

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**MÁRCIO FLÁVIO BARBOZA
WALLACE WENER DA SILVA**

**ATERRAMENTO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 69 kV – UM
ESTUDO DE CASO**

JOÃO MONLEVADE

2019

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**MÁRCIO FLÁVIO BARBOZA
WALLACE WENER DA SILVA**

**ATERRAMENTO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 69 kV – UM
ESTUDO DE CASO**

**Trabalho de conclusão do curso
apresentado à coordenação do curso
de Engenharia Elétrica da
Faculdade Doctum de João
Monlevade, como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.
Professor Orientador: D.Sc. Thais de
Fátima Araújo Silva.**

JOÃO MONLEVADE

2019



**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: **ATERRAMENTO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 69KV – UM ESTUDO DE CASO**, elaborado pelos alunos Márcio Flávio Barboza e Wallace Wener da Silva foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

João Monlevade, 10 de dezembro 2019

Thaís de F. Araújo Silva

Prof. Orientador: Thaís de Fátima Araújo Silva, Doutor

[Assinatura]

Prof. Examinador 1: Hernani de Oliveira Santiago Filho, Especialista

[Assinatura]

Prof. Examinador 2: Ana Regina Lara Bretz, Especialista

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar à Deus, que nos deu força para seguir firme nessa caminhada, encheu nossos corações de luz e contribuiu com a nossa cumplicidade. Agradecemos aos familiares, pais, esposas, e filhos por todo amor e carinho, e por entenderem nossas dificuldades, e os momentos de ausência. Aos nossos colegas de sala, por ter contribuído, e sofrido junto conosco nesse longo período da faculdade, muito obrigado pela ajuda em vários momentos de dificuldade. Agradecemos à Faculdade DOCTUM, por nos proporcionar um ambiente criativo e amigável para os estudos. Somos gratos à cada membro do corpo docente, à direção e a administração dessa instituição de ensino. Agradecemos a todos os nossos professores que tiveram paciência conosco nesses cinco anos. Obrigado, mestres, e doutores por exigir de nós muito mais do que nós imaginávamos ser capaz de fazer. Manifestamos aqui nossa gratidão eterna por compartilhar conosco suas experiências. Um agradecimento especial a D.Sc. Thais de Fátima Araújo Silva responsável pela orientação do nosso projeto. Obrigado por esclarecer tantas dúvidas e ser tão atenciosa e paciente. Enfim, agradecemos a todos, que de alguma forma puderam contribuir para que chegássemos a esse momento.

RESUMO

O sistema de aterramento em uma linha de transmissão é projetado com intuito de minimizar os desligamentos na linha, evitando danos a equipamentos, evitando também acidentes elétricos envolvendo pessoas e animais. Um sistema de aterramento bem projetado, é capaz de fornecer um caminho preferencial às correntes indesejáveis, direcionando-as diretamente para o solo em caso de uma falta, ou em caso de descargas atmosféricas que podem atingir diretamente ou indiretamente as linhas de transmissão. Geralmente em linhas de transmissão, são utilizados métodos de aterramento que buscam aliar o custo-benefício juntamente com a segurança, a confiabilidade, e principalmente com as especificações das normas vigentes para tal procedimento. Para isso existem métodos definidos por normas para se projetar um sistema de aterramento, que consideram desde equações mais simplificadas até modelos matemáticos mais complexos. Devido esses benefícios apresentados do sistema de aterramento, o presente trabalho apresenta um estudo de caso para uma linha de transmissão de 69kV, de aproximadamente 17 km de extensão, pertencente a uma mineradora situada no Médio Piracicaba. Essa linha de transmissão é a única fonte de alimentação da mineradora, e recentemente tem mostrado um desempenho não muito confiável, comprovado por vários registros de desligamentos. Por se tratar de uma linha de transmissão muito antiga, que com o passar do tempo existem partes físicas degradadas naturalmente, houve a necessidade de melhorias e de adequação às normas vigentes. Neste trabalho foram destacados alguns métodos na literatura, tanto para se calcular o sistema de aterramento, quanto para medir a resistência de aterramento, e a resistividade do solo, que é de suma importância para se obter um aterramento mais seguro e confiável. Também foram realizados os cálculos para se obter uma melhor configuração para sistema de aterramento, de forma que o sistema de aterramento torna-se eficiente e dentro dos procedimentos exigidos pelas normas vigentes NBR-5422 e NBR-15749. Através desses estudos, foram identificados que vários pontos da linha necessitam de melhorias nas configurações do aterramento para chegar a um valor de resistência que atenda as exigências da norma NBR 5422.

Palavras-chave: Aterramento em uma linha de transmissão. Resistência de aterramento. Normas regulamentadoras.

ABSTRACT

The grounding system in a transmission line is designed to minimize line shutdowns, avoiding damage to equipment, and also avoiding electrical accidents involving people and animals. A well-designed grounding system is able to provide a preferred path to undesirable currents, directing them directly to the ground in the event of a fault, or in lightning strikes that can directly or indirectly hit the transmission lines. Generally in transmission lines, grounding methods are used that seek to combine cost-effective together with safety, reliability, and especially with the specifications of current standards for such procedure. For this there are methods defined by standards to design a grounding system, which consider from simpler equations to more complex mathematical models. Due to these benefits presented from the grounding system, this paper presents a case study for a approximately 17 km long 69kV transmission line belonging to a mining company located in the Middle Piracicaba. This transmission line is the sole power source of the mining company, and has recently shown unreliable performance, proven by several shutdown records. Because it is a very old transmission line, which over time has naturally degraded physical parts, there was a need for improvements and adaptation to current standards. In this work, some methods in the literature were highlighted, both for calculating the grounding system, as well as for measuring the grounding resistance, and the ground resistivity, which is of paramount importance to obtain a safer and more reliable grounding. Calculations were also performed to obtain a better configuration for grounding system, where it can have an efficient grounding system and within the procedures required by current standards NBR-5422 and NBR-15749. Through these studies, it was identified that several points of the line need improvements in grounding configurations to reach a resistance value that meets the requirements of NBR 5422.

Keywords: Grounding on a transmission line. Grounding resistance. Regulatory Standards.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Linhas de transmissão aérea	18
Figura 2- Torre estaiada/autoportante	20
Figura 3- Descarga atmosférica atingindo a LT direta e indiretamente.....	23
Figura 4- Para-raios de ZnO.....	24
Figura 5- Aterramento aos pés da torre	25
Figura 6- Eletrodo disposto na horizontal	27
Figura 7- Modelo comumente utilizado em estruturas autoportantes.....	28
Figura 8- Esquema de potencial de toque	29
Figura 9- Esquema de potencial de passo.....	30
Figura 10- Malha de aterramento	32
Figura 11- Eletrodo com a haste em vertical.....	34
Figura 12- Eletrodo com a haste em horizontal	34
Figura 13- Solo estratificado em camadas	37
Figura 14- Montagem de Wenner	38
Figura 15- Montagem de Schlumberger	40
Figura 16- Curva da Resistência em função da distância do Aterramento.....	42
Figura 17- Cadeia de isoladores	47
Figura 18- Cabo no modelo CAA	48
Figura 19- Torre utilizada na LT	48
Figura 20- Traçado da LT	49
Figura 21- Conectores do sistema de aterramento e forma de conexão.....	53
Figura 22- As três fazes do projeto	54
Figura 23- Instalação do contrapeso com obstáculo	55
Figura 24- Posicionamento dos eletrodos de aterramento.....	58
Figura 25- Torre 01 com contrapesos rompidos	59
Figura 26- Configurações das medições da resistividade do solo	62
Figura 27- Associação das resistências nos pés da torre	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solo.....	36
Tabela 2- Características e bitola dos cabos AWG.....	53
Tabela 3- Resistência medida para resistividade de 300 Ωm	66
Tabela 4- Resistência medida para resistividade de 3.000 Ωm	66
Tabela 5- Resistência medida para resistividade de 5.000 Ωm	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Medição de resistência da torre 2.....	60
Gráfico 2- Medição de resistência de todas as torres	60
Gráfico 3- Torres fora do especificado pela norma NBR-5422	68
Gráfico 4- Variação da resistividade de acordo com a umidade	69
Gráfico 5- Variação da resistividade de acordo com a temperatura	70
Gráfico 6- Variação da resistividade de acordo com a porcentagem de sal.....	70

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1- Cálculo da tensão de toque.....	29
Equação 2- Cálculo simplificado da tensão de toque.....	29
Equação 3- Cálculo para tensão de passo.....	30
Equação 4- Cálculo simplificado para tensão de passo.....	31
Equação 5- resistência do aterramento.....	33
Equação 6- Cálculo para resistência de aterramento com eletrodo em vertical.....	34
Equação 7- Cálculo para resistência de aterramento com eletrodo em horizontal.....	34
Equação 8- Cálculo da resistência utilizando montagem de Wenner.....	38
Equação 9- Cálculo resistividade aparente utilizando a montagem de Wenner.....	39
Equação 10- Cálculo da resistência utilizando a montagem de Schlumberger.....	40
Equação 11- Cálculo da resistividade aparente com o método de Schlumberger....	40
Equação 12- Equação integral utilizada no MoM.....	45
Equação 13- Cálculo da resistividade aparente do solo.....	63
Equação 14- Cálculo da resistência de aterramento com o eletrodo em horizontal...	64
Equação 15- Soma das resistências no aterramento.....	65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

Ω - Unidade de medida de resistência (Ohms)

$\Omega \text{ m}$ – Unidade de medida de resistividade (Ohms por metro)

APR - Análise Preliminar de Risco

AWG - American Wire Gauge

CAA – Cabo de alumínio com alma de aço

FEM - Método dos Elementos Finitos

km - Quilômetros

kV - Quilovolts

LD - Linha de Distribuição

LT - Linha de Transmissão

m - metros

MoM - Método dos Momentos

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

PT - Permissão de Trabalho

SE - Subestação

SPDA - Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas

STP – Sondagem a Percussão

ZnO – Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
3 METODOLOGIA	16
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
4.1 Linhas de transmissão.....	17
4.2 Torre de transmissão	18
4.3 Descargas atmosféricas	21
4.4 Para-raios.....	23
4.5 Sistema de aterramento em linhas de transmissão	24
4.6 Malha de aterramento	31
4.7 Resistência de aterramento.....	32
4.8 Resistividade do solo.....	35
4.8.1 Estratificação do solo	36
4.8.2 Método de Wenner.....	38
4.8.3 Método de Schlumberger	39
4.9 Normas para medição do sistema de aterramento	41
4.10 Modelos matemáticos aplicados nos sistemas de aterramento	43
4.10.1 Método dos momentos (MoM).....	45
4.10.2 Método dos elementos finitos(FEM).....	46
5 DESCRIÇÃO DA LINHA.....	46
5.1 Linha de transmissão de 69 kV: objeto de estudo	46
5.2 Condições climáticas locais.....	50
5.3 Características do solo	51
5.4 Projeto do sistema de aterramento (28/03/2003)	52
6 ATUALIZAÇÃO DO PROJETO	56
6.1 Método utilizado para medir o valor da resistência do aterramento	57

6.2 Método para medição da resistividade do solo.....	61
7 CÁLCULOS PARA ADEQUAÇÃO DO PROJETO	63
7.1 Resultados obtidos	67
8 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais os critérios de confiabilidade e continuidade no sistema de geração, transmissão, e distribuição de energia elétrica tem sido objeto de estudo e pesquisas. Muitos recursos tem sido investidos em estudos e desenvolvimento de técnicas para melhorar o sistema de fornecimento de energia.

Os estudos de proteção têm por finalidade adaptar a suportabilidade das subestações, das linhas de transmissão e distribuição frente as sobretensões as quais estão sujeitas, pois sobretensões neste sistema podem acarretar muitos danos, alguns irreparáveis.

As sobretensões podem ser geradas por correntes e por tensões transitórias após operações de chaveamento e eliminação de faltas, durante condições anormais de operação, ou por fontes externas, neste caso sendo originadas por descargas atmosféricas.

Por sua vez, o Brasil é o país com maior incidência de raios no mundo. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2018), cerca de 70 milhões de raios atingem o país todos os anos, uma média de duas ou três descargas elétricas por segundo. Esta incidência de raios ocorre devido o Brasil estar localizado na zona tropical, onde o clima é mais quente, e mais favorável à formação de tempestades. A intensidade de um raio tem em média, cerca de 30 mil ampères e pode afetar diretamente a rede elétrica, já que a descarga chega a percorrer distâncias da ordem de 5km, gerando quedas de energia. No Brasil cerca de 70% dos desligamentos nas linhas de transmissão e 40% nas linhas de distribuição são causados por descargas atmosféricas (INPE, 2018).

Portanto, uma linha de transmissão deve estar provida de proteção contra essas descargas, caso contrário, elevadas tensões superiores à suportabilidade do isolamento podem ocasionar um curto-circuito levando ao desligamento da linha.

Sendo assim, o sistema de aterramento possui um papel essencial na proteção da linha de transmissão e na minimização dos efeitos dos surtos atmosféricos.

Uma possível causa para os desligamentos em linhas de transmissão está atrelada ao fato do sistema de aterramento estar com um valor de resistência muito alto, muito além do permitido pela norma NBR 5422 (ABNT, 1985).

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação proposital de um sistema físico ao solo. Em termos mais cotidianos, o aterramento elétrico é definido como um

caminho preferencial destinado a escoar anomalias advindas de uma rede elétrica, seja ela de transmissão ou distribuição de energia.

Para dimensionar um sistema de aterramento é necessário considerar parâmetros como tensão de toque e tensão de passo, para garantir a segurança dos cidadãos e demais seres vivos que utilizam áreas próximas às linhas de transmissão.

Portanto, um estudo mais apurado sobre o comportamento do sistema de aterramento, e de sua importância no desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas consiste em um importante objeto a ser investigado.

Devido a esses benefícios apresentados sobre o sistema de aterramento em uma linha de transmissão aérea, o presente trabalho apresenta um estudo de caso para uma linha de transmissão de 69 kV, que alimenta uma mineradora situada no Médio Piracicaba. Essa linha de transmissão é de suma importância para a operação da mina, pois é ela que alimenta todas as instalações existentes na mina. Por se tratar de uma linha muito antiga, houve a necessidade de melhorias e adequação às normas vigentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar um levantamento bibliográfico sobre como executar um projeto de aterramento em uma linha de transmissão, considerando os procedimentos indicados na norma NBR 15749, e com base nesses, avaliar um projeto de aterramento.

2.2 Objetivos específicos

Para que se possa alcançar o objetivo proposto, é importante que os seguintes objetivos específicos sejam cumpridos:

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre os paradigmas de um projeto de aterramento de linhas de transmissão, considerando todos os parâmetros e variáveis que podem alterar o projeto, tendo como referência a NBR 15749.

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre o dimensionamento do aterramento em uma linha de transmissão, com enfoque na medida da resistência de aterramento.
- Avaliar um projeto de aterramento em uma Linha de Transmissão pertencente a uma mineradora situada no médio Piracicaba que foi utilizada como objeto de estudo, a fim de adequar a norma NBR 15749.

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a evolução das técnicas de aterramento aplicadas em linhas de transmissão. Esse estudo embasa a adequação de um projeto de aterramento realizado para uma linha de transmissão pertencente a uma mineradora, objeto de estudo deste trabalho. A execução do projeto observou as seguintes etapas metodológicas:

- Realizar um estudo teórico acerca do aterramento em linhas de transmissão: Nessa etapa foi realizada uma pesquisa bibliográfica em artigos, livros e materiais com temas correlatos ao assunto, permitindo a condição de avaliar diferentes técnicas de aterramento.
- Analisar as técnicas de aterramento, comparando-as com as especificações da norma NBR 15749, com enfoque especial nos procedimentos de medição da resistência de aterramento.
- Avaliar um projeto de aterramento de uma linha de transmissão pertencente a uma mineradora, e propor melhorias seguindo as especificações da norma NBR 15749.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Linhas de transmissão

A eletricidade recebida por consumidores industriais, comerciais e residenciais é proveniente de um sistema de energia elétrica que é composto por geração, transmissão, e distribuição. A energia produzida é levada aos seus consumidores por meio de linhas de transmissão de alta tensão, passando por subestações para a redução da tensão e assim, entregue ao seu consumidor final (BLUME, 2007).

As linhas de transmissão tem como propósito transportar energia elétrica em grandes distâncias com um índice reduzido de perdas, garantindo assim, que a energia possa chegar até as extremidades dos circuitos com qualidade. Uma linha de transmissão é um circuito elétrico que interliga diferentes tipos de subestações, cujo o objetivo é o transporte de energia elétrica (SANTOS, 2002 p.3).

A necessidade da transmissão de energia elétrica em alta tensão se deve a impossibilidade de transmitir diretamente a mesma potência gerada nas usinas, pois as correntes seriam muito elevadas, com isso, as quedas de tensão e as perdas de potência na transmissão inviabilizariam tecnicamente e economicamente as transmissões. E esse problema é diretamente proporcional à distância e a potência a ser transmitida, quanto maior for a distância, e maior for a potência, maiores seriam as perdas. Com a elevação da tensão, a potência gerada nas usinas (que é função do produto da tensão pela corrente) pode ser transmitida com correntes inferiores às de geração, o que viabiliza a transmissão. Um fator importante na minimização dos custos de transmissão e distribuição é a escolha da seção dos cabos condutores das linhas, ou seja, de sua resistência ôhmica.

Como o custo das linhas de transmissão aumenta de forma linear com a seção condutora e as perdas ôhmicas, e seu custo varia com o inverso da seção dos condutores, ou seja, conseguindo-se reduzir a seção dos cabos condutores, reduz-se consideravelmente o custo de transmissão. Com a redução da corrente elétrica se consegue reduzir o diâmetro dos cabos condutores, reduzindo assim os custos para o transporte, já que além de transportar toda a energia gerada, estes componente do sistema elétrico possuem também a função de realizar a interligação dos mais variados sistemas de transmissão, gerando a possibilidade de intercâmbio de energia (MENEZES, 2015).

Os consumidores, individualmente, requerem potências inferiores às transmitidas. Portanto, são previstas subestações abaixadoras nas quais as tensões de transmissão são transformadas para níveis compatíveis com as cargas que vão alimentar regionalmente.

A transmissão de energia pode ser realizada através de linhas aéreas, subterrâneas ou subaquáticas. As linhas de transmissão mais utilizadas são as linhas aéreas, que são caracterizadas por utilizarem condutores nus em sua extensão, conectados nas estruturas por isoladores, a figura 1 apresenta linhas aérea. Já as linhas subterrâneas, em geral, utilizam cabos isolados e instalados em redes de dutos, sendo uma boa solução para grandes centros urbanos, apesar do custo mais elevado. As linhas subaquáticas, por sua vez, têm grandes limitações técnicas e econômicas, mas são úteis em projetos especiais de travessias de rios e canais com vãos muito grandes, que dificultam a escolha de outra alternativa.

Figura 1- Linhas de transmissão aérea



Fonte: Flickr (2013)

4.2 Torre de transmissão

Dentre os elementos que compõe uma linha de transmissão de energia elétrica, destacam-se as estruturas de suporte da linha, que são denominadas torres. Essas

torres são responsáveis pela sustentação dos cabos condutores, cabos para-raios, e também dos isoladores.

A suspensão dos cabos pelas torres devem ocorrer de modo a garantir a distância segura entre os cabos condutores de fases, de outros circuitos, e entre os condutores e o solo. Outra função das torres é dada pelas amarrações das LTs ao terreno, através das suas respectivas fundações, as quais transmitem todos os esforços gerados para o solo.

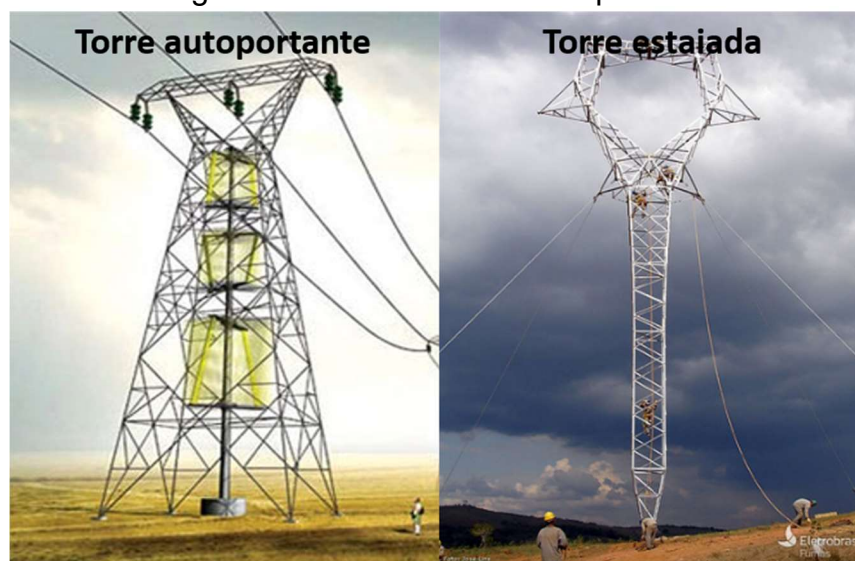
Para a construção de uma linha de transmissão são utilizadas estruturas em concreto, metálicas com perfis de aço galvanizado ou postes de aço. Para altas tensões, o emprego de torres metálicas treliçadas é a solução mais econômica, devido à rapidez na montagem, com menor mobilização de material e equipamentos na execução (SINGH, 2009).

Analizando as condições estruturais de uma torre, estão apresentados a seguir como forma de simplificação, as classificações quanto a resistência da estrutura e quanto a sua função na linha de transmissão.

As torres autoportantes apresentam o equilíbrio por meio da própria estrutura, são as mais comuns utilizadas no Brasil, devido a simplicidade de sua construção. Entretanto, a utilização de torres estaiadas veem crescendo a cada dia por apresentarem estruturas mais leves e mais baratas, mas necessitam da utilização de cabos tracionados presos ao solo numa das extremidades, e na outra, ao corpo da torre, para assegurar a sua estabilidade (CHAVES, 2004), como mostra a figura 2.

Segundo Chaves (2004), geralmente os cabos tracionados na torre estaiada formam um ângulo de 30° com a vertical, e são fixados nas partes superiores das torres. Os pés dos cabos tracionados fixam-se no solo a distâncias adequadas do pé da torre. A grande limitação das torres estaiadas encontra-se na utilização em terrenos acidentados e de pouco espaço, limitando assim sua utilização. A figura 2 mostra a diferença entre as torres autoportantes e as torres estaiadas.

Figura 2 – Torre estaiada/autoportante



Fonte: Eletrobrás Furnas (2019)

As mesmas podem ser classificadas conforme a estrutura e construção da seguinte maneira, (GONTIJO, 1994):

- A disposição dos cabos condutores;
- De acordo com número de circuitos elétricos que elas suportam;
- Devida a sua função na linha;
- Forma de resistência das estruturas (autoportantes e estaiadas);
- Quanto a tensão da linha;
- Formato da silhueta da torre.

Quando a função, as torres podem ser divididas em três tipos básicos:

- Terminais ou fim de linha;
- Torres de suspensão;
- Torres em ângulo.

As torres fim de linha, são aquelas utilizadas ou no início, ou no final, das linhas de transmissão, com o propósito de ancorarem os esforços dos cabos condutores e dos cabos para-raios. Essas possuem uma estrutura mais robustas, sendo projetadas para suportarem os esforços dos cabos com o eixo da linha não coincidente com o eixo da torre, (CHAVES, 2004).

As torres de suspensão são adotadas em trechos retos, ou em locais com pouca angulação entre os cabos, podendo ser autoportantes ou estaiadas. Já as torres em ângulos trabalham nos pontos de mudança de direção das linhas, podem

ser também chamadas de torres de ancoragem, na maioria das vezes estas torres são autoportantes (CHAVES, 2004).

Essas torres de transmissão, são de imensa importância para a linha de transmissão, tanto para suporte aos cabos de fase, e cabos para-raios, serve como ponte entre os cabos e o sistema de aterramento, auxiliando na descida das correntes indesejáveis para o solo através do sistema de aterramento, geralmente essas correntes são causadas por descargas atmosféricas.

4.3 Descargas atmosféricas

Um estudo do comportamento e desempenho das linhas de transmissão na presença de descargas atmosféricas tem uma grande importância no planejamento de projetos e execução de medidas que visam diminuir falha dessa natureza em sistemas de transmissão.

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que ocorrem a partir do surgimento de campos elétricos provenientes da separação de cargas positivas e negativas. Existem vários tipos de descargas, classificadas em função dos locais onde se originam e de onde terminam. Contudo, em relação às linhas de transmissão, somente as descargas nuvem-solo que provocam as sobretensões que, muitas vezes, causam os desligamentos da linha (INPE/ELAT, 2016). A descarga nuvem-solo também pode ser classificada como, descarga negativa ou positiva, de acordo com o sinal da carga efetivamente transferida da nuvem para o solo. Segundo dados do INPE/ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica (INPE/ELAT, 2016), as mais comuns são as descargas negativas que representam cerca de 90% de todas as descargas no solo que ocorrem no planeta terra.

De forma simplificada, quando uma descarga atinge uma linha de transmissão, provoca o aparecimento de ondas que trafegam pelo sistema. A descarga inicia a propagação de ondas de tensão e de corrente, que trafegam aproximadamente com a velocidade da luz em ambas as direções a partir do ponto de impacto. Ao serem propagados através da linha estes surtos são atenuados e destorcidos devido aos seus parâmetros longitudinais possuírem dependência com a frequência (D'AJUZ et al., 1987).

Esse tipo de onda continua a se propagar pela linha de transmissão até que encontre uma descontinuidade. Essas ondas de tensão e corrente são refletidas de

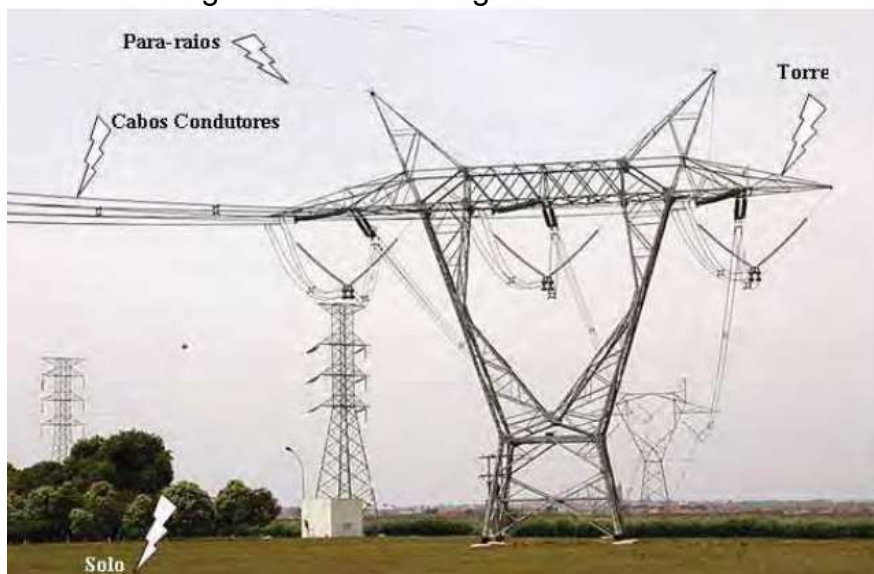
volta à linha enquanto outras são transmitidas através do ponto de descontinuidade. Tais pontos de descontinuidade podem ser disjuntores abertos, transformadores, outras linhas ou o rompimento do isolamento da linha.

Os estudos do desempenho quanto a descargas atmosféricas são divididos em dois tipos que são: queda direta ou indireta dos raios.

Nos estudos de queda direta, é abordado o problema das ocorrências de descargas dos raios atingindo diretamente um dos cabos condutores, elevando a tensão na fase. Se esta solicitação de tensão for superior à suportabilidade da cadeia de isoladores, poderá ocorrer uma descarga entre a fase e a torre. Este arco é alimentado pela tensão operativa do sistema que, conseqüentemente, provoca um curto-circuito e o desligamento da linha. Esse efeito é denominado de falha de blindagem. A partir dos estudos de queda direta é possível realizar uma otimização na posição dos cabos para-raios em relação aos condutores, o que permite que se obtenha, na maioria dos casos, uma proteção mais efetiva dos cabos condutores (SILVA, 2007).

Já nos estudos de queda indireta de raios, analisa-se o desempenho das linhas quando o raio atinge um dos cabos para-raios. Ao contrário da queda direta, a ocorrência de desligamentos em consequência desse fenômeno, dificilmente é totalmente eliminada. Entretanto, esses efeitos podem ser minimizados através da análise e adequação dos distanciamentos na torre, acoplamento entre os cabos condutores e para-raios e o aterramento da linha de transmissão. Proporcionando um melhor desempenho. Ao atingir o cabo para-raios, o raio provoca ondas de tensão e corrente que viajam ao longo da linha até atingir as torres mais próximas, com reflexões determinadas pelos valores das impedâncias de surto envolvidas. Exemplos da incidência de descargas atmosféricas em LTs é mostrado na figura 3.

Figura 3 – Descarga atmosférica atingindo a LT direta e indiretamente.



Fonte: Berardo (2012)

4.4 Para-raios

Os para-raios são considerados resistores que fornecem um caminho de baixa impedância para a corrente, além de limitar os níveis de sobretensões com base na compatibilidade dos equipamentos de proteção da rede. Sem a existência dos mesmos, as sobretensões poderiam gerar danos as linhas de transmissão, podendo gerar perdas materiais, pessoais e até mesmo ao meio ambiente (PINTO, 2006).

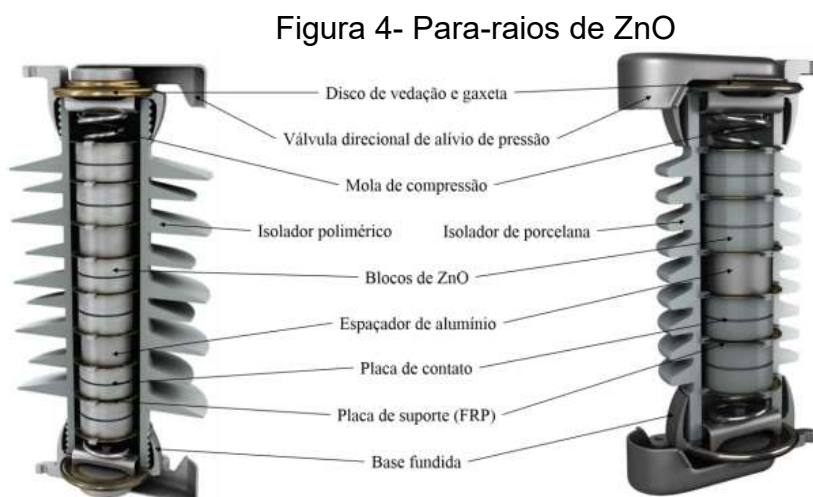
De acordo com Pinto (2006), quando ocorre uma descarga de corrente, a mesma é direcionada à terra, através dessa impedância de surto limita a tensão em relação à terra. Em condições normais de operação, essa impedância é suficientemente alta para trabalhar em um circuito aberto, e assim permanece até o para-raios ser atingido por uma tensão de surto.

Os cabos para-raios apresentam uma grande relevância nas linhas de transmissão, os mesmos são responsáveis pela proteção das fases contra descargas elétricas que podem gerar o desligamento temporário da linha ou até mesmo causar danos aos cabos e isoladores (GIAROLA, 2016).

Para a proteção das linhas, os para-raios são instalados no topo da torre, quando ocorre alguma descarga elétrica, os cabos para-raios direcionam as cargas elétricas, evitando assim o contato direto com cabos energizados (PINTO, 2006).

A utilização dos para-raios são determinados em projetos de acordo com as características construtivas das redes, bem como as condições topográficas e de resistividade do solo da região (GIAROLA, 2016).

Existem dois tipos de para-raios quanto ao material semicondutor utilizado: o para-raios de carboneto de silício (SiC) e o para-raios de óxido de zinco (ZnO). Os para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) atualmente são os mais utilizados na proteção dos sistemas elétricos. No Brasil, empresas concessionárias de energia e grandes consumidores industriais vêm utilizando cada vez mais os para-raios de ZnO sejam na substituição dos para-raios convencionais de SiC ou em novos projetos de proteção contra descargas atmosféricas (MARCARINI, 2012). A figura 4 mostra os detalhes de um para-raios de ZnO.



Fonte: Hubbell Power Systems (2015)

Tanto os cabos para-raios, quanto os para-raios, são de imensa importância para um bom desempenho das linhas de transmissão, pois esses tem uma conexão direta com o sistema de aterramento da linha, que direciona todas as correntes indesejadas para o solo.

4.5 Sistema de aterramento em linhas de transmissão

Segundo Visacro Filho (2002), o termo aterramento elétrico pode ser definido como uma forma de conectar de forma proposital uma estrutura condutora de corrente elétrica à terra, com a finalidade de prover um caminho a correntes indesejáveis pelo

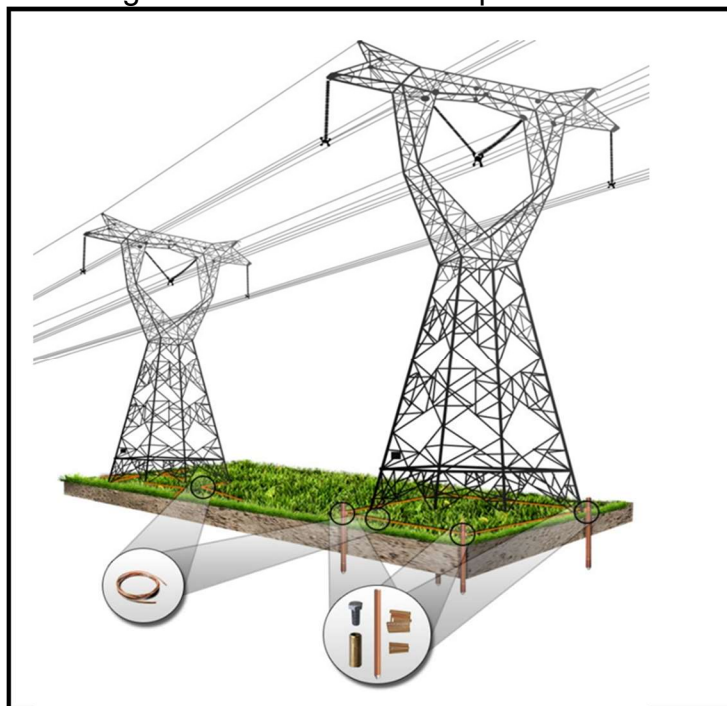
sistema através de uma impedância de aterramento. Basicamente um sistema de aterramento se divide em três componentes:

- Eletrodos de aterramento (eletrodo natural e convencional);
- Conexões e condutores elétricos que ligam os pontos do sistema;
- O solo que envolve os eletrodos.

A finalidade de um sistema de aterramento é garantir a segurança das pessoas e animais, que de alguma forma são beneficiadas pelo mesmo, uma vez que é projetado para impedir correntes de modo comum, garantindo tranquilidade para os operários que prestam manutenções em LTs (Linhas de Transmissão), e LDs (Linhas de Distribuição), aos usuários de uma instalação elétrica, e de todos equipamentos ligados a uma fonte de energia elétrica (MENEZES, 2015).

Nas linhas de transmissão, o sistema de aterramento é constituído de cabos contrapesos e impedâncias instaladas, ou nos pés das torres de ancoragem, ou nas bases do mastro central e estais de estruturas estaiadas (MENEZES, 2015). Os detalhes do sistema de aterramento aos pés das torres são mostrados na figura 5.

Figura 5- Aterramento aos pés da torre



Fonte: INTLLI (2019)

A presença de aterramentos é essencial para um melhor desempenho de um circuito de transmissão, o mesmo oferece proteção do sistema contra descargas

atmosféricas, indução de corrente de linhas de transmissão próximas, e acidentes na rede como o rompimento do cabo condutor. O sistema atua escoando o excesso de cargas elétricas na rede (MENEZES, 2015).

As falhas em um sistema de aterramento podem causar danos à transmissão de energia, reduzindo a eficiência das linhas de transmissão, provocando a formação de arcos elétricos entre a estrutura e o condutor, além de ocorrer nos casos mais graves o desligamento de toda a rede conectada até o local da falha existente (ROSA, 2009).

Segundo Silva e Junior (2004, p. 12) as principais finalidades do sistema de aterramento são as seguintes:

- Propiciar uma baixa resistência de aterramento;
- Conservar valores de tensão carcaça-terra, e estrutura-terra dentro do nível de segurança para as pessoas, em caso de partes metálicas da carcaça ou estruturas acidentalmente energizadas;
- Fornecer um caminho preferencial de escoamento para a terra das descargas atmosféricas ou sobretensões devidas a manobras de equipamentos;
- Permitir aos equipamentos de proteção, fusíveis, e disjuntores, que isolem o mais rápido possível as falhas a terra;
- Diminuir os valores de tensão fase-terra do sistema, fixando a tensão de isolamento a valores determinados;
- Acomodar a passagem de eletricidade estática originada por equipamentos ou por indução a terra impedindo faiscamento.

Também segundo Silva e Junior (2004, p. 12) para ser considerado eficiente um sistema de aterramento deve conter as seguintes características:

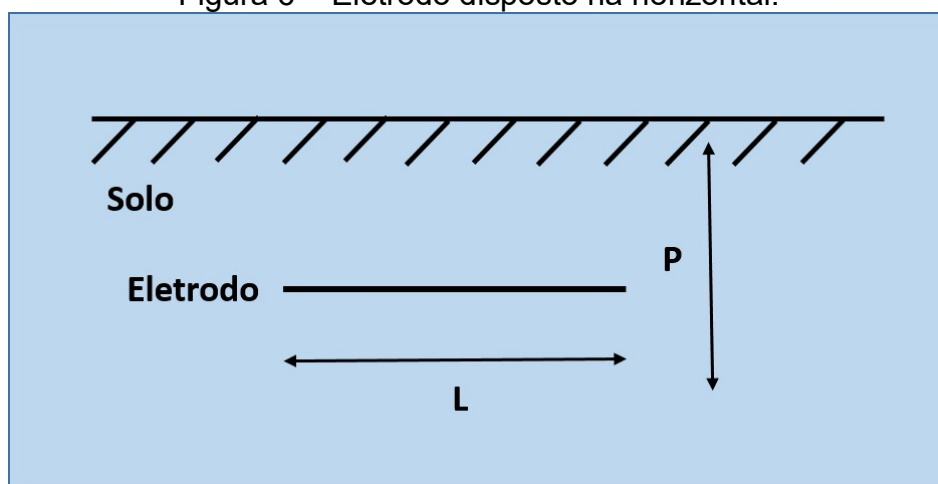
- Capacidade de condução de corrente: seu valor depende do material constituinte dos cabos e hastes empregados, do tempo de eliminação da falha, do tipo de conexão usada e das características do solo;
- Segurança: o índice de segurança de uma instalação está sujeito ao dimensionamento do sistema de aterramento, o qual deve ser feito para que os potenciais resultantes de correntes de falha estejam de acordo com os limites instituídos pelas normas técnicas;

- Estabilidade: para se ter um sistema de aterramento instável é imprescindível instalá-lo em um meio com resistividade constante em relação as condições climáticas, sendo que isto pode ser conseguido naturalmente ou artificialmente com o tratamento do solo, por exemplo com aplicação de bentonita.

Há também vários fatores que podem influenciar um sistema de aterramento, dentre eles destacam-se o tipo de solo, a geometria das malhas de aterramento, a estratificação do solo em várias camadas, a umidade, compactação, composição química, granulometria, porosidade e a temperatura do solo. Tais valores interveem nos valores finais do projeto de aterramento, ou seja, na resistência de malha de aterramento, e no possível aumento de potencial dessa malha ao ser exposta a um curto-circuito de uma fase para a terra ou de uma fase para a malha.

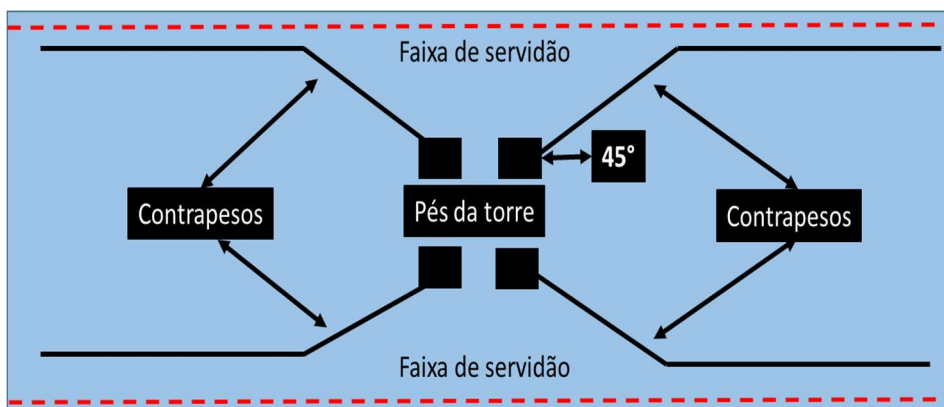
O sistema de aterramento convencional de estruturas de LTs é composto basicamente pelo lançamento de quatro cabos contrapesos radiais a partir do pé da torre, permanecendo dentro da faixa de servidão da LT, conforme mostrado nas figuras 6 e 7.

Figura 6 – Eletrodo disposto na horizontal.



Fonte: Autoria própria

Figura 7 - Modelo comumente utilizado em estruturas autoportantes.



Fonte: autoria própria

O sistema de aterramento mostrado na figura 6, baseia-se em eletrodos dispostos ao solo de forma horizontal, seu comprimento e sua profundidade pode variar de acordo com as características de cada tipo de solo, ainda pode conter anéis equalizadores e hastes, em casos nos quais se pretende mitigar potenciais de passo e de toque perigosos ao redor das estruturas, devido ao fato da LT atravessar áreas de loteamento e de circulação de pessoas. Já na figura 7 é mostrado o posicionamento dos cabos contrapeso, que é posicionado a um ângulo de 45° da estrutura respeitando a faixa de servidão.

A norma NBR 5422(ABNT, 1985), é o documento normativo responsável pelas diretrizes de confecção de projetos de redes de transmissão. O item 9 é o responsável pela normalização dos métodos de aterramento destinados às linhas de transmissão. Alguns itens desta norma destacam aspectos importantes para do dimensionamento da malha de aterramento das estruturas de uma linha de transmissão.

O item 9.1 da norma NBR 5422 esclarece que o aterramento projetado deve atender aos índices de resistência de aterramento que sejam capazes de garantir um desempenho de segurança satisfatório tanto para o sistema quanto para terceiros (NBR 5422, 1985 p.19). Para garantir tais índices, existem dois parâmetros importantes a serem levados em conta: tensão de toque e tensão de passo. Estes parâmetros garantem a segurança dos seres vivos que trafegam nos arredores da LT.

O potencial ou tensão de toque pode ser definido como a diferença de potencial entre um ponto da estrutura onde está situado o alcance da mão de uma pessoa, a um ponto no chão situado a 1m da base da estrutura (KINDERMANN, 1995 p.131).

Segundo Kindermann (1995), a tensão de toque poderá ser determinada pela equação 1:

$$V_{tq} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \cdot i_c \quad (1)$$

Onde:

- V_{tq} = Tensão de Toque;
- R_{ch} = Resistencia do corpo Humano considerada como 1000Ω ;
- R_c = Resistência de contato entre solo e corpo humano, que pode ser considerada como três vezes a resistividade superficial do solo;
- i_c = Corrente que passa pelo corpo humano;

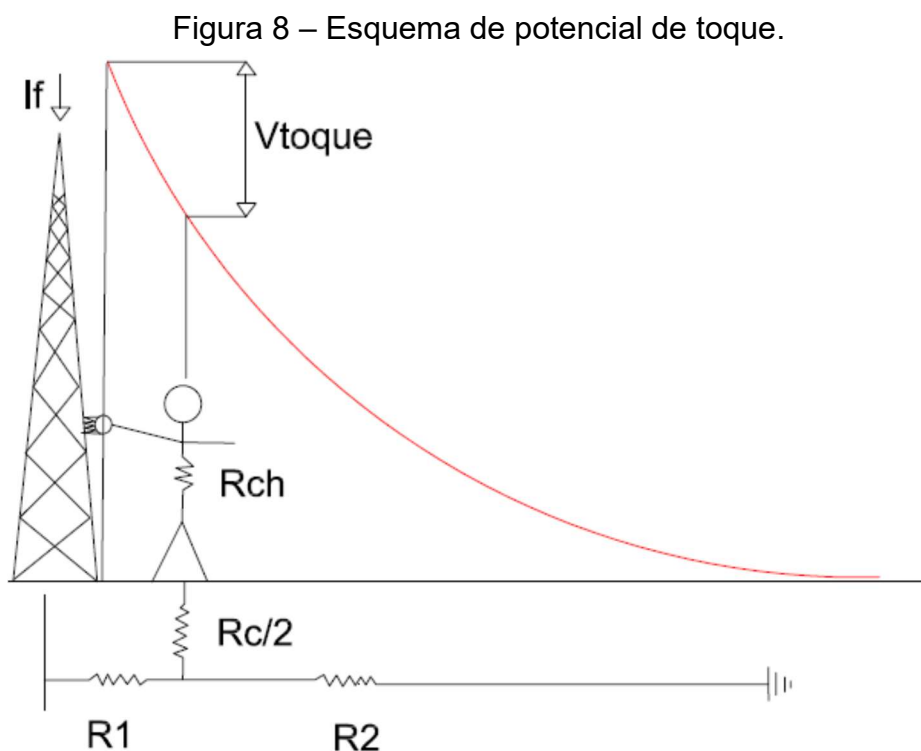
Substituindo os valores e simplificando a equação 5, também é possível escrevê-la como mostra na equação 2:

$$V_{tq} = (1000 + 1,5\rho_s) \cdot I_c \quad (2)$$

Onde:

- ρ_s é resistividade superficial do solo.

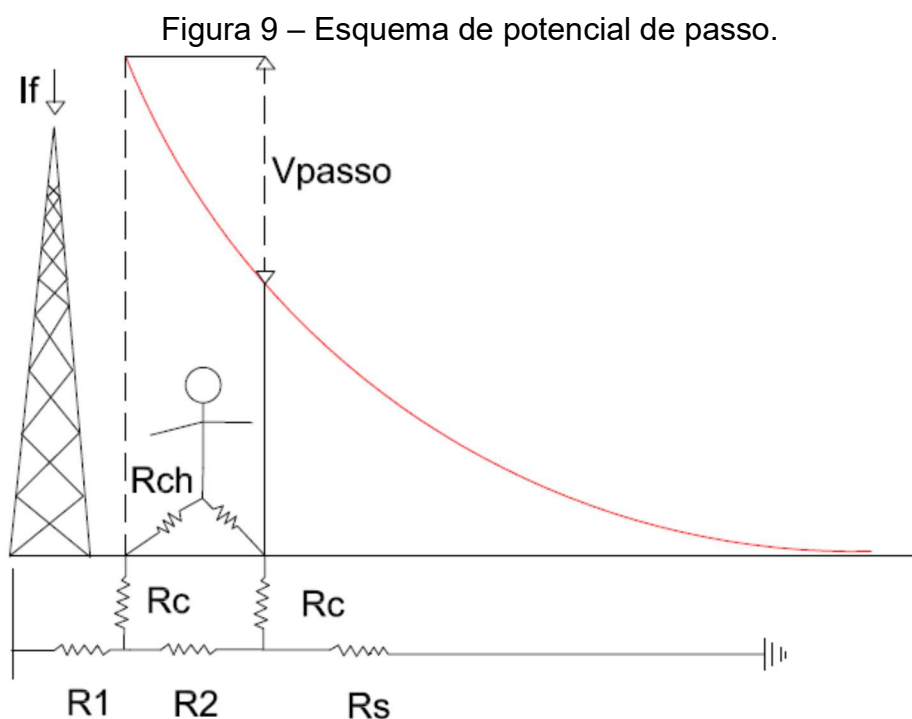
A figura 8 demonstra como funciona o diagrama elétrico para tensão de toque nas proximidades de uma estrutura de LT.



Fonte: Adaptado de KINDERMANN (1995, p. 131)

A tensão de passo acontece quando há um afastamento entre os membros inferiores dos seres vivos que trafegam sobre um uma certa área com potencial elétrico distribuído sobre o solo (KINDERMANN, 1995). Ao ocorrer uma corrente de falta ou descarga atmosférica, sobre um sistema de aterramento ou solo, haverá o aparecimento de superfícies equipotenciais.

Caso haja um espaçamento entre os membros inferiores do ser vivo que trafega sobre a superfície então energizada, haverá um ponto de entrada e um ponto saída, perante o corpo deste ser vivo, para a corrente elétrica disposta sobre o solo. A figura 9 demonstra como funciona o diagrama elétrico para tensão de passo nas proximidades de uma estrutura de Linha de Transmissão (KINDERMANN, 1995).



Fonte: Adaptado de KINDERMANN (1995, p .131)

Segundo Kindermman (1995), utilizando os mesmos parâmetros considerados para o levantamento é possível obter a tensão de passo para um dado ponto na superfície, considerando uma distância média entre os membros inferiores de aproximadamente 1m, como mostra a equação 3.

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c).I_c \quad (3)$$

Substituindo os parâmetros utilizados em (1) e manipulando a expressão 3, é possível obter uma expressão para tensão de passo, como mostra na equação 4.

$$V_{\text{passo}} = (1000 + 6\psi_s).I_c \quad (4)$$

Onde:

- ψ_s é resistividade superficial do solo.

4.6 Malha de aterramento

O objetivo principal da utilização de uma malha de aterramento é a manutenção das tensões de passo, toque e a resistência elétrica dentro dos níveis toleráveis (HUANG et al., 1995).

Este tipo de aterramento geralmente é empregado em instalações de maior porte, principalmente nas usinas e subestações. Basicamente se constitui de um reticulado de cabos enterrados horizontalmente, interligados entre si por juntas mecânicas ou soldas, possuindo também hastes cravadas verticalmente para interligação com os para-raios.

Todas as sobrecargas do sistema, ao apresentarem um aterramento adequado, direcionam as tensões excessivas para as malhas de aterramento independentemente se as sobrecargas são provenientes de curtos-circuitos, descargas atmosféricas, surtos por chaveamento e correntes harmônicas.

A baixa resistência no aterramento não garante em si a segurança da rede. A relação entre a resistência do sistema de aterramento e a máxima tensão elétrica do local nem sempre é linear devido aos fatores que impactam nas condições do aterramento.

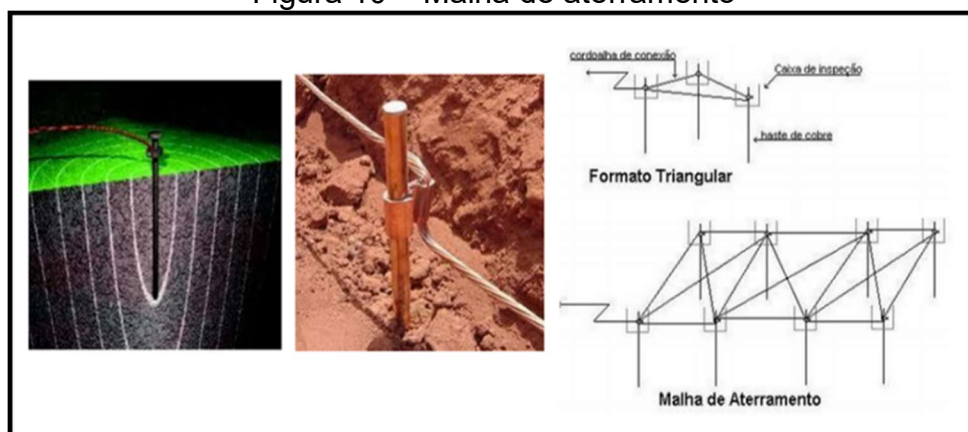
As malhas de aterramento requerem cuidados para que exerçam a integridade de suas funções. São fatores a serem considerados no projeto de aterramento das malhas: a geometria (as dimensões e especificações dimensionais), a localização dos eletrodos, as características do solo e outros fatores. O grande gradiente de potencial do solo, requer um cuidado especial no sistema de aterramento para que as sobrecargas sejam direcionadas ao solo protegendo o sistema como um todo (IEEE, 2015).

A resistência da malha de aterramento total é composta por três resistências em série: 1) resistência do eletrodo e das conexões, 2) resistência da interface de contato entre o eletrodo e o solo, e 3) resistência da terra circunvizinha do eletrodo. Normalmente são desconsideradas as duas primeiras resistências devido aos seus baixos valores em relação a resistência da terra (VISACRO, 2002).

A resistência da malha de aterramento é diretamente proporcional a resistividade aparente do solo e decresce com o aumento do comprimento do eletrodo, sendo obtida pela divisão do GPR (Ground Potential Rise) pela corrente total injetada na malha.

Em condições normais, o aterramento elétrico deve operar com potencial próximo de zero. Assim, o potencial do eletrodo do aterramento é praticamente igual ao potencial do terra remoto. Na ocorrência de falta, a corrente que é conduzida pela malha de aterramento para a terra causa a elevação do potencial elétrico da malha em relação ao terra remoto. A elevação do potencial da malha GPR é o potencial elétrico máximo que o eletrodo da malha pode atingir em relação ao terra remoto durante a falta. Este potencial é igual a corrente máxima injetada na malha multiplicada pela resistência do aterramento. A figura 10, mostra o formato de uma malha de aterramento.

Figura 10 – Malha de aterramento



Fonte: UFPR (2019)

4.7 Resistência de aterramento

Em uma conexão à terra, tem-se a resistência, a capacitância e a indutância, cada uma gerando uma influência na capacidade de condução de corrente elétrica

para o solo. Ao se tratar de resistência de aterramento é preciso considerar uma impedância.

A ligação do aterramento elétrico envolve todos os componentes condutores até a condução da corrente para o solo. O aterramento se comporta como uma impedância quanto a passagem da corrente elétrica, nas condições de baixa frequência ocorre a aproximação dessa impedância para uma resistência.

A aferição da resistência do aterramento pode ser obtida por meio da relação da tensão resultante no eletrodo, e o valor da corrente que percorre o aterramento até atingir o solo como mostra a equação 5 (VISACRO, 2002).

$$Rt = \frac{Vt}{I} \quad (5)$$

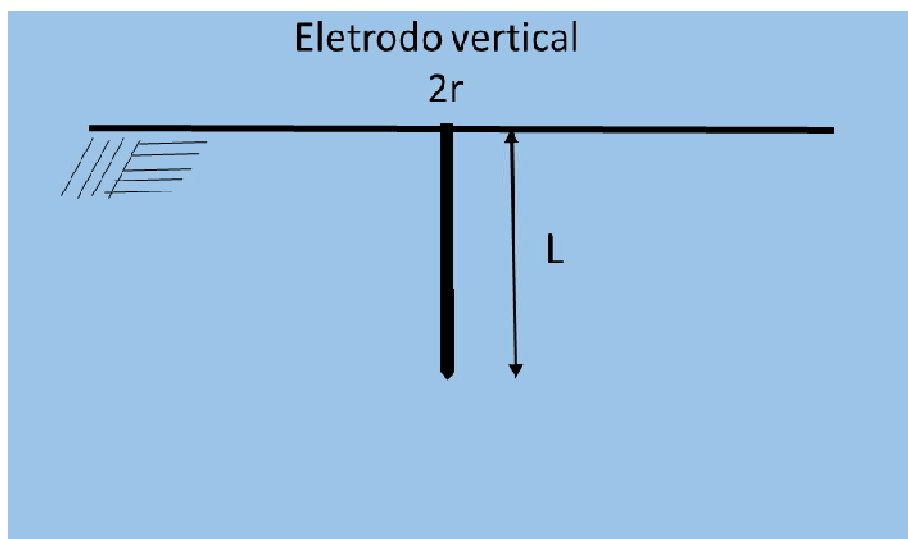
A resistência do aterramento se compõem de três partes básicas:

- A resistência própria do eletrodo e das ligações elétricas que o compõem;
- A resistência do contato entre o eletrodo e a terra ao redor do mesmo pode apresentar um valor desprezível, caso o eletrodo não tenha cobertura isolante e a terra não esteja bem comprimida no contato com o eletrodo.
- Resistência da terra ao redor da região do aterramento, este valor depende da resistividade do solo e de como se dá a distribuição de corrente proveniente do eletrodo.

O cálculo para se estabelecer a resistência dos aterramentos depende dos aspectos analíticos, aos quais dependem das configurações dos eletrodos utilizados.

As figuras 11 e 12 apresentam os diferentes tipos de eletrodos utilizados, e a maneira de se calcular a resistência dos mesmos.

Figura 11: Eletrodo com a haste em vertical

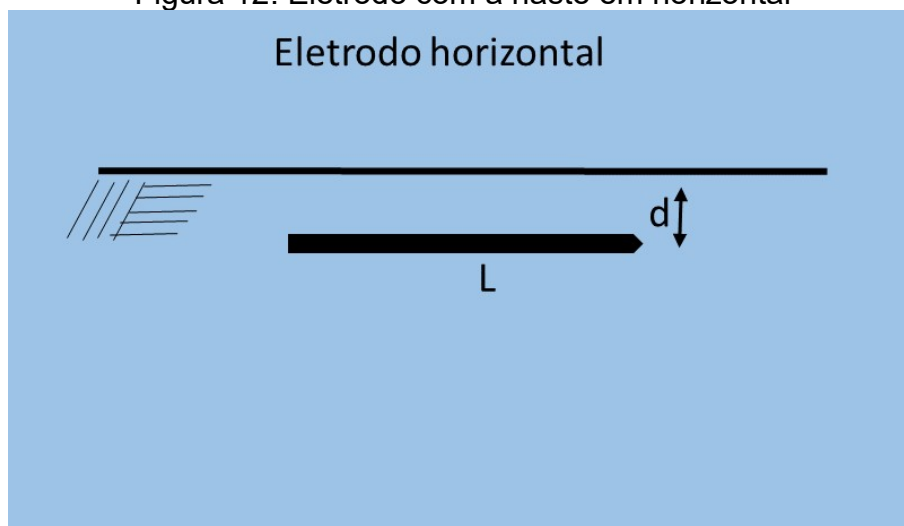


Fonte: Autoria própria

Para calcular a resistência do aterramento utilizando o eletrodo na vertical utiliza-se a equação 6.

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (6)$$

Figura 12: Eletrodo com a haste em horizontal



Fonte: Autoria própria

Já para calcular utilizando o eletrodo na horizontal utiliza-se a equação 7 como mostra abaixo:

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{4L}{d} - 2 + \frac{2d}{L} + \dots \right) \quad (7)$$

Onde:

- r = raio da seção reta do eletrodo;
- d = profundidade dos eletrodos;
- ρ = resistividade aparente (pa);
- L = comprimento do eletrodo em metro.

4.8 Resistividade do solo

A resistividade elétrica do solo corresponde a resistência existente entre faces opostas do volume de solo, em termos de facilitação do dimensionamento, se considera como parâmetro a análise de um cubo homogêneo e isotrópico cuja aresta mede uma unidade de comprimento.

Como o solo geralmente apresenta uma composição bastante heterogênea, o valor da sua resistividade pode variar em função do tipo de componente do solo (areia, argila, granito, calcário, dentre outros.), do nível de umidade (úmido ou seco), da profundidade das camadas, da formação geológica, da temperatura, entre outros aspectos naturais. Outros fatores podem também influenciar nas condições do solo como a compactação e a contaminação (MODENA e SUETA, 2013).

A resistividade do solo geralmente é afetada também por fatores externos, como contaminação e compactação do solo. A tabela 1 mostra a resistividade de alguns tipos de solos.

Tabela 1- Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solo

Tipos de Solo	Faixa de resistividade (Ω m)
Água do mar	Menor do que 10
Alagadiço, Limo, Húmus, Lama	Até 150
Água destilada	300
Argila	300 - 5.000
Calcário	500 – 5.000
Areia	1.000 – 8.000
Granito	1.500 – 10.000
Basalto	A partir de 10.000
Concreto	Molhado: 20 – 100 Úmido: 300 – 1.000 Seco: 3.000 – 2.000.000

A categoria molhado é típica de aplicação em ambientes externos. Valores inferiores a 50 Ω m são considerados altamente corrosivos.

Fonte: Adaptada da Revista Setor Elétrico (2013)

O solo é normalmente constituído por diversas camadas, cada uma delas apresentando uma espessura e resistividade. O conhecimento destes valores são de relevância para se determinar as condições do sistema de aterramento, bem como os determinar os potenciais de passo e do solo (MODENA e SUETA, 2013).

4.8.1 Estratificação do solo

Estratificação do solo pode ser considerada como a divisão do solo em camadas, determinando-se suas resistividades e respectivas profundidades. Os solos, na maioria das vezes, não são homogêneos, e sim formados por diversas camadas com resistividades diferentes, essas camadas são normalmente horizontais e paralelas à superfície do solo. Devido às falhas geológicas existem casos em que as camadas se apresentam verticalmente e até mesmo inclinadas. Porém, estes

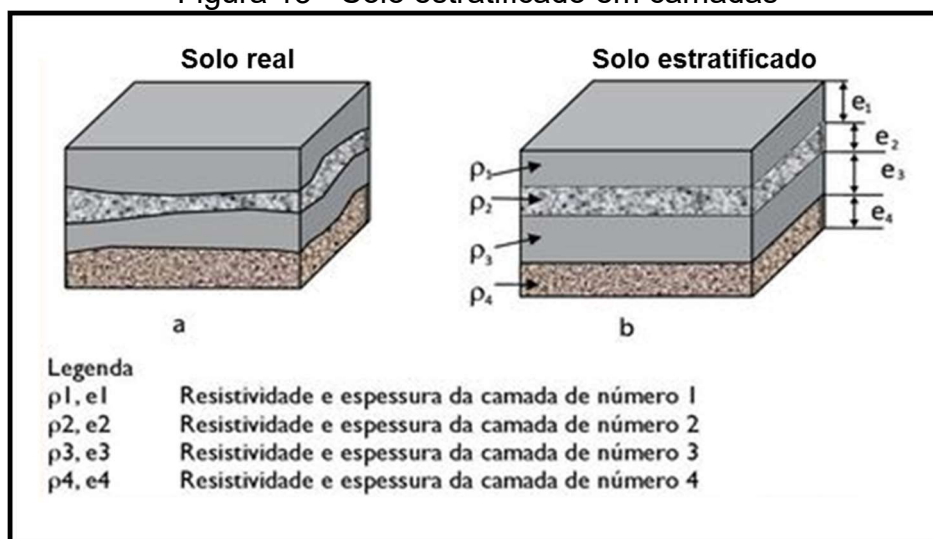
casos são raros, e os estudos apresentados consideram as camadas aproximadamente horizontais (MAMEDE FILHO, 2012).

Quando é projetado um sistema de aterramento, é necessário pensar na resistividade do solo local, onde há a necessidade de se utilizar um valor equivalente dessa resistividade para que represente a situação do solo ao qual o eletrodo estará conectado, ou seja, por onde o eletrodo fará escoar correntes de falta, ou provenientes de surtos.

Visto que o solo apresenta características diferentes de acordo com o seu tipo de formação e composição, ou seja, sua resistividade varia de acordo com a profundidade da medição (variação vertical), e como citado anteriormente, pode ocorrer variação de resistividade na faixa horizontal (pontos distintos do solo em uma mesma profundidade) (MAMEDE FILHO, 2012).

Para facilitar a obtenção do modelo para o solo, foram criados métodos de modelagem para representar o solo em várias camadas. Onde o objetivo é a consideração de que para uma mesma camada o solo seja homogêneo, possibilitando a obtenção de sua resistividade equivalente. Tais camadas apresentam espessuras diferentes, as quais determina-se um valor de resistividade equivalente por camada (MAMEDE FILHO, 2012). A figura 13 mostra um solo estratificado em várias camadas.

Figura 13- Solo estratificado em camadas



Fonte: Adaptado de Múltipla engenharia e tecnologia (2019)

Já com o solo estratificado pode-se utilizar vários métodos para avaliar a resistividade do solo onde será realizado o aterramento, entre eles dois métodos são

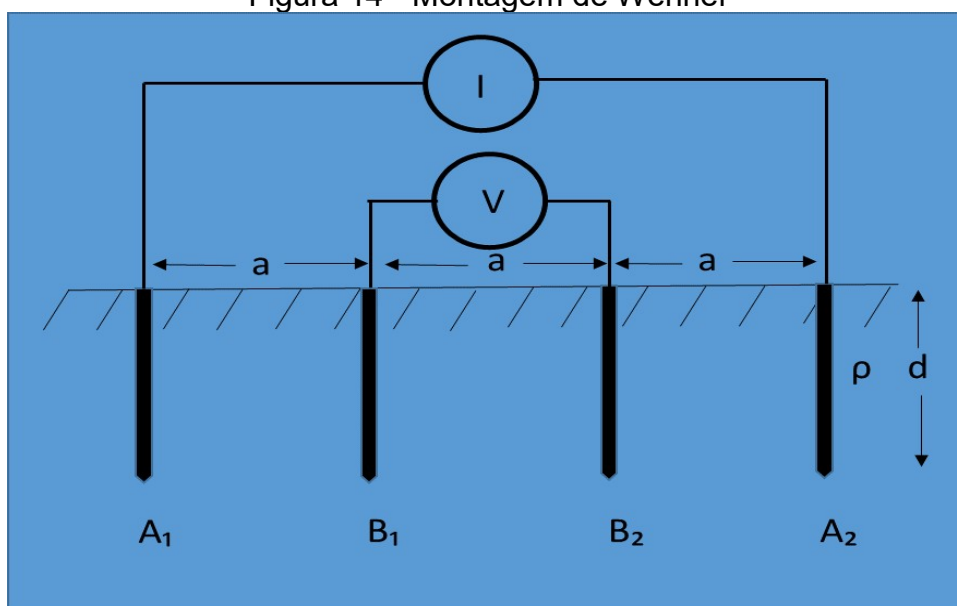
comumente utilizados: Os métodos de Wenner e de Schlumberger que serão discutidos a seguir.

Os métodos de Wenner e de Schlumberger são, a princípio, utilizados para se avaliar a resistividade aparente do solo, partindo-se da suposição que ele apresenta características uniformes ao longo de suas dimensões (RAGGI, 2009).

4.8.2 Método de Wenner

O método de Wenner consiste na disposição de quatro eletrodos igualmente espaçados no solo, a uma profundidade d da sua superfície, como mostra a figura 14. A corrente de teste (I) é aplicada entre os eletrodos externos, e a tensão (V) é medida entre os terminais internos. Desta forma, V/I fornece o valor de uma resistência em ohms (Ω), cuja expressão analítica, considerando-se um solo uniforme de resistividade ρ , é dada pela equação 8.

Figura 14- Montagem de Wenner



Fonte: Autoria própria

$$R = \frac{\rho}{4\pi a} \left(1 + \left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} \right) - \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}} \right) \right) \quad (8)$$

Onde:

- a = espaçamento entre os eletrodos;

- d = profundidade dos eletrodos;
- ρ = resistividade do solo.

As hastes de corrente são representadas por fontes esféricas localizadas a uma profundidade d da superfície do solo, sendo uma aproximação razoável para a montagem.

Igualando o valor da resistência obtido na medição com a expressão obtida analiticamente, determina-se o valor da resistividade “aparente” (ρ_a) do solo para o espaçamento a , conforme mostra a equação 9.

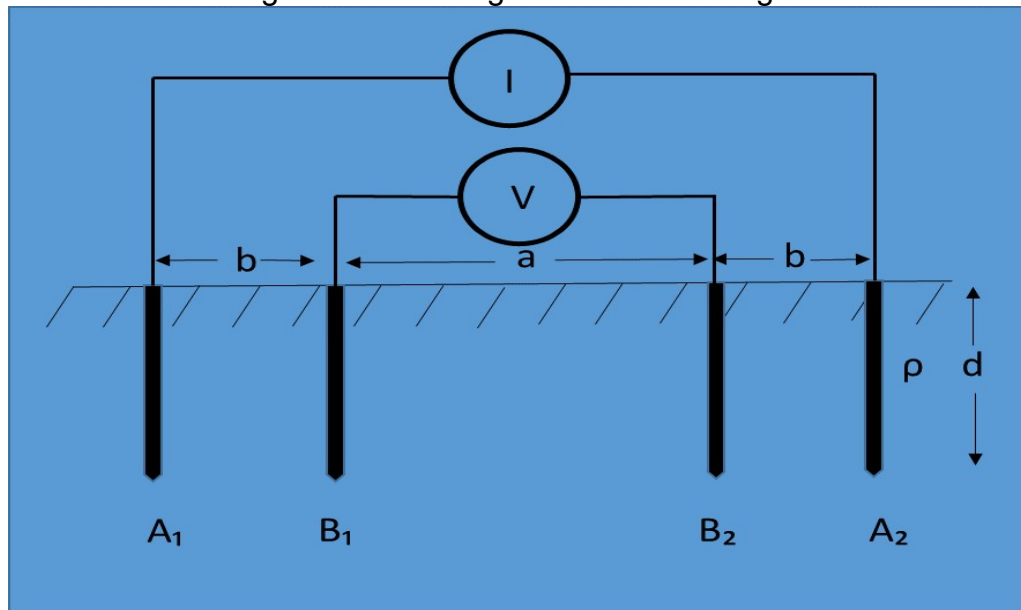
$$\rho_a = \frac{4\pi a(R)}{1 + \left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} \right) - \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}} \right)} \quad (9)$$

A denominação da resistividade aparente decorre do fato de que, na expressão analítica considerou-se o arranjo de Wenner disposto em um solo com características uniformes, o que pode não ocorrer na prática. Desta forma, a resistividade obtida na Equação 13, é um valor aparente para aquele espaçamento a entre os eletrodos, caso estes estivessem imersos em um solo uniforme (RAGGI, 2009).

4.8.3 Método de Schlumberger

O método de Schlumberger é muito parecido com o método de Wenner, diferenciando-se apenas nos espaçamentos utilizados entre os eletrodos. No método de Schlumberger, os eletrodos internos apresentam um espaçamento a e estes estão espaçados dos eletrodos externos de uma distância b , como mostra a figura 15, sendo a usualmente maior que b . Isto se justifica pelo fato de que quanto mais próximos os eletrodos de tensão estiverem dos eletrodos de corrente, maiores são as quedas de potencial registradas, contribuindo para a sensibilidade do medidor (RAGGI, 2009).

Figura 15- Montagem de Schlumberger



Fonte: Autoria própria

A equação 10 define analiticamente a resistência obtida para a configuração de Schlumberger, considerando-se um solo uniforme de resistividade ρ .

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{a}{b(a+b)} + \frac{1}{\sqrt{b^2+4d^2}} - \frac{1}{\sqrt{(a+b)^2+4d^2}} \right) \quad (10)$$

Conforme mostra a equação 11, obtém-se assim, o valor da resistividade aparente para os espaçamentos a e b :

$$\rho_a = \frac{2\pi(R)}{\frac{a}{b(a+b)} + \frac{1}{\sqrt{b^2+4d^2}} - \frac{1}{\sqrt{(a+b)^2+4d^2}}} \quad (11)$$

O solo, geralmente, não possui condições homogêneas devido a presença de umidade, alterações da composição, dentre outros. Por isso, a aferição das condições de resistividade do solo precisa ser realizada com uma certa frequência para aferir as condições do solo. A norma NBR-5419 (ABNT, 2005), define intervalos de 3 anos e de 1 ano para as instalações mais críticas. O ideal segundo a NBR-5419 é realizar a medição com o solo seco, pois ao estar seco os valores de resistência do solo são maiores.

A determinação da resistência de aterramento de outras configurações de aterramento segue o mesmo procedimento básico. A diferença fica por conta da forma de distribuição da densidade de corrente do solo, que depende da forma e dimensão do eletrodo e que determina uma formulação específica para o campo elétrico (MAYER, 2018).

O método de Schlumberger é comumente utilizado quando é necessário conhecer as resistividades de camadas mais profundas, sem necessidade de realizar muitas medições como com o método Wenner. Utiliza-se também quando os aparelhos de medição são pouco sofisticados. Somente recomenda-se fazer medições a 90 graus para que as leituras não sejam afetadas por estruturas subterrâneas. Já o método de Wenner é o mais utilizado devido sua simplicidade de precisão.

4.9 Normas para medição do sistema de aterramento

Para a determinação dos procedimentos a serem adotados no que diz respeito ao trabalho de técnicos e engenheiros nas medições da resistência dos aterramentos, a norma a ser seguida é a norma da ABNT NBR 15749 – Medição da resistência de aterramento e potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.

O instrumento utilizado para aferir a resistência do aterramento é o terrômetro. Esse instrumento é composto por 2 hastes de referência, que são compostos por divisores resistivos (ABNT, 2009)

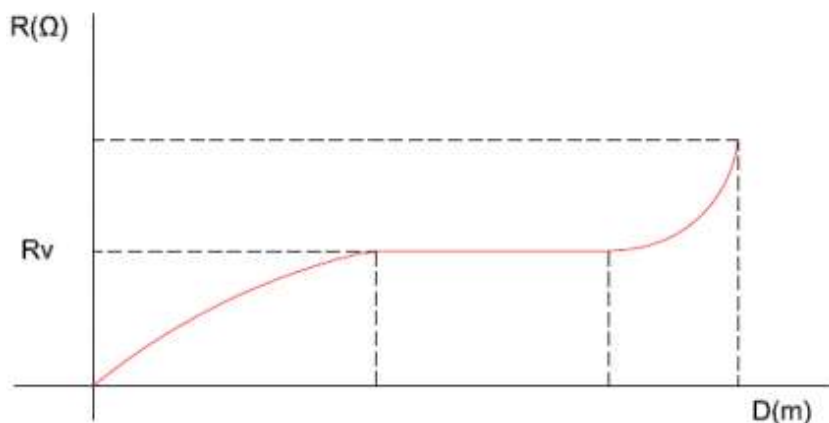
Nas medições de queda de potencial aferidas com o terrômetro, a norma NBR 15749 descreve os procedimentos. O terrômetro gera uma corrente elétrica na qual é aplicada no solo por meio de um eletrodo auxiliar de corrente, ao ser conectado à malha de aterramento, o terrômetro dispersa uma corrente elétrica sobre a região próxima ao aterramento.

A corrente elétrica gerada pelo terrômetro será medida através de uma sonda de tensão que quantifica a diferença de potencial presente no solo e na regiões próximas. A sonda está localizada no alinhamento da haste de potencial, a mesma fica em uma posição perpendicular à malha de aterramento (MAYER, 2018).

A medição do terrômetro é obtida com base na lei de ohm básica, com ao captar a leitura de tensão e corrente nas hastes de sonda, a mesma consegue determinar a resistência do aterramento. Segundo a NBR 15749 (ABNT, 2009), a aferição ocorre

quando o eletrodo de potencial se desloca a valores de 5% da distância do sistema de medição. A figura 16 mostra a curva de resistência de aterramento, segundo a NBR 15749 (ABNT, 2009):

Figura 16: Curva da Resistência em função da distância do Aterramento



Fonte: NBR 15749

Para se obter a curva da figura acima é preciso que o eletrodo de corrente esteja localizado à uma distância “d” da tomada de terra (ponto de injeção de corrente do aparelho). Segundo a norma é recomendável uma variação de posição de 5% do valor da distância “d”, medindo assim outras vezes para se obter a curva da resistência em função da distância (MAYER, 2018).

Segundo a norma, o eletrodo auxiliar de corrente e o eletrodo de sondagem de tensão precisam estar sempre alinhados ou à 180°. Nas condições em que a resistividade fica estável no gráfico são condizentes com a resistência real do aterramento, mantendo-se estável por grande parte das distâncias ao considerar as regiões próximas do aterramento (MAYER, 2018).

Como padronização, um aterramento que possui uma distância linear de por exemplo 10 m, é o recomendado que a posição do eletrodo seja posicionado à 62% da maior distância, ou seja, 6,2 m da malha de aterramento. Já a haste de sondagem para ficar isenta da influência de corrente elétrica é sempre localizada a uma distância fora da zona de influência do eletrodo de tensão para assim, aferir corretamente as resistências.

4.10 Modelos matemáticos aplicados nos sistemas de aterramento

Com a evolução dos equipamentos e programas de computação na década de 80, sua aplicação nos trabalhos e problemas relacionados à engenharia cresceu bastante, com isso permitiu que se reduzissem os custos de produção, aumentando a capacidade de processamento dos microcomputadores, contribuindo de forma contínua para a melhoria e a popularização destes equipamentos. Com isso, os recursos computacionais, passaram a se tornar cada vez mais acessíveis tanto para a comunidade científica como para os profissionais ligados à pesquisa, impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias, de modelagens mais eficientes e confiáveis de processos matemáticos mais rápidos e precisos (NOGUEIRA, 2006).

Em se tratando de estudos aplicados a sistemas de aterramento não é diferente. Metodologias computacionais mais coerentes foram sendo desenvolvidas e aprimoradas, substituindo os processos analíticos e empíricos, que eram baseados em equações simples obtidas a partir de resultados experimentais. E o comportamento transitório dos sistemas de aterramento sob a ação de descargas atmosféricas, evolui face às seguintes razões (NOGUEIRA, 2006):

- Os métodos analíticos e empíricos sofriam simplificações excessivas para chegar-se a uma solução aceitável;
- Os sistemas de aterramentos permitiram modelagens mais simples devido faixas de memória amplas e velocidades computacionais disponibilizadas;
- Problemas envolvendo análise de aterramentos podem ser avaliados utilizando abordagens analíticas e numéricas. Onde a aplicação de uma solução analítica é de análise e desenvolvimento, como ocorre em sistemas de malhas de terra, a utilização de métodos numéricos torna-se uma alternativa poderosa. Boa parte dos métodos numéricos de análise e modelagem de sistemas de aterramento resolve numericamente as Equações de Maxwell, sujeitas a certas determinações e condições de contorno. Os métodos também são classificadas em duas categorias:
 - Base com modelos de equações diferenciais;
 - Base com modelos de equações integrais.

Tanto do ponto de vista numérico quanto das técnicas analíticas, estas equações podem ser aplicadas para a solução de problemas no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Porém, as técnicas de modelagem no domínio tempo são mais apropriadas para a solução de problemas envolvendo várias frequências. Dependendo da complexidade do problema em estudo, o tempo de processamento computacional poderá ser elevado (NOGUEIRA, 2006).

Segundo Junior (2012. p. 38):

Metodologias baseadas no Domínio da Frequência possui melhor eficiência quando aplicado a soluções de problemas envolvendo poucas frequências, como é o caso da corrente elétrica comercial (50 ou 60 Hz). Diversas metodologias foram desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo dos últimos anos. Exemplos são o Método dos Momentos, o Método dos Elementos Finitos, o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo e a modelagem por Linhas de Transmissão, considerados como as principais empregadas para a solução de problemas de compatibilidade eletromagnética.

As aplicações dos métodos analíticos e numéricos utilizados na modelagem e análise de transitórios em sistemas de aterramentos, baixas ou altas frequências, resume-se em:

- Modelagem por circuitos elétricos;
- Modelagem por campos eletromagnéticos;
- Modelagem híbrida;
- Modelagem por linhas de transmissão.

Há de se considerar ainda que na modelagem analítica os fenômenos transitórios são caracterizados por duas formas de tratamento. Uma baseada no domínio da frequência (Frequency Domain-FD), procedendo a volta ao domínio tempo (Time Domain-TD) utilizando as transformadas inversa de Fourier ou de Laplace. As modelagens por circuitos elétricos e por linhas de transmissão utiliza diretamente o domínio do tempo (TD) para o cálculo da resposta dos sistemas de aterramento em uma ampla faixa de frequências. Outras modelagens como a de campos eletromagnéticos utilizam o domínio da frequência (FD) (JUNIOR, 2012).

Já a utilização de métodos numéricos para análise e modelagem torna-se uma alternativa poderosa. Boa parte dos métodos numéricos aplicados à modelagem de sistemas de aterramento resolve numericamente as Equações de Maxwell, sujeitas a

certas condições de contorno e também classificadas nas categorias de equações diferenciais e integrais (JUNIOR, 2012).

Diversas metodologias foram desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo dos últimos anos. Entre eles pode-se destacar o método dos momentos (MoM), e o método dos elementos finitos (FEM).

4.10.1 Método dos momentos (MoM)

A aplicação do MoM em problemas de aterramento elétrico é realizada discretizando-se o sistema de aterramento em diversos elementos e a interação entre eles é determinada pela aplicação das equações do eletromagnetismo (OLIVEIRA, 2016).

A equação integral a ser resolvida pelo MoM descreve o comportamento eletromagnético de aterramentos elétricos para configurações gerais de aterramento e considerando a aproximação de fio fino, como mostra a equação 12.

$$\int_{L_i} V dl_i = \frac{1}{4\pi\sigma L_i L_i} \int_{L_i} \int_{L_i} \frac{I_{t_l}}{r} dl_l dl_i, \quad (12)$$

Em que:

- V = Potencial ao longo do elemento i produzido pela densidade linear de corrente;
- j, l_i, l_l = comprimentos dos elementos i e j ;
- r = Distância entre cada elemento diferencial (dl) dos elementos i e j .

As vantagens em se utilizar o MoM na solução de problemas de aterramento residem no fato de que essa técnica é adequada para tratar problemas abertos e é de fácil aplicação em geometrias simples, como é o caso das configurações típicas de aterramento. Por outro lado, ao se utilizar esse método tem-se dificuldade em se considerar meios heterogêneos, como é o caso de solos reais em que os eletrodos estão inseridos (OLIVEIRA, 2016).

4.10.2 Método dos Elementos Finitos (FEM)

Na aplicação do Método dos elementos finitos (FEM), o domínio do problema é dividido em pequenos subdomínios com formas e comprimentos arbitrários, denominados de elementos. Em cada elemento, os valores dos potenciais são aproximados por meio de funções de interpolação e, utilizando-se o Método dos Resíduos Ponderados ou o Método Variacional, a equação diferencial parcial é transformada em uma equação integro- diferencial e, em seguida é convertida a um sistema algébrico de equações. O campo elétrico, calculado através dos valores dos potenciais, é utilizado para a obtenção da distribuição de corrente no sistema de aterramento. A partir dessa distribuição de corrente determina-se a resistência do aterramento (OLIVEIRA, 2016).

A grande vantagem da utilização do FEM na modelagem de sistemas de aterramento consiste na facilidade de tratar o solo onde o aterramento está inserido como sendo um meio heterogêneo. Como desvantagem, pode-se destacar a necessidade do método de delimitar o domínio de problemas abertos, como é o caso dos sistemas de aterramento, o que pode ter impacto na solução caso não seja realizado de forma adequada. Outra desvantagem está relacionada com o tamanho do domínio do problema que, dependendo da dimensão do arranjo de aterramento analisado, pode implicar um alto custo computacional, uma vez que o método requer a geração de uma malha (OLIVEIRA, 2016).

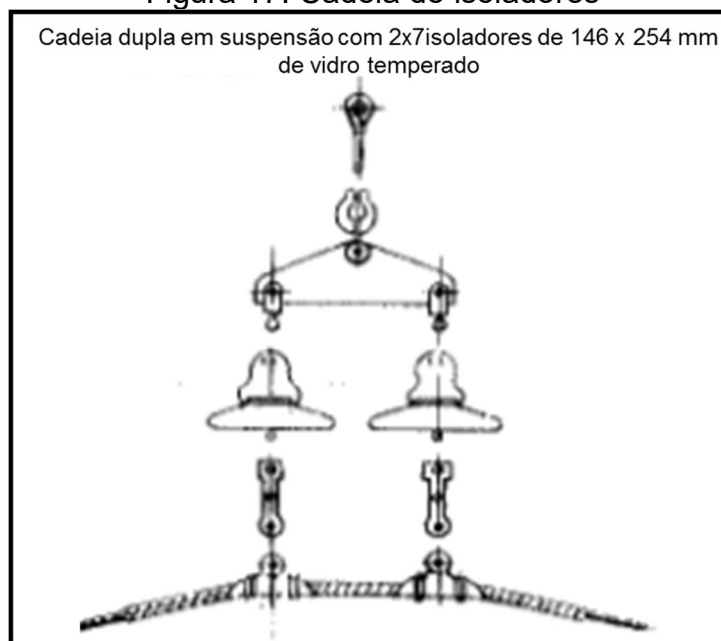
5 DESCRIÇÃO DA LINHA

5.1 Linha de transmissão de 69 kV: objeto de estudo

A linha de transmissão escolhida como objeto de estudo, inicia-se na SE Monlevade II, 230/ 69 kV, que está situada na cidade de João Monlevade, MG, e vai até a SE 13,8 kV que se encontra na cidade de Rio Piracicaba, MG. Essa linha de transmissão é composta por um circuito trifásico simples, possui uma tensão nominal de 69 kV, possui aproximadamente 17 km de extensão, e possui 34 torres autoportantes em estruturas treliçadas que são responsáveis pela sustentação dos demais elementos que compõe a linha, tais como a cadeia de isoladores, os cabos condutores, além dos cabos para raios.

A cadeia de isoladores é formada por uma cadeia dupla em suspensão com 2 isoladores de 146 x 254 mm de vidro temperado, como mostra na figura 17.

Figura 17: Cadeia de isoladores

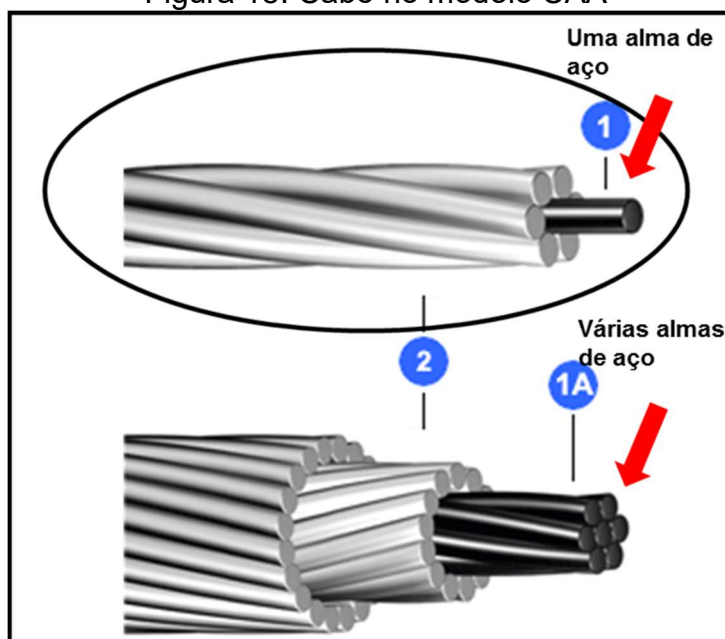


Fonte: SAMITRI S/A (1994)

Os cabos condutores utilizados, foram cabos de alumínio nu CAA (Cabos de alumínio com alma de aço), muito utilizado para linha de transmissão aérea, eles são cabos formados por uma ou mais coroas de fios de alumínio, em torno de uma alma de aço composta de um ou mais fios. Devido às numerosas combinações possíveis de fios de alumínio e aço, pode-se variar a proporção desses, a fim de se obter a melhor relação entre capacidade de transporte de corrente e resistência mecânica para cada aplicação. Nessa linha em específico, foi utilizado o cabo 6/1, sendo seis cabos de alumínio para um cabo de aço, a figura 18 mostra os detalhes dos cabos formados com apenas uma alma de aço, como é o caso desse utilizado na LT, como também um cabo formado por diversas almas de aço.

Para esta linha, foi projetada cabos na bitola de 107,2 mm², com uma máxima corrente suportada de 360 A, carga de ruptura máxima de 3.790 Kg, com uma carga máxima de trabalho de 1.241,7 Kg.

Figura 18: Cabo no modelo CAA



Fonte: Induscabos condutores elétricos (2019)

Na parte mais alta da torre estão situados os cabos para-raios, responsáveis por conduzir as correntes de surto até a estrutura mais próxima, e assim serem conduzidas para a terra através do sistema de aterramento, para esta linha está sendo utilizado um cabo de aço galvanizado na bitola de $35,8 \text{ mm}^2$, com uma formação de 7 fios. A figura 19 mostra o tipo de torre utilizados para LT em estudo, e a posição que estão situados os cabos para raios, e cada componente citado nas figuras 15 e 16.

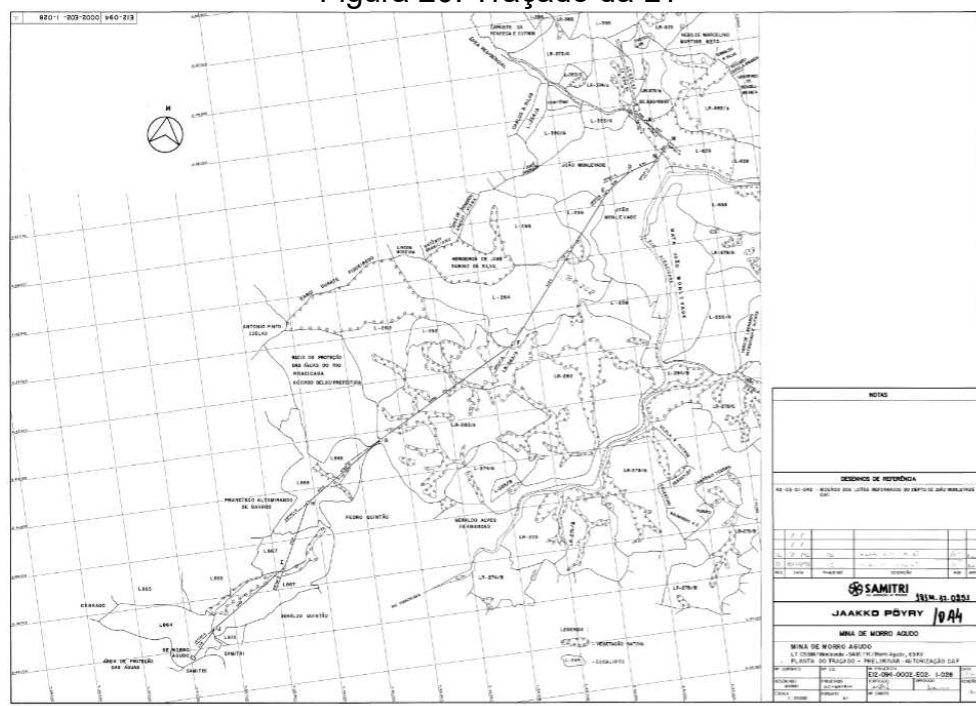
Figura 19: Torre utilizada na LT



Fonte: Próprio autores

Além da segurança mecânica, essa linha de transmissão é protegida eletricamente, nas saídas por disjuntores de operação automática, tanto na subestação de João Monlevade, quanto na SE da Mina. A LT é composta por 3 cabos condutores, e um cabo para-raios, a condição de carga máxima de trabalho dos cabos foi considerado uma temperatura ambiente de 10°C condição inicial com vento de 110 km/h, a condição de carga de maior duração foi considerada igual a 18,5% da carga de ruptura ao cabo condutor, com temperatura ambiente de 20°C, sem vento, condição final, a condição de flecha mínima de 0°C, sem vento, condição inicial, e flecha máxima de 75°C, condição final, e as cercas existentes foram construídas no limite da faixa, e todas aterradas de acordo com a NBR 5422. A figura 20 mostra o traçado dessa linha.

Figura 20: Traçado da LT



Fonte: SAMITRI S/A (1994)

Essa LT, pertence a uma mineradora, e é responsável por alimentar todo o sistema elétrico da mina, que possui seis instalações, sendo três instalações de britagem, e três instalações de concentração de minério.

5.2 Condições climáticas locais

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), o clima em João Monlevade é caracterizado como tropical subquente semiúmido. Com temperatura média compensada anual de 21 °C e pluviosidade média de 1.400 mm/ano, concentrados entre os meses de outubro e abril, sendo dezembro o mês de maior precipitação. A estação chuvosa compreende os meses mais quentes, enquanto que a estação seca abrange os meses amenos segundo o (INMET, 2019) Instituto Nacional de Meteorologia. O mês mais quente, fevereiro, tem temperatura média de 23,4 °C, enquanto que no mês mais frio, julho, a média é de 17,7 °C.

Apesar da queda da temperatura no inverno, eventos de frio em demasia não são comuns. Outono e primavera, por sua vez, são estações de transição.

Com quase 1.970 horas de insolação por ano, a umidade do ar é relativamente elevada, sendo a média anual superior a 75%. Nevoeiros ocorrem nas manhãs dos meses frios, por conta da alta umidade e das baixas temperaturas. No entanto, baixos índices de umidade podem ser registrados durante a estação seca ou em longos veranicos. Nesses períodos, o ar seco em associação à poluição gerada por veículos, indústrias e queimadas favorece a concentração de poluentes na atmosfera, contribuindo com a piora da qualidade do ar (INMET, 2019).

O vento dominante é originado da direção leste e, no período mais ventoso do ano, entre os dias 3 de agosto a 28 de novembro, a velocidade média é de 11,3 km, tendo uma ligeira concentração entre setembro e outubro. Na época mais calma, de março a junho, a velocidade média varia entre 9 e 10 quilômetros por hora.

Segundo dados do (INMET, 2019), referentes ao período de 1961 a 1984, 1986 a 1991 (até 31 de outubro), 1993 (a partir de 1° de abril) a 2002 e 2004 a 2018, a menor temperatura registrada em João Monlevade foi de 3,5 °C em 1 de junho de 1979, e a maior atingiu 37,8 °C em 10 de setembro de 1997. O maior acumulado de precipitação em 24 horas foi de 145,2 mm em 4 de janeiro de 1997. Outros acumulados iguais ou superiores a 100 mm foram 115,2 mm em 20 de dezembro de 2011, 111 mm em 17 de fevereiro de 1998, 105,2 mm em 27 de janeiro de 1961, 103,9 mm em 21 de fevereiro de 1964, 103 mm em 10 de novembro de 2009 e 100,3 mm em 23 de janeiro de 1977. Dezembro de 2011, com 616 mm, foi o mês de maior precipitação.

As chuvas, sobretudo nos meses da estação chuvosa, podem vir acompanhadas de descargas elétricas, rajadas de vento e, esporadicamente, queda de granizo, com registro em 15 de setembro de 2008. Conforme o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2018), João Monlevade é o 65 ° colocado no ranking de ocorrências de descargas elétricas no estado de Minas Gerais, com uma média anual de 11,4865 raios por quilômetro quadrado.

Devido as condições climáticas apresentadas, os meses de outubro a abril são considerados períodos chuvosos, são os meses que mais são registrados desligamentos na linha, pois é geralmente nesse período que ocorrem a maior parte das descargas atmosféricas.

5.3 Características do solo

Como abordado anteriormente, o tipo de solo por onde estão fixadas as estruturas, interfere diretamente no projeto de aterramento, pois através da resistividade do solo naquele local, consegue-se calcular as configurações de eletrodos necessários para que se possa obter o valor de resistência esperado.

Por este motivo, houve a confecção de um relatório de sondagem que demonstra o tipo de solo predominante na região. Foram ensaiados vários pontos ao decorrer da linha de transmissão. Esse relatório foi enviado por uma empresa contratada.

O método de sondagem utilizado foi o SPT (Standart Penetration Test), também conhecido como sondagem à percussão que consiste na penetração de um amostrador padrão com diâmetro interno de 34,9 mm e diâmetro externo de 50,8 mm acoplado a hastes de perfuração. O sistema é composto de um tripé que sustenta um peso de 65 kg. Na haste é feita uma marca nos 45 cm a partir de sua ponta, e então são feitas marcas de 15 cm em 15 cm. O peso é solto à uma altura de 75 cm sobre a haste. São realizados sucessivos golpes até que a haste atinja a marca de 45 cm, o número de golpes dos últimos 30 cm marcados na haste serão responsáveis por determinar qual o tipo de solo encontrado.

Em praticamente toda a extensão da LT, foram encontrados dois tipos de solos, argila arenosa marrom amarelada, e argila arenosa cinza amarelada. Ou seja, em toda a extensão da linha o solo predominante é a argila arenosa.

Como mostra a tabela 1, cada tipo de solo tem uma resistividade específica, que no caso a argila varia de 300 a 5000 Ω m

A profundidade média penetrável no solo na LT, foi de aproximadamente 12 m. Vale ressaltar que que houveram intervalos extremos de penetrabilidade com valor mínimo de 1,10 m e 12,25 m.

5.4 Projeto do sistema de aterramento (28/03/2003)

O método de aterramento executado nas estruturas dessa LT, dispõe da utilização de eletrodos horizontais posicionados à uma dada profundidade sobre a porção de solo nas proximidades das estruturas. Esta configuração de aterramento que é tipicamente utilizada em linhas de transmissão aérea, e traz benefícios como economia em materiais e tempo de execução das atividades construtivas da LT.

Para a execução do aterramento na linha de transmissão de 69 kV, foram utilizados como cabos contrapesos, fios de aço coberto de cobre nº 4 AWG (American Wire Gauge), e conectado aos pés das torres com conectores de cobre fundido estanhado, com parafusos de 1/2" x 70 mm, porcas e arruelas.

A tabela 2 mostra as bitolas e características dos cabos utilizados no sistema de aterramento, em vermelho destaca o cabo utilizado neste projeto.

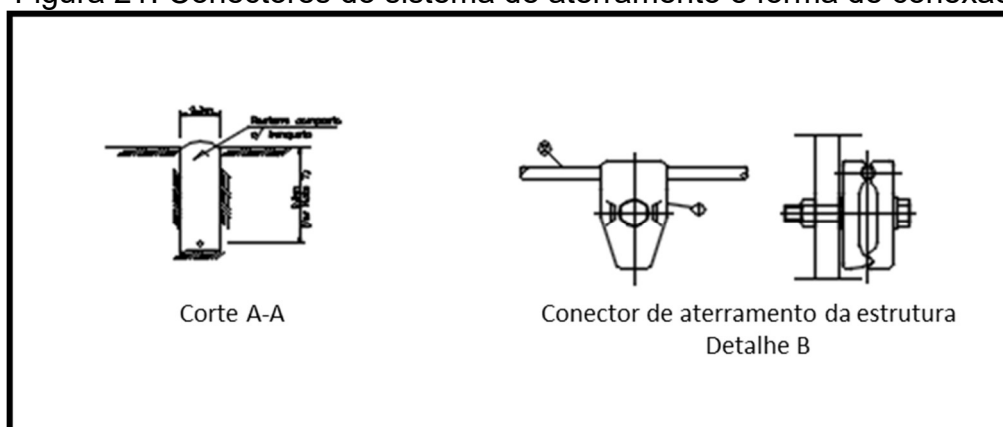
Tabela 2: Características e bitola dos cabos AWG

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm²)	Kg por km	Resistência (ohms por km)	Capacidade (A)
0000	11,86	107,2		0,158	319
000	10,40	85,3		0,197	240
oo	9,226	67,43		0,252	190
1	7,348	42,41	375	1,40	120
2	6,544	33,63	295	1,50	96
3	5,827	26,67	237	1,63	78
4	5,189	21,15	188	0,80	60
5	4,621	16,77	149	1,01	48
6	4,115	13,30	118	1,27	38
7	3,665	10,55	94	1,70	30
8	3,264	8,36	74	2,03	24
9	2,906	6,63	58,9	2,56	19
10	2,588	5,26	46,8	3,23	15

Fonte: Novacon (2019)

Os cabos contrapeso devem ser bem conectados aos pés das estruturas da torre para garantir que as correntes provenientes de surtos tenham um caminho preferencial para a terra. A figura 21 apresenta os conectores e a forma como foram conectados os cabos contrapesos as estruturas da torre, a conexão foi realizada desta maneira para todas as 34 estruturas.

Figura 21: Conectores do sistema de aterramento e forma de conexão



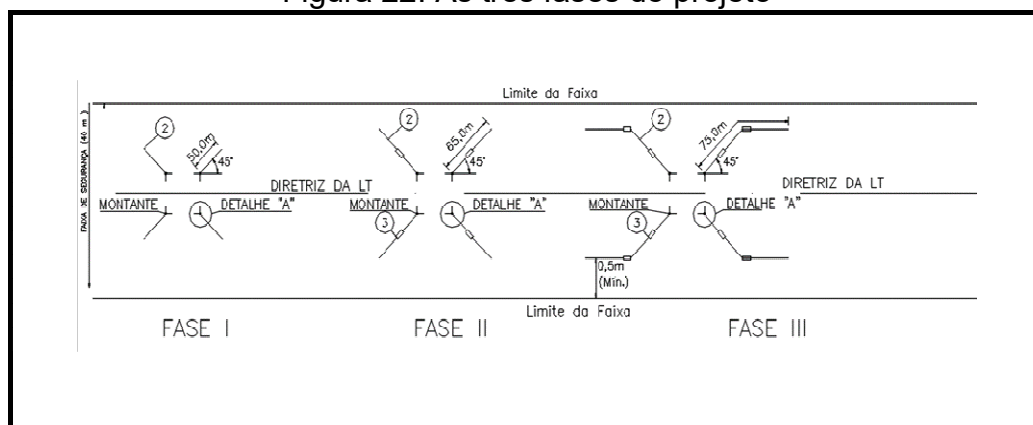
Fonte: SAMITRI S/A (2003)

Como 100% torres estão situadas em zona rural, foi utilizado o mesmo projeto para todas as 34 torres existentes. As valetas para a instalação dos cabos contrapesos foram escavadas, e depois de serem instalados os cabos contrapesos, foram aterradas e compactadas de forma a se reconstituir a configuração natural do solo, foi utilizado vegetação local para repor a camada superficial do solo, de forma a evitar erosão e possíveis descoberta dos cabos, e danos aos cabos contrapesos.

A medição da resistência do aterramento só foi realizada após o aterramento dos cabos, e compactação do solo, porém antes da instalação dos cabos para raios, ou com os mesmos isolados, e não foram utilizados produtos químicos como (sais) no aterramento das torres.

A instalação dos cabos contrapesos em cada estrutura foi dividido em três fases, após a instalação inicial, se o valor da resistência do aterramento ultrapassar um valor medido de 50 Ω , passa-se para a próxima fase de instalação, e assim sucessivamente, até atingir a fase três. Na primeira fase os cabos lançados foram de 50 m, na segunda fase foram de 65 m, e na terceira foram de 75 m, como mostra na figura 22. Para cada torre chegou-se a uma fase diferente, dependendo do valor da resistência medida em cada estrutura.

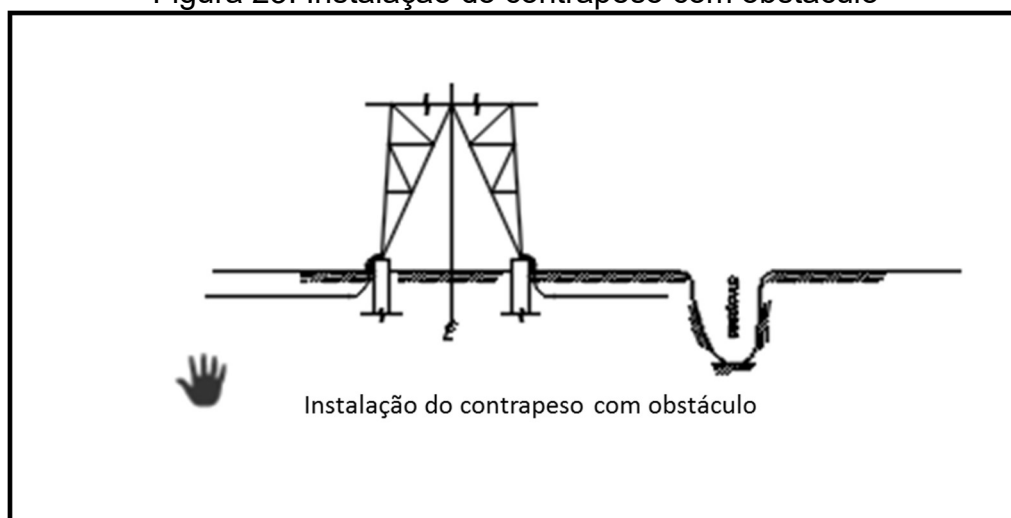
Figura 22: As três fases do projeto



Fonte: SAMITRI S/A (2003)

No caso de obstáculos encontrados na passagem dos cabos, a instalação dos cabos procede como mostrado na figura 23, o número total de voltas foi determinado de acordo com a distância entre a torre e o obstáculo, o comprimento mínimo entre voltas foi de 1/4 do comprimento de uma perna do contrapeso.

Figura 23: Instalação do contrapeso com obstáculo



Fonte: SAMITRI S/A (2003)

Os conectores de compressão para os cabos contrapesos só foram utilizados nos casos onde se constatou através da medição da resistência do aterramento, a necessidade de aumentar o comprimento do cabo para passar de uma fase para outra.

Em terrenos não cultivados, os cabos contrapesos foram instalados a uma profundidade de 0,3 m. Já em terrenos cultivados ou sobre estradas não pavimentadas os cabos contrapeso foram instalados a uma profundidade de 0,5 metros. Nos pontos onde foram encontrado rochas a uma profundidade inferior a especificada para o cabo contrapeso, a valeta foi tampada com terra, e em caso de afloramento rochoso o contrapeso foi instalado em uma valeta de 5 cm de profundidade, e fixado por meios de pino de rocha e espaçados a 2 m aproximadamente, e a valeta foi fechada com argamassa de cimento com traço de 4x1.

Outros procedimentos que foram seguidos de acordo com a norma NBR 5422, foram os seguinte:

- A distância mínima a ser mantida entre o cabo contrapeso e os limites da faixa de segurança é de 0,5 m.
- Os cabos contrapesos nunca deverá ser instalado dentro de um raio de 15 m de oleodutos, gasodutos, linhas de abastecimento de água, ou outras linhas subterrâneas.

Por sua vez, essa linha de transmissão é fundamental para operação da mina, por se tratar de uma única linha de alimentação. A sua falha pode provocar a paralização em toda a mina de Água Limpa, causando grandes prejuízos financeiros.

Ocorre que por se tratar de uma linha que está situada em uma região de alta densidade de descargas atmosféricas, ela vem apresentando um desempenho não muito confiável, onde existem vários registros de desligamentos, e vários danos a elementos físicos da linha, como rompimento de cabos, danos à para raios, danos a cadeia de isoladores, entre outros. Também se trata de uma linha de transmissão muito antiga, onde vários componentes do seu sistema de aterramento já possam estar danificados, e com o passar do tempo também já foram realizadas várias adequações nas normas.

A fim de propor soluções para estes problemas ocorridos com frequência nesta LT, será realizado um estudo mais apurado, e adequação as normas no seu sistema de aterramento.

6 ATUALIZAÇÃO DO PROJETO

Com o objetivo de propor melhorias ao desempenho dessa linha de transmissão para obter uma transmissão continua e confiável, o projeto é constituído por várias etapas, desde a medição da resistência de aterramento aos pés de todas as torres, até ao cálculo do projeto, utilizando as técnicas discutidas no item 3.8, para averiguar se o que está proposto no projeto (SAMTRI S/A, 2003) atende as expectativas estabelecidas pela norma NBR-5422.

Para se realizar as medições de resistência do aterramento, é necessário que se observe as condições climáticas da região, pois dependem de vários fatores que podem influenciar nas medições, onde em períodos chuvosos a umidade em todo o terreno é maior, diminuindo assim a resistividade, e como foi abordado no item 4.2, as chuvas podem vir acompanhadas de descargas atmosféricas, que não seria seguro realizar essas medições.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), o período chuvoso para essa região é de Outubro a Abril, sendo inviável que se realize as medições nesse período.

6.1 Método utilizado para medir o valor da resistência do aterramento

A fim de analisar se o valor das resistências de aterramento estão dentro do especificado pela norma NBR 5422, foram realizadas as medições seguindo os procedimentos indicados pela norma NBR 15749. Essas medições foram realizadas por uma empresa contratada.

Para realizar as medições da resistência de aterramento nas estruturas das torres da linha de transmissão, a metodologia aplicada foi o método de queda de potencial utilizando-se o terrômetro, de acordo com a Referência Normativa Conforme Anexo E da NBR 15749 (2009).

O terrômetro é o equipamento indicado para medições de resistência de aterramento e de resistividade elétrica do solo.

Esse instrumento é composto por 2 eletrodos de referência, sendo um de corrente e o outro de tensão, que são compostos por divisores resistivos. Ao entrar em funcionamento, o terrômetro insere uma corrente pela terra na qual é transformada em diminuições de tensões pelos resistores formados pelos eletrodos, e pelo próprio terra.

O eletrodo de corrente é afixado ao solo a uma distância de três vezes a maior dimensão do aterramento, ou seja se a maior haste de aterramento possui 3 m, esse eletrodo é afixado a uma distância de 9 m.

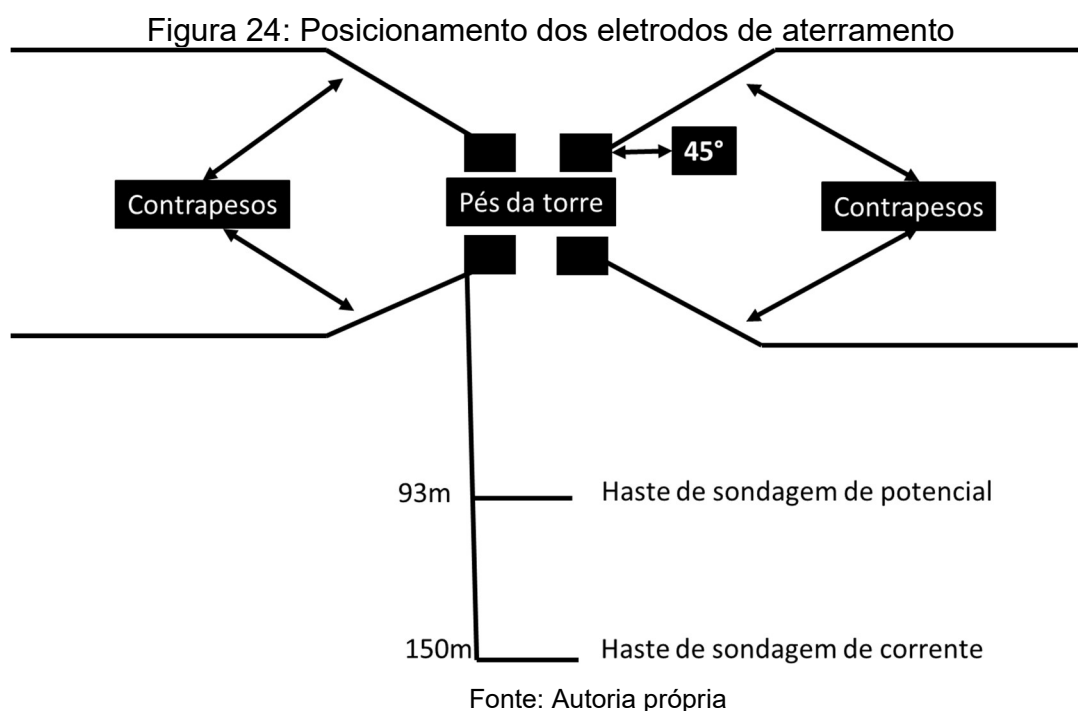
Em seguida o eletrodo de tensão é afixado ao solo a uma distância de 62% dessa distancia total, todos dois eletrodos são conectados ao aparelho através de um cabo, e um terceiro cabo é conectado ao sistema de aterramento. O terrômetro é capaz de lançar uma corrente controlada no solo através do eletrodo de corrente, e através dos eletrodos de potencial, de corrente e de tomada de terra é possível encontrar o valor da resistência de aterramento medida.

Por meio da diminuição de tensão, o mostrador é calibrado para indicar o valor da resistência do terra. Uma das dificuldades de se utilizar o equipamento é a escolha dos pontos de para a instalação das hastes de referência caso o chão seja concretado, porém, nas condições de solo expostos a tarefa se torna mais fácil (MAYER, 2018).

O terrômetro possui uma faixa de medição de 0 até 20.000 Ω . São utilizadas 4 faixas para medição e a precisão do valor de leitura é de 1,5% para mais ou para menos do valor de leitura, o que equivale cerca de 0,5% do valor de fundo de escala.

Como as hastes devem ser fixadas todas à mesma profundidade, não é questão caso foram escolhidas as mesmas profundidades do sistema de aterramento, ou seja, 0,3 m.

Como a primeira fase do projeto contempla os cabos contrapeso de 50 m, a distância para posicionamento da haste de sondagem de corrente, foi de 150 m. Para a haste de sondagem de potencial, foram atribuídos 93 m, ou seja, 62% da distância total. Os eletrodos foram posicionados perpendicularmente à malha de aterramento, tanto para área rural, quanto para a zona urbana as hastes devem ser posicionadas alinhadas entre si. As dimensões e posicionamentos utilizados na medição foram realizados conforme decisões acordadas entre a empresa executora e a equipe fiscalização da obra. A figura 24 mostra o posicionamento comum das hastes de sondagem mediante a malha de aterramento.



Os cabos contrapeso foram desconectados da torre e interligados entre si, e em diversos pontos, foram necessárias abertura de cavas para acesso aos conectores do aterramento. No total foram medidos as resistências de aterramento da torre 02 até a torre 34, e foram inspecionadas as 34 torres. A torre 01 não foi possível medir a resistência do aterramento devido todos os cabos contrapeso estarem rompidos como mostra a figura 25.

Figura 25: Torre 01 com cabos contrapeso rompidos

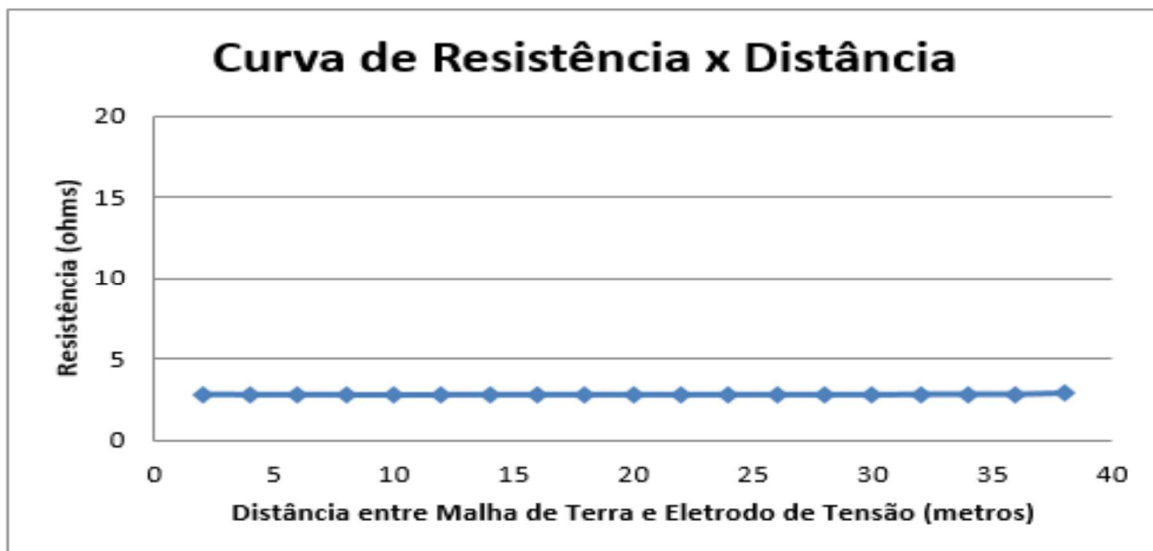


Fonte: Medições / Diagnostico dos aterramentos das torres - LT 69 kV

Para a execução das medições de aterramento foram adotadas algumas medidas de segurança, tais como: utilização de calçado adequado e isolado, utilização de capacete e luvas de vaqueta. A manipulação dos eletrodos só deve ser realizada com o aparelho desenraizado e/ou desligado. Além disso para executar a atividade de medição do sistema de aterramento a equipe de medição deve possuir Permissão de Trabalho (PT) e Análise Preliminar de Risco (APR) com anuência de um técnico e/ou de um engenheiro de segurança do trabalho, para autorização da execução. Outra recomendação que também é prevista na norma NBR 5422, que indica a paralização das atividades de medição de resistência de aterramento da malha em condições adversas de tempo. As condições adversas de tempo aumentam a probabilidade de uma descarga incidir sobre a linha, o que justifica as paralisações das atividades de medição nessas situações.

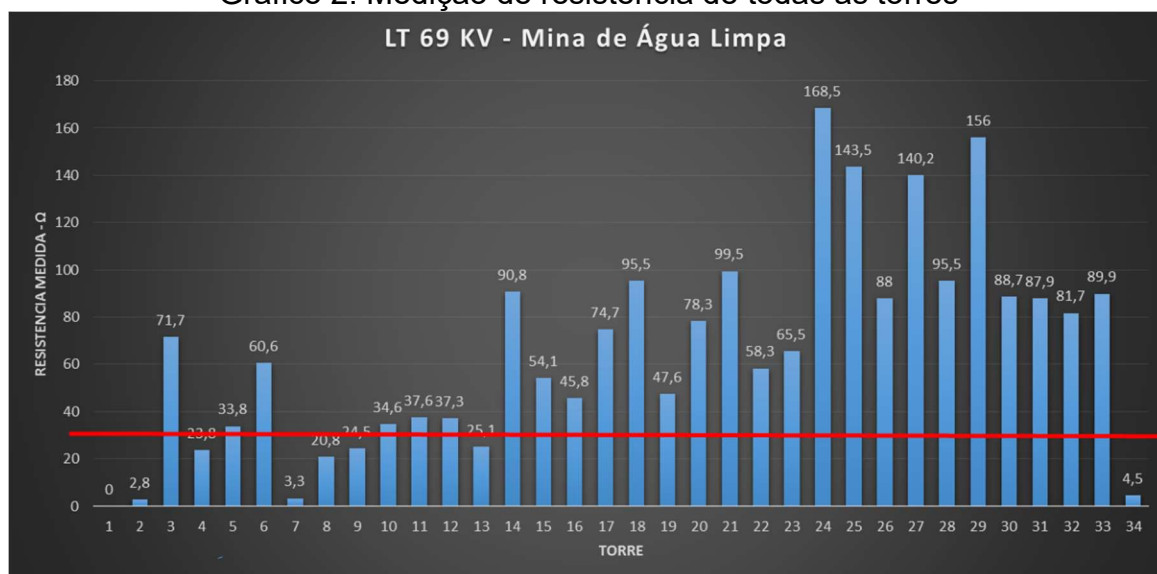
O gráfico 1 mostra a medida de aterramento da torre 02, como mostra no gráfico a resistência do aterramento deu 2,76 Ω , que se encontra dentro do desejável que é abaixo de 30 Ω . Já o gráfico 2 mostra a medição de todas as 33 torres que foram medidas.

Gráfico 1: Medição de resistência da torre 2



Fonte: Medições / Diagnóstico dos aterramentos das torres - LT 69 kV

Gráfico 2: Medição de resistência de todas as torres



Fonte: Medições / Diagnóstico dos aterramentos das torres - LT 69 kV

Como pode-se observar através do gráfico 2, vinte e seis das trinta e três torres medidas estão com os valores de resistências acima 30 Ω, ou seja 79% das torres estão com valores de resistências bem acima do desejável. Isso pode causar problemas de baixo desempenho dessa linha, pois o sistema de aterramento já não se torna o caminho preferencial para as correntes indesejáveis, causando desligamentos, e até mesmo danos aos componentes da LT.

6.2 Método para medição da resistividade do solo

Os sistemas de aterramento de estruturas deste tipo, são normalmente constituídos por condutores de cobre, aço zincado ou aço-cobre, tendo sido adotado o ultimo para este projeto.

O comprimento dos condutores depende do valor da resistividade do solo na localidade onde se encontra o aterramento, sendo definido através de instrução específica, não existindo, todavia, condutores menores que 20 m. Devem ser enterrados a pelo menos 0,5 m de profundidade podendo chegar a 0,7 m se o local estiver sujeito à agricultura cultivada ou se houver a possibilidade de ficarem expostos devido à erosão NBR 5422 (ABNT, 1985).

Há vários fatores que podem influenciar em um sistema de aterramento, dentre eles destacam o tipo de solo, a geometria da malha de aterramento, a estratificação do solo, a umidade, temperatura, granulometria, porosidade, e a composição química do solo. Tais valores intervêm diretamente nos valores finais do projeto, ou seja na resistência final do aterramento.

Como já foi representado anteriormente, foram realizadas atividades de sondagens ao decorrer da linha, com isso, é possível levantar uma resistividade conforme a estratificação de cada solo. Os resultados da sondagem mostraram que existem ao decorrer da linha praticamente dois tipos de solos, que são:

- Argila arenosa marrom amarelada.
- Argila arenosa cinza amarelada

Observa-se na tabela 1 que os dois tipos de solos possuem as mesmas características, e conseqüentemente as mesmas resistividades, que variam de 300 Ω m a 5.000 Ω m, dependendo de outros fatores como a temperatura, umidade, dentre outros.

Apenas com relatório de sondagem, é possível realizar os cálculos para a construção do sistema de aterramento, porém é aconselhável medir a resistividade do solo no local do aterramento para obter valores mais exatos.

Quando se tem os valores exatos da resistividade medida no local, é possível encontrar as configurações mais assertivas do sistema de aterramento, para com isso projetar um sistema de aterramento que seja eficaz, e sem desperdício de material, utilizando apenas o necessário para aquele tipo de solo.

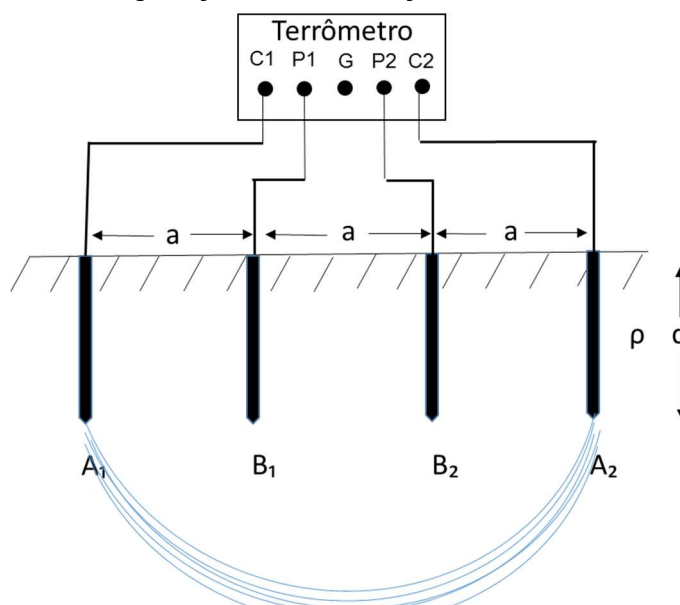
Como já foi relatado anteriormente, existem alguns métodos para medir resistividade do solo, entre eles o mais utilizado seria o método de Wenner, devido a sua facilidade, simplicidade, e precisão.

O método, como é conhecido, consiste na colocação de 4 elétrodos numa linha que atravessa a parte do terreno onde se pretende medir a resistividade do solo (ρ).

Os elétrodos deverão ser colocados em linha, respeitando rigorosamente a distância e entre eles, que deverá ser constante. Existe uma sequência correta para os elétrodos do modelo de Wenner que deverá ser absolutamente respeitada, sob pena de as medições obtidas virem incorretas (RAGGI, 2009).

A corrente de teste será injetada entre A1 e A2 (retorno efetuado pelo interior do solo), como mostra a figura 26. Essa corrente que circula pelo interior do terreno, vai provocar um diferente aumento do potencial nos elétrodos B1 e B2, essa diferença de potencial será interpretada pelo instrumento como uma tensão U, dividindo essa tensão pela corrente I que está a ser injetada em A1 ou A2, obtém-se uma resistência. O método considera que 58% da distribuição da corrente passa a uma profundidade igual ao espaçamento entre os eletrodos. Com isso considera que o valor da resistência lida pelo aparelho é relativamente a uma profundidade equivalente ao espaçamento (RAGGI, 2009).

Figura 26: Configurações das medições da resistividade do solo



Fonte: Autoria própria

Como a intenção é medir a resistividade do solo, o terrômetro é acetado na posição p do aparelho, porém ele mede o valor da resistência naquele local, que é dada em Ω .

Conhecendo o valor da resistência naquele ponto, utiliza-se a equação 13 para que se possa obter o valor da resistividade aparente do solo.

$$\rho_a = \frac{4\pi a(R)}{1 + \left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4d^2}}\right) - \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}}\right)} \quad (13)$$

Onde:

- a = espaçamento entre os eletrodos;
- d = profundidade dos eletrodos;
- ρ_a = resistividade aparente do solo.

Porém, por motivos não especificados, não será realizado as medições de resistividade, onde será utilizado apenas os valores disponíveis no relatório de sondagem enviado pela empresa contratada para análise e cálculo do projeto.

7 CÁLCULOS PARA ADEQUAÇÃO DO PROJETO

Como já foi apresentado anteriormente, existem várias formas de se calcular um sistema de aterramento, desde equações mais simples, a modelos matemáticos mais complexos. O cálculo para se estabelecer a resistência do aterramento depende dos aspectos analíticos, aos quais dependem das configurações dos eletrodos utilizados.

O projeto destinado à zona rural, como é o caso de toda extensão da linha em estudo, consiste em 4 eletrodos horizontais, lançados em um ângulo de 45° em relação a faixa de domínio da LT. O material utilizado para o aterramento foi fios de aço coberto de cobre nº 4 AWG.

Vale ressaltar que o aterramento é conectado ao sistema de cabos guardas/ para raios, porém como o SPDA/Subsistema de Descida é desacoplado da malha no momento da medição, apenas o sistema de aterramento é modelado.

Para realizar os cálculos, e análise deste projeto, será utilizada como modelo, a equação 14, como já foi destacada anteriormente, esse é um modelo de equação utilizada para o cálculo do sistema de aterramento utilizando eletrodos em horizontal, como é o caso dessa LT (MAYER, 2018).

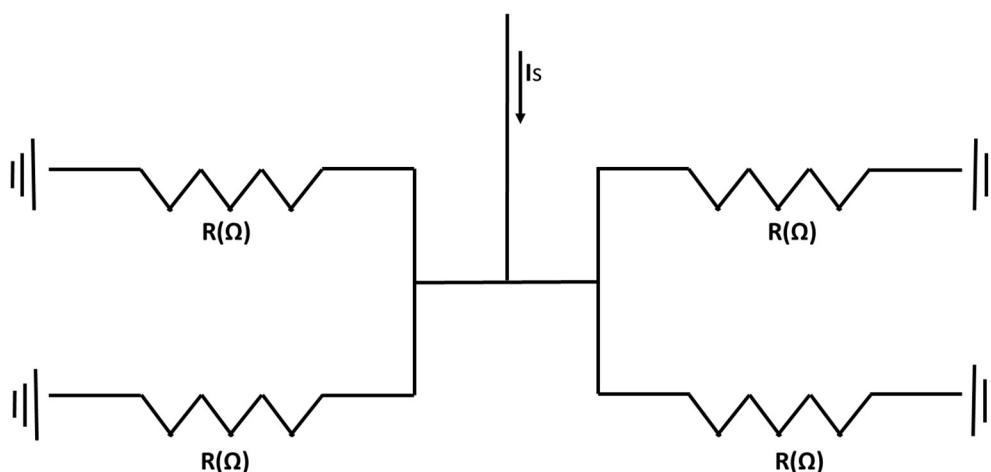
$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{4L}{d} - 2 + \frac{2d}{L} + \dots \right) \quad (14)$$

Onde:

- r = raio da seção reta do eletrodo;
- d = profundidade dos eletrodos;
- ρ = resistividade aparente (pa);
- L = comprimento do eletrodo em metro.

Uma vez que a aproximação do terreno já foi utilizada para levantamento matemático do sistema de aterramento, a resistência de aterramento rural pode ser modelada como associação de quatro resistências equivalentes em paralelo, que corresponde a cada eletrodo disposto sob o solo. A associação das resistências que são captadas pelo terrômetro nas medições são de acordo com a figura 27.

Figura 27: Associação das resistências nos pés da torre



Fonte: Autoria própria

Como foram realizadas apenas as medições de sondagem, onde não fornecem valores exatos da resistividade do solo, utiliza-se a tabela 1 para obter esses valores

aproximados, que no caso, os tipos de solo encontrados no local do aterramento possuem uma resistividade que variam de 300 Ω m a 5.000 Ω m, com isso é necessário que se realize os cálculos tanto para o valor mínimo quanto para o valor máximo de resistividade que podem ser encontradas naquele local.

Vale ressaltar também, que o projeto foi dividido em três fases, onde contemplam cabos contrapesos de 50 m, 65 m, e 75 m, por isso deve-se calcular os valores de resistências para os três comprimentos de cabo.

Realizando os cálculos para o valor mínimo de resistividade, que no caso seria 300 Ω m, onde:

- $r = 0,0025$ m;
- $d = 0,5$ m;
- $\rho = 300$ Ω m;
- $L = 50$ m.

Substituindo esses valores na equação 14, encontra-se uma resistência no valor de 13,93 Ω .

Porém esse valor de resistência é para apenas um cabo contrapeso. Como o sistema de aterramento contempla quatro cabos equivalentes em paralelo como mostra a figura 27, utiliza-se a equação 15 para encontrar o valor real da resistência do aterramento.

$$R_{atr} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (15)$$

Ao realizar a soma das resistências, é encontrado um valor de resistência de aterramento de 3,484 Ω .

O valor de resistência encontrado de acordo com a equação 15, destaca o valor de resistência encontrado para uma resistividade do solo de 300 Ω m, e contemplando o projeto na primeira fase.

Como já foi relatado anteriormente, a resistividade do solo nessa localidade da LT pode variar de 300 Ω m a 5.000 Ω m, e o projeto (SAMITRI S/A, 2003) foi dividido em três fases, foram realizados também, os cálculos para todos os valores, onde foram calculados os valores de resistência para o menor valor de resistividade esperado para esse tipo de solo, para a resistividade média, e para a máxima

resistividade. Os respectivos valores de resistência são mostrados nas tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3: Resistência medida para resistividade de 300 Ω m

Resistividade = 300 Ω m		
Fase	Comprimento dos cabos (m)	Resistência calculada (Ω)
1	50	3,48
2	65	2,90
3	75	2,42

Tabela 4: Resistência medida para resistividade de 3.000 Ω m

Resistividade = 3000 Ω m		
Fase	Comprimento dos cabos (m)	Resistência calculada (Ω)
1	50	34,79
2	65	27,5
3	75	23,13

Tabela 5: Resistência medida para resistividade de 5.000 Ω m

Resistividade = 5000 Ω m		
Fase	Comprimento dos cabos (m)	Resistência calculada (Ω)
1	50	57,99
2	65	46,0
3	75	40,75

Os valores mostrados na tabelas 3, mostram que para uma resistividade de 300 Ω m, o projeto na primeira fase, onde contempla cabos contrapeso de 50 m,

atendem as expectativas para se obter o valor de resistência aceitável pela norma NBR-5422, ou seja, menor que 30 Ω .

Na tabela 2, os valores mostram que para locais onde a resistividade do solo é de 3.000 Ω m, o projeto tem que passar para a segunda fase, pois cabos de 50m não atendem as expectativas, obtendo assim uma resistência de 34,79 Ω , ou seja acima do aceitável pela norma. Já na segunda e terceira fase atendem as expectativas.

Na tabela 3, os valores mostram que para os locais onde a resistividade do solo é de 5.000 Ω m, nem uma das fases atendem as expectativas, ou seja, mesmo com cabos contrapeso de 75 m, os valores de resistência ficariam acima do aceitável pela norma NBR-5422. Para um local com uma resistividade igual a 5.000 Ω m, devem utilizar cabos contrapeso de 110 m, onde conseguiria uma resistência no valor de 29 Ω .

Foi calculado também, o valor máximo de resistividade que o projeto SAMITRI S/A atende, que seria de 3.700 Ω m, obtendo assim na terceira fase, com cabos de 75 m, um valor de resistência igual a 30 Ω .

7.1 Resultados obtidos

Após os cálculos realizados, passa-se para as adequações propostas para uma tentativa de melhorar o desempenho da linha de transmissão, onde o objetivo é obter uma transmissão mais confiável e continua, pois, como já foi relatado, desligamentos nessa linha pode causar grandes prejuízos financeiros.

Visto que, a maior parte das torres estão com seus valores de resistência de aterramento bem acima do aceitável pela norma NBR-5422, ou seja 79% das torres necessitam de melhorias e adequações, como mostra o gráfico 3.

Gráfico 3: Torres fora do especificado pela norma NBR-5422

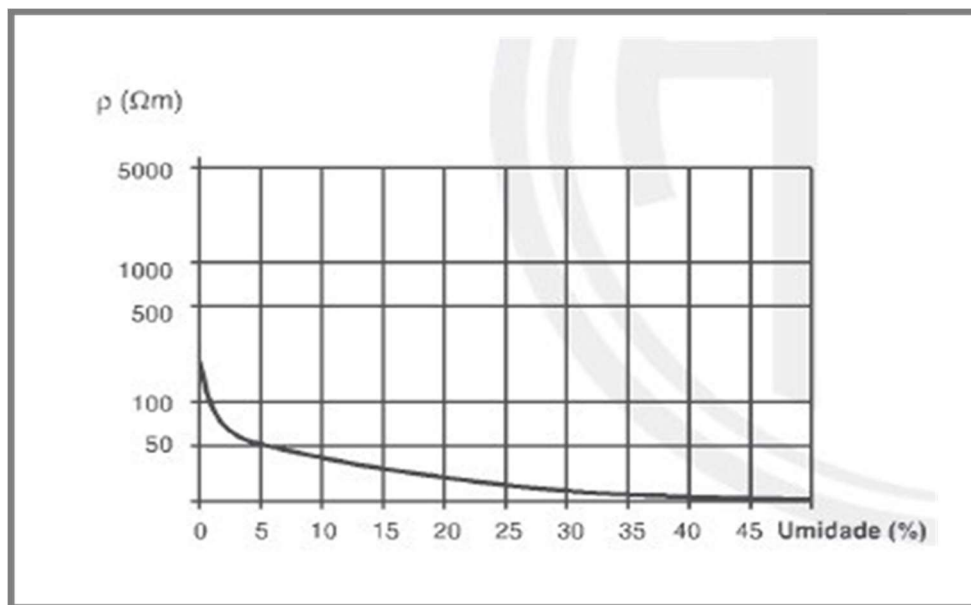


Fonte: Autoria própria

Para que se possa alcançar o resultado esperado, o mais indicado seria medir a resistividade do solo ao pé de cada torre para realizar a adequação específica para aquela torre, de acordo com a resistividade naquele local, evitando desperdício de material onde a resistividade é menor, ou até mesmo deixando o aterramento ineficiente onde há maior resistividade. Pois existem grandes variações de resistividade, mesmo sendo o mesmo tipo de material encontrado naquele solo, devido as diferentes características naquele local, como umidade, temperatura e outros.

A resistividade que um terreno apresenta, é em relação inversa à porcentagem de umidade contida no mesmo. Ao aumentar a umidade, diminui a resistividade e vice-versa. Em qualquer caso, sempre que é acrescentada água a um terreno, diminui a sua resistividade com relação à que teria em seco, como mostra o gráfico 4.

Gráfico 4: Variação da resistividade de acordo com a umidade

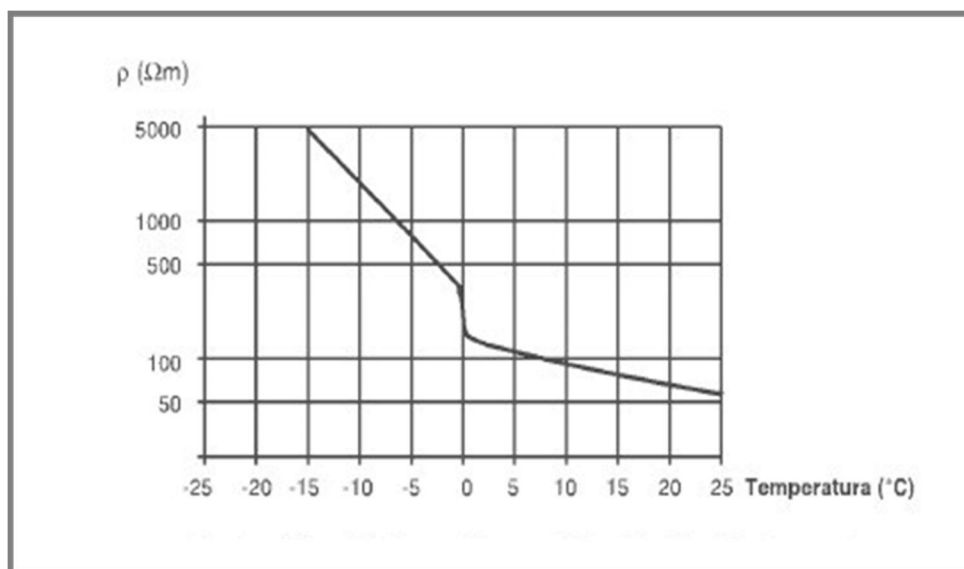


Fonte: NBR-7117 (2012)

A resistividade dos solos também depende da temperatura, esta característica térmica do terreno depende da sua composição, do seu grau de compactação e do grau de umidade.

A resistividade do terreno aumenta ao diminuir a temperatura, mas quando o terreno esfria abaixo de zero grau Celsius, a água que contém congela. Como o gelo é um isolante do ponto de vista elétrico, o que implica que a mobilidade dos íons do terreno através da água se vê detida ao congelar a mesma. Uma forma de amortecer este efeito em áreas com clima continental (invernos frios e verões quentes) será introduzindo os eletrodos em maior profundidade, a variação da resistividade de acordo com a temperatura é mostrada no gráfico 5.

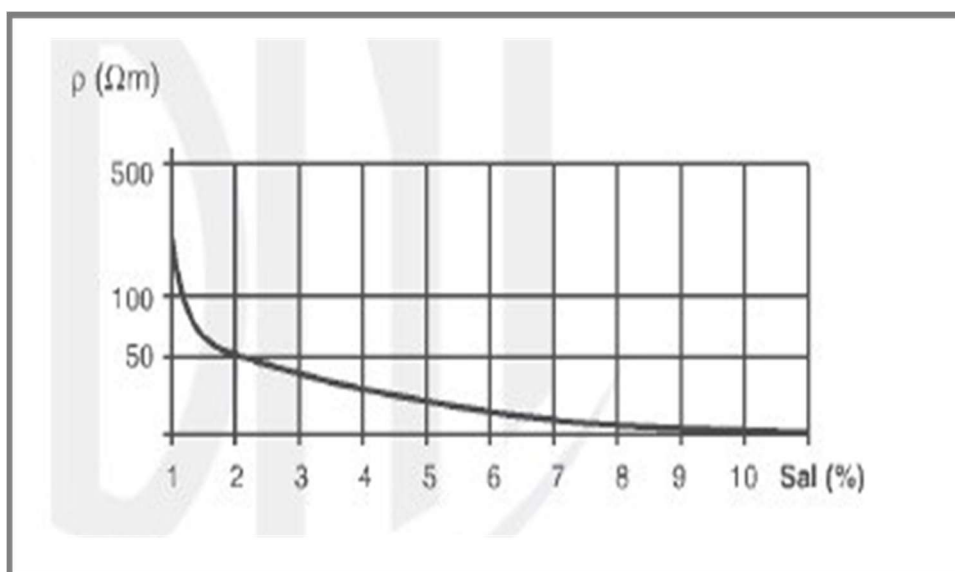
Gráfico 5: Variação da resistividade de acordo com a temperatura



Fonte: NBR-7117 (2012)

A quantidade de sal presente no solo também pode influenciar na sua resistividade. Ao se apresentar uma maior concentração de sais dissolvidos em um terreno, diminui a resistividade e, portanto, melhora notavelmente a condutividade. A água faz com que os sais penetrem para a parte profunda do terreno, para a camada de depósito. Um risco grande são as chuvas excessivas, que lavam o terreno e, portanto, arrastam o sal que rodeia os eletrodos, aumentando a resistividade, a variação da resistividade de acordo com a quantidade de sal é mostrada no gráfico 6.

Gráfico 6: Variação da resistividade de acordo com a porcentagem de sal



Fonte: NBR-7117 (2012)

Visto que a LT possui uma extensão de 17 km, onde ela passa por diversos pontos, desde região montanhosa, onde o solo é muito seco, até a beira de uma barragem onde o solo é bastante úmido, tendo em vista que a resistividade no ponto úmido é consideravelmente mais baixa que na região montanhosa, se as adequações forem as mesmas para os dois pontos, ou haverá desperdício de material na parte úmida, ou ineficiência no aterramento na região montanhosa.

Como não foi medido a resistividade do solo, o ideal é que se faça as adequações por etapa, primeiramente passar todas as torres que estão com a resistência de aterramento acima de 30 Ω para a segunda fase do projeto SAMITRI S/A, 2003, onde contempla cabos contrapeso de 65m, após, realizar novas medições do valor de resistência. As tores que necessitam de adequações são: 3, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 33.

Após as novas medições, as torres que ainda continuarem com o valor de resistência acima de 30 Ω , passa-se para a terceira fase do projeto (SAMITRI S/A, 2003), onde contempla cabos de 75 m, e realizar novas medições.

Após a terceira fase do projeto (SAMITRI S/A, 2003) ser concluída, se ainda existirem torres com a resistência de aterramento com valores acima de 30 Ω , será necessário que aumente ainda mais os cabos contrapesos, como foi mostrado na tabela 5, e de acordo com os cálculos, os locais onde a resistividade do solo for de aproximadamente 5.000 Ω m, será necessário utilizarem cabos contrapeso de até 110 m para obter um resultado esperado, que seria uma resistência abaixo dos 30 Ω , ou até mesmo realizar um tratamento do solo.

Para se realizar o tratamento do solo existem alguns produtos encontrados facilmente no mercado. Estes produtos são basicamente feitos de material condutor, e de baixa resistividade, não-corrosivo, baseado em compostos de carbono que melhora a eficácia do aterramento, especialmente em áreas de baixa condutividade, e alta resistividade, pois eles agem abaixando significativamente a resistividade do solo, aumentando assim sua condutividade. Após aplicado se solidifica, tornando-se um concreto condutivo permanente e não sofre lixiviação, que não se decompõe com o tempo e portanto sem necessidade de manutenções periódicas, suas vantagens são:

- Reduz os valores de resistência e impedância de aterramento.

- Mantém constante o valor da resistência de aterramento durante longos períodos de seca.
- Tem bom desempenho em todas as condições de solo, mesmo depois de prolongados períodos de seca, o produto mantém a umidade, beneficiando sobremaneira a redução da resistividade.
- Não dissolve, não decompõe, nem sofre lixiviação com o passar do tempo.
- Não requer complementações ou substituições periódicas.
- Não requer manutenção.
- Não requer presença contínua de água para manter a sua baixa condutividade.
- Vem em sacos fáceis de manusear,

Porém, o tratamento do solo não seria o mais indicado, pois trata-se de uma linha de transmissão de 17 km de extensão, onde elevaria muito o custo, visto que esse tipo de tratamento seria mais viável para aterramentos de pequenas dimensões.

O ideal para se alcançar os resultados esperados, seria medir a resistividade do solo ao pé de cada torre para realizar a adequação específica para aquela torre, de acordo com a resistividade naquele local, evitando desperdício de material onde a resistividade for menor, ou até mesmo deixando o aterramento ineficiente onde há maior resistividade.

Como não foi medido a resistividade do solo, e os cálculos foram realizados para uma resistividade específica para aquele tipo de solo, o mais indicado seria levar todas as torres que se encontram fora do especificado pela norma NBR 5422, que seriam valores de resistência de aterramento abaixo de 30Ω para a segunda fase do projeto, onde contempla cabos de 65 m, podendo chegar até cabos de 110 m em locais que a resistividade possa atingir $5.000 \Omega \cdot m$, como mostraram nos cálculos anteriores.

8 CONCLUSÃO

O sistema de aterramento em uma linha de transmissão tem como propósito minimizar desligamentos na linha, e danos causados por correntes indesejáveis, na maioria das vezes causados por descargas atmosféricas. Um sistema de aterramento bem projetado é capaz de fornecer um caminho preferencial às correntes indesejáveis, encaminhando-as diretamente para o solo. Para que o sistema de aterramento seja eficiente, é necessário que sua resistência seja o mais próximo possível de $0 \, \Omega$, porém, o aceitável pela norma NBR-5422 é que seja abaixo de $30 \, \Omega$, onde já é o suficiente para sua eficiência.

Para análise e compressão de um projeto de aterramento também é de grande importância a realização da medição da resistividade do solo, utilizando um dos métodos especificados pela norma NBR-7117 (ABNT, 2012), onde existem vários métodos utilizados para tal medições, como detalhados no texto, o método de Wenner, e o método de Schlumberger. Em caso da não medição da resistividade, é necessário que se realize um levantamento do tipo de solo presente aos arredores da LT, pois cada tipo de solo contém um valor de resistividade diferente, e esse valor de resistividade pode afetar diretamente nos resultados do projeto.

A linha de transmissão utilizada como objeto de estudo vem apresentando um péssimo desempenho, onde existem várias ocorrências de desligamentos, e danos causados a equipamentos da LT.

Diante disso, foram medidas as resistências de aterramento em 33 das 34 torres existentes na LT. A resistência da torre 01 não foi medida, pois se encontrava com os cabos contrapeso rompidos, e das 33 torres medidas, 26 delas estavam com o valor de resistência fora do especificado pela norma NBR-5422, ou seja 79% das torres estavam com a resistência de aterramento acima de $30 \, \Omega$. Houve também a confecção de um relatório de sondagem, que demonstra o tipo de solo predominante na região, onde foram ensaiados vários pontos ao decorrer da linha de transmissão. Em praticamente toda a extensão da LT, foram encontrados dois tipos de solos, argila arenosa marrom amarelada, e argila arenosa cinza amarelada. Ou seja, em toda a extensão da linha o solo predominante é a argila, que por sua vez sua resistividade pode variar de $300 \, \Omega \, m$ a $5.000 \, \Omega \, m$.

Através dos estudos realizados concluiu-se que para a linha de transmissão em questão, o mais sugerido seria a medição da resistividade do solo, onde o método de Wenner seria o escolhido dentre outras técnicas indicadas, devido sua simplicidade, e eficiência.

Com a medição da resistividade, consegue-se obter o valor da resistividade exata naquele ponto, para assim calcular a configuração ideal de eletrodos para aquele valor de resistividade, evitando desperdício de material onde a resistividade for mais baixa, ou até mesmo evitando que o sistema de aterramento fique ineficiente onde a resistividade for mais alta, visto que a LT passa por locais onde o terreno é mais seco, ou até mesmo em locais onde o terreno é muito úmido, tendo com isso grandes variações de resistividade, pois, enquanto maior a umidade, menor será a resistividade do solo.

Porém, como foi realizado apenas o processo de sondagem, de forma que se obtém uma resistividade para o tipo de solo predominante na região da LT, e essa resistividade pode variar de acordo com a umidade e temperatura, o ideal é que se faça as modificações por etapa, e em seguida realize novas medições.

De acordo com os cálculos, os locais onde a resistividade do solo é a mínima esperada para o tipo de solo encontrado no local da LT, ou seja $300 \, \Omega \, m$, os cabos contrapeso de 50 m que se encontram na primeira fase do projeto, atendem bem as expectativas, obtendo assim uma resistência de aterramento abaixo de $30 \, \Omega$, já os cabos contrapeso de 75 m que se contemplam na terceira fase do projeto, atendem as expectativas para locais onde a resistividade máxima é de $3.700 \, \Omega \, m$. já em locais onde a resistividade pode chegar a $5.000 \, \Omega \, m$, devem ser colocados cabos contrapeso de 110 m para obter uma resistência de aterramento que seja aceitável pela norma NBR-5422, ou seja abaixo de $30 \, \Omega$.

A realização do estudo de caso no presente trabalho, da referida linha de transmissão, possibilitou a compreensão das diretrizes e procedimentos a serem seguidas para elaboração e execução de projetos, bem como do método correto de medição da resistividade do solo, e da resistência do aterramento, utilizando como referência as normas vigentes para os respectivos sistema de aterramentos utilizados em linhas de transmissão. Também mostrou os benefícios que um sistema de aterramento bem projetado tem para um bom desempenho das linhas de transmissão,

bem como a importância de uma manutenção preventiva com o passar do tempo, e a importância de estar sempre atualizando as normas vigentes para tal procedimentos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA (NBR) 5422. *Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA (NBR) 5419. *Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas*. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA (NBR) 15749. *Medição da resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistema de aterramento*. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA (NBR) 7117. *Resistividade do solo*. Rio de Janeiro, 2009.

ABRADEE. Redes e energia Elétrica. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-elétrico/redes-de-energia-elétrica>. Acesso em 05/19.

BERARDO, B. L. *Estudo do Aterramento dos Pés de Torres de Linha de Transmissão Frente as Descargas Atmosféricas*. 2012. 58p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2012.

BLUME, S.; *Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional*. Wiley: Hoboken, 2007.

CEMIG. *Instrução para aterramento de suportes de linhas de transmissão*. Manual técnico da diretoria de projetos e construções. [S.l.]. 1998.

CHAVES, R. A.; *Fundações de Torres de Linhas de Transmissão e de Telecomunicação*. Dissertação. 2004. 214p. (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2004.

D'AJUZ, A., FONSECA, C.S., CARVALHO, F.M.S., FILHO, J.A., DIAS, L.E.N., PEREIRA, P.M., ESMERALDO, P.C.V., VAISMAN, R., FRONTIN, S.O. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento. Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*, FURNAS, Niterói, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF, Rio de Janeiro, 1987.

DOCPLAYER. *Para raios para aplicação em linhas de transmissão*. Disponível em < <https://docplayer.com.br/9059855-Para-raios-para-aplicacao-em-linhas-de-transmissao.html> > Acesso em: 23 mai. 2019.

ELETRONBRAS. *Energia que impulsionam o Brasil*. Disponível em < <https://www.furnas.com.br/busca?termo> > Acesso em: 22 maio. 2019.

EPE (2015). *Balanço energético nacional 2015*. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Disponível em:< https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf >. Acesso em: 30 abr. 2019.

FILHO, S. V; “*Aterramentos Elétricos*”. Artilber Editora, São-Paulo,2002.

FLICKR. *Linhas de transmissão 230 e 88 kv. Power transmission lines*. Disponível em < <https://www.flickr.com/photos/92036053@N06/9970566845> > Acesso em: 06 jun. 2019.

FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas*. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1977. Volume 2.

GIAROLA, B. N. *Análise da influência de para-raios nas sobretensões atmosféricas por descarga direta em linhas de transmissão considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência*. 2016. 161p. Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal de São João del-Rein, 2016.

GONTIJO, C. R. *Cálculo de torres para linhas de transmissão*. IEA Editora, 1994

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. *Power System Analysis*. 1ª ed. McGrawHill Education, 1994.

HUBBELL POWER SYSTEMS. *Subscribe To The Current*. Disponível em < <https://www.hubbell.com/hubbellpowersystems/en/> > Acesso em: 18 maio. 2019.

IBGE, INSTITUTO NACIONAL DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. *Brasil climas*. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/>> acesso em: 23/09/2019.

INPE, INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Descargas Atmosféricas*. Disponível em <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>> Acesso em: 23 Abr. 2019.

IEEE. *IEEE guide for safety in ac substation grounding*. IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015), p. 1–226, 2015. 29, 30, 33, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 118

IEEE. *IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system*. IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983), p. 1–86, 2012. 33, 34, 39, 51

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Normais climatológicas do Brasil*. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/>> Acesso em 23/09/2019.

INTLLI. *A segurança nas pontas de um fio*. Disponível em <<http://www.intelli.com.br/aplicacoes/aterramento-spda/aterramento-em-transmissao>> Acesso em: 21/09/2019.

JUNIOR, J. S. S. *Sistema de aterramento com cabo contrapeso representado por linha de transmissão implementado em matlab com circuitos em cascatas de π* . 2012. 84p. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica- UNESP, São Paulo, 2012.

KINDERMANN, G; CAMPAGNOLO, J. M.; *Aterramento Elétrico*. Editora Sagra, DC Luzzatto, Porto Alegre, 1995.

LUZ E FORÇA, *Medições / Diagnostico dos aterramentos das torres - LT 69 kV*. Rio Piracicaba, Minas Gerais, 2019.

MAMEDE FILHO, João. *Instalações Elétricas Industriais*. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MARCARINI, Fabiano. *Proteção contra Descargas Atmosféricas Utilizando Para-raios de Óxido de Zinco*. 2012. 46p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MAYER, E. A. N. *Aterramento de uma Linha de Transmissão 138kv em Ambiente Semiárido – Estudo de Caso*. 2018. 82p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTPR. Ponta Grossa, 2018.

MENEZES, V. P. *Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Técnicos*. 2015. 77 p. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, RJ, 2015.

MODENA, J. SUETA, H. *Procedimentos para Medição da Resistividade do Solo*. Revista O Setor Elétrico. 2013. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2012/01/Ed70_fasciculo_aterramentos_cap11.pdf>. Acesso em 30 abr. 2019.

MÚLTIPLA ENGENHARIA E TECNOLOGIA. *Estratificação do solo*. Disponível em<<http://multiplaengenharia.net.br/servico/estratificacao-de-solo/>>Acesso em: 21 Ago. 2019.

NOGUEIRA, R. L. S. *Análise de sistemas de aterramento sob solicitações impulsivas*. 2006. 145p. Dissertação de pós graduação de engenharia da universidade federal do Rio de Janeiro, RJ, 2006.

NOVACON. *Tabela de fios AWG com tabela de conversão para medidas métricas*. Disponível em: <<http://www.novacon.com.br/audiotabawg.htm>>. Acesso em: 30 set. 2019.

O extra. *Incidência de raios aumentam em 2019*. Disponível em:<<http://oextra.net/13450/incidencia-de-raios-aumenta-em-2019>>. Acesso em: 13 maio. 2019.

OLIVEIRA, M. L. F. *Estudo de aterramentos elétricos em baixa frequências utilizando o método sem malha*. 2016. 79p. Programa de pós graduação em Engenharia elétrica. CEFET, MG, 2016.

PARA-RAIO. *Raios no Brasil*. Disponível em:< <http://para-raio.info/proteger-de-raios/raios-no-brasil.html>>. Acesso em: 13 maio. 2019.

PINHEIRO, F. H. C. *Estudo Teórico e Computacional do Desempenho de Linhas de Transmissão de Alta-Tensão na Presença de Descargas Atmosféricas*. 2008. 113 p. Dissertação de mestrado, São Luís, UFMA, 2008.

PINTO, R. L. F. *Análise de Métodos Convencionais na Avaliação do Desempenho de Cabos OPGW em Linhas de Transmissão*. 107 p. COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.

RAGGI, L. M. R. *Projeto de malhas de aterramento: Contribuição ao computo da estratificação do solo*. 2009. 103p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica – CPDEE Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, MG, 2009.

ROCHA, D. P. C; ALELUIA Jr, L. C. *Apostila – Linhas de Transmissão. Apostila Didática*. (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) Instituto de educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Goiânia, 2013.

ROSA, M. *Linha de Transmissão: Critérios de Projetos e Definição do Tipo de Fundação*. 2009. 81p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2009.

SANTOS, R. B. *Apostila de Transmissão de Energia Elétrica 1*. Recife- PE. 2002.

SAMITRI S/A. *Linha de transmissão 69kV, Morro agudo, Rio Piracicaba, Minas Gerais*, 1994.

SILVA, R. J, JUNIOR A. M. O, *Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas e aterramento*. 2004. 103p. Projeto Final apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2004.

SILVA, A. P. *Melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: desenvolvimento de sistema de informações e análise de caso*. 2007. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SINGER, K. S. *Análise estática de torres metálicas treliçadas autoportantes para Linhas de Transmissão*. 2009. 110 p. Dissertação de mestrado em estruturas e, construção civil, Departamento de Engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 2009.

UFPR. *Elettricidade aplicada II*. Disponível em: <
https://www.eletrica.ufpr.br/p/_media/professores:mateus:te243_capitulo_7_-

_aterramento_e_protecao_contra_descargas_atmosfericas.pdf> Acesso em: 18 Abril. 2019.

ZANETTA JR, L. C.; *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. 1. ed. São Paulo. Editora Livraria da Física, 2006.