



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PATRICK RAMON GOMES ALVES

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO SISTEMA
DE ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO 69 KV**

Fortaleza
2020

PATRICK RAMON GOMES ALVES

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE SISTEMA
DE ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO 69KV

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para o título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral Câmara

Fortaleza
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A481a Alves, Patrick Ramon Gomes.
Análise teórica e experimental do sistema de aterramento da subestação 69 kV / Patrick Ramon Gomes
Alves. – 2020.
47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

Coorientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

1. Aterramento. 2. Resistência. 3. Potenciais. I. Título.

CDD 621.3

PATRICK RAMON GOMES ALVES

ANALISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO SISTEMA
DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO 69 KV

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Ph.D. Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará

Eng. Francisco Fábio Moreira Palácio

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia àqueles que me ajudaram nessa caminhada: Donato Caratú, Kátia Muniz, Dennys Bastos, Marta Muniz, Antônio Diógenes, Adalcina Muniz, Dilma Almeida; meu grande amigo Harllan Muniz; meus pais e meus irmãos, que me deram muito apoio nos momentos mais difíceis da minha vida e sempre forças para continuar e nunca me deixaram desistir, e dizer, meu muito obrigado por tudo que fizeram ao longo da minha vida! Também dedico à minha esposa Giciany Pinheiro pela dedicação, apoio, companheirismo, felicidade, auxílio e esforços em ajudar, sendo uma pessoa especial na minha vida. Desejo ter sido merecedor do esforço dedicado por vocês.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a DEUS, pela força e coragem durante todo este percurso e a quem devo tudo o que sou.

Agradeço especialmente, aos meus pais que sempre me apoiaram para concretizar minha formatura, sempre incansáveis, e também em tê-los como exemplo para minha vida. A eles dedico inteiramente este trabalho.

A meus irmãos que sempre me encorajaram e apoiaram.

A minha esposa que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades.

A todos os meus familiares pela ajuda, o apoio e o incentivo recebido. Em especial, a meus padrinhos Dennys Bastos e Marta Muniz.

A todos os meus amigos, em especial Harllan Muniz, que me apoiou, me corrigiu e compreendeu, e sempre esteve por perto disposto a me ajudar, ouvindo minhas angústias e dividindo momentos alegres.

Queria agradecer pela oportunidade oferecida por meu orientador Prof. Dr. Raphael Amaral e aos presentes na minha banca, o Professor Fernando Luiz e o Engenheiro Francisco Fábio que me ajudaram no meu crescimento profissional.

"Purifique teu coração para permitir que o amor entre nele, pois até o mel mais doce azeda num recipiente sujo." (Pitágoras)

RESUMO

Nesse trabalho são apresentados os conceitos básicos sobre aterramento elétrico para o funcionamento com desempenho satisfatório, o conhecimento das características do solo e sua estratificação para os cálculos precisos de sua resistividade através da realização da medição de resistividade e de potenciais na superfície de sua malha. São mostrados os procedimentos atualmente utilizados para as medições, conforme ABNT NBR 7117:2012, NBR 15751:2013 e NBR 15749:2009. Também são delineadas as definições e os objetivos de um sistema de aterramento buscando descrevê-lo para um maior entendimento das medições do sistema como resistência de aterramento, potencial de toque e potencial de passo. Em complemento ao trabalho, foram explanados alguns métodos mais adequados para as medições da resistência e de potenciais na superfície de um sistema de aterramento. Por fim, realizou-se a validação de um método de Wenner por meio de um estudo de caso para uma malha de aterramento de uma subestação com a tensão de fornecimento de 69 kV, buscando propiciar uma avaliação do sistema de forma segura contendo dados reais e teóricos, obtidos com a realização dos ensaios, a fim de comparar com os resultados teóricos.

Palavras-chave: Medições. Resistência de aterramento. Tensão de passo e toque.

ABSTRACT

In this work, the basic concepts about electrical grounding are shown for satisfactory performance, the knowledge of the characteristics of the soil and its stratification for the precise calculations of its resistivity through the measurement of resistivity and potentials on the surface of its mesh. The procedures currently used for measurements are presented, according and ABNT NBR 7117: 2012, NBR 15751: 2013 and NBR 15749: 2009 guidelines. The definitions and objectives of a grounding system are also outlined in order to describe it for a better understanding of system measurements such as grounding resistance, touch potential and step potential. In addition to the work, some more suitable methods for measuring resistance and potentials on the surface of a grounding system were explained. Finally, a Wenner method was validated, through a case study for a substation grounding grid with a supply voltage of 69 kV, seeking to provide a safe assessment of the system, containing data real and theoretical results, obtained with the tests in order to compare with the theoretical results.

Keywords: Measurements. Grounding Resistance. Voltage step and touch.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 Organização do trabalho | 13 |
| 2. FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS | 15 |
| 2.1 Introduções a sistemas de aterramento | 15 |
| 2.2 Natureza da resistência de aterramento | 16 |
| 2.3 Resistividade do solo | 17 |
| 2.4 Influência da umidade..... | 18 |
| 2.5 Influência da composição química | 19 |
| 2.6 Influência da temperatura | 19 |
| 2.7 Compacidade e Granulometria do solo..... | 21 |
| 2.8 Influência da frequência | 21 |
| 2.9 Influência da estratificação | 23 |
| 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 23 |
| 3.1 Equipamento de medição..... | 24 |
| 3.2 Método Wenner | 25 |
| 3.3 Condições de risco à segurança de pessoas | 27 |
| 3.4 Medição da tensão de toque..... | 28 |
| 3.5 Medição da tensão de passo..... | 31 |
| 4. ESTUDO DE CASO | 33 |
| 4.1 Medição da Resistividade Elétrica do Solo | 35 |
| 4.2 Resultados das Medições | 36 |
| 4.3 Parâmetro das Medições | 36 |
| 4.4 Cálculo do Coeficiente de Reflexão | 37 |
| 4.5 Cálculo da Resistência de Aterramento..... | 37 |
| 4.6 Determinação da Resistividade Aparente..... | 38 |
| 4.7 Resistência da Malha de terra Equivalente Considerando o paralelismo dos cabos Horizontais enterrados | 38 |
| 4.8 Conclusão | 38 |
| 4.9 Tensão de passo | 39 |
| 4.10 Determinação da Tensão de Passo Máxima | 39 |
| 4.11 Determinação do Coeficiente de Superfície Ks..... | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 4.12 Determinação da Tensão de Passo da Malha..... | 41 |
| 4.13 Tensão de Toque..... | 42 |
| 4.14 Determinação da Tensão de Toque Máxima | 42 |
| 4.15 Determinação da Tensão de Toque na Malha..... | 43 |
| 4.16 Conclusão | 44 |
| 4.17 Parecer Final sobre a Instalação | 45 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 46 |
| REFERÊNCIAS..... | 47 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Efeito da temperatura na resistividade do solo. | 20 |
| Figura 2 - Componentes de corrente no solo. | 22 |
| Figura 3 - Circuito equivalente de aterramento em condições de baixa frequência. | 22 |
| Figura 4 - Estratificação do solo em duas camadas. | 23 |
| Figura 5 - Ligação do Terrômetro aos eletrodos de medidas de resistência do solo. | 25 |
| Figura 6 - Distância entre hastes correspondente à profundidade do solo. | 26 |
| Figura 7 - Situações de risco susceptíveis às tensões de toque e passo. | 28 |
| Figura 8 - Indivíduo sujeito à tensão de toque. | 29 |
| Figura 9 - Indivíduo sujeito à tensão de passo. | 31 |
| Figura 10 - Esquema da malha de terra. | 35 |
| Figura 11 - Topologia método de Werner. | 35 |
| Figura 12 - Gráfico de tensão de passo. | 41 |
| Figura 13 - Gráfico de tensão de toque. | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Tipo de solo e respectiva resistividade..... | 17 |
| Tabela 2 - Resistividade de um solo com concentração de umidade. | 18 |
| Tabela 3 - Resistividade de um solo com variação da temperatura..... | 20 |
| Tabela 4 -Tipo de solo e respectiva resistividade..... | 36 |

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos são projetados e construídos com o objetivo de otimizar a operação e promover a máxima confiabilidade, assegurando a continuidade e a qualidade no fornecimento de energia elétrica. Por isso, suas instalações precisam atender a critérios específicos de desempenho e segurança sob as diversas condições operativas. Nesse contexto, os sistemas de aterramento são elementos de extrema importância e favorecem a compreensão do comportamento das instalações tanto em regime permanente, como sob curtos-circuitos à frequência industrial ou transitórios eletromagnéticos.

No que se refere ao assunto tratado, para atender as exigências de modo seguro, contra riscos e acidentes fatais, as subestações de 69 kV devem possuir um sistema de aterramento dimensionado adequadamente para níveis de corrente de curto-circuito e fase-terra que venham permitir a atuação da proteção, assim como potenciais de passo e potenciais de toque suportáveis, ou ainda, proteções contra descargas atmosféricas e surtos de manobras.

No entanto, as frequências utilizadas no projeto de sistema de aterramento podem se dividir em duas faixas, sendo frequência industrial e frequência transitória eletromagnética. A frequência transitória eletromagnética pode ser dividida em duas categorias: transitório impulsivo (descargas atmosféricas) e transitório oscilatório (surtos de manobras) segundo Visacro (2010). O aterramento deve ser tratado como parte do estudo de compatibilidade eletromagnética, o qual abrange as áreas de qualidade de energia elétrica, sistemas de proteção, ensaios de equipamentos sensíveis, entre outras áreas da engenharia.

Todavia, é importante ressaltar que auferir uma resistência de aterramento com níveis mais baixos possíveis para correntes de falta, tem como função principal assegurar a integridade física dos equipamentos instalados, como também a segurança das pessoas que trabalham em processos industriais ou que desempenham tarefas de manutenção preventiva e corretiva em subestações de 69 kV. Para isso, o sistema de aterramento tem que proporcionar o escoamento do potencial estático para terra.

Contudo, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a natureza do aterramento, capacitância, indutância e o cálculo das energias correspondentes, por meio de uma resistência e uma impedância em série.

Realizou-se uma análise teórica, aplicando o método dos elementos finitos, condução de corrente de falta à frequência industrial, comparando com valores reais da resistência de aterramento com valores teóricos. Além disso, fez-se uma verificação do

sistema de aterramento através de medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo, pelo método de Wenner, e estratificação do solo pelo método simplificado em duas camadas.

A pesquisa aborda as principais normas regulamentadoras. Inicialmente, a norma ABNT NBR 15749:2009 (Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento), estabelece os critérios e métodos de medição de resistência de sistemas de aterramento e de potenciais na superfície do solo, bem como define as características gerais dos equipamentos que podem ser utilizados nas medições e os conceitos para avaliação dos resultados.

A norma ABNT NBR 7117:2012 (Medição de Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo) estabelece os requisitos para medição da resistividade e determinação da estratificação do solo, a metodologia de medição Arranjo de Wenner, estratificação do solo para métodos gráficos, estratificação do solo métodos computacionais, estratificação do solo método simplificado. A norma ABNT NBR 15751:2013 (Sistema de Aterramento de subestações) estabelece os requisitos para dimensionamento do sistema de aterramento de subestações de energia elétrica, acima de 1 kV, quando sujeitos a solicitações em frequência industrial.

As normas descritas acima estabelecem limites para os níveis de tensão e o valor máximo da resistência de aterramento em relação a uma determinada tensão de referência.

1.1 Organização do trabalho

O capítulo 1 apresenta a introdução, com o tema, sua relevância, objetivo do trabalho e metodologia utilizada.

O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica sobre o sistema de aterramento, as características do solo, a natureza da resistência de aterramento, a resistividade do solo, a influência da umidade, a influência da composição química, a influência da temperatura, a compactidade e granulometria do solo, a influência da frequência e a influência da estratificação.

O capítulo 3 aborda a os procedimentos metodológicos, o método de Wenner para medições da resistividade do solo utilizando-se um Terrômetro digital, atendendo aos requisitos da norma da ABNT NBR 7117:2012 - (Medição da Resistividade e Determinação

da Estratificação do Solo), as condições de risco, a segurança das pessoas, a determinações da tensão de passo e de toque máxima e a determinação da tensão de passo e toque na malha.

O capítulo 4 apresenta os resultados da inspeção de uma malha de aterramento em uma subestação com tensão de fornecimento de 69 kV (estudo de caso). Foram verificados apenas os valores medidos e comparados com os valores máximos estabelecidos por norma. Ressalta-se que, não houve nenhum tipo de dimensionamento inicial da malha, sendo estes dados enviados pelo o projetista que dimensionou o sistema. No presente estudo foram apenas medidos os valores de resistência de aterramento e os potenciais, realizando uma verificação dos valores reais referenciados com as normas vigentes.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo de caso, analisando os resultados medidos na subestação, como os valores da resistência de aterramento de tensão de toque e de passo a fim de verificar se os valores estão satisfatórios, sendo inferiores aos valores máximos estipulados pelas “Especificação Técnica no. 407 Versão no. 01: Fornecimento de Energia Elétrica em Alta Tensão - 138-69 kV”. ENEL Fortaleza. 2019.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução a sistemas de aterramento

Em se tratando do Sistema Elétrico, os sistemas de aterramento têm importância fundamental para o adequado desempenho das instalações, tanto em regime permanente como sob condições de curto-circuito e transitórios eletromagnéticos, devendo ser objeto de cuidadosa análise devido a um conjunto de fatores, dentre os quais se destacam a própria topologia do sistema elétrico e as características meteorológicas e físicas existentes em cada região.

Os fatores associados ao sistema de aterramento contribuem de forma significativa para um maior desempenho do sistema de aterramento, podendo ser caracterizado pela utilização do neutro aterrado, no qual suas funções de proteção são combinadas em um único condutor ao longo do sistema. Neste caso, o condutor neutro conecta a malha de terra na origem do sistema, que é a subestação e que interliga todas as massas da instalação. O neutro, além de conduzir a corrente de desequilíbrio do sistema, é responsável também pela condução da corrente de defeito.

No entanto, a topologia do sistema exige atenção para alguns cuidados, pois sendo o neutro referenciado através do sistema de aterramento, torna-se conveniente conectar todas as partes metálicas da instalação, uma vez que as tensões induzidas e as falhas de isolamento interno em equipamentos e, contatos acidentais com elementos energizados, podem submetê-las a tensões elevadas, colocando em prováveis situações de risco, pessoas ou outros equipamentos que se encontrem em contato com elas.

Assim, é fundamental que o quesito aterramento mereça um cuidado especial, tendo em vistas que, existem variações em seu comportamento, por exemplo: a temperatura, a umidade, os tipos de solos, e, as vizinhanças podem afetar seu desempenho. Os sistemas de aterramento têm como finalidade proteger os equipamentos elétricos contra descargas atmosféricas, curto-circuito, surto de manobra, mantendo os potenciais produzidos dentro dos limites de segurança.

2.2 Natureza da resistência de aterramento

A princípio, os valores de aterramento são dados pelo efeito das seguintes resistências: resistência própria do eletrodo e das ligações elétricas ao mesmo (usualmente, de valor muito reduzido, devido à alta condutividade dos metais empregados), segundo Visacro (2010); resistência de contato entre o eletrodo e a terra adjacente ao mesmo (de valor desprezível se o eletrodo estiver isento de qualquer cobertura isolante, e se a terra estiver bem comprimida de encontro à superfície do eletrodo); resistência da terra circunvizinha (componente fundamental, que efetivamente determina o valor da resistência de um aterramento bem instalado e que depende basicamente da resistividade do solo e da distribuição de corrente provinda do eletrodo, está determinada, principalmente, pela forma e dimensão do mesmo).

Dos fatores que influenciam a resistência total do sistema, temos a resistência das conexões entre os eletrodos de terra, este valor é muito reduzido devido à alta condutividade dos materiais empregados. As conexões entre os cabos e as hastes de aterramento são feitas por solda exotérmica, que é um método de soldagem de alta temperatura usado na união permanente de metais e condutores elétricos. Trata-se de uma união a nível molecular, em que as conexões não são afetadas sob elevados surtos ou picos de corrente elétrica; não sofrem corrosão; são mecanicamente estáveis; a conexão passa a fazer parte integrante do condutor ou da superfície soldada; possuem capacidade de corrente elétrica igual ou maior que a dos condutores conectados. Assim também, a resistência dos cabos e condutores metálicos, tem o valor quase desprezível.

Ao considerar o valor da resistência de um condutor de cobre de 50 mm² que é cerca de 0,375 ohms/km, as contribuições da resistência dos cabos podem chegar a 5% da resistência final da malha. As hastes de aterramento, por serem fabricadas com aço carbono 1010/1020 e revestimento de acobreado, têm sua resistência desprezível. Assim podemos concluir que o efeito da resistência ôhmica pode ser desprezado.

Sob o mesmo ponto de vista, a resistência entre eletrodo e o solo é muito expressiva e corresponde a uma parcela considerável do valor final da resistência de malha de terra. Na realidade, a resistência é a oposição à passagem da corrente, que escoar do eletrodo de aterramento para a terra. A resistência é bem maior onde o eletrodo não faz contato direto com a terra circunvizinhas. A resistência elétrica total de um terreno que envolve um eletrodo

nele enterrado se encontra geralmente dentro de um raio de 1,8 a 3,5 m do eixo geométrico do referido eletrodo.

Finalmente, a resistência relativa ao terreno circunvizinho ao eletrodo de aterramento é, em geral, a parcela de maior valor na composição da resistência do sistema de aterramento. O solo é um elemento heterogêneo de modo que o valor de sua resistência varia de uma direção à outra, conforme é composto seu material, profundidade de suas camadas e idade de sua formação geológica.

2.3 Resistividade do solo

Primeiramente, para um projeto de um sistema de aterramento, é importante o conhecimento prévio das características do solo, principalmente no que diz respeito à homogeneidade de sua constituição. Os fatores que influenciam na resistividade do solo são: tipo do solo, solos constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes, teor de umidade, compactação e composição química dos sais dissolvidos na água retida. As várias combinações acima resultam em características de solos diferentes e com valores de resistividades distintos.

Por sua vez, os tipos de solo encontrados no Brasil não são claramente definidos, quanto às propriedades físicas, por isso, não é possível atribuir um valor específico de resistividade a um tipo de solo. As misturas de diversos tipos de solo apresentam em geral, elevados valores de resistividade à frequência industrial, muito embora não seja uma referência confiável para elaboração de um projeto de malha de aterramento. A tabela 1 utiliza os valores apenas ilustrativos da resistividade de solos para naturezas distintas.

Tabela 1- Tipo de solo e respectiva resistividade.

| <i>Tipo de Solo</i> | <i>Resistividade ($\Omega.m$)</i> |
|------------------------------------|---|
| 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 20% de umidade | 330 |
| Argila com 40% de umidade | 80 |
| Areia molhada | 1300 |
| Areia seca | 3000 a 8000 |
| Calcário compacto | 1000 a 5000 |
| Granito | 1500 a 10000 |

Fonte: (KINDERMANN, et al., 2011)

Considerando as características dos solos constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes, essas camadas são em geral horizontais e paralelas em virtude da sua própria formação geológica ao longo dos anos. A modelagem em duas camadas tem produzido excelentes resultados, sendo a camada superior de maior resistividade, e a inferior com decréscimo de resistividade em decorrência da umidade.

2.4 Influência da umidade

Antes de tudo, deve-se observar o efeito da umidade na resistividade do solo. A condução das cargas elétricas se faz basicamente por mecanismos eletrolíticos, e a alteração da umidade irá influenciar na condução que é predominantemente iônica. Para que a eletrólise se estabeleça é essencial à existência de água e sais minerais que irão prover os íons. A condutividade iônica é sensivelmente afetada pela quantidade de água contida nas camadas do solo, sendo a água o principal elemento para condução da corrente no solo e a ligação entre os sais minerais da terra e os condutores elétricos.

Por sua vez, a umidade de uma região é determinada por diversos fatores, tais como clima, estações do ano, temperatura, natureza do solo, existência de lençóis freáticos, índice pluviométrico, dentre outros. Dessa forma, um solo específico, com concentração de umidade, apresenta uma grande variação na sua resistividade, principalmente nas camadas mais superiores do solo. Observa-se que, os solos em seu estado natural, dificilmente encontram-se realmente secos, e raramente os solos tem umidade superior a 40%, conforme tabela 2.

Tabela 2 - Resistividade de um solo com concentração de umidade.

| <i>Índice de Umidade (% por peso)</i> | <i>Resistividade ($\Omega.m$)</i> |
|---|--|
| 0 | 10.000.000 |
| 2,5 | 1.500 |
| 5 | 430 |
| 10 | 185 |
| 15 | 105 |
| 20 | 63 |
| 30 | 42 |

Fonte: (KINDERMANN, et al., 2011).

Conclui-se, portanto, que o valor da resistividade do solo acompanha os fatores temporais de cada região, melhorando sua qualidade em épocas chuvosas e baixando em períodos de seca.

2.5 Influência da composição química

As propriedades físicas e químicas do solo são determinadas pelo processo geológico de sua formação e sua evolução de acordo com o clima e o relevo do local. As propriedades físicas do solo (textura, estrutura, densidade, porosidade, permeabilidade, fluxo de água, ar e calor) são responsáveis por influenciar diretamente sua resistividade. As propriedades químicas (pH, teor de nutrientes, capacidade de troca iônica e condutividade elétrica) que normalmente se acham agregados ao solo, influenciam predominantemente no valor da resistividade.

Quando é necessário reduzir a resistência de determinada malha de terra, adicionam-se, adequadamente, produtos químicos ao solo circundante ao eletrodo de terra. É comum o emprego de cloreto de sódio ou sulfato de cobre, ou ainda, de produtos químicos à base de mistura de sais, que, combinados entre si e na presença de água, formam o gel, produto de uso comercial e de grande eficiência na redução da resistividade do solo.

Assim, como o tratamento químico do solo é empregado na correção de aterramento existente, deve-se então utilizar produtos industrializados ou naturais, como: sal, carvão vegetal, bentonita e earthron.

2.6 Influência da temperatura

A princípio, deve-se encarar os efeitos da temperatura sobre a resistividade do solo do ponto de vista que, com a elevação da temperatura, a evaporação da água no solo irá aumentar, ocasionando a diminuição da umidade na terra e resultando no aumento da resistividade de aterramento. Existe uma relação direta entre o aumento da temperatura e o aumento da resistividade do solo. Considerando que a resistividade é sensivelmente influenciada pelo aumento da temperatura, o oposto também ocorrerá. Com a diminuição da temperatura, a umidade do solo tende a aumentar, devido a água nele contida, com isso a resistência de aterramento tende a diminuir para valores acima de 0 °C.

Da mesma forma, devemos analisar a resistividade do solo em relação à temperatura a 0 °C (passagem do estado líquido para estado sólido, através do resfriamento). Quando a substância líquida inicia a solidificação, a temperatura fica inalterada até que a totalidade esteja no estado sólido, e só depois a temperatura continua a baixar. No caso da água, em seu ponto de solidificação, a resistividade do solo sofre uma descontinuidade, aumentando o seu valor. Isto acontece devido ao fato de ocorrer uma mudança brusca no estado de ligação entre os grânulos que formam a concentração eletrolítica.

Em se tratando de temperaturas a baixo de 0 °C, o efeito da resistividade do solo e a resistência de um sistema de aterramento são bastante afetadas, ocorrendo um aumento significativo na resistividade. Assim como todas as demais características fixas e variando apenas a temperatura, o efeito típico sobre a resistividade de um dado solo é mostrado na tabela 3.

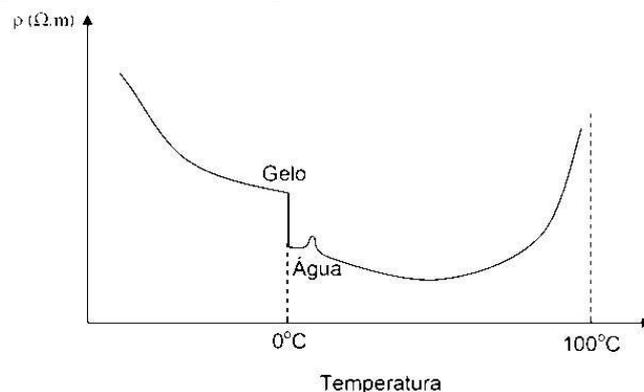
Tabela 3 - Resistividade de um solo com variação da temperatura.

| <i>Temperatura (°C)</i> | <i>Resistividade (Ω.m)</i> |
|-----------------------------|--------------------------------|
| +20 | 72 |
| +10 | 99 |
| 0 (água) | 138 |
| 0 (gelo) | 300 |
| -5 | 790 |
| -10 | 3.330 |

Fonte: (KINDERMANN, et al., 2011).

Generalizando, o desempenho de um determinado solo, submetido à variação de temperatura, pode ser expresso pela curva da Figura 1.

Figura 1- Efeito da temperatura na resistividade do solo



Fonte: (KINDERMANN, et al., 2011).

2.7 Compacidade e Granulometria do solo

A compacidade de um solo granular depende da maneira com que suas partículas sólidas se dispõem. Descreve-se a compacidade de um solo granular por expressões qualitativas (muito fofa, fofa, medianamente compacta, compacta). A Granulometria do Solo é a distribuição de suas partículas constituintes, de natureza inorgânica ou mineral, em classes de tamanho. As classes de tamanho das partículas inorgânicas são também chamadas de frações granulométricas.

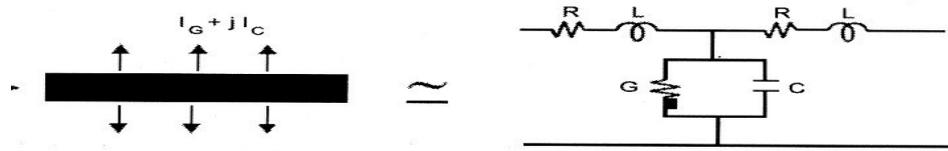
Um solo mais compacto apresenta uma maior continuidade física, devido ao contato direto da terra com a haste de aterramento e os condutores verticais, o que proporciona um menor valor de resistividade. Um aumento de pressão sobre o solo ocasiona geralmente maior compacidade deste, com redução de sua resistividade, devido à redução de vazios através de esforços externos gerados por meios mecânicos.

Quanto à influência de uma granulometria, quanto maior os grãos de natureza inorgânica ou mineral, maior será a resistividade do solo, pois menor é a capacidade de retenção de água no solo, deixando-a fluir para camadas mais profundas ou evaporar-se, e menor continuidade elétrica. A presença de grãos de tamanhos variados tende a diminuir as lacunas, tendo assim uma maior continuidade de massa do solo, aumentando a capacidade de retenção da sua umidade.

2.8 Influência da frequência

A perspectiva na qual o sistema enxerga o aterramento pode ser expressa através da sua resistência, capacitância e indutância, cada uma influenciando na capacidade de condução de corrente para o solo. O mesmo sistema pode ser caracterizado por meio de uma impedância de aterramento, a figura 2 apresenta uma representação simplificada do aterramento por meio de um circuito equivalente, a corrente que é injetada é parcialmente dissipada para o solo e uma pequena parte é transferida para o eletrodo, e um campo magnético é estabelecido na região em volta devido à passagem dessa corrente, tanto no interior como no exterior do eletrodo e do condutor.

Figura 2 - Componentes de corrente no solo.

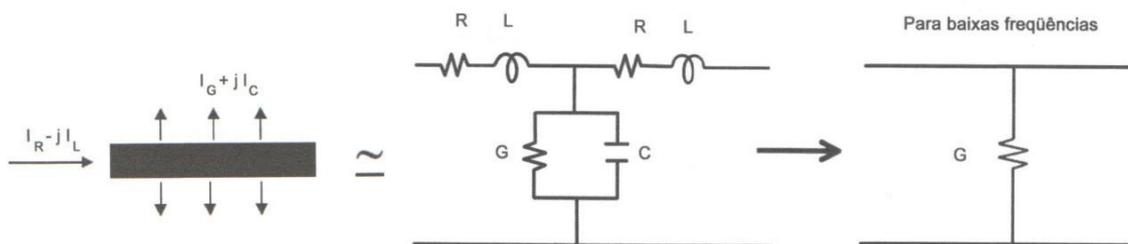


Fonte: (VISACRO FILHO, 2002).

O campo elétrico no solo (meio de resistividade ρ e permissividade ϵ) determina o fluxo de corrente condutiva e capacitiva no meio. A relação entre tais correntes não depende da geometria dos eletrodos, mas somente da relação $\sigma/\omega\epsilon$, em que σ se refere à condutividade do solo e ω à frequência angular. Em termos de um circuito equivalente, o cálculo das energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência e uma indutância em série.

Para condições de baixa frequência (frequência industrial), os valores de resistividade do solo não são muitos elevados, logo os efeitos reativos são desprezados. Neste caso, o circuito equivalente para o aterramento fica reduzido a uma série de condutâncias acopladas. Assim, em baixas frequências, o solo apresenta um comportamento basicamente resistivo, ou seja, a sua característica dielétrica pode ser desprezada perante a condutividade, conforme a figura 3.

Figura 3 - Circuito equivalente de aterramento em condições de baixa frequência.



Fonte: (VISACRO FILHO, 2002).

Para determinar o desempenho dos sistemas de aterramento sob solicitações transitórias, tipicamente provocadas por descargas atmosféricas, faz-se necessário obter a resposta dos mesmos para frequências. Como as características elétricas do solo influenciam de forma significativa no comportamento do aterramento, e os parâmetros condutividade (σ) e permissividade (ϵ) são fortemente dependentes da frequência, é imprescindível que a modelagem do solo seja representativa e fisicamente coerente com esta dependência.

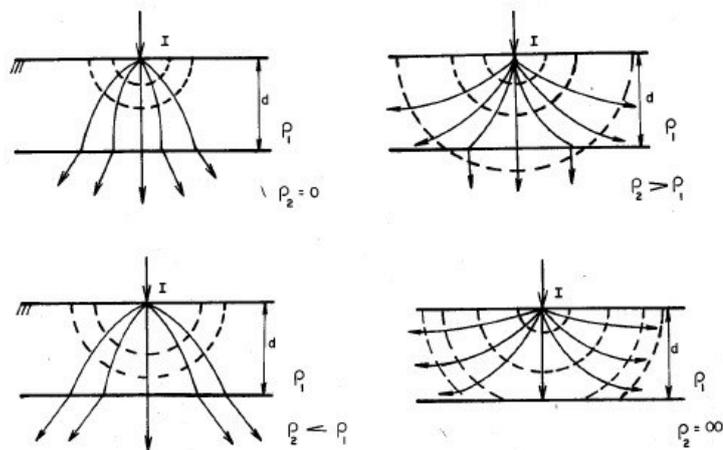
2.9 Influência da estratificação

A estratificação é uma ou um conjunto de camadas que dão forma a algo. Consiste na disposição paralela ou subparalela que as camadas do solo, ao se acumularem, formam as rochas. Na camada superficial do solo, encontramos areia, argila, ar e humos. Na camada intermediária há fragmentos de rochas e seres vivos. Já na camada mais profunda encontramos grandes rochas. Esta forma de organização do solo é conhecida como estratificação do solo ou do terreno.

Os solos, em sua grande maioria, não são homogêneos, mas formados por diversas camadas com características geológicas diferentes. Essas camadas, devido a sua formação geológica, são em geral horizontais e paralelas à superfície do solo. Existem casos em que camadas se apresentam inclinadas e até verticais, devido a alguma falha geológica. Entretanto, os estudos apresentados para a pesquisa do perfil do solo as consideram aproximadamente horizontais, uma vez que os outros casos são menos típicos principalmente no local da instalação da subestação.

Com a variação da resistividade das camadas do solo, tem-se a variação da dispersão de corrente. Em solos heterogêneos a dispersão da corrente elétrica tem comportamento conforme figura 4 abaixo.

Figura 4 - Estratificação do solo em duas camadas.



Fonte: (KINDERMANN, et al., 2011).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para realização das medições de resistência e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramentos, adotou-se a ABNT NBR 15749:2009 (Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento), e atendendo aos requisitos da norma da ABNT NBR 15751:2013 (Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos) onde estabelecem os critérios e métodos de medição de resistência de sistemas de aterramentos e de potenciais na superfície do solo.

A utilização de procedimentos experimentais tem a finalidade de fornecer elementos que permitam não só subsidiar a execução de projetos, mas também avaliar a conformidade quanto a critérios de desempenho ou até mesmo validar a consistência de modelagens físicas. Por isso, tanto os ensaios quanto tratamento dos resultados obtidos deve ser feitos criteriosamente e seguindo metodologias e processos que minimizem imprecisões e erros inerentes à medição.

No entanto, o estudo de caso está voltado para a utilização de metodologia para avaliar a resistência de um solo por intermédio de um Sistema de Aterramento Elétrico da Subestação de 69 kV da Grendene, baseados no projeto da LAP. São apresentadas todas as informações relativas ao projeto, desde o método de medição da resistividade, até os cálculos que definirão como se dará a configuração do sistema.

No tópico a seguir são apresentados os conceitos fundamentais empregados, os equipamentos utilizados, o método utilizado, condições de risco à segurança de pessoas, cálculo da malha de aterramento, determinação da tensão de toque máxima, determinação da tensão de toque na malha, determinação do coeficiente K_m , K_s e K_i , determinação da tensão de passo máxima, determinação da tensão de passo na malha, fazendo-se uma abordagem específica da metodologia adotada neste trabalho.

3.1 Equipamento de medição

Para o projeto de um sistema de aterramento, é de primordial importância o conhecimento das características do solo. Para cálculos precisos da resistividade do solo é necessária a realização de medições com instrumentos do tipo “terrômetro”. O aparelho utilizado na medição foi um terrômetro digital da marca MEGABRAZ, que é capaz de injetar

corrente no solo, medir a queda de tensão, calcular o valor da resistência e retornar em um display digital este valor.

Aplicação: Medição de resistências de aterramento (com 3 bornes), resistividade do solo pelo método de Wenner (com 4 bornes) e tensões presentes no terreno.

Método de medição de resistência: O terrômetro injeta no terreno uma corrente estabilizada eletronicamente e mede com alta precisão a tensão que aparece no terreno pela circulação dessa corrente através da resistência de difusão do aterramento. A leitura de R é direta, no display.

Exatidão: Medição de resistências: $\pm 2\%$ do valor medido $\pm 1\%$ do fundo de escala. Medição de tensão: $\pm 2\%$ do valor medido $\pm 1\%$ do fundo de escala.

3.2 Método Wenner

O método adotado foi o método de Wenner, que consiste em colocar quatro eletrodos de teste em linha, separados por uma distância “x”, e enterrados no solo com uma profundidade de aproximadamente 20 cm. Os dois eletrodos externos estão ligados aos terminais de correntes EC e EXC e os dois eletrodos centrais estão ligados aos terminais ET e EXT do terrômetro. A disposição do terrômetro de terra para medição e dos eletrodos está representada na figura 5:

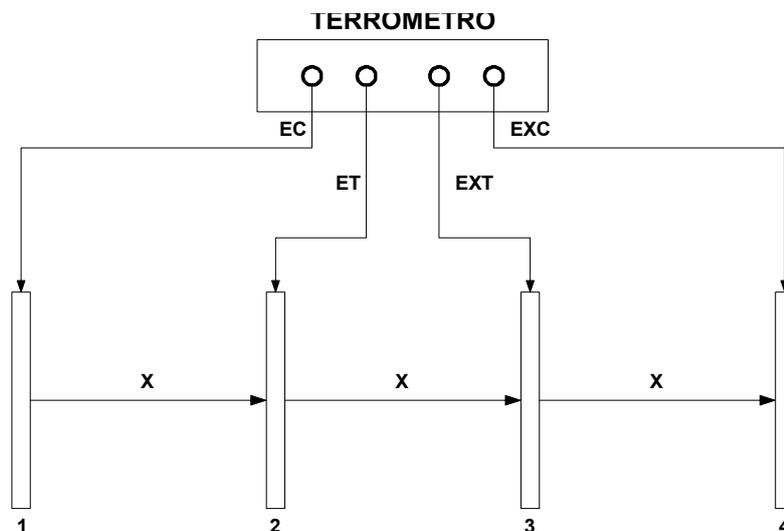
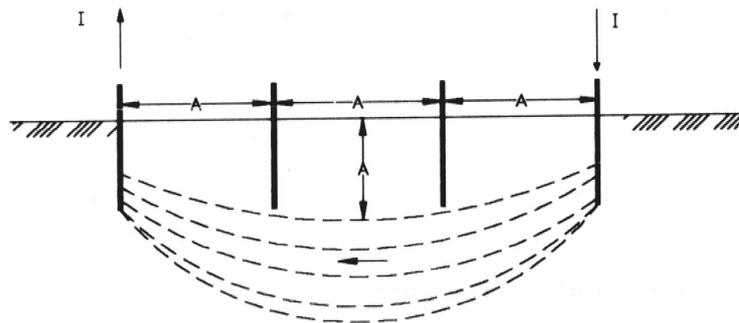


Figura 5 - Ligação do Terrômetro aos eletrodos de medidas de resistência do solo.

Para realizar uma medição correta, devem ser observados alguns pontos básicos:

- Os eletrodos devem ser cravados, aproximadamente, a 20 cm no solo, ou até que apresentem resistências mecânicas de cravação consistente, definindo uma resistência de contato aceitável;
- Os eletrodos devem estar sempre alinhados e as distâncias entre os eletrodos deverão ser sempre iguais;
- Os eletrodos deverão estar isentos de óxido ou gorduras;
- Para um determinado espaçamento definido entre os eletrodos ajustar o potenciômetro e múltiplo do terrômetro até que o galvanômetro do aparelho indique “zero”, com o equipamento ligado;
- Depois de zerado o terrômetro, anotar o valor de R obtido, na planilha de medições mostrada adiante (tabela 01), para cada espaçamento entre eletrodos utilizados;
- O espaçamento entre os eletrodos deverá variar segundo a série: 1, 2, 4, 6, 8, 16, 32 e 64m, e para cada espaçamento deverá ser medido o correspondente valor de R.
- A distância entre hastes correspondente à profundidade do solo cuja resistividade se está medindo está ilustrada na figura 6;

Figura 6 - Distância entre hastes correspondente à profundidade do solo.



Fonte: (LAP, 2019).

- Se o display do galvanômetro oscilar insistentemente, isto significa que existe alguma interferência que deve ser eliminada ou minimizada, afastando-se, por exemplo, os pontos de medição;

- Devem ser anotadas as condições do solo, como umidade, temperatura, tipo e etc.;
- A locação dos pontos onde foram executadas as medidas está descrita no projeto.

O valor da resistividade deve ser calculado por $\rho = 2\pi.a.R$ ($\Omega.m$) sendo:

a-----> Distância entre eletrodos, em m;

R-----> Valor da resistência do solo, indicado no terrômetro em Ω ;

O valor de ρ obtido pela equação acima, para cada espaçamento entre eletrodos, representa a resistividade do solo até a profundidade igual ao espaçamento considerado.

Analisar os valores resultantes da medição de resistividade média, ou seja:

- Calcular a média aritmética dos valores de resistividade do solo para cada espaçamento considerado;
- Calcular o desvio de cada medida em relação à média aritmética anteriormente calculada;
- Desprezar todos os valores de resistividade que tenham um desvio superior a 50% em relação à média;
- Para um grande número de valores desviados da média, é conveniente repetir as medições em campo;
- Persistindo os resultados anteriores, a região pode ser considerada como não aderente ao processo de modelagem do método de Wenner;

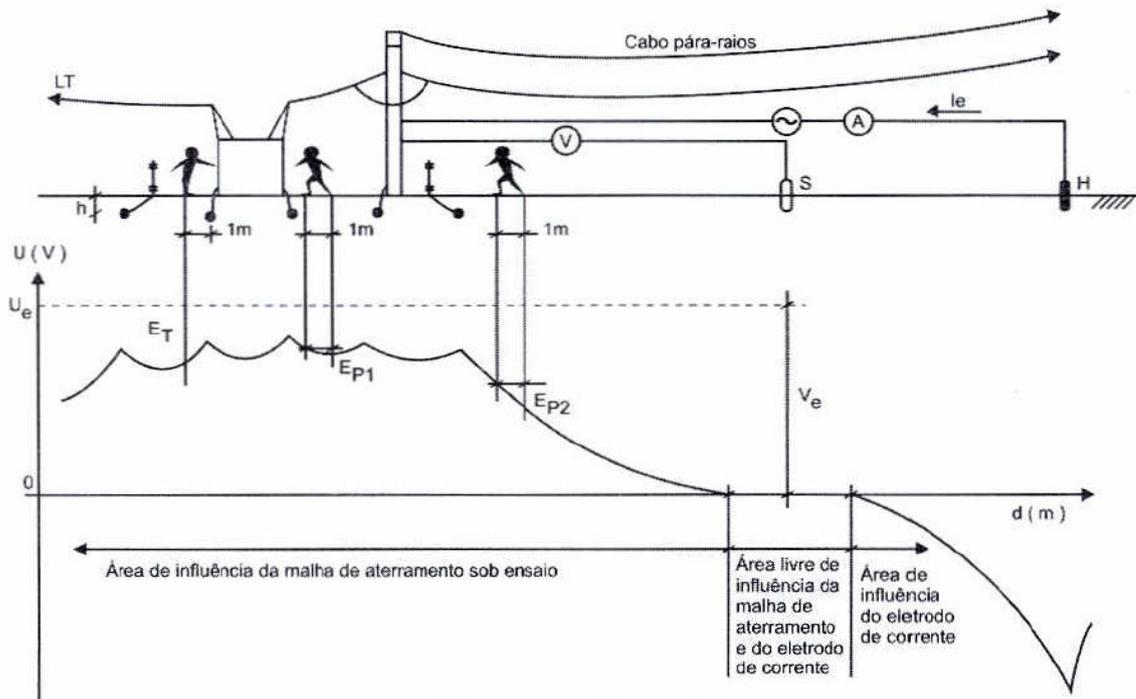
3.3 Condições de risco à segurança de pessoas

O fato de se aterrar as partes metálicas de uma instalação gera a preocupação de se observar os riscos associados à diferença de potencial que aparece entre estas partes metálicas e a superfície do solo na vizinhança das mesmas quando há o escoamento de uma corrente do sistema de aterramento para solo, proveniente de circuitos que de alguma forma estejam ligados ao sistema. Uma situação típica para este tipo de exposição ocorre estando um indivíduo de pé sobre o solo e tocando nestas partes metálicas, a tensão aplicada sobre o mesmo é denominada tensão de toque.

Outra situação de risco também comum ocorre através da tensão aplicada entre os pés de um indivíduo, pois como a corrente que escoar através do aterramento origina campos

no solo e como estes campos são mais intensos nas proximidades de um sistema de aterramento, ao caminhar sobre estes locais uma pessoa pode se colocar em condição de risco devido à tensão de passo. A seguir, na figura 7, são exemplificadas ambas as situações de risco.

Figura 7 - Situações de risco susceptíveis às tensões de toque e passo.



Fonte: (NBR 15749:2009)

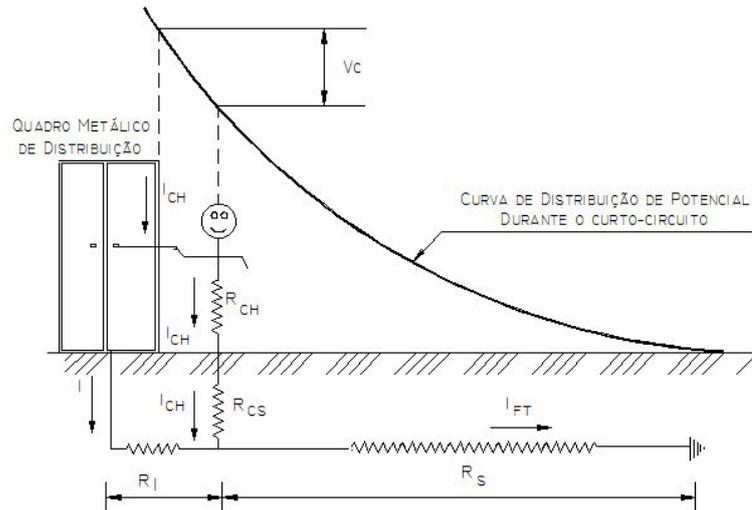
Além dessas, existe também a condição correspondente à tensão transferida, que ocorre basicamente devido à indução em condutores pertencentes a circuitos eletricamente isolados do sistema de aterramento (cujo caminhamento esteja nas proximidades do mesmo) ou aos próprios cabos de aterramento que, por vezes, são utilizados para interligar elementos afastados da área da malha. Se uma pessoa se colocar em contato com tais circuitos (ou equipamentos a eles conectados) ou com os referidos elementos aterrados, poderá se expor à tensão transferida.

3.4 Medição da tensão de toque

A medição da tensão de toque deve ser feita entre elementos metálicos como estruturas metálicas, carcaças de equipamentos e massas metálicas ligadas ao sistema de

aterramento sob estudo e o eletrodo de potencial cravado no solo conforme figura 7 ou como indicado na Figura 8 (uso de placas como eletrodos auxiliares), sempre obedecendo à distância de 1 metro.

Figura 8 - Indivíduo sujeito à tensão de toque.



Fonte: (MAMEDE, 2010).

Com base na norma IEEE 80:2000 tomamos os valores da resistência elétrica do corpo humano e das constantes para o peso do operador que pode ser 50 e 70 kg.

$$E_{\text{toque}} = (R_{ch} + Z_{th}) \cdot I_b \quad (2.10)$$

$$E_{\text{toque}} = (R_{ch} + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot I_b \quad (2.11)$$

$$I_b = \frac{k}{\sqrt{T_e}} \quad (2.12)$$

a) Determinação da tensão de toque máxima

Onde:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (2.13)$$

$$E_{\text{toque}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{T_e}} \quad (2.14)$$

ρ é a resistividade do solo

R_{ch} é a resistência do corpo humano

Z_{th} é a resistência equivalente do sistema (Z Thevenin)

T_e é o tempo de operação da proteção;

h_s é a espessura do material (brita)

ρ_s é a resistividade superficial da brita

C_s é o fator de redução devido às densidades da superfície e o tipo de material da superfície

k : Constante empírica, relacionada à massa do ser humano.

$k = 0,116$ para pessoas com massa de 50kg.

$k = 0,157$ para pessoas com massa de 70kg.

b) Determinação da tensão de toque na malha

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_{cft}}{L_M} \quad (2.15)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{D_{cp}^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_{cp} + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_{cp} \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \quad (2.16)$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (2.17)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{2} \quad (2.18)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{(2 \cdot n)^n \cdot h}{h_0}} \quad (2.19)$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (2.20)$$

Onde:

K_m é o coeficiente de malha;

K_i é o coeficiente de irregularidade;

I_{cft} é a corrente de curto circuito fase-terra;

L_M é o comprimento total dos condutores e hastes de aterramento;

D_{cp} é distância dos condutores da malha de aterramento;

n é o coeficiente geométrico ;

d é o diâmetro do condutor em m;

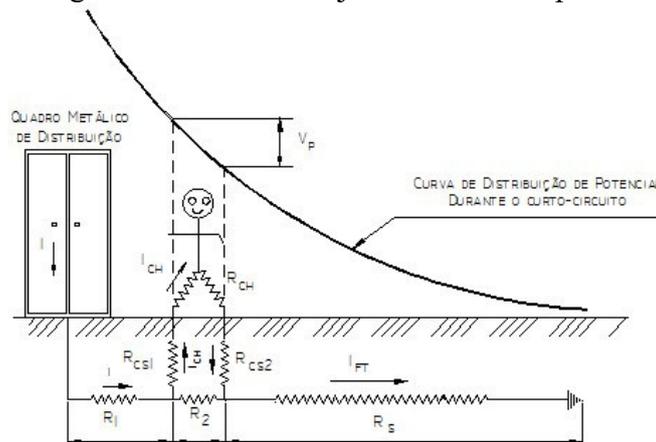
h_0 é a profundidade de referência da malha

h é a profundidade da malha.

3.5 Medição da tensão de passo

A medição da tensão de passo deve ser medida entre dois eletrodos de potencial cravados no solo, distanciados de 1 metro, conforme, figura 7 ou como indicado na figura 9 (uso de placas como eletrodos auxiliares).

Figura 9 - Indivíduo sujeito à tensão de passo.



Fonte: (MAMEDE, 2010).

Com base na norma IEEE 80:2000 tomamos os valores da resistência elétrica do corpo humano e das constantes para o peso do operador que pode ser 50 e 70 kg.

$$E_{\text{passo}} = (R_{ch} + Z_{th}) \cdot I_b \quad (2.21)$$

$$E_{\text{passo}} = (R_{ch} + 6 \cdot C_s \cdot p_s) \cdot I_b \quad (2.22)$$

a) Determinação da tensão de passo máxima

Onde:

$$I_b = \frac{k}{\sqrt{T_e}} \quad (2.23)$$

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (2.24)$$

$$E_{\text{passo}} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{T_e}} \quad (2.25)$$

k: Constante empírica, relacionada à massa do ser humano.

k = 0,116 para pessoas com massa de 50kg.

k = 0,157 para pessoas com massa de 70kg.

b) Determinação da tensão de passo na malha

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_{cft}}{L_s} \quad (2.26)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D_{cp+h}} + \frac{1}{D_{cp}} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (2.27)$$

Onde:

K_s é o coeficiente de superfície dos condutores;

L_s é o comprimento percentual dos condutores e das hastes de aterramento.

4. ESTUDO DE CASO

Conforme Especificação Técnica nº 407 (2019) da Enel descreve-se a subestação como parte do sistema de potência que compreende os dispositivos de manobra, controle, proteção, transformação e demais equipamentos, condutores e acessórios, abrangendo as obras civis e estruturas de montagem. Funciona como ponto de controle e transferência em um sistema de transmissão elétrica, direcionando e controlando o fluxo energético.

O estudo de caso foi realizado em uma subestação de 69 kV da Grendene onde foram realizadas as medições de resistência de aterramento pelo o método de Wenner e também, as medições de potenciais na superfície do solo, cálculo da malha de aterramento, determinação da tensão de toque máxima, determinação da tensão de toque na malha, determinação do coeficiente K_m , K_s e K_i , determinação da tensão de passo máxima, determinação da tensão de passo na malha.

Portanto o estudo de caso foi uma análise dos resultados medidos na subestação, como os valores da resistência de aterramento e de tensão de toque e passo, para verificar se os valores estão satisfatórios, sendo inferiores aos valores máximos estipulados pela “Especificação Técnica no. 407 Versão no. 01: Fornecimento de Energia Elétrica em Alta Tensão - 138-69 kV”. Enel – Fortaleza (2019).

O objetivo deste estudo foi o dimensionamento da malha de terra na SE 69/13,8 kV de maneira a:

- Assegurar que pessoas localizadas na subestação e nas suas vizinhanças não sejam expostas, ao perigo de um choque elétrico crítico, no tocante aos limites de potenciais de toque e de passo;
- Possibilitar um meio eficaz de escoamento de correntes elétricas para a terra, sob condições normais ou de falta, sem exceder nenhum limite de operação de equipamentos, bem como permitir o perfeito funcionamento da proteção;
- Obter uma resistência de terra economicamente mais baixa possível para as correntes de falta à terra.

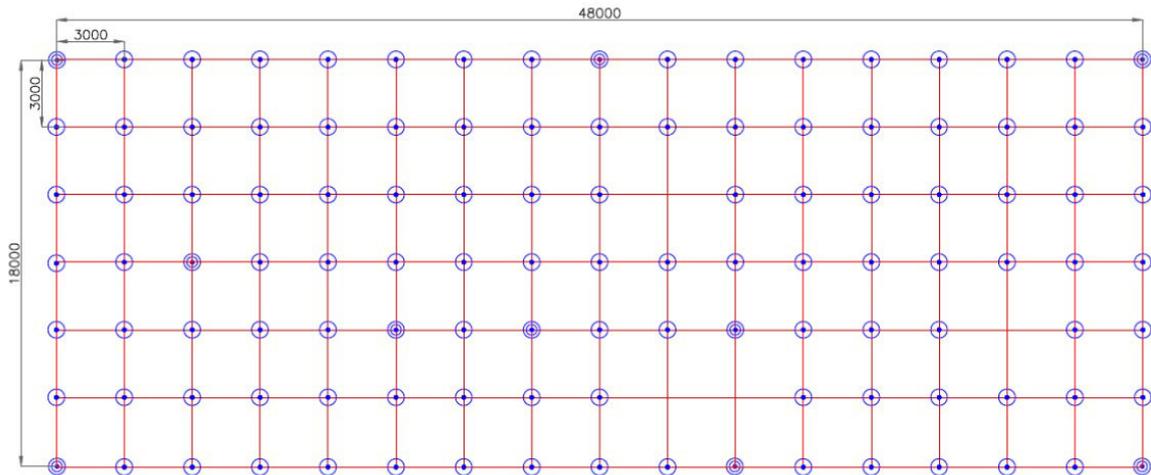
São apresentados os cálculos da resistência da malha de terra. O valor da resistência de aterramento, tensão de passo e de toque projetada é de **2,84 Ω** , **2.886,78 V** e de **563,59 V**, respectivamente, atendendo aos requisitos da norma da ABNT NBR 15751:2013 - (Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos).

Seguem apresentados os resultados dos ensaios através dos valores das medições para o sistema de aterramento da subestação, considerando o valor da resistência e os potenciais na superfície do solo, que irá verificar o desempenho do projeto da malha de terra a ser inspecionada, respeitando os valores máximos de resistência de aterramentos e de potenciais de toque e passo em função da malha projetada.

a) Dados Considerados para a Malha de Terra

- Resistividade aparente do solo: $\rho_a=494,21 \Omega.m$
- Resistividade da primeira camada: $\rho_1=882,51 \Omega.m$
- Resistividade da segunda camada: $\rho_2=72,42 \Omega.m$
- Resistividade superficial da brita: $\rho_s=3.000\Omega.m$
- Corrente estimada de curto-circuito fase-terra: $I_{cft}= 2,988 \text{ kA}$
- Comprimento da malha: $C_m=48 \text{ m}$
- Largura da malha: $L_m=18 \text{ m}$
- Distância entre os condutores principais e de junção: $D_{cp} =3,0\text{m}$ e $D_{cj} = 3,0\text{m}$
- Tempo de operação da proteção: $T_e=0,5\text{s}$
- Diâmetro do condutor: $d=0,00975 \text{ m}$
- Profundidade da malha: $h=0,6\text{m}$
- Resistência do corpo humano: $R_{ch}=1.000\Omega$
- Diâmetro da haste de terra: $D_{ht}=3/4''$
- Comprimento da haste de terra: $L_h= 3\text{m}$
- Número de hastes de terra utilizadas inicialmente: $N_h=119$

Figura 10 - Esquema da malha de terra.

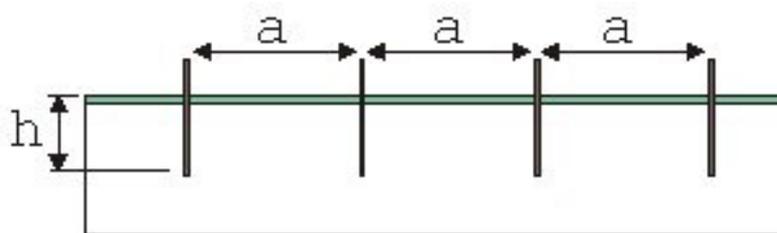


Fonte: Adaptado pelo autor (LAP, 2019).

4.1 Medição da Resistividade Elétrica do Solo

Foram feitas medições da resistividade do solo pelo Método de Wenner utilizando-se um Terrômetro digital modelo MTD-20kW da Megabrás.

Figura 11: Topologia método de Werner



Fonte: Adaptado pelo autor, LAP (2019).

O terrômetro fornece o valor da resistência de cada medida para obtenção das resistividades do ponto, através da fórmula abaixo, atendendo aos requisitos da norma da ABNT NBR 7117:2012 - (Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo).

$$\rho = \frac{4\pi \cdot a \cdot R}{\frac{1 + 2 \cdot a}{\sqrt{(a^2 + 4h^2)}} + \frac{a}{\sqrt{(a^2 + h^2)}}$$

Onde:

ρ = Resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

R = Resistência do solo (Ω);

a = Distância entre os eletrodos (m);

h = Profundidade enterrada dos eletrodos (m).

No entanto, quando $a \gg h$, onde as medições do espaçamento entre os eletrodos do terrômetro são bem maior, 10 ou mais vezes que a profundidade de cravação do mesmo ($a > 10xh$), a fórmula pode ser reduzida para:

$$\rho = 4\pi \cdot a \cdot R$$

4.2 Resultados das Medições

Tabela 4: Tipo de solo e respectiva resistividade.

| Espaçamento dos eletrodos (a) | 1ª leitura A (Ω) | 2ª leitura B (Ω) | 3ª leitura C (Ω) | 4ª leitura D (Ω) | Média R (Ω) | Coefficiente $K=2\pi a$ (Ω) | Resistividade elétrica $\rho=KxR$ (Ωm) |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------------------|--|
| 1 m | 114,9 | 145,7 | 128 | 106,7 | 123,83 | 6,28 | 778,02 |
| 2 m | 31,7 | 24,5 | 17,9 | 21,3 | 23,85 | 12,57 | 299,71 |
| 4 m | 4,6 | 0,6 | 0,5 | 3,04 | 2,19 | 25,13 | 54,92 |
| 8 m | 3,6 | 1,3 | 0,89 | 3,67 | 2,37 | 50,27 | 118,88 |
| 16 m | 2,5 | 0,29 | 0,97 | 1,62 | 1,35 | 100,53 | 135,21 |

Fonte: Adaptado pelo autor, LAP (2019).

Vale salientar que o valor da resistividade do solo é influenciado pelo tipo do solo, pela sua composição, temperatura e capacidade de retenção de água. O solo é um elemento heterogêneo, de modo que o seu valor de resistividade varia de uma direção à outra, conforme o material de que é composto, segundo a profundidade de suas camadas e idade de sua formação geológica.

4.3 Parâmetro das Medições

As condições climáticas e do solo eram as seguintes:

- Condições do Solo: úmido

- Temperatura Ambiente: 28°C
- Data da Medição: 30/05/2019

As medições foram efetuadas de maneira a contemplar um número considerável de medidas por diversos pontos da área da subestação.

4.4 Cálculo do Coeficiente de Reflexão

$$K = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \rightarrow K = \frac{(72,42 - 882,51)}{(72,42 + 882,51)} \rightarrow K = -0,8483$$

$$\rho_1 = 882,51 \Omega.m$$

$$\rho_2 = 72,42 \Omega.m$$

4.5 Cálculo da Resistência de Aterramento

A malha de terra está prevista com profundidade de $h=0,6$ m, cabo de cobre nu de 70 mm^2 na malha principal para atender as exigências de resistividade mecânica, boa condição e capacidade para suportar curtos-circuitos.

Com a finalidade de se reduzir a tensão de passo e proteger o solo, o piso da subestação receberá uma camada de brita com resistividade de $3000 \Omega.m$ e altura mínima de 10 cm.

O arranjo da malha de terra tem uma área com cerca de $864,00 \text{ m}^2$ e comprimento total dos condutores de 642,00 m, tendo como espaçamento nos condutores principais de 3,0 m e nos condutores de junção 3,0 m.

De acordo com IEEE-80, temos:

$$S = L_m \times C_m \rightarrow S = 864,00 \text{ m}^2$$

Vale ressaltar que no cálculo da resistência média, foram desconsiderados os valores medidos que apresentaram um desvio de 50% em relação à média dos valores medidos.

4.6 Determinação da Resistividade Aparente

Raio equivalente:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \rightarrow R = \sqrt{\frac{864}{\pi}} \rightarrow R = 16,58 \text{ m}$$

O valor de K será:

$$K = \frac{R}{h1} \rightarrow K = \frac{16,58}{1,20} \rightarrow K = 13,82$$

O valor de ρ_2/ρ_1 para a estratificação equivalente será:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{72,42}{882,51} = 0,082$$

4.7 Resistência da Malha de Terra Equivalente considerando o paralelismo dos cabos horizontais enterrados

$$R1 = \frac{\rho_a}{\pi \cdot L} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L}{\sqrt{d \cdot 2h}} \right) \right] + K1 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right) - K2$$

$$R1 = \frac{494,21}{\pi \cdot 642} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 642}{\sqrt{0,0049 \cdot 2,0,6}} \right) \right] + 1,028 \left(\frac{642}{\sqrt{864}} \right) - 5,875$$

$$R1 = 2,445 \Omega$$

4.8 Conclusão

O máximo de **5 Ω** para a resistência da malha de terra. Os valores obtidos são satisfatórios quando comparados com as exigências da Enel, conforme **Especificação Técnica nº 407 Versão no. 01 – Enel (2019) Assunto: “Fornecimento de Energia Elétrica em Alta Tensão - 138-69 kV”**, que prevê o valor.

Substituindo os valores da equação citadas no capítulo dois, chegamos a uma resistência de aterramento máxima de **2.455 Ω** .

4.9 Tensão de passo

Corresponde a máxima tensão que apareceria entre os dois pés de uma pessoa que se encontra no interior de uma malha de terra durante a ocorrência de uma falta a terra. Cabe salientar que a corrente elétrica quando injetada no solo através de eletrodos ou diretamente por descarga atmosférica se dispersa em forma de arcos com o centro no local de penetração, podendo provocar uma tensão de passo.

Considerando o peso do operador 70 kg.

4.10 Determinação da Tensão de Passo Máxima

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right)}{2 \cdot h + 0,09}$$

$$C_s = 0,738$$

$$E_{\text{passo}} = (R_{ch} + Z_{th}) \cdot I_b$$

$$E_{\text{passo}} = (R_{ch} + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot I_b$$

$$I_b = \frac{0,157}{\sqrt{T_e}}$$

$$E_{\text{passo}} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{T_e}}$$

$$E_{\text{passo}} = (1000 + 6 \cdot 0,738 \cdot 3000) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}}$$

$$E_{\text{passo}} = 3182,60 \text{ V}$$

4.11 Determinação do Coeficiente de Superfície Ks

a) Coeficiente de Superfície Ks para os Condutores Principais:

$$K_s = \left(\frac{1}{\pi}\right) \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D_{cp} + h} + \frac{1}{D_{cp}} \cdot (0,5^{n-2}) \right]$$

$$K_s = 0,45$$

b) Coeficiente de Superfície Ks para os Condutores de Junção

$$K_s = \left(\frac{1}{\pi}\right) \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D_{cp} + h} + \frac{1}{D_{cj}} \cdot (0,5^{n-2}) \right]$$

$$K_s = 0,45$$

Onde:

n = Coeficiente Geométrico

L_c = Comprimento Total dos Condutores na Horizontal da Malha

L_p = Comprimento do Perímetro da Malha

$c_n = 1$; Considerar este valor para malha com formato retangular

$d_n = 1$; Considerar este valor para malha com formato retangular

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 5,091 \cdot 1,06 \cdot 1 \cdot 1 = 5,394$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} = \frac{2 \cdot 2336}{132} = 5,091$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{S}}} = \sqrt{\frac{132}{4 \cdot \sqrt{864}}} = 1,06$$

c) Determinação do Coeficiente de Irregularidade Ki

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot 5,394$$

$$K_i = 1,442$$

4.12 Determinação da Tensão de Passo da Malha

$$Es = \frac{\rho \cdot Ks \cdot Ki \cdot I_{cft}}{Ls}$$

$$Es = \frac{494,210,451,442,2998,36}{555,45}$$

$$Es = 1731,12$$

Onde:

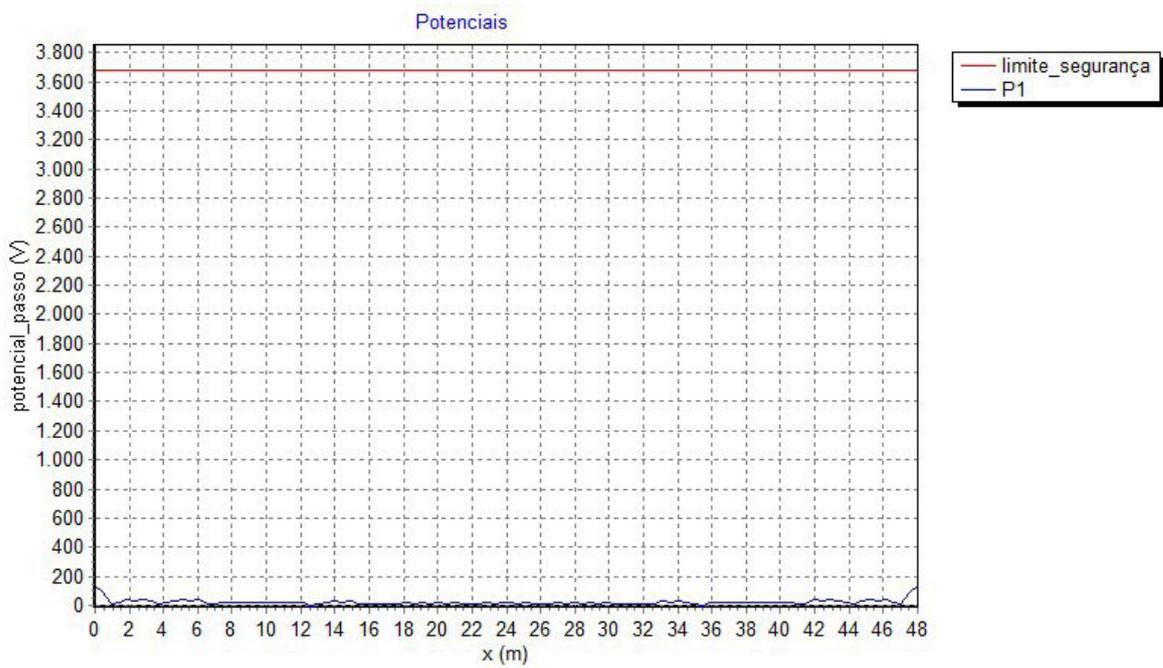
Lht = Comprimento Total de Todas as Haste de Terra

$$Ls = 0,75 \cdot Lc + 0,85 \cdot Lht$$

$$Ls = 0,75 \cdot 336 + 0,85 \cdot 257$$

$$Ls = 555,45 \text{ m}$$

Figura 12: Gráfico de tensão de passo.



Fonte: Adaptado pelo autor, LAP (2019).

Os riscos devidos às tensões de toque e de passo (Figura 12) podem ser reduzidos a níveis toleráveis se uma das seguintes condições for preenchida (ABNT, 2015, Parte 3):

- a) A probabilidade da aproximação de pessoas, ou a duração da presença delas fora da estrutura e próximas aos condutores de descida, for muito baixa;

- b) O subsistema de descida consistir em pelo menos dez caminhos naturais de descida interconectados conforme o item 5.3.5 da NBR 5419-3;
- c) A resistividade da camada superficial do solo, até 3 m de distância dos condutores de descida, for maior ou igual a 100 kΩ.m; caso nenhuma dessas condições seja atendida, medidas de proteção extras devem ser adotadas para evitar os acidentes relacionados aos potenciais perigosos formados durante uma descarga atmosférica em uma estrutura protegida por um SPDA (ABNT, 2015, Parte 3).

4.13 Tensão de Toque

Corresponde à máxima tensão que apareceria entre uma mão e os dois pés de uma pessoa em pé e tocando uma estrutura aterrada.

Considerando o peso do operador 70 kg.

4.14 Determinação da Tensão de Toque Máxima

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09}$$

Onde: h_s = Espessura do material (brita) 0,1m

$$C_s = 0,738$$

$$E_{\text{toque}} = (R_{ch} + Z_{th}) \cdot I_b$$

$$E_{\text{toque}} = (R_{ch} + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot I_b$$

$$I_b = \frac{0,157}{\sqrt{T_e}}$$

$$E_{\text{toque}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{T_e}}$$

$$E_{\text{toque}} = (1000 + 1,5 \cdot 1,738 \cdot 3000) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}}$$

$$E_{\text{toque}} = 962,20 \text{ V}$$

a) Coeficiente de Malha Km para os Condutores Principais

$$K_m = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \left[\ln \left[\frac{Dcp^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(Dcp + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot Dcp \cdot d} + \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{Kh} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0,699$$

Onde:

n = Coeficiente Geométrico (calculado no item 2.5.2)

d = Diâmetro do Condutor em m

L_p = Comprimento do Perímetro da Malha

h_0 = Profundidade de Referência da Malha ($h_0 = 1m$)

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 5,091 \cdot 1,106 \cdot 1,1 = 5,394$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0,6}{1}} = 1,265$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}} = \frac{2,336}{(2 \cdot 5,394)^{2/5,394}} = 0,468$$

b) Determinação do Coeficiente de Irregularidade Ki

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot 5,394$$

$$K_i = 1,442$$

4.15 Determinação da Tensão de Toque na Malha

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_{cft}}{L_m}$$

$$E_m = 461,23$$

Onde:

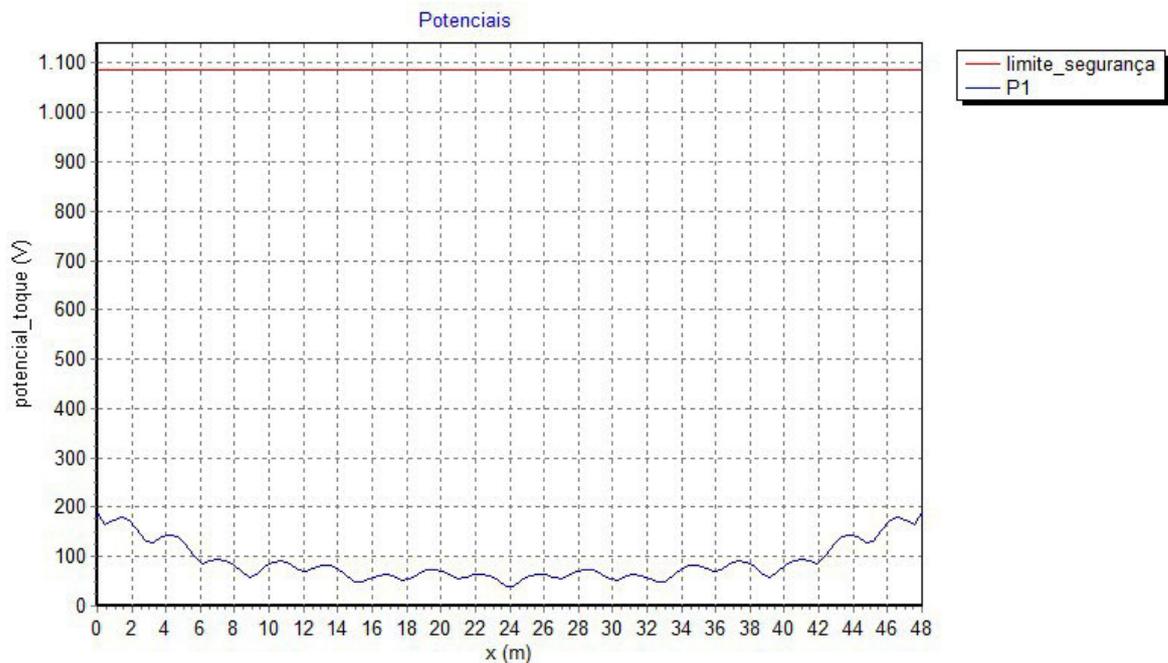
Lht = Comprimento Total de Todas as Haste de Terra

LM = Lc + Lht

LM = 336 + 357

LM = 693, 00 m

Figura 13: Gráfico de tensão de toque.



Fonte: LAP, 2019.

4.16 Conclusão

Os valores obtidos são satisfatórios quando comparados com as exigências Segundo o guia **IEEE Std 80-2000: “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”**, a máxima tensão de toque é dada pela seguinte equação:

$$E_{\text{toque}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{K}{\sqrt{T_e}}$$

Os valores calculados e obtidos satisfazem a norma citada acima.

4.17 Parecer Final sobre a Instalação

Os resultados obtidos na inspeção da malha de terra da subestação indicam que o sistema de aterramento está em condições satisfatórias, conforme apresentado no projeto. A inspeção visual realizada mostra que a instalação apresenta bom estado de limpeza, não havendo corrosão nos equipamentos. Foi verificado que todos os equipamentos e componentes da subestação estão devidamente aterrados tais como, ferragens, portas e telas metálicas, blindagem dos cabos, condutores de proteção, bem como o neutro do transformador.

5. CONCLUSÃO

As análises comparativas entre os resultados obtidos com os critérios utilizados no método de Wenner, segundo a ABNT NBR 7117:2012 (Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo), os valores indicam se o sistema de aterramento está eficaz, desempenhando o seu papel, buscando medidas de segurança e objetivando garantir a proteção do pessoal das instalações.

Diante do exposto neste trabalho, foi possível compreender a importância da inspeção da malha de aterramento das subestações antes da energização, sendo um procedimento bastante útil na detecção de possíveis problemas na operação do sistema. O estudo teve como finalidade, apresentar os conceitos de inspeção de uma malha de aterramento em uma subestação de 69/13,8kV, o qual já é abordado pelas normas vigentes das ABNT NBR 15749:2009 “Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento”, introduzindo uma metodologia de medição específica para cada elemento, como resistência e potenciais.

Portanto, concluiu-se que os valores do aterramento da subestação de 69kV da empresa citada, estão dentro dos valores especificados nas normas regulamentadoras vigentes e das especificações técnicas da Enel, garantindo assim a proteção dos operadores que estarão expostos a riscos mínimos de acidentes relativos a potenciais perigos que possam ocorrer nas proximidades do sistema de aterramento.

O trabalho mostrou resultados bastante satisfatórios e foram essenciais para obtenção de conhecimento na área de aterramento de equipamentos e subestações que hoje é uma área ainda pouco valorizada, porém de muita importância porque está envolvido diretamente com a engenharia elétrica e outras áreas da engenharia, requerendo mais estudos nesse campo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 5419**, Parte 3. (Proteção contra descargas atmosféricas. Parte 3: Danos físicos às estruturas e perigos à vida). [s.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 15749**: (Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na superfície do Solo em Sistemas de Aterramento – Elaboração. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 14724**: Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro. 2011.

COELHO, ROONEY RIBEIRO. **Análise Eletromagnética de Sistemas de Aterramento em Regime Quase-estático através do Método dos Elementos Finitos**. 1. Fortaleza: Unifor, 2012.

ENEL - Ente Nazionale per l'Energia Elétrica. **Especificação Técnica nº 407 Versão no. 01: Fornecimento de Energia Elétrica em Alta Tensão - 138-69 kV**. Fortaleza, 2019.

KINDERMANN, GERALDO and CAMPANOLO, JORGE MÁRIO. **Aterramento Elétrico**. 6. Santa Catarina: EEL, 2011.

KINDERMANN, GERALDO. **Choque Elétrico**. Santa Catarina: EEL, 2005.

LEITE, CARLOS MOREIRA. **Malha de terra: Técnicas de Aterramento Elétrico**. 1. São Porto: Editora Oficina de Mydia, 2007.

MAMEDE FILHO, JOÃO. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

TELLÓ, MARCOS. **Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixa e Alta Frequência**. 1. Porto Alegre: ediPUCRS, 2007.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE std. 80: Guide for Safety in AC Substation Grounding**. 2000.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE std. 81: Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System**. 2012.

VISACRO FILHO, SILVERIO. **Aterramentos Elétricos - Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento**. 1. São Paulo: Artliber, 2002.