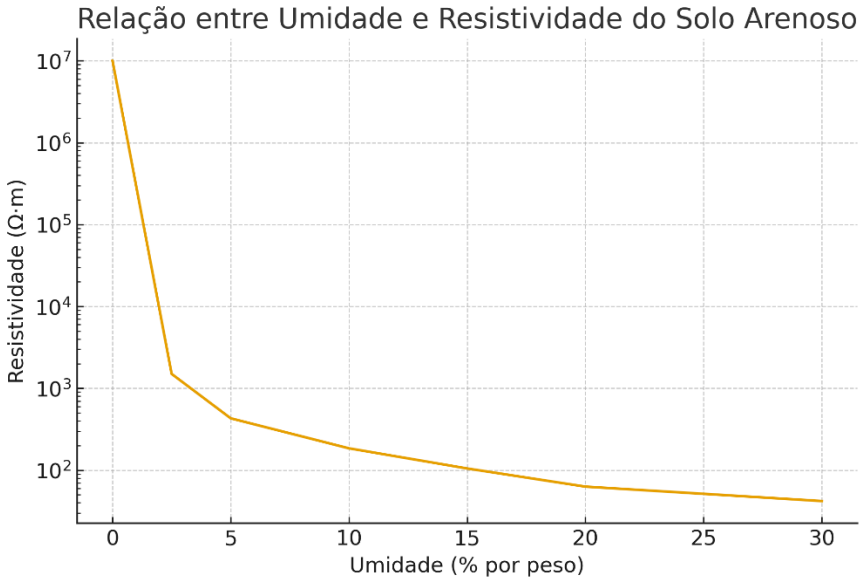

Figura 1: Relação entre Umidade e Resistividade do solo Arenoso (Fonte: Kindermann).

2.4.2 TEMPERATURA DO SOLO

A resistividade do solo também varia com a temperatura do solo, havendo distinção entre temperaturas altas e baixas. Na **Tabela 2**, é possível observar a resistividade do solo para algumas temperaturas, utilizando como referência um solo arenoso.

Temperatura (ºC)	Resistividade (Ω.m) (Solo arenoso)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3300

Tabela 2: Resistividade do solo pela variação de temperatura (Fonte: Kindermann).

A analise demostrada pela **Tabela 2** utiliza o ponto de transição e comumente se representa pela curva presente na **Figura 2**.

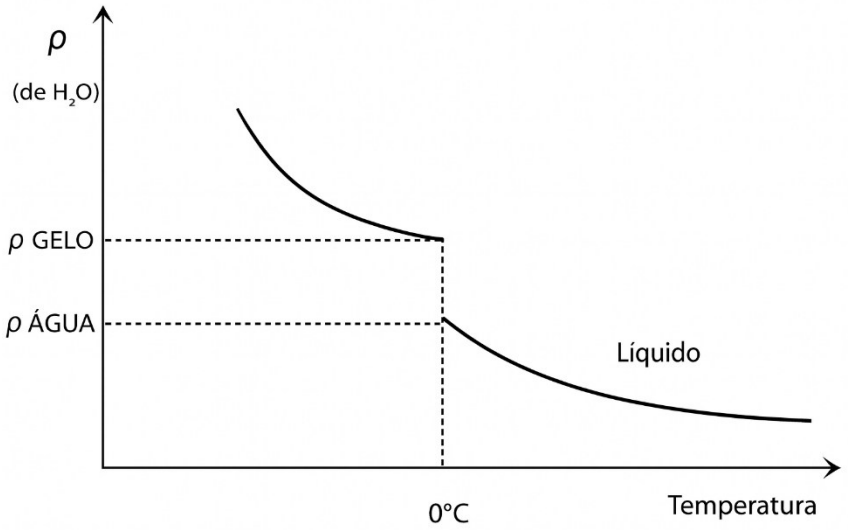

Figura 2: Relação de resistividade x Temperatura (Fonte: Visacro).

Nota-se que na temperatura de 0º, ou seja, quando ocorre a passagem do estado liquido para o solido da água, temos uma descontinuidade, podendo ser utilizado como ponto de referência. Para temperaturas positivas, a resistividade do solo se comporta diretamente proporcional ao aumento da temperatura, devido a vaporização do solo, diminuindo a umidade. Para as temperaturas negativas, a resistência do solo e a resistividade se comporta inversamente proporcional a temperatura, ou seja, com a diminuição da temperatura temos um aumento da resistividade do solo, ocorrendo por conta da dispersão nas ligações iônicas entre os grânulos da terra e solo.

2.4.3 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Os solos normalmente não são compostos de forma homogenia, sendo formados por diversas camadas que apresentam profundidade e resistividade diferentes. Normalmente, essas camadas são horizontais e paralelas à superfície do solo.

Essas camadas são sobrepostas, onde cada uma possui valor próprio de resistividade e possuem certa descontinuidade, a resistividade deve ser calculada em função da média das resistividades obtidas, essa resistividade recebe a nomenclatura de resistividade efetiva.

O fenômeno de estratificação ocasiona variações na dispersão da corrente elétrica no solo. Na **Figura 3** demostra a estratificação no solo, nela pode-se notar a dispersão das correntes ao redor do ponto de aterramento presente no solo, é possível observar que a dissipação da corrente ocorre facilmente na camada com menor resistividade.

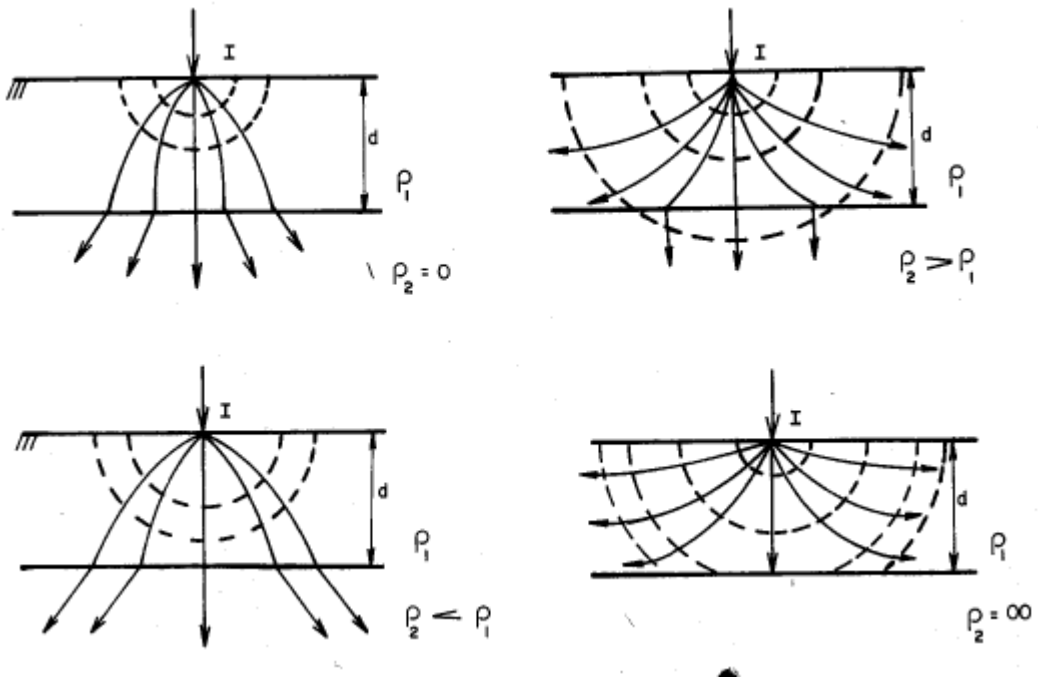

Figura 3: Estratificação do solo em duas camadas (Fonte: Kindermann).

As linhas pontilhadas representam superfícies equipotenciais, enquanto, as linhas cheias representam as correntes elétricas fluindo pelo solo.

2.4.4 COMPACIDADE DO SOLO

Solos mais compactos apresentam maior continuidade física, proporcionando menor valor de resistividade. Recomenda-se a espera de determinado período de tempo para a medição da resistência do aterramento elétrico, pois o solo demora para se tornar mais compacto.

A relação entre a pressão e a compacidade se dá de forma proporcional, um aumento de pressão sobre o solo ocasiona maior compacidade, no entanto, ocorre uma redução de resistividade.

2.5 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

A conexão com a terra apresenta valores de resistência, capacitância e indutância, sendo responsáveis pela capacidade de condução de corrente no solo, ou seja, a capacidade de condução do solo. O solo normalmente possui baixa frequência, dessa forma despreza-se os valores de capacitância e indutância, por serem muito menores que o valor resistivo, e pode-se tratar a resistência de aterramento como uma resistência linear. Em aplicações em alta frequência, como em telecomunicações, deve-se utilizar os efeitos capacitivos.

A resistência de aterramento refere-se ao valor da tensão resultante no eletrodo e o valor da corrente injetada na terra através do mesmo (VISACRO,2025). Sendo composta por três componentes principais:

- Resistência própria do eletrodo (usualmente baixa devido ao material empregado);
- Resistência de contato entre o eletrodo e o solo adjacente (valor praticamente desprezível);
- Resistência da terra circunvizinha (componente fundamental).

Dessa forma, a resistência de aterramento resulta no somatório das resistências de todas as fatias hemisféricas do solo, desde a superfície do eletrodo até uma distância infinita. Como a área se torna cada vez maior à medida que se afasta do eletrodo, pode-se notar que as áreas que possuem maior influência no valor da resistência total, são as áreas mais

próximas do eletrodo, podendo desprezar áreas muito afastadas. Na **Figura 4** é possível visualizar esse comportamento.

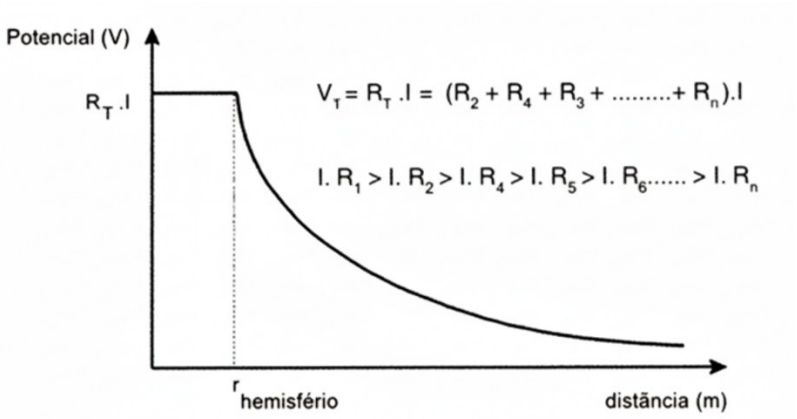

Figura 4: Relação da resistência em relação a distância (Fonte: Visacro).

Nota-se que quanto maior a distância das áreas em relação ao eletrodo, a contribuição para a o valor da resistência se torna irrelevante.

2.5.1 TÉCNICAS MAIS COMUNS PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Por diversos motivos a resistência de aterramento real pode apresentar uma medida diferente da resistência esperada teoricamente. Pensando em contra medidas para casos em que a resistência de aterramento seja superior ao valor designado no projeto, foram criadas técnicas que buscam a melhorar do valor da resistência do solo em áreas próximas ao eletrodo de aterramento ou até a mudança do próprio eletrodo, algumas técnicas utilizadas serão listadas abaixo:

- **Aumento da Quantidade de eletrodos em paralelos**

A associação de múltiplos eletrodos em paralelos é capaz de reduzir a resistência de aterramento. No entanto, essa técnica precisa de um espaçamento adequado para que as interferências mutuas sejam minimizadas. A eficiência da técnica diminui de forma significativa com a quantidade de eletrodos utilizados, sendo a redução da resistência desprezível após certa quantidade de eletrodos. Na **Figura 5** mostra-se a relação entre a quantidade de eletrodos e a redução na resistência de aterramento.

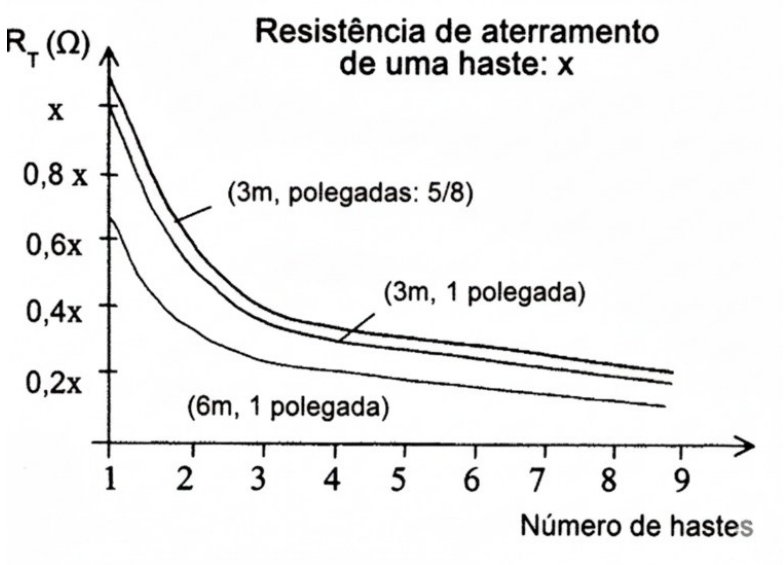

Figura 5: Relação entre a resistência de aterramento com quantidade de hastes (Fonte: Visacro).

- **Aprofundamento dos eletrodos**

O aumento da profundidade dos eletrodos, em especial os de hastes verticais, se mostra uma técnica eficiente em reduzir a resistência do aterramento, especialmente quando o eletrodo consegue alcançar camadas do solo com menor resistividade. No entanto, a depender do tipo de solo essa técnica perde eficiência, como em solos homogêneos, quando a profundidade se aproxima de 3,5 m os ganhos dessa técnica se tornam irrelevantes. A **Figura 06** representa graficamente essa relação entre a resistência com a profundidade nos casos destacados.

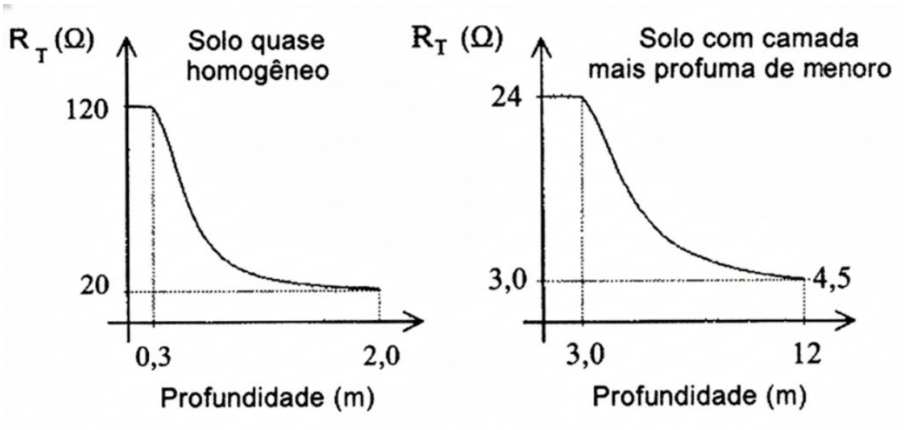

Figura 6: Relação da resistência com a profundidade da haste em solos diferente (Fonte: Visacro).

- **Aumento da secção reta do eletrodo**

Ao ampliar o tamanho da secção reta do eletrodo observa-se uma diminuição na resistência de aterramento, no entanto, essa secção normalmente é dimensionada por questões de resistências mecânicas ou em função da capacidade de condução do eletrodo, dessa forma a diminuição do valor da resistência de aterramento utilizando essa técnica é pequena.

- **Tratamento Químico do Solo**

Ao adicionar sais ao solo próximo a área do eletrodo, ocorre a redução na resistência de aterramento. Essa técnica possui maior eficácia em pequenos sistemas, por conta da área necessária de injeção de sais, podendo reduzir a resistência do aterramento em até metade do valor, mas possui desvantagens, como a dispersão dos sais e a corrosão de materiais. Em casos com aterramentos extensos, como em subestações, a redução não ultrapassa 15% do valor nominal.

- **Tratamento Físico do Solo**

Trata-se da técnica de envolver o eletrodo com materiais condutores, ampliando a superfície de contato entre o eletrodo e as terras adjacentes. Os materiais utilizados nessas técnicas são carvão e sucata.

3 CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA EM ATERRAMENTOS

O aterramento elétrico possui como foco principal a segurança pessoal daqueles próximos ao sistema, sendo projetado com o objetivo de limitar os riscos associados à circulação da corrente elétrica pelo corpo humano durantes faltas no sistema elétrico. Durante um curto-circuito para a terra, diferenças de potencial no solo podem acabar expondo indivíduos às tensões de passo (entre os pés) e tensões de toque (entre os pés e as mãos), ao quais são capazes de gerar correntes perigosas no organismo.

Dessa forma, é necessário o conhecimento dos critérios de segurança e considerar os efeitos fisiológicos da corrente elétrica no organismo, especialmente o risco de fibrilação ventricular, que depende de fatores como trajeto da corrente, duração e característica da onda. Dessa forma, os projetos de aterramento possuem o dever de assegurar que os potenciais gerados no solo permaneçam abaixo do limite que representa perigo à vida humana.

- **Tensão de Passo**

A tensão de passo se define como a máxima diferença de potencial (d.d.p) entre os pés, ao qual uma pessoa pode ser submetida na região de aterramento. Durante descargas elétricas para o solo, ocorrem elevações de potencial, ocorrendo formação de distribuição de potenciais no solo, onde as áreas próximas ao eletrodo possuem maiores potenciais que regiões mais afastadas. Dessa forma, uma pessoa que estiver nessa região possui uma d.d.p. entre seus pés, normalmente sendo definida como a distância de um metro entre os pés, como existe uma d.d.p e o corpo humano funciona como uma resistência, ocorrendo a passagem de corrente através das pernas. A **Figura 7** ilustra como funciona a imposição da d.d.p. durante o momento da descarga.

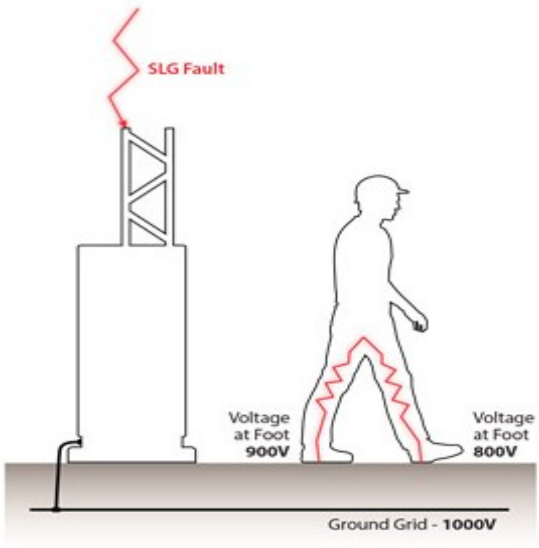

Figura 7: Representação Tensão de Passo (Fonte: Easypower.com).

Em seres humanos, a passagem dessa corrente pode acarretar diferentes efeitos, dependendo do trajeto percorrido, em animais, a tensão de passo é mais danosa, possuindo maior risco de fibrilação ventricular.

Para evitar que ocorra a passagem de corrente utilizam-se duas técnicas: andar com os pés próximos para que estejam no mesmo potencial ou apoiar-se em apenas um dos pés. Dessa maneira, não existirá uma d.d.p. entre os pés e, consequentemente, não ocorrerá a passagem de corrente.

- **Tensão de Toque**

Pode ser definida como a máxima diferença de potencial entre a mão e os pés a qual uma pessoa pode ser submetida na região de aterramento. Diferentemente da tensão de passo, o caminho que a corrente passa é mais crítico, atravessando braço, troco e pernas, tornando-se significativamente mais perigosa. Essa trajetória pode desencadear a fibrilação cardíaca, queimaduras e outras lesões graves, representando risco significativo à integridade humana. A **Figura 8** representa o mecanismo da tensão de toque no momento de uma falta.

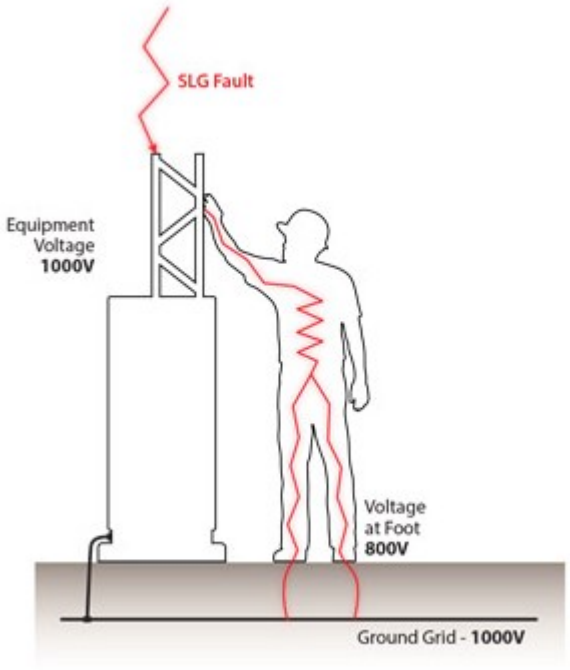

Figura 8: Representação Tensão de Toque (Fonte: Easypower.com).

4 CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO DE ATERRAMENTO EM UMA ESTRUTURA METÁLICA DE 500 KV

Os sistemas de aterramentos em linhas de transmissão são geralmente instalados em disposição radial, utilizando cabos de aços revestidos de cobre ou de aço zincado, tradicionalmente denominados como cabos *contrapeso.* A **Figura 9** ilustra um modelo do projeto utilizado para construção da linha, seguindo o padrão especificado pela Eletrobras CHESF.

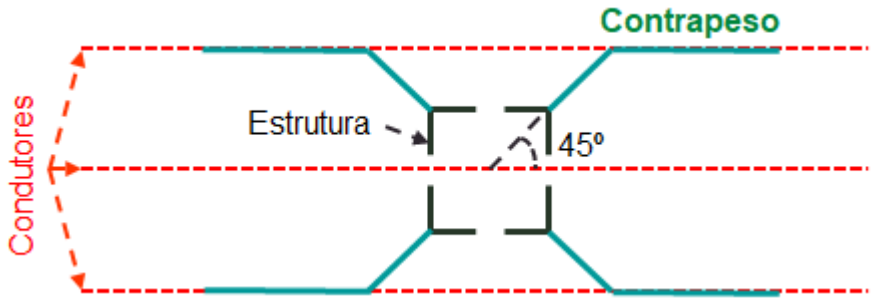

Figura 9: Representação projeto de aterramento em estruturas (Fonte: Acervo HWM).

Para o procedimento da construção deve-se considerar o valor da resistividade do solo para determinar o comprimento dos cabos Contrapeso. O critério utilizado deve se basear no comportamento do sistema de 60 Hz, a frequência nominal do sistema brasileiro, onde pela norma o valor máximo da resistência de aterramento a ser atendida é de 20 ohms.

Para a profundidade do eletrodo de aterramento, normalmente se utiliza a profundidade de 50 a 70 cm, em alguns solos, como solos utilizados para agricultura, deve-se aumentar a profundidade do eletrodo, podendo ser colocado a 1 metro de profundidade. Dessa forma, após a instalação dos cabos contrapesos as varetas devem ser fechadas e compactadas de forma a se reconstruir a configuração natural do solo.

Antes da concretagem das fundações, devem ser instalados eletrodutos de PVC para a passagem dos cabos contrapeso. No projeto está definido, como devem ser realizadas as conexões do contrapeso da estrutura, a **Figura 10** ilustra os diagramas dessa conexão.

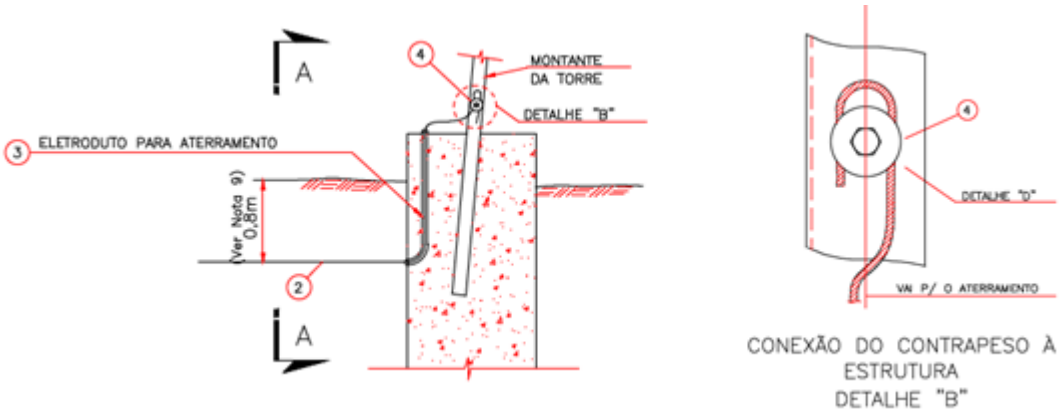

Figura 10: Conexão do cabo contrapeso com a estrutura (Fonte: Acervo HWM).

O cabo *contrapeso* deve ser instalado dentro do limite da faixa de servidão da LT, nesse caso, aproximadamente 40 m. As direções do cabo podem ser alteradas devido a eventuais obstáculos que possam aparecer, não podendo ser instalado dentro de um raio de 30 metros de oleodutos, gasodutos, linhas de abastecimento de água ou outras linhas subterrâneas. Em caso de grandes obstáculos que venham a impedir a continuidade da instalação, este deverá retornar de maneira paralela ao instalado, com uma distância mínima de 6 metros e raio mínimo de retorno de 3 metros, fazendo com que o cabo instalado se aproxime ao máximo do valor especificado no projeto (Chesf, 2007.), em caso de rocha, é preferível desviar o caminho do cabo, no entanto, caso não seja possível, deve-se retirar ou quebrar uma parte da rocha para a instalação do cabo.

5 ESTUDO DE CASO

Foram realizadas medições de resistividade do solo e resistência de aterramento, na cidade de Juazeiro – BA, na obra de seccionamento da Linha de Transmissão de 500 kV, no trecho do seccionamento que liga as usinas de Sobradinho e Luiz Gonzaga pela Subestação Juazeiro III. As medições foram realizadas nas proximidades das estruturas metálicas.

5.1 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Inicialmente, foi necessário realizar a medição da resistividade do solo, etapa fundamental para o dimensionamento do comprimento e do tipo de cabo contrapeso a ser utilizado no sistema de aterramento da estrutura.

Para medição da resistividade, utilizou-se o terrômetro digital MTD20KWe, fabricado pela Megabras, juntamente com quatro hastes de cobre de 50 cm de comprimento e 16 mm de diâmetro, além de quatro carreteis de cabo. Para a realização do ensaio deve-se atentar a algumas variáveis que podem interferir no valor medido, sendo a temperatura ambiente, a condição do solo e o tipo de solo. Os ensaios foram realizados em solos do tipo argiloso pedregoso e argiloso arenoso, apresentando uma camada superficial de aproximadamente 50 cm.

Na **Figura 11** apresenta-se a interface do equipamento utilizado durante a medição.



Figura 11: Aparelho utilizado para medição (Fonte: Autoria Própria).

5.1.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

O método utilizado para a medição da resistividade do solo foi o método de Frank Wenner, descrito na norma técnica NBR 7117-1:2020, ao qual consiste na disposição linear de quatro hastes metálicas igualmente espaçadas, utilizando o ponto central da estrutura como referência e cravadas no solo com mesma profundidade.

Os terminais de corrente do terrômetro são conectados às hastes mais externas, denominadas hastes de corrente, enquanto os terminais de potencial são conectados às hastes mais internas, chamadas hastes de potencial. No ensaio, foram utilizadas hastes de aproximadamente 50 cm de comprimento, sendo cravadas a uma profundidade média de 30 cm. A **Figura 12** apresenta o esquema de referência utilizado para a medição.

.

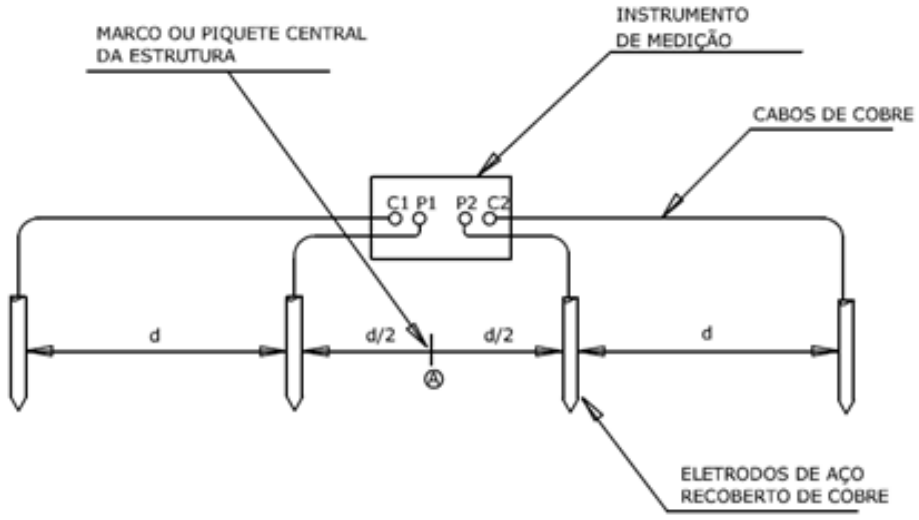

Figura 12: Modelo de medição de resistividade (Fonte: Acervo HWM).

As medições foram realizadas em dois eixos de referência, o eixo longitudinal e o transversal, em relação à linha de transmissão (LT), buscando sempre posicionar o conjunto de hastes o mais próximo possível do ponto central da estrutura.

Foram realizadas medições variando a distância *d* entre as hastes, adotando os valores de 2, 4, 8, 16 e 32 metros, valores descritos na norma e nas especificações da CHESF.

O terrômetro utilizado fornecia diretamente o valor da resistência elétrica do solo (R), sendo necessário o uso da **Equação 2** para determinar a resistividade aparente (ρ).

$$\rho = 2\pi dR\ (\Omega.\ m)$$

Equação 2: Equação resistividade medida

Onde:

- ρ representa a resistividade do solo $(\Omega.\ m)$;
- d representa a distância entre as hastes (m);
- R representa a resistência do solo (Ω).

Para minimizar possíveis erros de medição, foram realizadas três leituras para cada espaçamento, utilizando-se a média aritmética dos valores obtidos. A escolha da escala adequada do equipamento também foi essencial para garantir a precisão dos resultados.

A **Figura 13** registra a execução das medições em campo, mostrando o momento onde são colocadas as hastes para medição da resistividade.



Figura 13: Aplicação de haste para medição (Fonte: Autoria Própria).

5.1.2 Apresentação de Resultados

Foram realizadas medições de resistividade do solo em todas as estruturas do seccionamento, no entanto, serão apresentadas apenas os valores obtidos em duas estruturas especificas, 36/1 e 1/3.

As estruturas possuem uma nomenclatura com dois números, *a/b*, onde *a* representa o quilometro que a estrutura está inserida em relação ao início da linha, enquanto que *b*, representa a posição da estrutura em relação as outras nessa quilometragem especifica.

Para a estrutura 36/1, os valores medidos de resistividade estão apresentados na **Tabela 3**.

Eixo Longitudinal					
d(m)	2	4	8	16	32
R (Ω)	3,27	5,07	0,48	0,34	0,21
ρ = 2πdR (Ω. m)	41,07	127,36	24,12	34,16	42,20

Eixo Transversal					
d(m)	2	4	8	16	32
R (Ω)	3,07	3,14	1,49	0,6	0,33
ρ = 2πdR (Ω. m)	38,56	78,88	74,86	60,29	66,32

Tabela 3: Valores medidos de resistividade na estrutura 36/1 (Fonte: Acervo HWM).

Observa-se que, conforme descrito na fundamentação teórica, à medida que a distância *d* entre as hastes aumenta, ou seja, quanto mais distante do centro da estrutura, a resistência medida tende a diminuir, até estabilizar-se.

Com base nesses resultados, foi possível determinar o comprimento do cabo contrapeso a ser utilizado na estrutura conforme os critérios estabelecidos pela CHESF, apresentados na **Tabela 4**.

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE			
	FASE	RESISTIVIDADE	CABO CONTRAPESO UNITÁRIO	TOTAL
CABO CONTRAPESO DE AÇO GALVANIZADO 3/8" SM B (QUANTIDADE DE METROS ATERRADOS)	I	000 < ρ < 500	15	60
	II	500 < ρ < 1000	25	100
	III	1000 < ρ < 1500	35	140
	IV	1500 < ρ < 2000	45	180
	V	2000 < ρ < 2500	60	240
	VI	2500 < ρ < 3000	75	300
	VII (ESPECIAIS)	ρ > 3000	84	512

Tabela 4: Especificação do contrapeso em relação a resistividade (Fonte: Acervo HWM).

Considerando que os valores de resistividade medidos se encontram na faixa de 0 a 500 Ω.m, recomenda-se o uso de 15 metros de cabo contrapeso por pé da estrutura. No entanto, visando maior segurança e confiabilidade elétrica, optou-se pela instalação de 22 metros de cabo contrapeso por pé.

Durante as medições de resistividade na estrutura 1/3, ocorreram alguns contratempos. No eixo longitudinal, observou-se o comportamento esperado, a resistência diminuindo conforme o aumento da distância entre as hastes. Contudo, no eixo transversal, foram obtidos valores inconsistentes com a teoria, principalmente nas distâncias de 4 a 16 metros.

Os resultados estão apresentados na **Tabela 5**

Eixo Longitudinal					
d (m)	**2**	**4**	**8**	**16**	**32**
R (Ω)	**0,72**	**0,58**	**0,54**	**0,31**	**0,18**
ρ=2πdR (Ω.m)	**9,05**	**14,58**	**27,14**	**31,16**	**36,19**

Eixo Transversal					
d (m)	**2**	**4**	**8**	**16**	**32**
R (Ω)	**0,20**	**19,50**	**3,80**	**315,00**	**0,20**
ρ=2πdR (Ω.m)	**2,51**	**490,09**	**191,01**	**31.667,25**	**40,21**

Tabela 5: Valores medidos de resistividade na estrutura 1/3 (Fonte: Acervo HWM).

A análise em campo constatou que as medições foram realizadas próximas a uma cerca metálica, localizada abaixo da linha de transmissão de 500 kV que se encontrava energizada. A indução capacitiva proveniente da rede energizou parcialmente a cerca, provocando interferência nas correntes de medição das hastes. Essa influência explica as leituras anômalas observadas nos valores de resistência e resistividade do eixo transversal.

Dessa forma, como na estrutura 36/1, foram utilizados cabos contrapesos de 25 metros de comprimento por pé da estrutura, garantindo assim um nível adequado de aterramento e segurança elétrica para o sistema.

5.2 APLICAÇÃO DE CABO CONTRAPESO

Finalizada a medição da resistividade do solo, procedeu-se ao dimensionamento dos comprimentos dos cabos contrapesos utilizados no sistema de aterramento das estruturas.

Com o auxílio de uma retroescavadeira, foram cavadas valas com comprimentos entre 22 e 25 metros e profundidade média de 50 centímetros.

Após a escavação foram posicionados os cabos contrapesos de aço galvanizado de 3/8’’, dando início ao processo de reaterro e compactação. O reaterro foi executado em camadas de aproximadamente 20 cm, sendo cada camada devidamente compactada com o uso de equipamentos apropriados. Após a aplicação das três camadas de reaterro, considerava-se concluída a instalação do cabo contrapeso em cada vala.

Para garantir a eficiência e confiabilidade elétrica do sistema de aterramento, algumas normas de execução devem ser rigorosamente observadas:

- O contrapeso deverá inicialmente ser conectado nas fundações da estrutura, mesmo que a medição ultrapasse 20 ohms, até que seja fornecido o comprimento pela CHESF;
- Os fios contrapesos deverão ser instalados com máxima precaução, evitando-se danos ou quebras, não sendo admitidas emendas, exceto aquelas resultantes do processo de instalação;
- A instalação do contrapeso deve ser concluída antes de quaisquer lançamentos de cabos, sejam eles cabos para-raios ou cabos condutores.

As **Figuras 14 e 15** apresentam o processo de instalação e aplicação dos cabos contrapesos em campo:



Figura 14: Aplicação de cabo Contrapeso (Fonte: Autoria Própria).



Figura 15: Reaterro e Compactação do cabo Contrapeso (Fonte: Autoria Própria).

5.3 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Para medição da resistência de aterramento, foi utilizado o terrômetro digital MTD20KWe, fabricado pela Megabras, junto com três hastes de cobre com 50 centímetro de comprimento e diâmetro de 16 mm, além de três carreteis de cabo. Para a realização do ensaio deve-se atentar a algumas variáveis que podem interferir no valor medido, sendo a temperatura ambiental, a condição do solo, o tipo de solo e a data da última chuva. Os ensaios foram realizados em solos do tipo argiloso pedregoso e argiloso arenoso, apresentando uma camada superficial de aproximadamente 50 cm.

Utilizou-se o mesmo equipamento empregado na medição da resistividade do solo, alterando-se apenas o modo de operação de "ρ" (resistividade) para "R" (resistência), conforme função disponível no terrômetro. Nesse procedimento, foram utilizadas três hastes em vez das quatros utilizadas no ensaio de resistividade.

O método adotado para essa medição foi o método da queda de potencial, descrito na NBR 15749:2009, ao qual consiste em injetar uma corrente elétrica estabilizada no solo por meio de duas hastes, uma conectada ao eletrodo de aterramento em teste e outra a haste de corrente auxiliar. A haste de potencial, é posicionada entre as duas anteriores em função de medir a diferença de potencial gerada no solo pela circulação da corrente.

Com base na tensão medida e na corrente injetada o terrômetro calcula automaticamente a resistência de aterramento utilizando a lei de ohm.

5.3.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

Após a inserção do cabo contrapeso, é necessário observar alguns critérios e cuidados específicos antes da realização da medição da resistência de aterramento.

A medição da resistência de aterramento deve ser executada somente após três dias da conclusão do reaterro e compactação do cabo contrapeso e após, no mínimo, sete dias da última chuva. Essa precaução é fundamental, pois, conforme descrito na fundamentação teórica, a umidade do solo influência diretamente o valor da resistência medida, podendo falsear o resultado, comprometendo a precisão do ensaio.

Utilizando o método da queda de potencial, descrito anteriormente, foram realizadas as medições, em busca de otimizar o processo e reduzir o número de medições, não foram realizados ensaios individuais para cada pé da estrutura. Em vez disso, foi instalado um cabo de interligação entre os quatros cabos contrapesos, permitindo a medição conjunta da resistência de aterramento do sistema como um todo. A **Figura 16** ilustra um modelo de como foi realizada a medição.

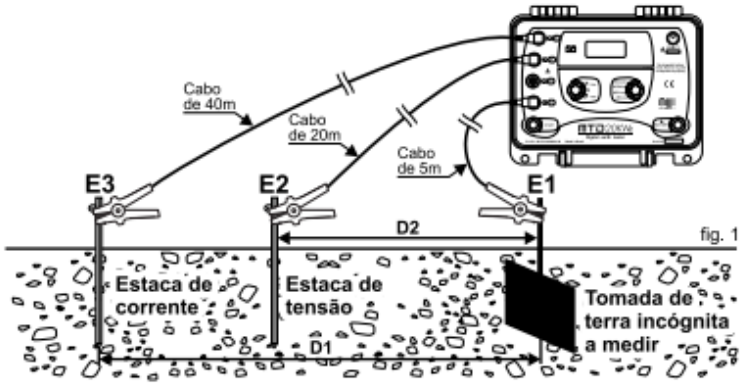

Figura 16: Modelo de medição da resistência de aterramento (Fonte: Acervo HWM).

Durante o ensaio, a haste de corrente foi posicionada a uma distância de 100 metros do ponto de ligação à estrutura, enquanto as hastes de potencial foram cravadas a 10 metros desse ponto, sendo deslocadas em incrementos de 10 metros a cada nova leitura.

Para que as medições sejam consideradas válidas e confiáveis, devem ser atendidos os seguintes critérios técnicos:

- A diferença entre as três leituras sucessivas não pode ser superior a 10%;
- A distância do eletrodo de potencial ao eletrodo de corrente não pode ser inferior a 30 metros;
- Caso a diferença seja superior a 10%, o eletrodo deve ser cavado mais longe da estrutura e as medições deverão ser repetidas.

A média das leituras válidas será considerado como o valor final da resistência de aterramento da estrutura.

A **Figura 17** ilustra como foram realizadas a conexão dos pés da estrutura para realização das medições de aterramento.



Figura 17: Conexão entre os pés da estrutura (Fonte: Autoria Própria).

Para que haja confiabilidade nas medições realizadas, são necessárias algumas precauções operacionais durante a medição, sendo elas:

- Não se deve ocorrer medições durante períodos de chuva, pois a umidade no solo pode apresentar com umidade superior as reais, ocorrendo sete dias após a última chuva;
- Utilização de calçados e luvas com nível de isolamento compatível com os valores máximos de tensão que possam ocorrer no sistema sob medição;
- Em medições realizadas próximas a linhas energizadas, é obrigatório o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) adicionais, como vestimentas antichamas e botas com isolamento elétrico adequado, a fim de garantir a integridade física da equipe e a segurança operacional.

Como algumas estruturas do seccionamento eram próximas a subestação Juazeiro III, foram necessários a utilização de equipamento antichamas durante toda a operação.

5.3.2 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Todas as medições foram realizadas com acompanhamento dos engenheiros da HWM /fiscais da Chesf, garantindo o cumprimento dos critérios técnicos e normativos exigidos para esse tipo de ensaio. As medições foram realizadas em cada estruturas, parando as medições quando foram obtidas três medidas sucessivas em sequência, para medição são conectados

os contrapesos de todos os pés e feitas as medições, a amostragem consiste em 6 (seis) estruturas, das quais serão apresentadas apenas duas. Na **Tabela 7** são mostrados os valores das resistências de aterramento medidas em ambas as estruturas.

MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERAMENTO			
DISTÂNCIA À ESTRUTURA (m)		Resistência Medida (Ω)	Variação (%)
Haste de Corrente	Haste de Potencial		
100	10	0,76	
100	20	0,96	-3%
100	30	0,95	-4%
100	40	1,06	7%
100	50		
Média de Três Leituras Sucessivas Referência (Ω)		0,99	

Tabela 6: Medição de Resistência de Aterramento estrutura 36/1(Fonte: Acerto HWM).

MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERAMENTO			
DISTÂNCIA À ESTRUTURA (m)		Resistência Medida (Ω)	Variação (%)
Haste de Corrente	Haste de Potencial		
100	10	0,82	
100	20	0,96	
100	30	1,14	-6%
100	40	1,19	-1%
100	50	1,29	7%
Média de Três Leituras Sucessivas Referência (Ω)		1,21	

Tabela 7: Medição de Resistência de Aterramento estrutura 1/3 (Fonte: Acervo HWM).

Conforme estabelece a NBR 15751:2009, a média das três leituras consecutivas deve ser considerada como o valor representativo da resistência de aterramento da estrutura, desde que a variação entre as leituras não ultrapasse 10%.

Nos dois casos apresentados, a variação observada permaneceu dentro dos limites aceitáveis, indicando que as medições foram estáveis e confiáveis. Dessa forma os valores médios são considerados adequados e atendem aos critérios técnicos exigidos para sistemas de aterramento de linhas de transmissão.

5.3.3 ANALISE DE RESULTADOS

Com base nos documentos técnicos fornecidos pela CHESF e os critérios estabelecidos pela NBR 15749:2009, os valores de resistência de aterramento obtidos devem

ser inferiores a 10 ohms, pelas medições em campo foi constatado que a resistência do aterramento em todas as estruturas foi inferior a 10 ohms, indicando que o sistema atende plenamente às exigências normativas. As normas da CHESF determinam que o valor máximo aceitável de resistência é de 20 ohms, portanto, resultados abaixo de 10 ohms representam uma condição excelente ao aterramento e boa eficiência do sistema de dissipação de correntes elétricas para o solo.

Esses resultados indicam que o contato elétrico entre os condutores enterrados e o solo é eficiente, o que reduz significativamente o risco de sobretensões, potenciais de toque e passo, assegurando a proteção das estruturas e equipamentos interligados aos cabos contrapesos.

Portanto, conclui-se que o sistema de aterramento avaliado apresenta desempenho satisfatório e dentro dos padrões exigidos, garantido segurança operacional e confiabilidade elétrica para a linha de transmissão. A obtenção desse valor demostra uma execução adequada, atendendo aos requisitos sem necessidade de complementação do sistema de aterramento.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram abordados conceitos fundamentais sobre sistemas de aterramento, com ênfase na medição da resistência de aterramento em linhas de transmissão. O método empregado para as medições foi o método de queda de potencial, realizado por meio de terrômetro, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 15749:2009 e pelas especificações técnicas da CHESF. Essa metodologia permitiu a obtenção de resultados precisos e representativos das condições reais do solo e da eficiência do sistema implantado.

A partir das medições realizadas em campo, tanto de resistividade do solo quanto de resistência de aterramento, foi possível comparar os valores obtidos como os parâmetros definidos em projeto. Os resultados demostraram que como as estruturas apresentam resistência inferior a 10 ohms, portanto dentro dos limites estabelecidos pelas normas e especificação técnicas. Apenas uma estrutura apresentando um valor de resistividade acima do esperado, no entanto, sendo utilizando as precauções para medições próximos de cercas aterradas determinadas pela CHESF.

Conclui-se que o sistema de aterramento estudado atende satisfatoriamente os requisitos de segurança e desempenho elétrico. As medições e análises realizadas confirmam a eficiência dos procedimentos de instalação e medição, assegurando a confiabilidade e a proteção do sistema de transmissão. O trabalho proporcionou ainda um importante aprendizado prático sobre a execução de ensaios de resistividade do solo e resistência de aterramento, consolidando conhecimentos essências para o projeto e avaliação de sistemas elétricos de potência.

7 REFERÊNCIAS

KINDERMAN G., CAMPAGNOLO J.M. **Aterramento Elétricos.** 3 ed. Porto Alegre: SAGRA-DC LUZZATO, 1995.

VISACRO F. S. **Aterramento Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento.** São Paulo: Artiliber Editora Ltda., 2005.

CHESF. **Especificação Técnica de Serviços de Linha de Transmissão.** Sistema de Aterramento. Set/2011.

CHESF. **Especificação Técnica de Serviços de Linha de Transmissão.** Fios Contrapesos para Linhas de Transmissão. Set/2009.

MAYER, Elton Anthony Novais. **Aterramento de uma linha de transmissão 138 kV em ambiente semiárido – Estudo de caso.** Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

COSTA, Wesley José Nóbrega Aires e. **Análise de aterramento em linhas de transmissão.** Trabalho de Conclusão de Curso, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

EASYPOWER. **Touch and Step Voltage Calculations.** In: EASYPOWER: Resources. [S.I.]. Disponível em: https://www.easypower.com/resources/article/touch-and-step-voltage-calculations. Acesso em: 3 nov. 2025.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ANBT). NBR 7117-1: **Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos – Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoelétrica.** Rio de Janeiro, 2020.

AQUINO, R.M. DE. **Parcela Varável das Funções de Transmissão da Rede Básica e o seu Impacto na Operação do Sistema Elétrico.** [s.1: s.n.].

CAETANO, C. E. F. et al. **A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding: Full-scale measurements. 34th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2018,** 2018.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatório de Analise de Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão – Edição 2018.** Brasília, 2018.

INPE, Disponível em: http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php, Acesso em: 3 nov. 2025.

ELAT, Disponível em: http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/el.atm/perguntas.e.respostas.php Acesso em: 3 nov. 2025

CARVALHO, Franklin Barbosa de. **Metodologia de aterramento em linha de transmissão em corrente alternada 550 kV na Amazônia – Um estudo de caso.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.