

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA

ELTON ANTHONY NOVAIS MAYER

ATERRAMENTO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO 138kV EM
AMBIENTE SEMIÁRIDO – ESTUDO DE CASO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

ELTON ANTHONY NOVAIS MAYER

**ATERRAMENTO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO 138kV EM
AMBIENTE SEMIÁRIDO – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel Engenharia Eletrônica, do Departamento de Engenharia Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim de Mira Jr.
Coorientador: Prof. Msc. Percio Luiz Karam de Miranda

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

ATERRAMENTO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO 138KV EM AMBIENTE SEMIÁRIDO – ESTUDO DE CASO

por

ELTON ANTHONY NOVAIS MAYER

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado as 13:30h de 25 de junho de 2018 como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Joaquim de Mira Jr.

Prof. Orientador

Prof. Msc. Percio Luiz Karam de Miranda

Prof. Coorientador

Prof. Msc. Edison Luiz Salgado Silva

Membro Titular

Prof. Dr. Josmar Ivanqui

Responsável pelos TCC's

Prof. Msc. Jeferson José Gomes

Coordenador do Curso

Dedico este trabalho à Deus, por dar-me perseverança e ciência, e a minha família por todo incentivo.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, gostaria de agradecer a Deus por toda força à mim fornecida durante toda vida, e com destaque aos anos decorridos na graduação.

Aos meus pais Cleverton e Elisete, aos meus irmãos Juan e Luiz Henrique, à minha tia Maria Edinil e à minha avó Deolinda, à todos os citados deixo meus sinceros agradecimentos, pois sem o apoio de vocês nada disto haveria se tornado realidade.

Ao meu colega de trabalho Eng^o Raphael Lucas Elbl pelo auxílio organizacional das atividades de fim de curso e pelos ensinamentos profissionais à mim concedidos. Ao meu colega Eng^o Rubens Manoel Simas Neto por todo o suporte fornecido para elaboração deste trabalho, e por todo conhecimento à mim repassado durante os períodos de obra.

Por fim agradeço ao meu orientador, Prof. Joaquim de Mira Jr, por ter me auxiliado e acreditado em minha capacidade. Nos momentos de dificuldades para elaboração deste trabalho, agradeço pela sabedoria de vossa parte para superação dos obstáculos encontrados. Agradeço também ao Prof. Percio Luiz Karam de Miranda pela coorientação e tempo dedicado para elaboração deste trabalho.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa. Tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

(SILVA, Ayrton S., 1990)

RESUMO

Mayer, Elton A. N.. **ATERRAMENTO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO 138kV EM AMBIENTE SEMIÁRIDO – ESTUDO DE CASO**. 2018. 82p. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Engenharia Eletrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.2018.

Os sistemas de aterramentos são componentes de suma importância para garantia de segurança dos meios que envolvem eletricidade, bem como, dos seres vivos que circundam as proximidades de áreas energizadas. Em Linhas de Transmissão, são utilizados de métodos de aterramento que buscam aliar o custo-benefício juntamente com à segurança e a confiabilidade. Logo, buscando confiabilidade e economia, são empregados eletrodos horizontais, também conhecidos como cabos contrapeso para composição destes sistemas de aterramento. O presente trabalho apresenta uma relação dos valores das resistências de aterramento e procedimentos usados para a medição das malhas das estruturas de uma Linha de Transmissão 138kV localizada no estado do Rio Grande do Norte. Foi efetuado um estudo de caso que visa a adequação dos equipamentos e procedimentos utilizados para medição das malhas, perante normativa vigente.

Palavras-chave: Aterramento. Linha de Transmissão. Contrapeso. Resistência de aterramento.

ABSTRACT

Mayer, Elton A. N.. **ELETRICAL GROUNDING OF A 138kV TRANSMISSION LINE IN A SEMIARID ENVIROMENT– CASE STUDY**. 2018. 82p. Completion of Bachelor's Degree in Eletronic Engineering – Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa .2018.

Electrical grounding systems are essential components to ensure the safety of the mediums that envelop eletricity, as well as the living beings that surround the energized area. For the transmission line, we look for the use of grounding methods that combine the cost-benefit to safety and reliability. Therefore, searching for reliability and economy, horizontal electrodes, also known as counterweight cables, are usually used for the composition of these grounding systems. The following paper presents a relation between values of the grounding resistances and procedures used to measure the mesh of the structures of a 138kV Transmission Line located in the state of Rio Grande do Norte. A case study is carried out aiming at the adequacy of the equipment and procedures used to measure the mesh, before current regulations.

Keywords: Grounding. Transmission Line. Horizontal Eletrode. Grounding Resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito equivalente da LT (Modelo PI)	21
Figura 2 – Eletrodo Vertical Implantado	23
Figura 3 – Eletrodo disposto na Horizontal	24
Figura 4 – Esquema de Potencial de Toque	25
Figura 5 – Esquema de Tensão de Passo	26
Figura 6 - Curva de Umidade do Solo	30
Figura 7 – Curva de Temperatura do Solo	30
Figura 8 – Curva de Salinidade do Solo.....	31
Figura 9 – Modelo de Solo Estratificado.....	32
Figura 10 – Arranjo para medição de resistividade de solo pelo método de Wenner.....	34
Figura 11 – Esquema de distribuição de corrente e potencial em um ponto	36
Figura 12 – Sistema de Aterramento em Hastes Simples	39
Figura 13 - Sistema de Aterramento em Hastes Paralelas	39
Figura 14 – Curva de Resistência em função da Dist.	41
Figura 15 - Descarga Atmosférica.....	42
Figura 16 – Curva expressa pela função de Heidler	43
Figura 17 – Isolador com isolamento rompido	44
Figura 18 – Localização do Sistema de Pára Raios	45
Figura 19 – Descarga Incidida Sobre a LT	46
Figura 20 – Detalhe de fixação de Cabos OPGW na LT	48
Figura 21 – Cabo OPGW	48
Figura 22 – Interface de conexão: Sistema de Descida SPDA/Aterramento	50
Figura 23 – Layout de Aterramento Rural	51
Figura 24 – Layout de Aterramnto Urbano.....	51
Figura 25 – Execução de Sondagens.....	54
Figura 26 – Desacoplamento SPDA/Aterramento	56
Figura 27 – Esquema de Medição executado Utilizando Terrômetro.....	57
Figura 28 – Esquema de Posicionamento das Hastes	57

Figura 29 – Esquema equivalente de Aterramento Urbano	61
Figura 30 – Circuito Equivalente sistema de aterramento Rural	64
Figura 31 – Curva de Resistência de Aterramento.....	68
Figura 32 – Fluxograma de Análises Preliminares	70
Figura 33 – Fluxograma de Medição	72
Figura 34 – Esquema de Variação da Haste P1.....	74
Figura 35 – Relação entre escalas BWG/SWG/AWG.....	81
Figura 36 – Terrômetro utilizado nas medições.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistividade por tipo de solo	35
Tabela 2 – Tabela de complementação de fases em área urbana.....	52
Tabela 3 - Tabela de complementação de fases em área rural	52
Tabela 4 – Tabela de medição de resistência de aterramento - 1º Fase	58
Tabela 5 – Tabela de medição de resistência de aterramento - Fase final ..	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATIVAS

ELAT	Grupo de Pesquisa de Eletricidade Atmosférica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ABRADEE	Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SIN	Sistema Interligado Nacional
LT	Linha de Transmissão
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ONS	Operador Nacional do Sistema
OPGW	Optical Ground Wire
SIN	Sistema Interligado Nacional
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas
PT	Permissão de Trabalho
APR	Análise Preliminar de Risco
SPT	Standardt Penetration Test

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1. TEMA.....	15
1.2. PROBLEMA.....	16
1.3. OBJETIVO GERAL.....	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.5. JUSTIFICATIVA.....	17
1.6. METODOLOGIA.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 CARACTERÍSTICAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO 138KV.....	19
2.2 SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	22
2.3 RESISTIVIDADE DO SOLO.....	27
2.4 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....;	35
2.5 NORMAS PARA MEDIÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO.....	40
2.6 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO ...	41
3 DESENVOLVIMENTO.....	47
3.1 LINHA DE TRANSMISSÃO 138KV, OBJETO DE ESTUDO.....	47
3.2 ATERRAMENTO.....	49
3.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS LOCAIS.....	53
3.4 CARACTERÍSTICAS DE SOLO.....	53
3.5 MÉTODOS DA MEDIÇÃO DA RSISTÊNCIA DE ATERRAMENTO....	55
4 ANÁLISE DE RESULTADOS E METODOLOGIAS.....	61
4.1 ANÁLISE DO MATEMÁTICA	61
4.2 ANÁLISE DE EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....	65
4.3 ADEQUAÇÕES DE EQUIPAMENTOS E METODOS	69
5 CONCLUSÃO.....	76
REFERÊNCIAS.....	78
ANEXO A – A ESCALA BWG.....	81

ANEXO B – TERRÔMETRO.....	82
----------------------------------	-----------

INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Os estudos relacionados à resistência de aterramento presente nos sistemas de aterramento são de extrema relevância para compreensão de problemas aliados às linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação proposital de um sistema físico ao solo (FILHO, 2002, p.11). Em termos mais cotidianos, o aterramento elétrico é definido como um caminho proposital destinado a escoar anomalias advindas de uma rede elétrica, seja ela de transmissão ou distribuição de energia elétrica.

Uma possível causa para desligamentos em linhas de transmissão está atrelada ao fato das resistências de aterramento, que são encontradas nas malhas das estruturas, estarem oferecendo altos índices de impedância. A maior parte destes desligamentos em linhas de transmissão é causada pela incidência de descargas atmosféricas. No Brasil cerca de 70% dos desligamentos nas linhas de transmissão e 40% nas linhas de distribuição são causados por descargas atmosféricas (INPE, 2018). A garantia de uma resistência ou impedância de aterramento baixa, implica na diminuição dos problemas causados por desligamentos em sistemas elétricos oriundos surtos e anormalidades de funcionamento.

Um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é formado por: coletores, sistemas de descida e sistemas de aterramento. Segundo o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), que é um laboratório pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil é atingido com cerca de 50 milhões de descargas por ano (ELAT, 2018). Estes dados e conceitos nos chamam a atenção para a importância de um, projeto de malha bem executado, que seja capaz de garantir segurança para os índices exigidos no Brasil.

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

Como objeto de estudo foi realizada a análise de caso do sistema de aterramento de uma Linha de Transmissão localizada no estado do Rio Grande do Norte.

Foram empregados levantamentos analíticos mediante o método de medição executado em campo, bem como as capacidades e limitações do terrômetro, que foi utilizado para a coleta dos resultados. A fim de garantir a confiabilidade sobre os resultados encontrados em campo, todo o procedimento de medição foi analisado em torno da Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 15749, que é norma destinada à medição de sistemas de aterramento com a utilização de aparelhos de medição.

No decorrer do estudo houve a identificação de falhas que colocaram em questionamento a confiabilidade das medições realizadas em campo. A primeira falha está relacionada com a limitação dos cabos oriundos de fábrica que fazem parte do kit básico do aparelho medição (terrômetro), uma vez que estes condutores não possuem a capacidade de alcançar as dimensões lineares necessárias mediante as proposições da NBR 15749. A segunda falha está relacionada com os procedimentos adotados para a execução medição, que por sua vez, encontram –se também fora de norma.

1.2 PROBLEMA

Durante a implantação o sistema de aterramento da referida linha de transmissão localizada em uma região do semiárido os resultados das medições realizadas em campo, chamaram a atenção para um estudo da metodologia de medição empregada, bem como, das limitações do aparelho de medição. Após estudos, são detectadas irregularidades em relação às limitações técnicas do aparelho, e também do método de medição utilizado, perante a Norma Brasileira Regulamentadora 15749. Estas situações colocam em questionamento à confiabilidade dos resultados obtidos.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral compreende a análise do sistema de aterramento, do equipamento de medição e dos procedimentos utilizados para obtenção do valor da resistência de aterramento de uma Linha de Transmissão 138kV instalada em ambiente semiárido. Para avaliação do método de medição empregado, foi feita a comparação dos procedimentos realizados em campo com os procedimentos indicados na norma

vigente à atividade (NBR 15749). Além disso, foi efetuada também a análise das características construtivas e físicas do aparelho utilizado para medição - no caso estudado o terrômetro - perante a NBR 15749.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o estudo de caso proposto, são relacionados os seguintes objetivos específicos:

- Conceituar e entender os parâmetros da Linha de Transmissão utilizada como objeto de estudo, destacando cada item que possua relevância em relação às peculiaridades e ao dimensionamento de projeto.

- Levantar os conceitos empregados no dimensionamento da malha de aterramento, tal qual, todos os parâmetros e variáveis que alteram o resultado final buscado.

- Realizar a análise do método de medição e das características físicas/de operação do terrômetro utilizado, a fim de comparação com as tratativas estipuladas pela norma NBR 15749.

- Efetuar análise técnica dos projetos disponibilizados, que são: sondagem, aterramento em zona rural, aterramento em zona urbana e similares; a fim de levantar modelos matemáticos e analíticos para compreensão do funcionamento e da dispersão física de correntes elétricas pelos sistemas de aterramentos implementados.

- Após a execução dos estudos e análises do procedimento de medição e do aparelho, é feito um apontamento das irregularidades visando elaboração de um modelo baseado em fluxogramas, para ajuste do processo de medição do aparelho, para as características construtivas do sistema de aterramento da Linha de Transmissão analisada.

1.5 JUSTIFICATIVA

A confiabilidade das medições de resistência de aterramento de uma malha, são de grande relevância para a garantia de segurança e prevenção aos surtos e as

anomalias de funcionamento de uma rede elétrica. Dados levantados com confiabilidade, são capazes de assegurar do bom funcionamento de uma malha de aterramento, uma vez que é possível planejar a realização de manutenções e adequações a serem feitas, mediante os parâmetros coletados e analisados. O sistema de aterramento serve também de escoamento para as descargas atmosféricas incididas sobre o Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA). Garantir que a malha de aterramento funcione corretamente, é essencial do funcionamento por completo do SPDA, evitando problemas como: desligamentos ou interrupções do transporte de energia elétrica. Segundo o ELAT, os desligamentos em linhas de transmissão(LT's), acarretam em prejuízos de aproximadamente 600 milhões de reais por ano (ELAT,2018). Sabe-se que a maior parte dos desligamentos em LT's são causados pela falha do conjunto SPDA e Malhas de aterramento.

1.6 METODOLOGIA

A fim da compreensão do método de medição, bem como, da implementação e funcionamento do sistema de aterramento em si, foram realizados acompanhamentos em campo (nos meses de Novembro de 2017 à Fevereiro de 2018) e estudos teóricos baseados em modelos físicos/matemáticos.

Para atestar a qualidade dos resultados é utilizada como base a NBR 15749, que é específica para medições da resistência de tomada de terra. Vale ressaltar que a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é responsável pela normalização de procedimentos e parâmetros técnicos em vários segmentos da engenharia, dentro do território nacional. O uso da norma para elaboração de atividades/projetos é garantia de qualidade, segurança e confiabilidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CARACTERÍSTICAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO 138kV

A linha 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).

Os tipos mais comuns de linhas de transmissão são: linhas aéreas em corrente alternada, linhas subterrâneas com cabo coaxial e linhas em trilhas metálicas. As linhas aéreas, destinadas ao transporte de energia elétrica, constituem a aplicação mais utilizada das linhas de transmissão, uma vez que são responsáveis pelo transporte interestadual e intermunicipal da energia elétrica em todo o território nacional.

As linhas de transmissão no Brasil são classificadas em três tipos conforme seu respectivo nível de tensão de operação (ABRADEE,2018). Segundo a ABRADEE (2018) as linhas com classificação A3 são linhas que possuem tensão de operação de 69kV, sua principal característica é possuírem uma curta extensão, e neste caso são utilizadas para alimentação de subestações voltadas à indústrias (Linhas Expressas) e subestações rebaixadoras voltadas à distribuição de energia. As linhas de transmissão (LT's) de classificação A2, encontram-se em um intervalo de tensão de fornecimento de 88kV à 138kV. As LT's com classificações A2 e A3 são denominadas como redes de subtransmissão e são na maior parte administradas pelas próprias concessionárias responsáveis pela distribuição de energia elétrica. As linhas do tipo A1, são linhas com patamares de tensão superiores ou iguais a 230kV. As LT's classificadas como A1 compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN) e são operadas por concessionárias voltadas apenas à transmissão de energia elétrica.

Uma linha de transmissão de energia elétrica possui quatro principais parâmetros a serem analisados. São eles: resistência, indutância, capacitância e condutância (ROCHA, ALELUIA, 2013, p.23). Mesmo se tratando de um regime de baixa frequência (60Hz), é necessário considerar a capacitância presente entre cabo e solo. Uma vez que os cabos estão carregados, há uma diferença de potencial entre solo e

cabo, similarmente à duas placas opostamente carregadas. O espaço entre cabo e solo é preenchido pelo ar, e que por sua vez, se comporta como fluido dielétrico. Com estas características há a presença um modelo físico similar ao de um capacitor.

Segundo Rocha e Aleluia (2013), a capacitância também se faz presente no espaçamento entre os condutores da LT, uma vez que carregados, os condutores paralelamente podem ser vistos como placas carregadas e preenchidas por um dielétrico. A equação que representa a capacitância entre dois condutores de uma LT é dada por:

$$C = \frac{\pi k}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \quad (1)$$

Onde D_{eq} é a distância equivalente entre os cabos, r é o raio de secção transversal do cabo e k é a constante dielétrica do ar. Do mesmo modo, e com as mesmas variáveis é possível calcular também a capacitância cabo-solo, através da equação abaixo.

$$C = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (2)$$

Onde D é a distância entre o cabo e solo. A unidade de medida para as capacitâncias de uma linha de transmissão é o Faraday por metro (F/m). Para linhas aéreas de transmissão a constante dielétrica é dada por $k=8,85 \times 10^{-12}$. A capacitância é um efeito que pode ser desprezado em linhas curtas, ou seja, menores que 80km de extensão (ROCHA, ALELUIA, 2013 p.25).

A resistência elétrica dos cabos condutores pode ser calculada pela equação clássica abaixo:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (3)$$

Onde l é o comprimento do cabo, ρ a resistividade do material condutor e A é a área de secção transversal do cabo.

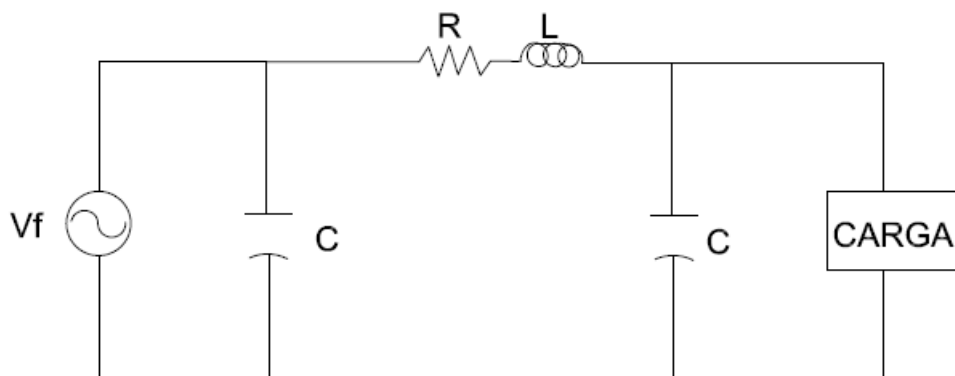
Para o cálculo de indutância são considerados parâmetros como: o raio do condutor, a permeabilidade magnética do ar e também a distância equivalente entre os condutores. Para uma linha trifásica, o cálculo de indutância em um dos condutores é dada pela expressão:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{eq}}{RMG}\right) \quad (4)$$

Considera-se que a μ_0 é correspondente à permeabilidade magnética do ar, D_{eq} a distância genérica entre os condutores e RMG é o raio médio geométrico. O RMG é uma aproximação que busca encontrar valores reais de indutância. Como as linhas de transmissão possuem, em sua maioria, cabos condutores o RMG é encontrado com base em dados de tabela fornecidas pelos fabricantes dos condutores. O parâmetro do raio médio geométrico está diretamente relacionado às propriedades dos materiais empregados na composição do cabo condutor da Linha de Transmissão.

Com o levantamento dos parâmetros significativos em uma Linha de Transmissão, é possível atribuir os valores dos componentes e coloca-los em um circuito equivalente. Este circuito emula os efeitos eletromagnéticos presentes em uma linha de transmissão juntamente às características das reatâncias presentes nos cabos e isoladores.

Figura 1 - Circuito Equivalente LT (Modelo PI).



Fonte: Autoria Própria.

2.2 SISTEMAS DE ATERAMENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para qualquer tipo de sistema que envolva o de eletricidade, é de importância significativa que hajam dispositivos de proteção capazes de garantir a integridade do sistema e dos seres vivos que circundam e usufruam de seus benefícios.

Entende-se por aterramento qualquer ligação proposital de um sistema à terra através de eletrodos, hastes ou cabos (FILHO,2002 p.11). O aterramento é o sistema de proteção responsável por escoar surtos e anomalias que ocorrem em uma LT diretamente para a terra. É de costume adotar a terra como caminho ideal para o escoamento das correntes originárias de condições de surto, devido a característica de potencial nulo, ou seja, a ausência de tensão intrínseca que contribui para que o caminho de menor oposição à passagem de corrente seja o próprio solo.

Segundo FILHO (2002), basicamente existem dois objetivos destinados ao dimensionamento de um sistema de aterramento. O primeiro objetivo de um aterramento é a proteção dos seres vivos e do patrimônio (equipamento) em relação a uma corrente de falta, ou seja, uma corrente de curto circuito. O segundo objetivo de um sistema de aterramento é o direcionamento de maneira controlada por um caminho de baixa impedância, de correntes advindas de descargas atmosféricas ou anomalias de rede (correntes de falta e sobretensões).

O sistema de aterramento em linhas de transmissão de energia elétrica é composto pelos seguintes componentes:

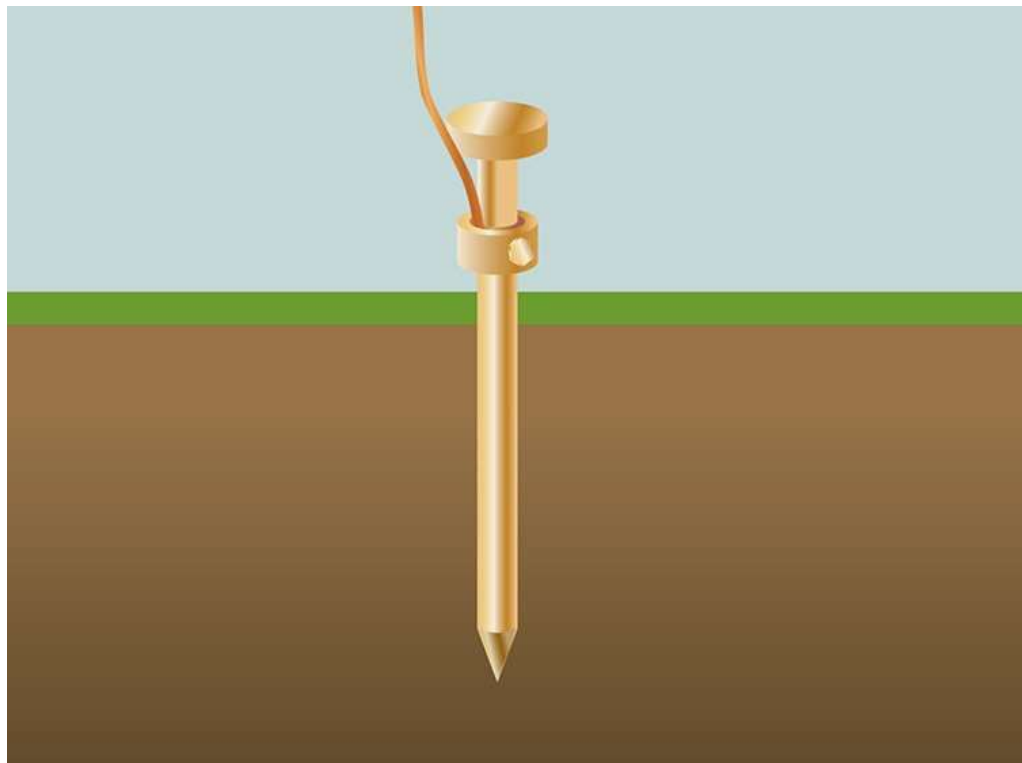
- Os elementos metálicos que compõe a estrutura, tais como vergalhões, mísulas, fundações, *stubs*, tubulões, parafusos e cordoalhas (no caso de estruturas de concreto);
- Dispositivos de aterramentos como hastes, anéis horizontais, contrapesos ou qualquer combinação entre os dispositivos acima que estejam enterrados no solo.

Os elementos metálicos que compõem as estruturas, servem como um sistema de descida para as correntes de falta e correntes originárias de descargas atmosféricas, quando há ausência do condutor de aterramento. Porém também há a possibilidade da utilização de um subsistema de descida. O condutor deve ser capaz

de suportar por determinado tempo a corrente de curto circuito dimensionada da linha de transmissão, bem como, as correntes padrões para uma descarga atmosférica.

O eletrodo é o dispositivo específico que faz a interface entre a terra e massa a ser aterrada. Uma prática muito comum, é o uso de eletrodos locados perpendicularmente em relação a face do solo, popularmente conhecidos como hastes de aterramento ou eletrodos dispostos na vertical (figura 2).

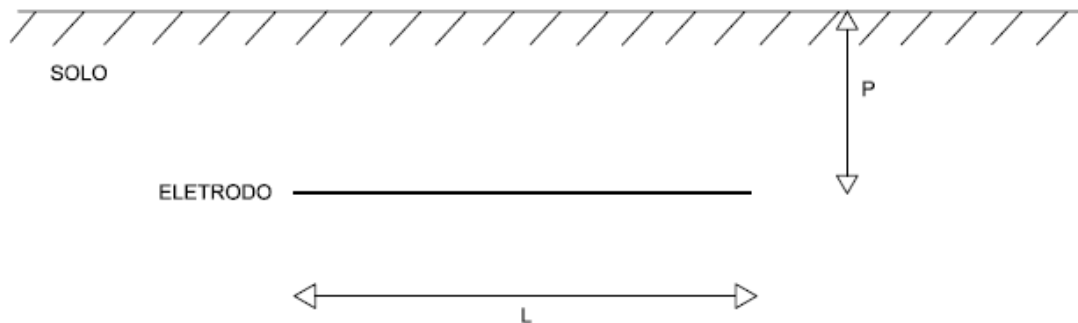
Figura 2 - Eletrodo Vertical Implantado.



Fonte: FLUKE (2018)

Outro método comumente utilizado é a disposição de eletrodos horizontais sob o solo, em termos técnicos, este tipo de configuração pode ser denominada também como aterramento em contrapeso (figura 3). O eletrodo em contrapeso é o método mais utilizado para realização dos aterramentos voltados às linhas de transmissão. Fica a critério da proprietária da linha a escolha do método de aterramento utilizado para o aterramento, visa –se sempre aliar um ajuste técnico/econômico (NBR 5422, 1988 p.19).

Figura 3 - Eletrodo disposto na horizontal.



Fonte: Autoria própria

A norma NBR 5422, é o documento normativo responsável pelas diretrizes de confecção de projetos de redes de transmissão aéreas. 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 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, 1982 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 abaixo:

$$V_{tq} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \cdot I_c \quad (5)$$

Podemos definir as variáveis como:

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;

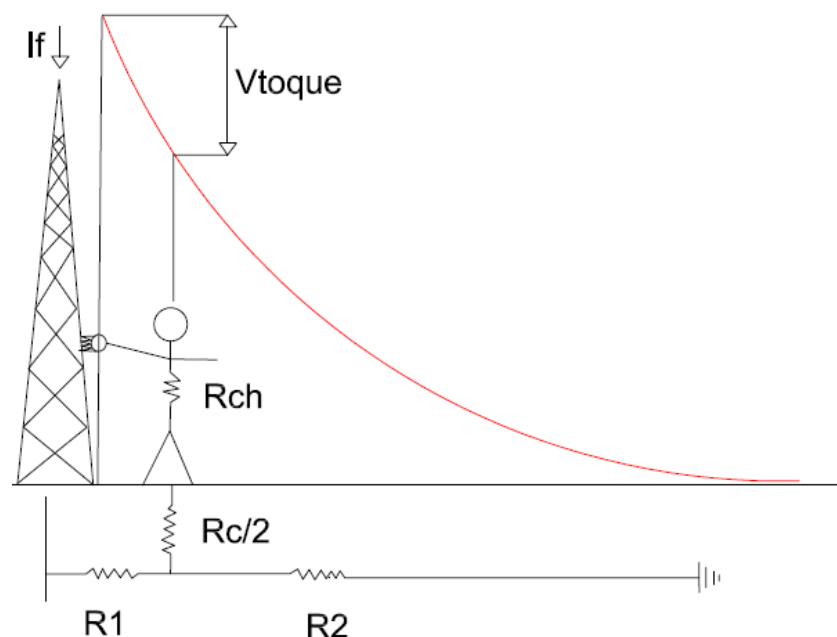
I_c = Corrente que passa pelo corpo humano;

Substituindo os valores e simplificando acima também é possível escrevê-la da seguinte maneira:

$$V_{tq} = (1000 + 1,5\rho_s) \cdot I_c \quad (6)$$

Onde ρ_s é resistividade superficial do solo. Com estas aproximações é possível obter uma estimativa da tensão de toque, tomando como base a figura 4.

Figura 4 - Esquema de potencial de toque.

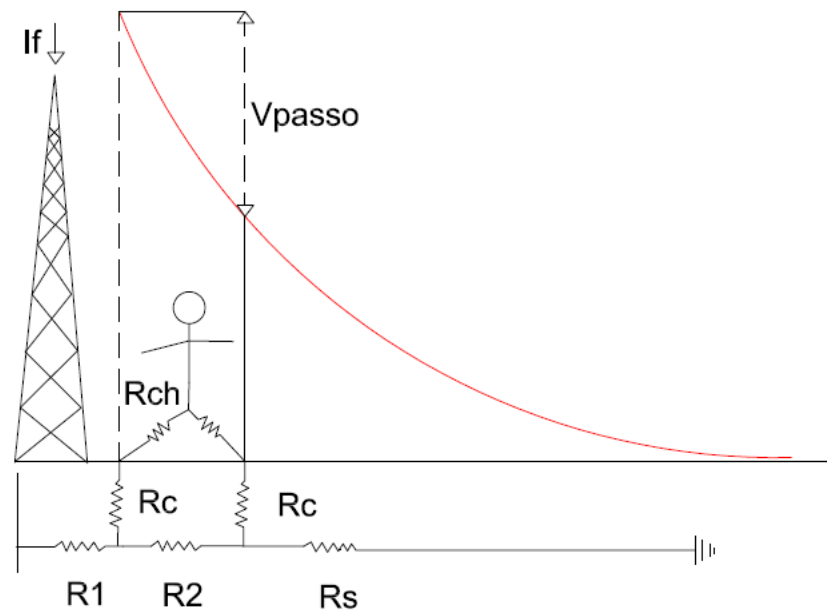


Fonte: Adaptado de KINDERMANN (1995, p .131).

A tensão de passo acontece quando há um afastamento entre os membros inferiores dos seres vivos que trafegam sobre 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 - de certa então forma 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 5 demonstra como funciona o diagrama elétrico para tensão de passo nas proximidades de uma estrutura de Linha de Transmissão.

Figura 5 - Esquema de tensão de passo.



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

Segundo Kindermann (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.

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c) \cdot I_c \quad (7)$$

Substituindo os parâmetros utilizados em (5) e manipulando a expressão 7, é possível obter uma expressão para tensão de passo:

$$V_{passo} = (1000 + 6\rho_s) \cdot I_c \quad (8)$$

Além da tensão potencial distribuída no solo, é preciso considerar também a intensidade de corrente que passa pelo ser vivo, logo, um dado importante a ser considerado é a corrente de fibrilação humana. A fibrilação é considerada como uma anomalia ou contração irregular das fibras constituintes do tecido cardíaco, ou seja, o ventrículo entra num estado caótico e não contrai de forma eficaz (MURAT et al, 2013 pg.1).

Quando uma corrente elétrica percorre o organismo de um ser vivo, dependendo da intensidade da mesma, poderá haver a fibrilação ventricular ocasionando no mínimo danos graves à saúde, e em última instância a morte (DALZIEL,1956). Segundo Dalziel (1956) a corrente de fibrilação humana, ou a máxima corrente suportável de choque, pode ser dada pela seguinte equação:

$$I_{cm} = I_c = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

O índice t representa o máximo tempo de duração da descarga sobre um ser humano com um massa corpórea de aproximadamente 50kg.

Substituindo a [9] em [8] tem – se máxima tensão de passo (V_{pm}):

$$V_{pm} = \frac{116 + 0,696\rho s}{\sqrt{t}} \quad (10)$$

Analogamente, substituindo [9] em [6] é possível levantar o mesmo parâmetro para obter a máxima tensão de toque (V_{tqm}):

$$V_{tqm} = \frac{116 + 0,174\rho s}{\sqrt{t}} \quad (11)$$

Outro aspecto que chama a atenção, é com relação ao pH existente no solo. Segundo NBR 5422 (1982) item 9.5, os materiais para confecção do aterramento deve ser resistente a corrosão empregada pela acidez do solo. Por este motivo são utilizados materiais de Cobre, Alumínio Zinco (Cu, Al, Zn) e também materiais galvanização de superfície. Estes materiais fornecem resistência à corrosão por parte do solo em relação ao sistema de aterramento, prologando a vida útil do sistema de aterramento que será empregado na respectiva linha.

2.3 RESISTIVIDADE DO SOLO

Em sistemas onde há utilização da energia elétrica, o solo é considerado como referencial de tensão nula. Todas as correntes elétricas tendem a se encaminhar para

o solo, pois trata-se teoricamente, do caminho natural de menor impedância e oposição à passagem de corrente elétrica. Porém como o solo é um meio material, haverá oposições à propagação de corrente elétrica, ou seja, haverá uma resistência elétrica em relação dispersão de corrente sobre o solo, e por conseguinte, haverá também uma razão de resistência elétrica do solo por unidade de comprimento.

A resistividade do solo pode ser definida como a resistência elétrica entre as faces opostas de um cubo homogêneo exposto cuja a aresta mede uma unidade de comprimento (NBR 7117, 1981 p.2). Em termos empíricos é a resistência elétrica de uma porção de solo encontrada entre as faces transversais de um cubo com o volume de 1m³.

Conforme definição da NBR 7117, é possível interpretar a resistividade como a resistência dada na porção linear de um metro de comprimento, à este fato, atribui-se a unidade de medida de resistividade elétrica, que é $\Omega.m$ (*Ohm metro*). A resistividade elétrica também pode ser interpretada como o inverso da condutividade elétrica (MOLIN, RABELLO, 2011 p.3).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (12)$$

Em que:

σ = Condutividade elétrica do solo ($S.m^{-1}$)

ρ = Resistividade do Solo ($\Omega.m$)

Fisicamente existem fatores que são capazes de alterar a resistividade do solo, como agentes químicos e físicos responsáveis pela determinação do comportamento de correntes elétricas dispostas sobre/sob o solo. Segundo NBR 7117(1981) a resistividade dependerá do tipo de solo e das condições naturais intrínsecas, tais como: umidade, temperatura e salinidade.

A umidade do solo é corresponde à massa de água contida em um determinado volume de substrato. A NBR 6465 regulamenta a medição de umidade no solo através do ensaio utilizando coleta de um volume determinado de substrato em um recipiente. É possível, então determinar a umidade (%) com base nos seguintes parâmetros: massa do substrato úmido, massa do substrato pós secagem e massa do recipiente. Abaixo, tem-se a equação que mensura a umidade do solo (NBR 6457, 1986, p.8).

$$h = \frac{M1 - M2}{M2 - M3} \cdot 100 \quad (13)$$

Tal que:

M1=Massa do Solo Úmido acrescido à massa do recipiente(g);

M2 = Massa do Solo Seco acrescido à massa do recipiente(g);

M3= Massa do recipiente (g);

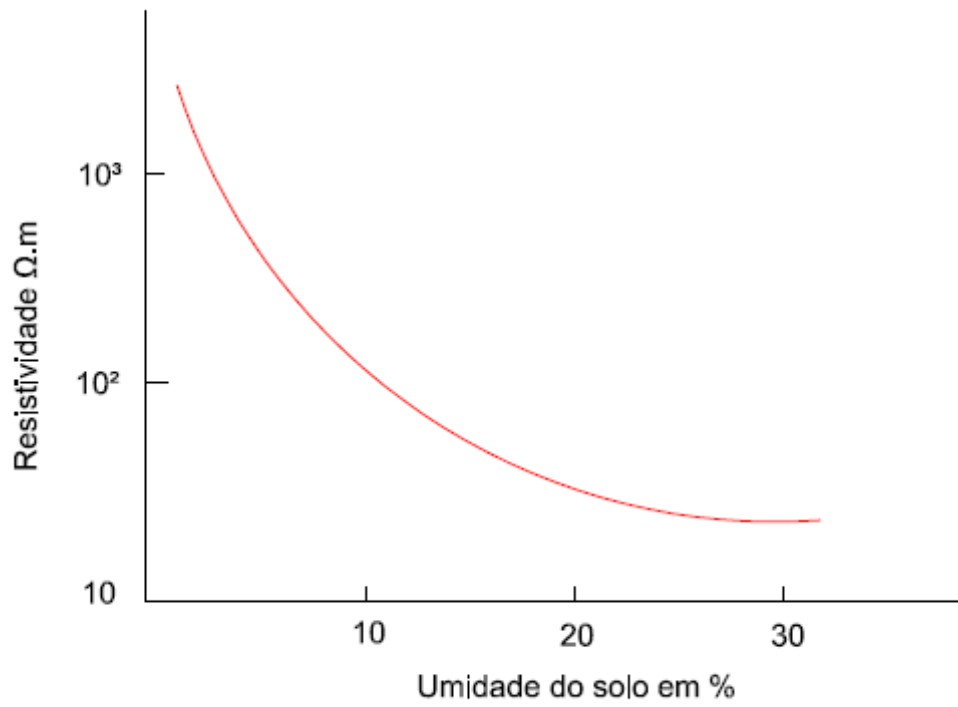
h= Teor de umidade presente no solo (%).

A influência da umidade do solo na resistividade elétrica se dá no fato de que a presença de água facilita a ionização dos sais minerais no solo, deste modo facilita também a capacidade de condução e fluência de corrente elétrica nas três dimensões do substrato. A figura 6, apresenta a curva de umidade resultante.

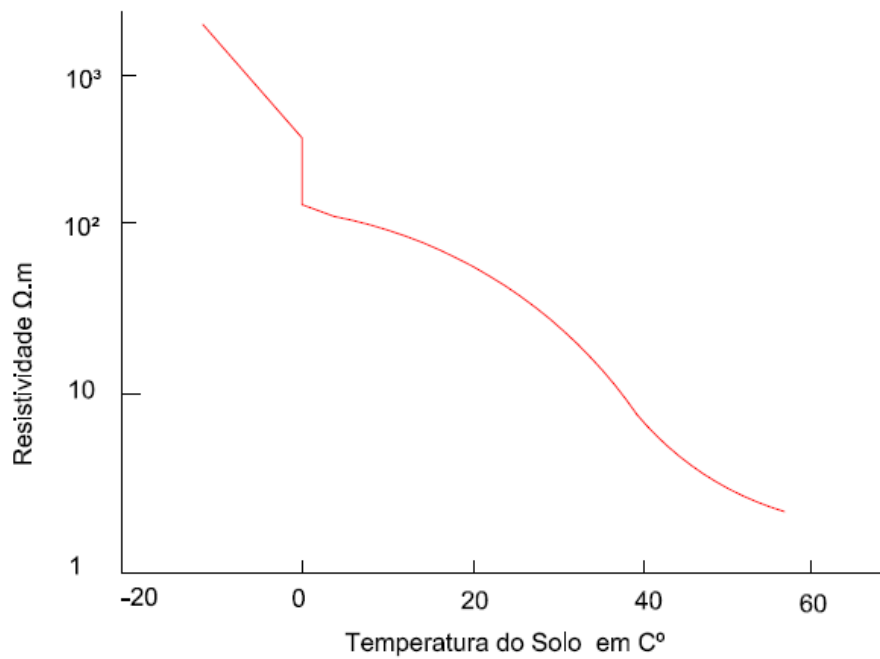
A temperatura é outra variável de importante peso na obtenção da resistividade do solo. Segundo Filho (2002), a temperatura do solo deverá ser analisada por dois pontos distintos, pela temperatura excessivamente elevada e pela temperatura extremamente baixa.

Uma temperatura elevada acarreta numa taxa de evaporação de água do solo mais elevada, e por consequência, a diminuição de água no solo provoca um aumento da resistividade do solo (conforme figura 7). Pelo ponto de vista de temperaturas baixas, a queda torna a matéria mais sólida dificultando a ionização intrínseca, ou seja, diminui o número de elétrons livres no solo para ionização.

Outro aspecto capaz de alterar significativamente o valor da resistividade do solo é a presença de sais minerais contidos na porção de substrato que receberá o sistema de aterramento. Assim como condutividade da água é regida pela presença de sais minerais em sua composição, analogamente a condutividade do solo é regida pela presença dos sais minerais dispostos sob o solo. Quando os sais intrínsecos ao solo juntam-se com um teor considerável de umidade, tal combinação ocasiona em um ambiente altamente condutivo e propício para a queda expressiva da resistividade, conforme apresenta o gráfico da figura 8.

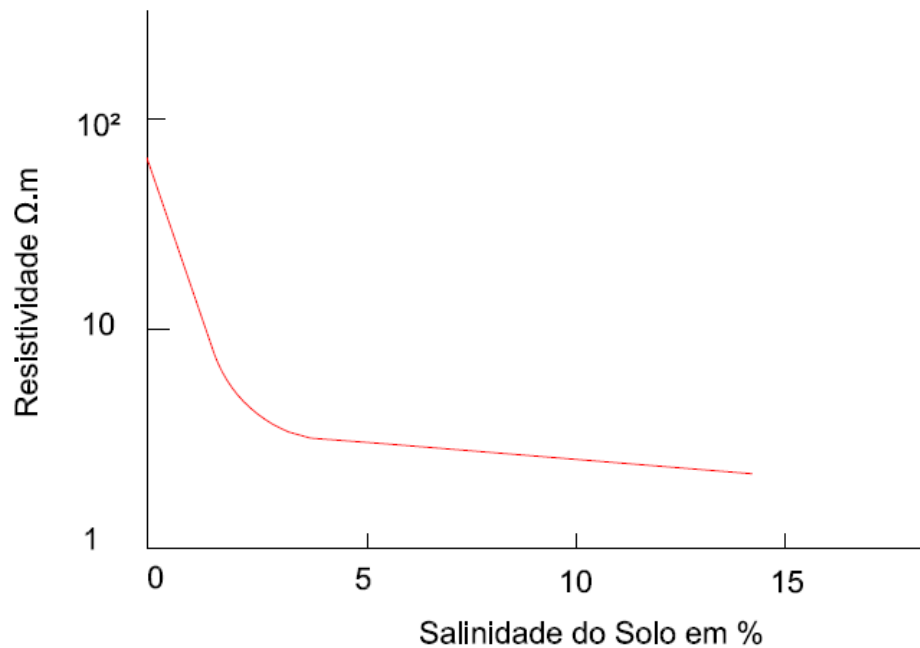
Figura 6 - Curva de umidade do solo.

Fonte: Adaptado de NBR 7117 (1981, p.4)

Figura 7 - Curva de Temperatura do solo

Fonte: Adaptado NBR 7117 (1981, p.4)

Figura 8 - Curva de salinidade do solo.



Fonte: Adaptação NBR 7117 (1981, p.4)

Além dos fatores citados acima, existem outros aspectos que acabam influenciando na resistividade do solo, são eles a compactidade e a granulometria do solo. A compactidade diz respeito ao índice de compactação do solo. Um solo mais compactado possui uma distribuição de pressão maior que um solo menos compactado e por conseguinte, quanto maior a pressão menor será a resistividade do solo. A granulometria é o índice que mensura a dimensão dos grãos que compõe o substrato. Um solo com menor granulometria resultante, garante uma maior retenção de água e por conseguinte uma maior continuidade física, à estes fatores atribui-se uma menor resistividade resultante do solo.

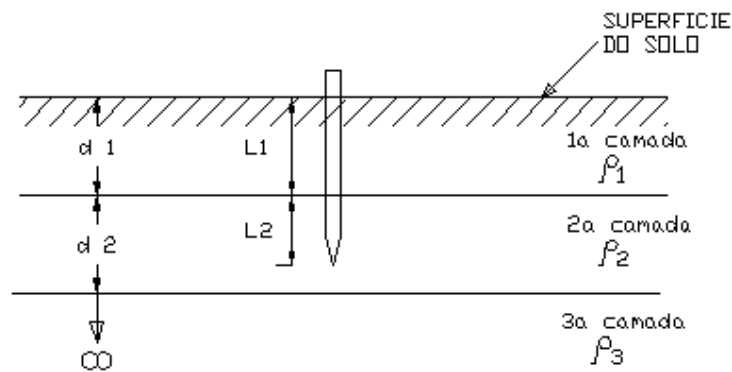
Outro fator bastante questionado é o modelo de estratificação do solo em camadas. A estratificação é definida como a alteração do tipo de solo, em função da profundidade, ou seja, uma distinção de solo em função da profundidade alcançada pelo aterramento. Consequentemente, a resistividade irá ser diferente para as dadas camadas, podendo ser maior ou menor, conforme o tipo de solo encontrado.

As respostas das resistividades, irão influenciar na respostas de corrente elétrica ao decorrer de sua profundidade. Através do modelo de estratificação é possível encontrar uma resistividade aparente. Esse fenômeno ocorre devido à variação do

tipo de solo conforme haja um aumento de profundidade. Para simplificação da obtenção das interferências das resistividades dos diferentes tipos de solo por camada, considera-se a resistividade aparente. Considerando a figura 9, é notável a variação de solo por uma determinada distância, que implicará na porção de comprimento que a haste abrange por cada tipo de solo. Deste modo, possível determinar a resistividade aparente através da equação de Hummel.

Os variáveis d_1 , L_1 , e ρ_1 compreendem respectivamente à distância da porção de solo da primeira camada, a porção de comprimento abrangida pela haste na primeira camada de solo e a resistividade. Os índices d_2 , L_2 e ρ_2 correspondem ao mesmo parâmetros citados para a primeira porção de solo, porém contextualizados para a segunda camada de solo.

Figura 9 - Modelo de solo estratificado em camadas.



Fonte: MERLIN (2018).

$$\rho_a = \frac{L_1 + L_2}{\left(\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}\right)} \quad (14)$$

Quando a haste é capaz de penetrar mais de uma camada, é possível escrever a equação 14 em forma de somatório para as n camadas de solo existentes.

$$\rho_a = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i}{\rho_i}\right)} \quad (15)$$

Outro método bastante popular de modelo de estratificação em camadas é o comportamento eletromagnético do solo na presença de uma corrente elétrica. Segundo Kindermann (1995), há a possibilidade determinar o potencial elétrico em um

determinado ponto do solo utilizando a equação de Laplace, para duas camadas diferentes de solo estratificadas. Considerando a entrada de corrente elétrica I em um Ponto A disperso pelo solo, tem-se um ponto p com uma distância r e uma altura de camada estratificada h . Desenvolvendo respectivamente a equação de Laplace, é obtido:

$$V_p = \left(\frac{I\rho_1}{2\pi} \right) \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (16)$$

Onde:

V_p = potencial da primeira camada de solo em relação ao infinito;

ρ_1 = Resistividade da primeira camada de solo;

h = profundidade da primeira camada

r = distância do ponto p até o ponto A definido de inserção de corrente elétrica.

K = coeficiente de dispersão

O coeficiente de dispersão pode ser encontrado pela relação abaixo:

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (17)$$

Onde:

ρ_1 = resistividade da primeira camada de solo;

ρ_2 = resistividade da segunda camada de solo.

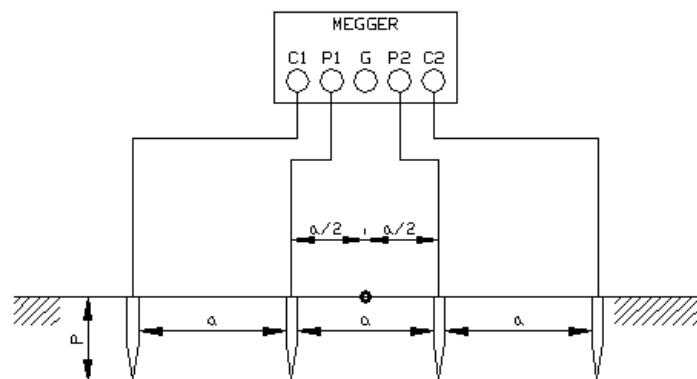
O coeficiente possui variações de -1 até 1, e é uma constante adimensional.

Diferentemente de outros parâmetros, a resistividade do solo é um parâmetro complexo a ser definida, uma vez que possui dependência direta de vários outros fatores, sendo assim não é uma tarefa fácil encontrar a resistividade do solo utilizando métodos analíticos. Porém, existem métodos práticos que são utilizados constantemente para determinar a resistividade na área desejada. Dentre eles, o método mais utilizado e padronizado é o Método de Wenner, que também é conhecido como método dos quatro pontos ou quatro hastes. A Associação Brasileira de Normas Técnicas

(ABNT), dispõe de uma norma brasileira regulamentadora dedicada única e exclusivamente para medição da resistividade da terra utilizando o método de Wenner, identificada como NBR 7117.

O método de Wenner consiste na disposição de quatro eletrodos fixados simetricamente sobre o solo, espaçados entre si por uma mesma distância. Os eletrodos também devem ser cravados firmemente no solo e com a mesma profundidade. Entre os eletrodos das extremidade circula uma corrente controlada. Esta dispersão de corrente é medida em forma de tensão sobre os eletrodos P1 e P2, como demonstrado na figura 10. A distância a referenciada na figura 10 e na equação 18, corresponde à distância que é empregada entre as hastes de medição, estas distâncias devem ser iguais de uma haste a outra. A profundidade p também referenciada na figura 10 e na equação 18 deve ser a mesma para todas as hastes de sondagem.

Figura 10 - Arranjo para medição de resistividade do solo pelo método de Wenner.



Fonte: MERLIN (2018)

Com a tensão e a corrente retornada, é possível por lei de ohm obter um valor de resistência R . Este método possibilita a obtenção da resistividade pontual do solo, de maneira prática com as condições encontradas em campo. Para chegar no valor de resistência de aterramento, é necessário utilizar a equação abaixo.

$$\rho_s = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2 + 4p^2)}} - \frac{a}{\sqrt{(a^2 + p^2)}}} \quad (18)$$

Onde R é a resistência em Ohms que será expressa no visor do terrômetro, a a distância entre as hastes e p a profundidade das hastes. Porém se distância entre as

hastes a é que 20 vezes maior que a profundidade em metros, a equação 18 pode ser simplificada.

$$\rho_s = 2\pi aR \quad (19)$$

Visto que são encontradas as resistividades aparentes do solo, vale ressaltar que para cada tipo de substrato haverá um valor de resistividade, conforme seu tipo, forma, temperatura, granulometria e etc. Segue abaixo tabela de resistividade do solo propostas pela NBR 7117. Estes valores pré definidos, podem ser utilizados para levantamentos prévios e comparações com os resultados de métodos práticos implementados para medição das propriedades intrínsecas do solo.

Tabela 1 - Resistividade por tipo de solo.

Tipo de Solo	Resistividade ($\Omega.m$)
Solos alagadiços limos, humo, lama	até 150
Solos aráveis, argilo-arenosos	50 a 500
Argila	300 a 5000
Areia	1000 a 8000
Calcário	1000 a 5000
Granito e Arenito	100 a 10000
Basalto	10000 a 20000

Fonte: NBR 7117 (1981, p.3)

Os valores acima são tabelados e servem apenas como base para distinguir as resistividades típicas de cada solo. Para elaborar um projeto recomenda-se que sejam executadas medições de resistividade elétrica sobre a área compreendida da malha de aterramento.

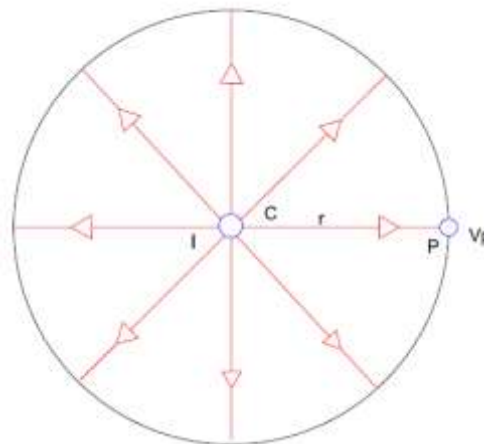
2.4 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Pelo princípio semântico a palavra resistência denota um conceito de oposição relativo à algo ou à alguma ação. Segundo Filho (2002) o conceito de impedância ou resistência de aterramento pode ser definido como à oposição à passagem de uma corrente elétrica injetada no solo, ou no sistema de aterramento.

Por tratar-se de uma conexão ao sistema de aterramento, o eletrodo apresenta uma capacitância, uma resistência e uma indutância. Porém, como as correntes de surto e as correntes utilizadas para medição são correntes com frequências baixas a resistência de aterramento pode ser vista apenas como uma associação simples de resistências em série ou paralelo.

A resistência de aterramento de um sistema pode ser modelada como contribuição da resistência aparente do solo ao redor da malha de aterramento em série com a resistência intrínseca do cabo. Segundo Kindermann (1995) a resistência de aterramento, pode ser deduzida supondo um ponto posicionado sob o solo, conforme a figura 11.

Figura 11 – Esquema de distribuição de corrente e potencial em um ponto.



Fonte: Adaptado de KINDERMANN (1995, p.15)

Há a presença de um ponto “C” concêntrico imerso em um solo infinito, que emana uma corrente elétrica “I”. Primeiramente busca-se o potencial elétrico “ E_p ” do campo em um determinado ponto “P”. Como há uma dispersão eletromagnética de corrente em relação ao solo, considera-se a lei de Ohm para o caso abaixo.

$$E_p = \rho J \quad (20)$$

A constante “J” é correspondente à densidade de corrente elétrica em relação ao ponto P. Superficialmente, a densidade de corrente no ponto P, pode ser expressa como a densidade na superfície de uma esfera, que é modelada por:

$$J = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (21)$$

Fazendo a substituição de 21 em 20 é possível obter o potencial em função da corrente elétrica que é emanada pelo ponto concêntrico c .

$$E_p = \frac{\rho I}{4\pi r^2} \quad (22)$$

Para analisar o potencial elétrico do ponto “p” imerso em um solo infinito, utiliza-se o conceito de distribuição da tensão e elétrica no solo, considerando um raio infinitesimal dr .

$$V_p = \int_r^{\infty} E_p dr \quad (23)$$

Substituindo a 22 em 23, tem-se:

$$V_p = \int_r^{\infty} \frac{\rho I}{4\pi r^2} dr \quad (24)$$

Resolvendo a integral e manipulando a expressão, é obtido o resultado para o potencial disposto no solo.

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (25)$$

Porém aplicando a Lei de Ohm na equação acima encontra-se a equação clássica que descreve resistência de um ponto imerso no solo.

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} \quad (26)$$

Analisando a equação, é possível ver que a resistência de terra R é diretamente proporcional à resistividade aparente do solo no entorno da malha de aterramento. Também é possível ver que a resistência de aterramento é inversamente proporcional à área do condutor utilizado para efetuar o aterramento.

Segundo FILHO (2002) a resistência de aterramento também dependerá da forma e disposição da malha de aterramento sobre o solo. Dentre as várias possibilidades para se efetuar o aterramento em uma Linha de transmissão, uma das mais

usadas corresponde a um eletrodo horizontal de raio r disposto no solo com um comprimento L , sob a superfície com uma profundidade p , conforme demonstrado na figura 3 e a equação 27.

Segundo Kindermann (1995) a resistência de aterramento para um eletrodo horizontal ou contrapeso pode ser expressa por:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L^2}{rp} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad (27)$$

Além do aterramento por contrapesos, em linhas de distribuição (média tensão) e redes de baixa tensão (entradas de serviço) costumam-se usar hastes de aterramento, mediante apresentado na figura 12. As hastes podem ser modeladas segundo Filho (2002) pela equação abaixo.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right] \quad (28)$$

Onde "r" corresponde ao raio do eletrodo.

Outra técnica utilizada é a associação de hastes contínuas em paralelo. Esta técnica é utilizada em linhas de distribuição de média tensão e consiste na locação de hastes interligadas em paralelo, tal que a resistência de aterramento tende a não baixar com a locação de apenas uma haste. As hastes são dispostas verticalmente e interligadas por um condutor. Onde o índice n da equação 29 corresponde ao número de hastes associadas em paralelo, conforme é demonstrado na figura 13.

$$R = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 + \frac{L}{p} \ln \left(\frac{1,781n}{2,718} \right) \right] \quad (29)$$

Onde:

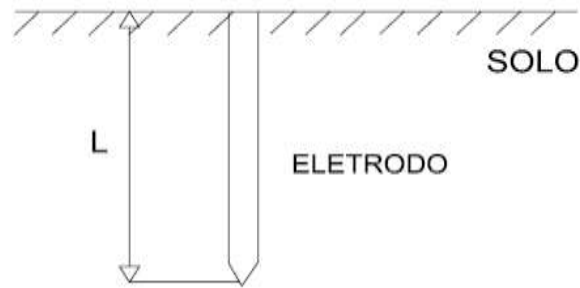
L = comprimento do eletrodo;

P = profundidade do eletrodo;

r = raio do eletrodo.

A associação de hastes em paralelo é comumente empregada em sistemas de distribuição de energia para aterramento de equipamentos (para-raios, religadores, etc.).

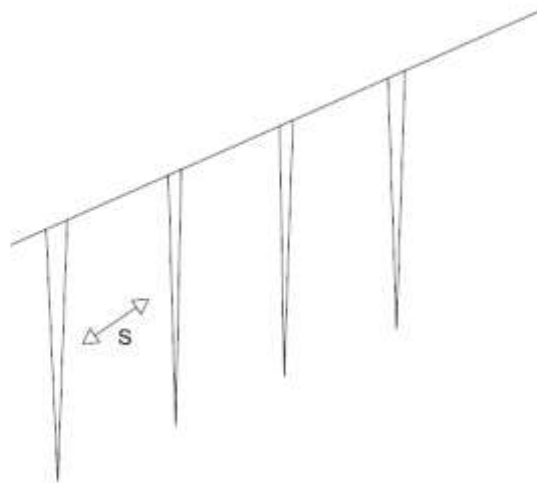
Figura 12 – Sistema de aterramento em hastes simples.



Fonte: Autoria Própria.

Como já mencionado, pelo item 9 da NBR 5422 não há parâmetros para a escolha da resistência ótima de aterramento. A definição da resistência de aterramento é feita pelo projetista, e é válida desde que sejam respeitados os índices de segurança em relação à tensão de toque e tensão de passo. Devido a resistência de aterramento ser diretamente proporcional a resistividade do solo, é necessário levantar um estudo de sondagem e resistividade do solo antes de iniciar as atividades de projeto do sistema de aterramento.

Figura 13 – Sistema de aterramento em hastes paralelas.



Fonte: Autoria Própria.

Para uma linha de transmissão são aceitáveis resistências de aterramento, cujos valores devem estar em um limiar que seja menor ou igual a 30Ω .

2.5 NORMAS PARA MEDIÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

Há uma norma que fornece diretrizes aos projetistas, técnicos e engenheiros perante os procedimentos de medição da resistência de aterramento. A normativa é intitulada como: “ABNT NBR 15749 – Medição da resistência de aterramento e potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento”.

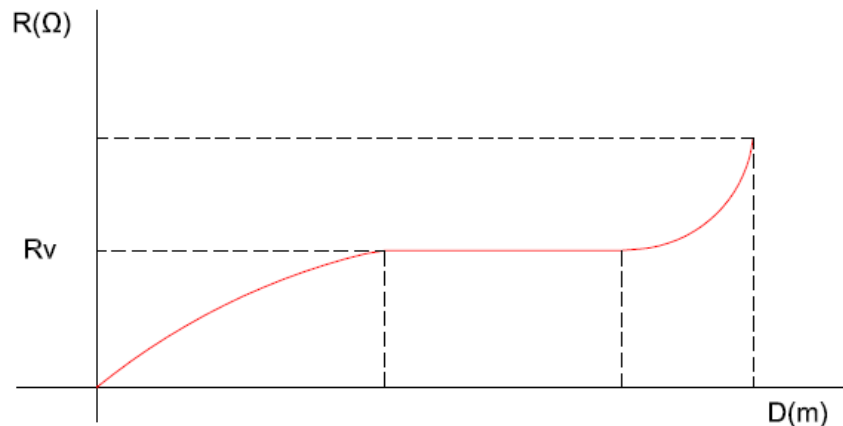
O método da queda de potencial a NBR 15749, descreve como deve ser feita utilização do terrômetro para realização das medições. O terrômetro injeta uma corrente elétrica sobre o solo através de um eletrodo auxiliar de corrente, este eletrodo é conectado na malha de aterramento e irá dispersar uma corrente elétrica, por um determinada área sobre/sob o solo. Há uma sonda de tensão que mede a diferença de potencial presente no solo, nas regiões periféricas à malha. No alinhamento da haste de potencial perpendicular à malha de aterramento há uma haste de sonda de corrente elétrica. O terrômetro capta a leitura de tensão e corrente nas hastes de sonda, e através de lei de ohm básica encontra a resistência de aterramento.

Pelo item 6.1.4 da NBR 15749 o processo de medição ocorre de modo que o eletrodo de potencial se desloque-se a valores de 5% da maior distância do sistema de medição “d”. O perfil de curva da resistência de aterramento em função da distância pode ser descrito pela figura abaixo, conforme a norma.

Para obter uma curva similar à demonstrada na figura 14 é necessário que o eletrodo de corrente esteja à uma distância “d” da tomada de terra (ponto de injeção de corrente de ensaio). Recomenda -se uma variação de posição de 5% do valor da distância “d”, coletando sucessivas medições a fim de levantar a curva. Uma consideração importante é em relação a direção e o sentido do eletrodo auxiliar de corrente e do eletrodo e sondagem de tensão, em todas as variações estes eletrodos devem estar alinhados ou à 180°. O trecho horizontal é corresponde a resistência real de aterramento.

Para um aterramento cuja a maior distância linear seja 10m, recomenda –se que o eletrodo de sondagem potencial seja posicionado à 62% da máxima distância, ou seja a 6,2 metros da tomada de terra ou da malha de aterramento. A haste de sondagem de corrente elétrica é locada em uma distância fora da zona de influência do eletrodo de tensão.

Figura 14 – Curva de Res. de aterramento em função da distância.



Fonte: Adaptado NBR 15749 (2012, p.7)

2.6 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Em uma linha de transmissão podem ocorrer anomalias capazes de provocar desligamentos e danos nos materiais componentes. Os surtos mais comuns detectados durante a operação de uma rede de transmissão de energia, são os curtos circuitos (ou correntes de falta) e as descargas atmosféricas.

Uma descarga atmosférica é denominada como, uma descarga elétrica advinda da atmosférica entre nuvem e solo ou entre nuvem e nuvem (NBR 5419, 2012 p.2).

Pode-se definir descarga atmosférica como um fenômeno transitório e aleatório, que ocorre na atmosfera, tendo como origem uma nuvem de tempestade que se expressa, em seu estágio final, através de um fluxo de corrente impulsiva com alta intensidade em um curto intervalo de tempo através de um percurso constituído pelo canal de descarga. (BERARDO, 2012 p.29)

O tipo de descarga atmosférica que mais ocorre são as descargas atmosféricas negativas descendentes (figura 15). Estas descargas podem incidir de maneira direta ou indireta sobre uma rede, não só de transmissão, mas também de distribuição, telefonia, bem como, qualquer estrutura que ofereça um caminho de baixa impedância para terra.

Os raios são formados por sucessivas descargas intranuvens de menor intensidade (INPE, 2018). A primeira etapa da formação de uma descarga atmosférica é denominada de líder escalonado. Há um campo elétrico formado entre nuvem e solo

e em detrimento deste fato, as cargas negativas do líder escalonado se movem rapidamente por distâncias longas na nuvem. Passados alguns segundos o líder escalonado surge na base da nuvem.

Com a formação do líder escalonado na base há também a formação de um canal de cargas que se direcionam para a terra. A velocidade média das cargas direcionando –se ao solo são de cerca de 100km/s. A intensidade de corrente ao longo do canal é de aproximadamente 1kA, porém no pico de formação do canal, passagem da etapa de líder escalonado para o canal, há um pico de corrente de 30kA. Porém aparelhos de medição em torres são capazes de registrar valores de até 400kA.

Figura 15 – Descarga Atmosférica.



Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2010)

Uma descarga atmosférica pode ser modelada por uma função descoberta por Heidler. Todo o processo de descarga atmosférica dura em média de 60 segundos (VASCONCELLOS, MOREIRA, 2017 p.2). A equação de Heidler é dada pode ser expressa abaixo:

$$F(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}{\left(1 + \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{\frac{1}{n}} \right)} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (30)$$

Onde:

I_0 = Amplitude de corrente na base do canal;

τ_1 = constante de tempo relacionada ao tempo de frente de onda de corrente;

τ_2 = constante de tempo relacionada ao tempo de decaimento de onda de corrente;

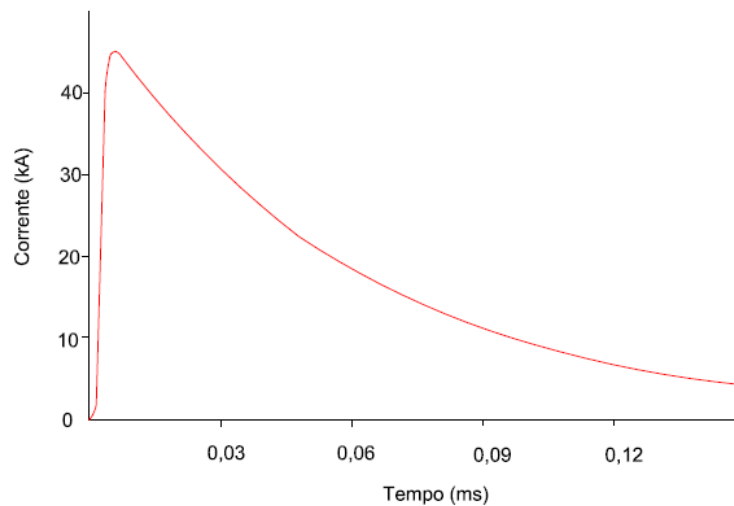
n = expoente de ajuste da função de Heidler;

η = fator de correção de amplitude.

$$\eta = e \left(\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right) \left(\frac{n\tau_1}{\tau_2} \right) \right)^{\frac{1}{n}} \quad (31)$$

De maneira gráfica a função de Heidler pode ser expressa pela curva abaixo (figura 16). A função de Heidler é amostrada em um tempo na casa dos mili segundos, uma vez que a velocidade de propagação de uma descarga elétrica é cerca de 100km/s.

Figura 16 – Curva expressa pela função de Heidler.



Fonte: VASCONCELOS e MOREIRA (2017, p.2)

Segundo a NBR 5419 (2012) existem eventos que podem devem ser considerados, uma vez que a linha de transmissão está sujeita à descargas atmosféricas questão?

- Descargas na estrutura;
- Descargas próximas à estrutura;
- Descargas em linhas conectadas à estrutura;
- Descargas perto de uma linha conectada a estrutura;
- Descargas em uma outra estrutura na qual a linha é conectada.

Para linhas de transmissão existe a possibilidade da incidência de descargas diretas nas torres, descargas próximas à torre. Outro caso importante são de descargas incididas diretamente sobre o condutor da linha de transmissão. Ambos os eventos comprometem e colocam em risco a continuidade da operação da LT, para evitar estas situações as linhas sempre possuem para-raios (ou cabos guardas).

Porém, mesmo com a presença de cabos para-raios, ainda existem ocorrências de surtos capazes de provocar desligamentos na linha de transmissão. Ambos são fenômenos oriundos de descargas atmosféricas que atingem a rede são eles: flashover e backflashover.

Segundo o INPE(2018) o flashover ocorre quando uma descarga atmosférica atinge diretamente os cabos condutores da LT. A sobretensão incidida diretamente sobre os condutores é capaz de romper o isolamento das cadeias de isoladores que garantem o isolamento elétrico entre a estrutura e os condutores. Este tipo de fenômeno também é conhecido como Descarga Disruptiva Direta (BERARDO, 2012).

Quando é rompido o isolamento entre os condutores da LT e os isoladores da estrutura o caminho que possui a menor impedância para escoamento da corrente elétrica, acaba sendo os próprios cabos condutores da linha de transmissão. A figura 17 apresenta um isolador com isolamento rompido. O módulo de sobretensão adicionado à tensão operação da LT, além de romperem o isolamento, ocasionam o surgimento de um arco elétrico, à este efeito se deve a origem do termo *flashover*.

Figura 17 – Isolador com isolamento rompido.

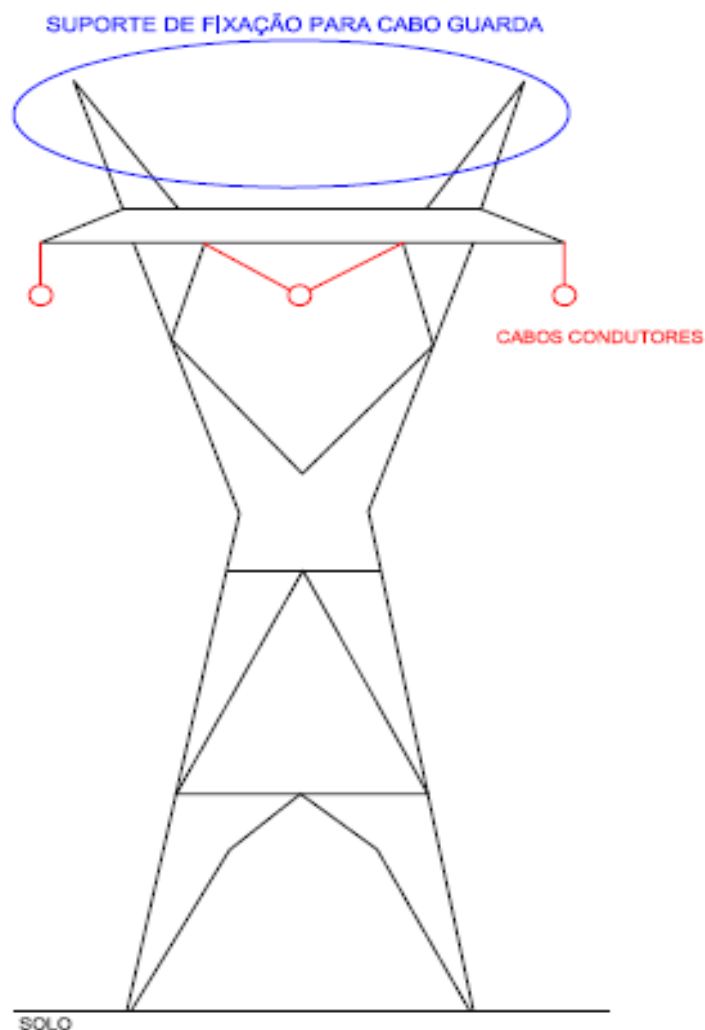


Fonte: INMR (2017)

Para prevenir desligamentos de uma LT ocasionado por um *flashover* é necessário um bom dimensionamento do SPDA a fim de diminuir a possibilidade de uma incidência direta de uma descarga atmosférica nos cabos condutores da linha originária.

Outro fenômeno capaz de causar desligamentos em uma linha de transmissão é o *backflashover*. Este fenômeno ocorre quando uma descarga atmosférica incide sobre os cabos guardas (figura 18) da Linha de Transmissão (BERARDO,2012). Se a resistência de aterramento da malha sobre a estrutura estiver com elevados índices, ou foi maior que a impedância equivalente da LT, haverá um retorno da corrente da descarga atmosférica sobre o eletrodo.

Figura 18 – Localização do sistema de pára-raios.



Fonte: Autoria própria.

O sistema de descida é conectado a parte desenergizada dos isoladores, que por sua vez sofrerão interrupções, fazendo com que a corrente de retorno atinja aos cabos condutores, provocando o desligamento da LT. Este comportamento denomina-se *backflashover*.

O método preventivo mais eficaz contra o *backflashover* é o dimensionamento correto da malha de aterramento sobre os pés das estruturas, além disso realizar o aferimento da resistência de aterramento periodicamente a fim de evitar possíveis desligamentos e comprometimentos com as estruturas.

Figura 19 – Descarga Incidindo sobre LT.



Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais(2018)

Há também a ocorrência de desligamentos ocasionados devido à incidências indiretas sobre as LT's. Quando uma descarga atmosférica de alta intensidade atinge o solo, ou a outra estrutura próximo a linha de transmissão, haverá a dispersão de um campo eletromagnético de extrema intensidade. Este campo é capaz de induzir tensões sobre os condutores, ocasionando novamente sobretensões e consequentemente desligamentos na LT.

3 DESENVOLVIMENTO

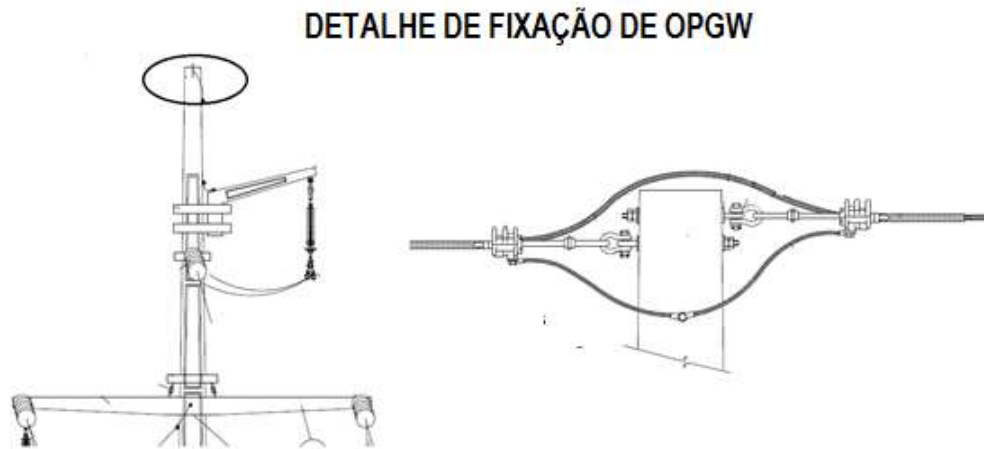
3.1 LINHA DE TRANSMISSÃO 138kV, OBJETO DE ESTUDO

A linha de transmissão, que é o objeto de estudo foi construída, aproximadamente à 50km do Município de Mossoró no estado do Rio Grande do Norte. Possui aproximadamente 14km de extensão e por ser da classe de tensão de 138kV é classificada como tipo A2, ou seja, não é diretamente operada pelo ONS (Operador Nacional do Sistema), logo, a energia é transportada até uma subestação seccionadora/distribuidora pertencente à concessionária local responsável por operar as LT's da região. Lá a energia é mensurada e faturada.

A linha é composta por 53 estruturas de concreto (postes tipo duplo "T") de diferentes cargas mecânicas e tamanhos, que são responsáveis pela sustentação dos demais elementos componentes da LT, tais como: as cadeias de Isoladores, os cabos condutores e o cabo OPGW (figura 21). Na parte mais alta de todas as estruturas encontram-se os arranjos da passagem e ancoragem do cabo OPGW (figura 20). A sigla OPGW vem do inglês *Optical Ground Wire*, ao pé da letra a tradução significa, fio óptico de aterramento (MELLO, 2017).

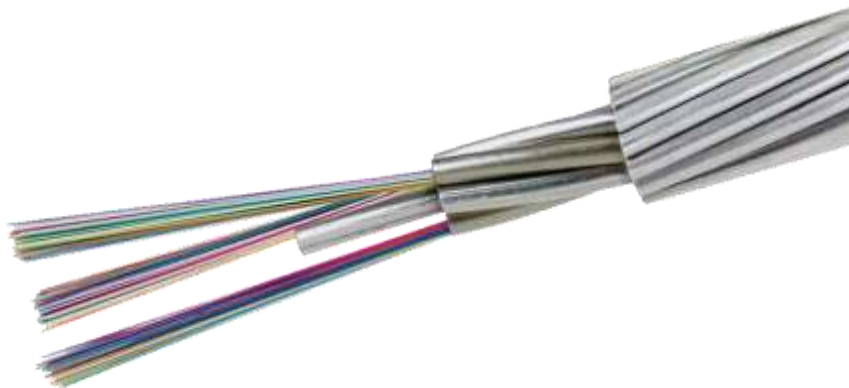
A parte interna do cabo OPGW é composta de fibra óptica revestida por cabos de aço com superfícies recobertas em alumínio. A parte externa do cabo é recoberta por um material ferromagnético, o cabo pode ser visto como um cilindro de comprimento infinito cujo a espessura do cabo é o diâmetro deste cilindro virtual. Analisando cilindro com interior oco, nota –se que o campo eletromagnético é nulo, ou seja, há uma aplicação prática do princípio da Gaiola de Faraday. Como comporta-se como uma Gaiola de Faraday, além de transmitir dados o cabo OPGW também é utilizado como cabo guarda, que compõe o SPDA por toda a extensão da LT. Por ser utilizado como cabo guarda, funciona como uma espécie de captor de descargas atmosféricas e deve ser conectado ao subsistema de descida. O subsistema de descida por sua vez é conectado ao sistema de aterramento, que por sua vez irá dispersar as correntes que são advindas de anomalias da linha de transmissão.

Figura 20– Detalhe de fixação de cabos OPGW na LT.



Fonte: Acervo próprio

Figura 21 – Cabo OPGW



Fonte: TELETCHNO (2018).

Na LT estudada, foi utilizado em sua construção um cabo OPGW 115mm² com até 48 fibras ópticas, com a resistência elétrica do cabo de fábrica (20°C) é de 0,454Ω/km. Para os 14km tem-se uma resistência equivalente de 6,35Ω.

O cabo OPGW é conectado ao sistema de aterramento através de uma cordoalha de cobre embutida internamente nas estruturas de concreto. A conexão é feita através de um presilha bifilar tanto na parte inferior, quanto na parte superior da estrutura.

Além de garantir o funcionamento do sistema de aterramento, o OPGW utilizado na linha de transmissão também é responsável pela transmissão de dados. Os

dados levantados na Subestação (SE) Coletora são comparados com os dados levantados na SE Seccionadora. Essas informações são capazes de amostrar índices como perdas na linha, potência gerada e potência faturada, valores reativos e ativos de energia. Todos os parâmetros citados irão impactar diretamente na quantidade de entrega de energia na Subestação Seccionadora.

A saída do transformador tem seus enrolamentos secundários ligados em topologia triângulo, ou seja, a linha de transmissão é composta de três cabos condutores elevados à uma tensão de aproximadamente 138kV. O cabo condutor utilizado é constituído da liga de alumínio 1120, com bitola 659,1 MCM que é corresponde à um diâmetro de 22,73mm. Estas características garantem que o cabo suporte uma corrente de regime permanente de 864 A, ou seja, o uso deste cabo permite o equivalente máximo de potência de 206,5MVA cerca de quase 3 vezes a potência instalada da SE Coletora. Vale ressaltar que há uma projeção de ampliação no projeto, por este motivo o cabo encontra-se superdimensionado em relação a potência atual instalada.

3.2 ATERRAMENTO

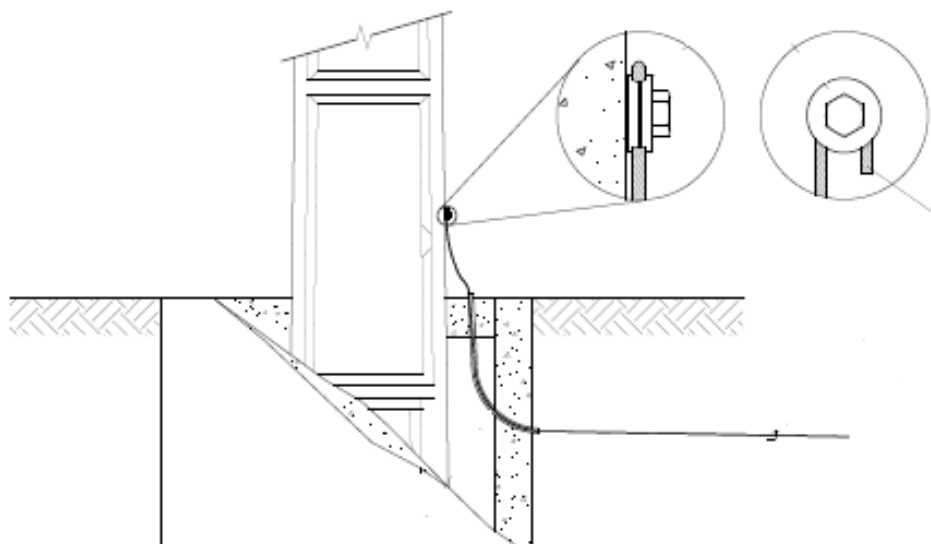
O método de aterramento executado nas estruturas da LT, dispõe da utilização de eletrodos horizontais posicionados à uma dada profundidade sobre a porção de solo nas proximidades das estruturas. Esta configuração de aterramento que é tipicamente utilizada em linhas de transmissão, traz benefícios como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

Para a LT 138kV, foram utilizados como eletrodos cabos de bitola 4BWG em aço galvanizado. A escolha do aço galvanizado se deve em relação aos índices de corrosão do solo em relação ao eletrodo. Segundo o Anexo C da NBR 5422, a escolha dos materiais que constituem as malhas de aterramento das LT's, está relacionada com o "pH" constituinte do solo. Devido à este aspecto, opta-se por utilizar na LT um cabo que possui sua superfície externa galvanizada à fogo. Esta superfície galvanizada deve garantir que o sistema de aterramento não sofra falhas ocasionadas pela corrosão dos eletrodos durante ao menos a vida útil dimensionada da LT.

A malha de aterramento da estrutura deve ser conectada aos cabos guardas e aos suportes de cadeias de isoladores, para escoamento das correntes provenientes

dos surtos que podem eventualmente ocorrer na rede. Há uma cordoalha que realiza a conexão do sistema de aterramento com as massas que precisam ser aterradas, Esta cordoalha compõe o subsistema de descida e este condutor se encontra protegido por um eletroduto, na parte interna do poste. A interconexão entre o sistema de descida e a malha de aterramento ocorre através de dois conectores tipo presilha bifilar para cabos de bitola 4BWG e um parafuso de 5/8". O parafuso também é galvanizado a fogo e é afixado em uma porca interna que garante contato com o sistema de descida. A figura 22, apresenta a conexão entre o subsistema de descida e a malha de aterramento. Independentemente do tipo de projeto (rural ou urbano), a conexão será realizada desta maneira para todas as estruturas.

Figura 22 – Interface de Conexão: Sistema de Descida SPDA/ Aterramento.



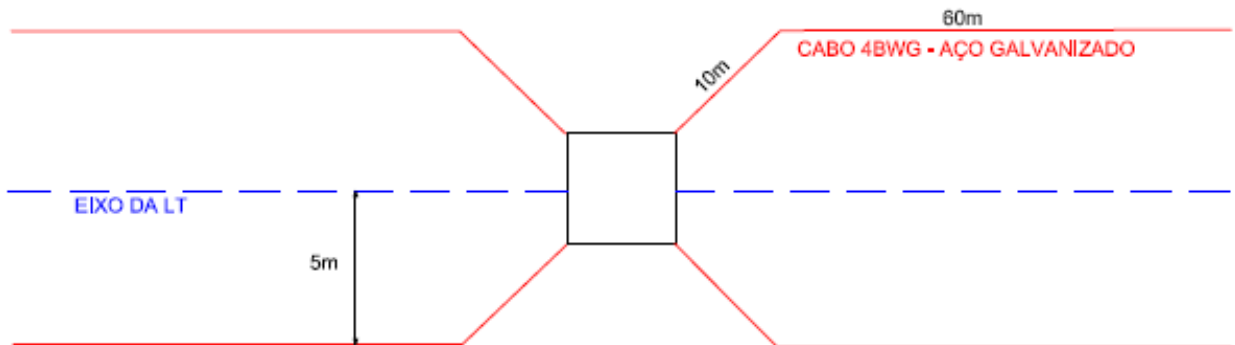
Fonte: Acervo próprio ¹

Cerca de 60% das estruturas da referida LT, encontram-se na zona rural do município, e cerca de 40% das estruturas estão localizadas na zona urbana. Os projetos das malhas de aterramento foram divididos em dois tipos: “Aterramento Rural” e “Aterramento Urbano” (Figuras 23 e 24, respectivamente). A divisão ocorre em função da utilização da faixa de servidão da Linha, uma vez que, na Zona Rural há mais espaço para ocupações do que na Zona Urbana.

¹ O **Acervo Próprio** é um acervo de projetos cedido para estudo por parte das empresas participantes da obra. Contempla cerca de 90 projetos, que compõem a LT.

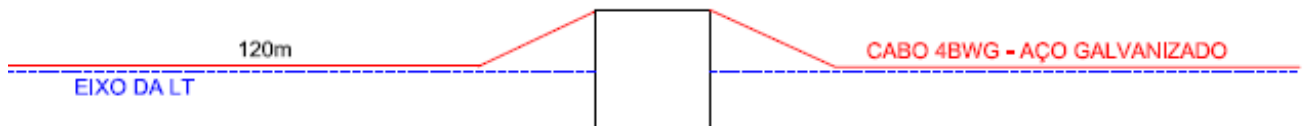
Há também uma distinção relacionada à profundidade dos eletrodos para cada aplicação (Rural ou Urbana). Em áreas cultiváveis, com passagens de veículos ou outras atividades cotidianas, adota-se uma profundidade média de aproximadamente 90cm. Para áreas não cultiváveis e sem a passagem de veículos opta-se por utilizar uma vala mínima de 60cm.

Figura 23 – Layout de Aterramento Rural.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Layout de aterramento urbano.



Fonte: Autoria própria.

Após o lançamento dos primeiros condutores foram realizadas medições de aterramento para definição da quantidade de condutores a serem complementados, caso fosse necessário, nas malhas de aterramento. O projeto foi dividido em 4 fases para a área rural, e 3 fases para a área urbana. A tabela abaixo demonstra as fases de execução de projeto para as malhas localizadas dentro do perímetro urbano do município onde a LT está localizada.

Tabela 2 – Tabela de complementação de fases em área urbana.

Valores Medidos de Resistencia	Tipo de Fase	Complemento
Até 15 Ω	Fase I	2x10m de Cabo 4BWG (obrigatório)
De 15 Ω à 33 Ω	Fase II	2x20m de Cabo 4BWG
De 34 Ω à 61 Ω	Fase III	2x40m de Cabo 4BWG

Fonte: Acervo próprio.

O primeiro passo foi lançamento de duas seções de cabos de 20m para ambos os lados dentro da faixa de domínio da LT. Após 3 dias para normalização do solo foi realizada a primeira medição.

Perante o resultado da primeira medição e conforme tabela a 2 a malha de aterramento é complementada com as respectivas quantidades.

No caso do sistema de aterramento rural, o processo construtivo se mantém, tal como descrito nos procedimentos de execução de malha de aterramento urbana. Primeiramente foram lançadas 4 seções de 10m de cabo 4BWG em uma determinada inclinação dentro da faixa de domínio da LT. Passados três dias para volta das condições normais de solo, foi realizada a primeira medição. Conforme análise dos resultados, foi escolhida então qual a quantidade a ser complementada mediante exigências de projeto. A tabela 3, demonstra qual a quantidade de cabo 4BWG a ser complementada.

Tabela 3 – Tabela de complementação de fases em área rural.

Valores Medidos de Resistencia	Tipo de Fase	Complemento
Até 15 Ω	Fase I	4x10m de Cabo 4BWG (obrigatório)
De 15 Ω à 33 Ω	Fase II	4x20m de Cabo 4BWG
De 34 Ω à 61 Ω	Fase III	1x40m de Cabo 4BWG
Acima de 61 Ω	Fase III	4x60m de Cabo 4BWG

Fonte: Acervo próprio.

Para realizar emenda entre os cabos dispostos como eletrodos horizontais, foi utilizada uma luva de compressão para cabo 4BWG, galvanizada a fogo e a compressão foi feita através de uma alicate de compressão Y35. Ao todo foram lançados aproximadamente 12 mil metros de cabo 4BWG, para atender as respectivas fases de projetos solicitadas.

3.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS LOCAIS

O clima do estado do Rio Grande do Norte para a mesorregião onde localiza-se a linha de transmissão, ou seja, a 50km da cidade de Mossoró é um clima típico semiárido. A precipitação de chuvas durante o ano na região em questão foi de aproximadamente 765mm por ano. Os piores meses do ano são os meses de Setembro, Outubro e Novembro, cuja precipitação mensal não passa de 10mm.

Segundo dados da estação meteorológica (INMET,2018) de uma cidade a aproximadamente 80km do local onde está situada a linha transmissão, entre os meses de outubro à dezembro de 2017 a mínima precipitação ocorreu no mês de outubro com cerca de 3.6mm de precipitação. Já nos meses de Janeiro a Março de 2017 há uma média de 124mm de precipitação. Os dados foram retirados do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os meses em questão foram escolhidos por corresponderem aos menores e maiores índices de precipitação respectivamente. Estes dados configuram e expressam o comportamento do clima potiguar em relação ao volume de chuvas. Nota -se que em aproximadamente 8 meses do ano, a precipitação de chuva é quase nula, o que é uma característica latente do clima semiárido.

3.4 CARACTERÍSTICAS DE SOLO

Como a linha de transmissão está localizada em um ambiente com características semiáridas, é de se esperar que o solo no entorno das estruturas de sustentação possuam características de baixa umidade e compacidade.

Para os estudos de fundações de estruturas, houve a confecção de um relatório de sondagem, conforme exigência do cliente, que demonstra o tipo de solo predominante na região. Foram ensaiadas as 53 estruturas que compõem a LT.

O método de sondagem utilizado foi o SPT, *Standart Penetration Test* (figura 25), também popularmente conhecido como sondagem à percussão que consiste na penetração de um amostrador padrão com diâmetro interno de 34,9mm e diâmetro externo de 50,8mm acoplado a hastes de perfuração. O sistema é composto de um

tripé que sustenta um peso de 65kg. Na haste é feita uma marca nos 45 cm a partir de sua ponta, e então são feitas marcas de 15 em 15 cm. O peso é solto à uma altura de 75cm sobre a haste. São realizados sucessivos golpes até que a haste atinja a marca de 45cm, o número de golpes dos últimos 30cm marcados na haste serão responsáveis por determinar qual o tipo de solo encontrado.

Figura 25– Execução de sondagens.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados da sondagem apontaram a predominância de dois tipos solos: areia e silte arenoso e argila e silte arenoso. Ou seja, há predominância de solos arenosos e solos argilosos durante a maior parte da faixa de domínio da LT. Horizontalmente há uma estratificação do solo. O primeiro horizonte é composto em sua maior parte de areia fina e siltosa e o horizonte seguinte composto de arenito, de cor vermelha predominante. No segundo horizonte, na maior parte das atividades de sondagem, houveram registros de impenetrabilidade, configurando solo com rocha ou de extrema compactação.

A profundidade média penetrável no solo na LT, é de aproximadamente 3,3m. Vale ressaltar que que houveram intervalos extremos de penetrabilidade com valor mínimo de 1,10 m e 12,25m. Estes dados são importantes para limitação de profundidade da malha de aterramento, bem como alcance máximo de hastes, etc.

3.5 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Para efetuar as medições na linha de transmissão, foi utilizado um terrômetro, que é o equipamento indicado para medições de resistência de aterramento e de resistividade elétrica do solo. O aparelho é capaz de lançar uma corrente controlada no solo e através dos eletrodos de potencial de corrente e de tomada de terra é possível encontrar o valor da resistência de aterramento medida *in loco*.

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. A Frequência de operação do aparelho é de 150Hz variando 1,5% para mais e para menos, com uma forma de onda quadrada, possuindo um *duty cycle* de 50%. Além do aparelho em si, o equipamento é provido de 2 cabos de 16m com de bitola 2,5mm² e 2 cabos de 30m, também de 2,5mm². Possui também 4 estacas do tipo *Cooperweld*, que são utilizadas como sonda de tensão e corrente.

Como a linha de transmissão, já possuía o SPDA (cabos guardas e subsistema de descida) com sua execução construtiva já finalizada na época em que iniciaram as medições, foi efetuado desacoplamento do sistema de aterramento individual de cada estrutura durante a medição do sistema de aterramento, conforme figura 26.

Como as hastes devem ser fixadas todas à mesma profundidade, no e questão caso foram escolhidas as mesmas profundidades do sistema de aterramento, ou seja, para a área urbana 0,90m e para área rural aproximadamente 0,60m.

A distância “D” apresentada na figura 27 para posicionamento da haste de sondagem de potencial, foi de 10m. Para a haste de sondagem de corrente, ou seja a distância “C”, foram atribuídos 15m. Os eletrodos foram posicionados perpendicularmente (figura 28) à malha de aterramento, tanto para área rural, quanto para a zona urbana e 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 27 apresenta o posicionamento comum das hastes de sondagem mediante a malha de aterramento.

Após posicionadas as hastes foi sugerido a colocação da chave seletora do terrômetro utilizado na de medição, no 4º estágio que compreende um intervalo de

medição de 0 à 20.000 Ω . Em seguida é realizada variação das escalas, de modo que o valor encontre-se dentro do menor intervalo possível da chave seletora, para garantir maior precisão de medição.

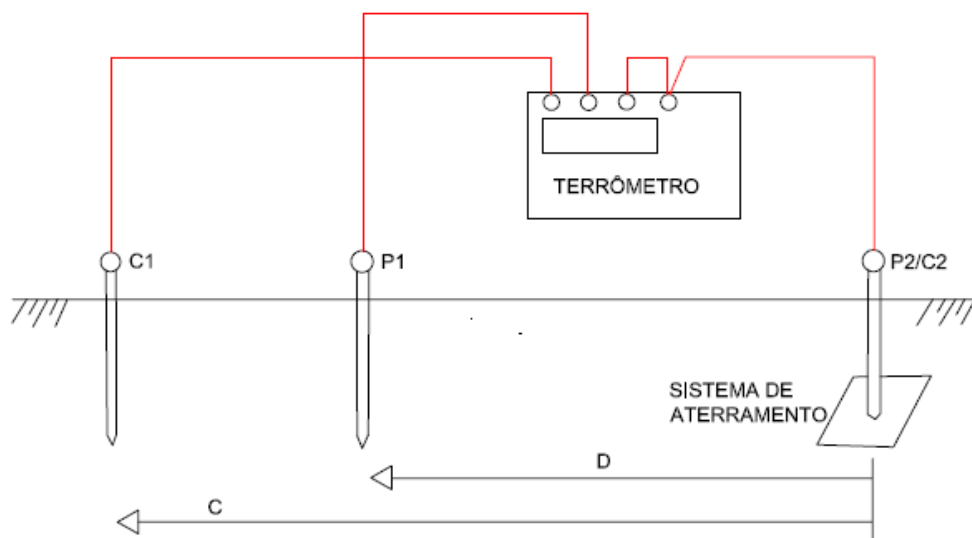
Figura 26– Desacoplamento SPDA / Aterramento.



Fonte: Autoria própria.

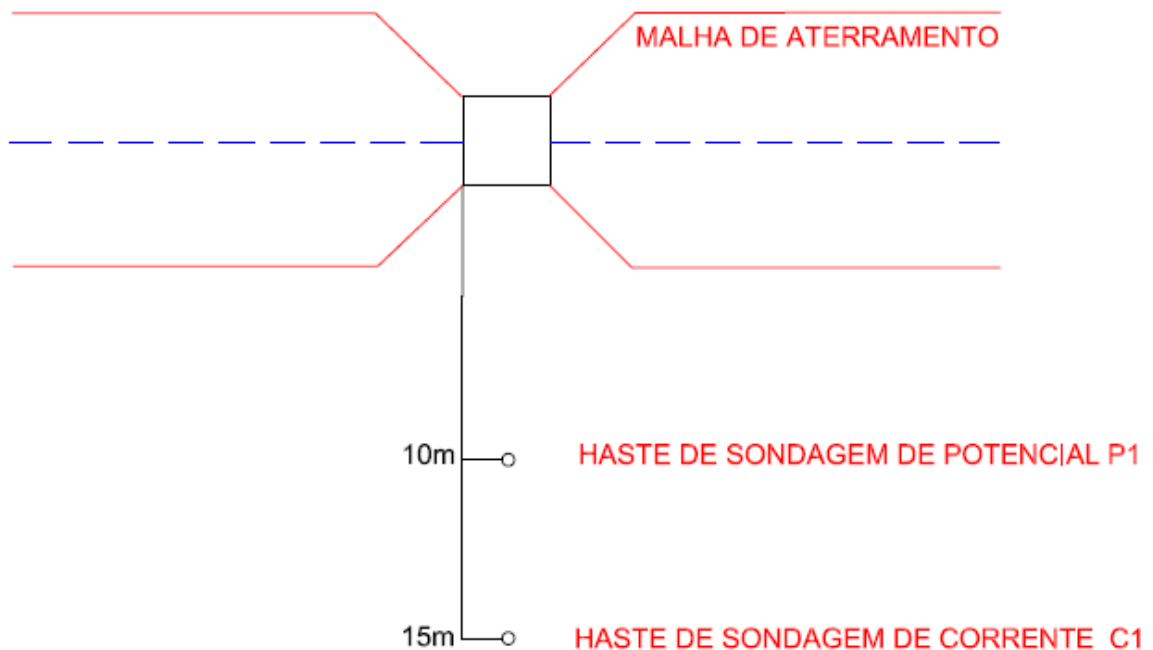
Para a execução das medições de aterramento foram adotadas algumas medidas de segurança, tais como: utilização de calçado adequado e isolado, utilização de capacete e luvas de vaqueta. A manipulação dos eletrodos só deve ser realizada com o aparelho desenergizado e/ou desligado. Além disso para executar 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 paralisação 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

Figura 27 – Esquema de medição executado utilizando terrômetro.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Esquema de posicionamento das hastes.



Fonte: Autoria própria.

A tabela 4 apresenta a resistência de aterramento da primeira fase de execução de projeto. A primeira fase compreende o lançamento preliminar de 4 seções de 10m para as malhas empregadas na zona rural, e 2 seções de 20m na zona urbana.

Tabela 4 – Tabela de resistência de aterramento – 1º fase

Estrutura Nº	Resistencia Medida (Ω) - Primeira Etapa	Estrutura Nº	Resistencia Medida (Ω) - Primeira Etapa
1	18	28	59
2	182	29	153
3	330	30	107
4	350	31	172
5	106	32	150
6	31	33	55
7	81	34	21
8	94	35	7
9	164	36	11
10	67	37	25
11	170	38	24
12	1000	39	190
13	70	40	31
14	135	41	33
15	171	42	30
16	135	43	24
17	53	44	0,8
18	78	45	6,7
19	51	46	6
20	50	46A	54
21	140	47	24
22	69	48	58
23	60	49	10
24	97	50	15
25	47	51	25
26	135	52	62
27	179	53	18

Fonte: Aatoria Própria.

Tendo em vista os resultados apresentados acima, verificou -se que a maior parte das medições estavam fora do patamar proposto pelo cliente, sendo assim necessária a implementação da fase final de projeto (4º fase em zona rural e 3º fase em zona urbana) em 47 das 53 estruturas da LT. Cabe ressaltar que o limiar máximo para

resistência de aterramento das malhas de cada estrutura impostas pelo cliente era de 15 Ω .

A tabela 5 demonstra os resultados obtidos na última fase de execução. A última resulta em um lançamento de 4 seções de 60m totalizando uma distância linear de total de 70m, para cada seção de abo na zona rural. Para a zona urbana foram realizados os lançamentos de 2 seções de 100m de cabos, totalizando uma distância linear máxima de 120m para cada seção de cabo.

Tabela 5 – Tabela de resistência de aterramento – Última Fase

Estrutura Nº	Resistencia Medida (Ω) - Última Etapa	Estrutura Nº	Resistencia Medida (Ω) - Última Etapa
1	5.3	28	10
2	10	29	15
3	5	30	8
4	8	31	13
5	8.3	32	13
6	3	33	12
7	6	34	14
8	6	35	4
9	9	36	4
10	14.2	37	15
11	12	38	8
12	7	39	11
13	14	40	9
14	9	41	4
15	9	42	3
16	11	43	3
17	11	44	5
18	15	45	4
19	8	46	6
20	15	46A	2
21	5	47	0
22	8	48	1
23	11	49	4
24	11	50	5
25	14	51	6
26	13	52	6
27	15	53	10

Fonte: Aatoria Própria.

As grandes variações entre os valores das medições podem ser explicadas com bases nos dados meteorológicos. As medições da tabela 4 foram realizadas em outubro de 2017, mês que registou um índice de 3.6mm precipitação. Já os valores

obtidos na tabela 5 foram realizados em fevereiro de 2018, mês que registrou um índice de precipitação de 124mm.

4 ANÁLISES DE RESULTADOS E METODOLOGIAS

4.1 ANÁLISE MATEMÁTICA

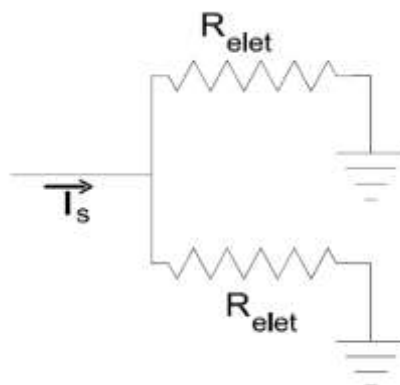
Para compreensão dos projetos executados foi feita uma modelagem matemática, onde a primeira parte a ser analisada é correspondente ao projeto desenvolvido e moldado para a zona urbana. O projeto destinado à Zona Urbana consiste em dois eletrodos lançados em um ângulo de 180° entre si, dispostos sobre a faixa de domínio correspondente à LT. O material usado para o aterramento, como já citado, foi um cabo de bitola 4BWG, composto por aço galvanizado.

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.

A resistência de aterramento da malha, é composta pela contribuição da resistência intrínseca do cabo com a resistência do solo na região do sistema de aterramento. Porém, como a resistividade do cabo é muito menor que a resistividade do solo, a contribuição do cabo torna-se pouco relevante na análise.

Caso haja a presença de uma anomalia de rede, haverão dois caminhos para dispersão da corrente transitória. É possível aproximar o Sistema de Aterramento Rural como duas resistências de valores iguais associadas em paralelo, uma vez considerando as mesmas características de solo da região da base da estruturas. Cada eletrodo é associado à uma resistência elétrica R_{elet} , o sistema é percorrido por uma corrente de surto, representada por I_s , como mostra a figura 29.

Figura 29 - Esquema Equivalente aterramento urbano.



Fonte: Autoria Própria.

Reforçando o fato de que a aproximação de resistências em paralelo é válida, a resistência equivalente pode ser expressa como:

$$R_{at} = \frac{R_{elet}}{n} \quad (32)$$

A variável n , pode ser considerada como o número de eletrodos associados em paralelo. Como já mencionado, é possível subentender-se que para o caso do aterramento urbano a variável n equivale a 2.

Para o eletrodo em contrapeso utilizado no aterramento, utiliza-se a equação abaixo para modelo matemático. Este modelo é obtido com base no fator de forma e disposição do eletrodo horizontal.

$$R_{elet} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L^2}{rp} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad (33)$$

Onde:

L = Comprimento horizontal do eletrodo (m);

p = profundidade vertical do eletrodo (m);

r = raio do eletrodo (m);

ρ = resistividade aparente ($\Omega \cdot m$).

Para o aterramento urbano, substituindo a equação 33 na equação 32, considerando um número de eletrodos igual 2, tem-se:

$$R_{at} = \frac{\rho}{4\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L^2}{rp} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad (34)$$

A resistividade aparente é a resistividade refletida sobre o eletrodo, ou seja, caso haja presença de um solo homogêneo, a resistividade de solo obtida será a resistividade do único tipo de solo existente. Para casos em que haja a estratificação do substrato, é interessante considerar a influência dos vários aspectos de solo presentes na área abrangente do sistema de aterramento. Como já referenciado, para o caso em que se conheça a estratificação do solo local, é possível utilizar a equação de Hummel (16) para determinação da resistividade aparente, ou utilizar dos métodos

apresentados na NBR 7117. O relatório de sondagem é capaz de apresentar o solo estratificado em camadas (inclusive com suas profundidades), logo, é possível obter os valores das resistividades aparentes locais em cada estrutura.

Para o sistema de aterramento rural, é considerada a disposição de 4 seções de cabos lançados sob o solo com uma determinada inclinação em relação a faixa de domínio da LT. O comprimento linear da malha de aterramento de cada seção de cabo disposta sob o solo é de aproximadamente 70m, o que totaliza cerca de 280m de cabos lançados à uma profundidade de aproximadamente 0,6m em solos não cultiváveis, e 0,9m em solos cultiváveis. A escolha da profundidade foi feita considerando às possíveis interferências no solo advindas de sistemas de aragem, irrigação, plantio e semelhantes. Cabe ao executor avaliar a situação do terreno para escolha da profundidade.

Considera-se a resistência de aterramento como a soma entre a resistência do cabo, a resistência de aterramento e a resistência mútua de acoplamento. Como há uma disposição de cabos paralelos entre si, neste caso haverá a contribuição da resistência mútua.

“Quando dois eletrodos são colocados próximos ao solo, passa a existir uma interferência entre ambos que influencia na capacidade de dispersão de corrente do conjunto. Cabe então, conceituar a Resistência Mútua (R_m) entre dois eletrodos de aterramento. Esta é definida como a elevação do potencial de um eletrodo em relação ao terra infinitamente afastado, devido ao fluxo de corrente unitária do outro eletrodo.” (FILHO, 2002 p.52).

Quando uma corrente passa sobre um eletrodo, haverá o aparecimento de uma superfície equipotencial disposta ao seu redor. No caso de dois eletrodos paralelos haverá, uma distância lateral em que um eletrodo irá influenciar no outro. Como na configuração de aterramento urbano os eletrodos eram dispostos 180° entre si, não havia influência de resistência mútua sobre os eletrodos.

Considerando o efeito da resistência mútua para cada eletrodo tem –se:

$$R_{aterr} = R_m + R_{ate} \quad (35)$$

Onde:

R_m = resistência mútua;

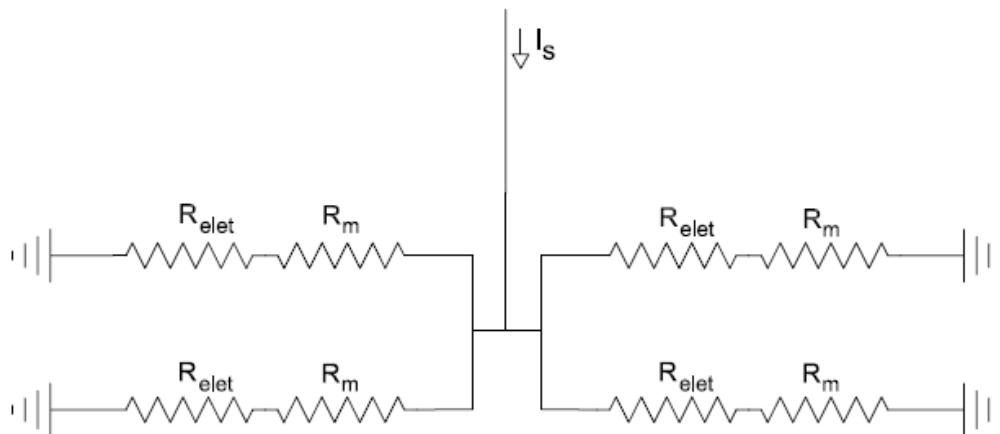
R_{elet} = resistência de aterramento do eletrodo.

A resistência de aterramento do eletrodo horizontal é dada pela equação 33 substituindo 33 em 35, tem-se:

$$R_{aterr} = R_m + \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{2L^2}{rp}\right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{p}{L}\right)^4 \right] \quad (36)$$

A equação 36, corresponde ao modelo matemático de um eletrodo da configuração rural. Similarmente ao modelo de aterramento urbano, no modelo de aterramento rural há um circuito equivalente (figura 30) da associação de resistências de aterramento que são captadas pelo terrômetro durante a execução da medição.

Figura 30- Circuito equivalente sistema de aterramento rural.



Fonte: Autoria própria

Uma vez que a aproximação do terreno já foi utilizada para levantamento matemático do sistema de aterramento urbano, a resistência de aterramento rural pode ser modelada como associação de 4 resistências equivalentes em paralelo, que corresponde a cada eletrodo disposto sob o solo.

$$R_{atr} = \frac{R_{aterr}}{n} \quad (37)$$

Portanto em relação ao sistema de aterramento rural, utiliza-se $n=4$. Substituindo na equação 37, e posteriormente substituindo a equação 36, na equação 37 tem-se que:

$$R_{atr} = \frac{R_m}{4} + \frac{\rho}{8\pi L} \left[\ln\left(\frac{2L^2}{rp}\right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{p}{L}\right)^4 \right] \quad (38)$$

Onde R_{atr} é a resistência de aterramento para os circuitos utilizados para a área rural.

Caso a implantação necessite de dobras para desvios de obstáculos, recomenda-se em projeto manter uma distância paralela mínima de aproximadamente 2m, do eletrodo. Na configuração de aterramento rural há uma distância de afastamento de aproximadamente 10m entre um eletrodo e outro, logo, haverá a presença da resistência mutua entre os eletrodos, no entanto, com um valor de pouca significância para o cálculo de resistência de aterramento.

Como foram feitas atividades de sondagens em todas as estruturas da linha, é possível levantar uma resistividade conforme a estratificação de cada solo, utilizando também a equação de Hummel (equação 16) e os métodos empregados na norma NBR 7117. Não foram realizadas atividades de medição de resistividade de solo, pois este procedimento não constava no escopo da empresa contratada para execução/medição do sistema de aterramento.

4.2 ANÁLISE DE EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Conforme já mencionado, foram realizadas medições da resistência de aterramento nas malhas das 53 estruturas que constituem a LT. A resistência de aterramento proposta para a malha de individual de cada estrutura foi estipulada à um limiar máximo de 15Ω. Porém, após acompanhamento do método de medição, foram levantados questionamentos perante as limitações do equipamento e dos procedimentos utilizados para medição, em relação a norma regulamentadora vigente, que é a NBR 15749. A referida norma é intitulada como “Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento”.

Como o equipamento utilizado para medições (terrômetro) dispõe de um manual de instruções, a primeira ação para elucidação do problema encontrado foi realizar um estudo detalhado do manual.

Dentro das especificações do aparelho há uma nota que limita a medição para uma distância linear máxima de 10m, na malha de aterramento. Os cabos fornecidos são apropriados para medição de Resistência de Aterramento de um sistema com dimensão máxima de 10m. Caso haja necessidade de medição um sistema de aterramento superior à 10m, recomenda-se a utilização de cabos de bitola 2,5mm² isolados, com classe de isolamento de 750V.

Quanto aos requisitos de qualidade do terrômetro, a empresa executora das medições apresentou o equipamento com documentos que comprovam a aprovação e anuência perante aos fiscais de obra INMETRO, sendo eles, o relatório de ensaio e o termo de aprovação. É possível concluir que o equipamento atende as diretrizes especificadas pela NBR 15749. Portanto, a única limitação encontrada em relação ao aparelho, está relacionada às distâncias que os cabos fornecidos para medição podem alcançar.

Levando em consideração que a maior distância linear encontrada nas malhas das estruturas da LT é de 70m, nota-se que há uma limitação de medição, em relação aos cabos fornecidos pelo fabricante, cuja capacidade de medição é limitada à malhas com comprimentos lineares inferiores ou iguais à 10m.

Pelo item 6.1.5.4 da NBR 15749 recomenda-se uma distância entre malha de aterramento e o eletrodo de corrente auxiliar de no mínimo o triplo da maior distância linear encontrada na malha de aterramento. No manual de instruções do terrômetro é mencionado considerar cerca do quádruplo da maior distância, neste caso um patamar que enquadra-se dentro do padrões ABNT 15749.

Então visando a adequação do terrômetro para as malhas encontradas em campo, devem ser considerados cabos 2,5mm², com uma extensão de no mínimo 210m. Tais considerações são capazes de adequar o uso equipamento perante as exigências apresentadas em norma.

No ponto máximo (no mínimo o triplo da maior distância) é locada a sonda de corrente, e a uma distância fora da zona de influência da malha, deve ser posicionada a sonda de tensão. O método mais eficiente de encontrar a distância de locação da sonda de tensão, que dará efetivamente a resistência de aterramento é o método estipulado pela norma ABNT NBR 15749.

Então para efetuar a medição, portanto é necessário seguir alguns procedimentos, com base na norma. O método utilizado para a coleta dos dados das tabelas 4 e 5 encontra-se em desacordo com as especificações mencionadas na NBR 15749. Uma vez que os condutores utilizados não atingem as distâncias necessárias para manter as sondas nos locais corretos, é escolhido um método dentro da NBR 15749, cuja as características da LT em questão se encaixam.

O método escolhido para medição da resistência de aterramento, está contemplado pela NBR 15749 e denomina-se “Método da Queda de Potencial. Podemos definir o método como:

“O método da queda de potencial consiste em fazer circular uma corrente de através de uma malha de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre a malha de aterramento e o terra de referência (terra remoto) por meio de um sonda ou eletrodo auxiliar de potencial.” (NBR 15749, 2012 p.5)

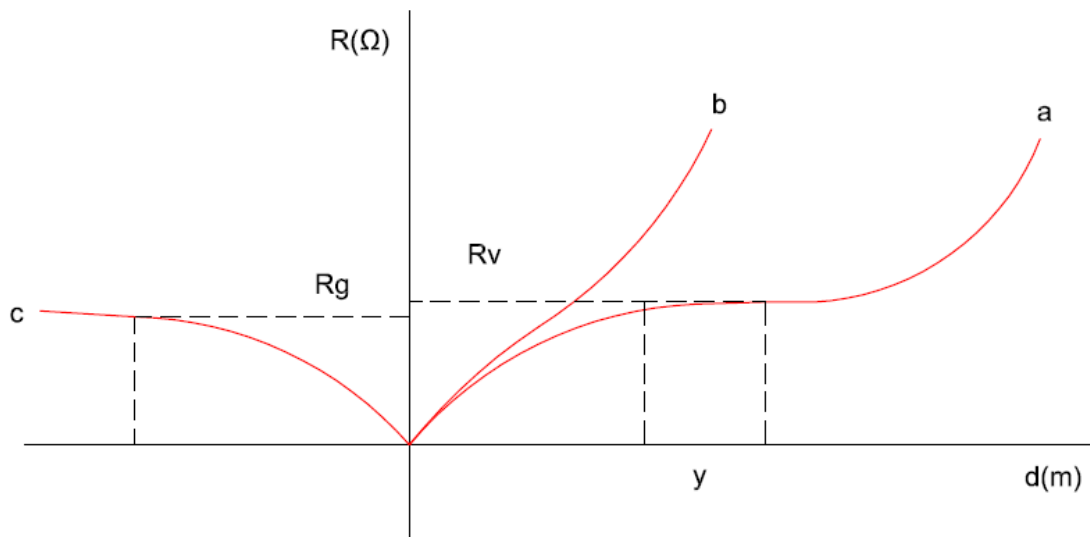
O primeiro passo, é a obtenção da maior distância linear do sistema de aterramento para definição do posicionamento da sondagem de corrente elétrica ou eletrodo de corrente auxiliar. Esta distância será de no mínimo o triplo do maior comprimento da malha, ou seja, para a malha de aterramento, cerca de 210m no mínimo, perpendicularmente à malha referida.

A sonda de corrente, deve ser fixada em uma direção pré definida, neste caso também perpendicular à malha. Em seguida, é necessário variar a posição da haste de sonda tensão, de maneira que esta saia próxima ao eletrodo de tomada de terra para onde se encontra fixado o eletrodo auxiliar de corrente. No caso da malha estudada, a haste deve estar fixada à 210m do eletrodo de tomada de terra.

A variação de posicionamento segundo a norma, deve ser seccionada em cerca de 5% do valor da distância entre o eletrodo auxiliar de corrente e o ponto de tomada de terra (borne conectado à malha). Para a análise da malha, quando esta se encontra com as quatro seções de 70m lançadas, haverão 20 pontos a serem medidos. Estes pontos seguem o alinhamento da haste de sondagem de corrente, ou seja a perpendicularmente à malha, variando à uma distância de 10,5m. Com estes dados é possível levantar uma curva da resistência de aterramento em função da posição de onde foi medido cada valor de resistência.

Se a haste de tensão tem sua posição variada fora do alinhamento da haste de corrente, a curva encontrada será similar à curva “b” da figura 31. Caso a haste de potencial tenha sua posição variada no alinhamento da haste fixa, serão encontrados resultados de curvas similares às funções “a” e “c” apresentadas na figura 31. Quando a variação da posição ocorre na direção da haste fixa, o perfil de curva será à função “a” da figura 31, caso a posição da haste de tensão seja variada no sentido oposto, a curva terá um resultado similar à curva “c”. A resistência de aterramento será o ponto em que a curva possui um perfil horizontal, ou seja a região “y”.

Figura 31 - Curvas de Resistência de Aterramento



Fonte: Adaptado de NBR 15749 (2012, p.8.)

O intervalo da função, denotado como região “y”, possui um perfil praticamente horizontal ou se aproxima de uma função constante, este intervalo demonstra a resistência real de aterramento. Se aplicada a derivada neste intervalo da função, o seu resultado tenderá a zero, uma vez que a inclinação em relação ao eixo das abcissas, é quase nula.

$$\frac{dR(x)}{dx} = 0 \quad (39)$$

Esta análise não se encontra prevista em norma, porém é um método de análise que visa facilitação em relação ao processamento dos dados obtidos. É recomendado derivar a função levantada com os valores coletados em campo, para identificar

o intervalo que garante e expressa a resistência de aterramento encontrada. Vale ressaltar que o valor deverá ser sempre maior que zero, uma vez que não existe, fisicamente, resistência elétrica negativa.

Segundo o item 6.1.7.7 da NBR 15749 os eletrodos devem estar alinhados para a minimização dos erros e segundo o item 6.1.7.6 o levantamento da curva “c”, limita –se apenas para sistemas de aterramento cujas dimensões são pequenas. De preferência é indicado não realizar a inversão da sentido do posicionamento da haste para medição em sistemas de aterramento de grande porte. Isto ocorre em decorrência de variações do tipo de solo abrangente à região periférica do malha. Caso seja empregado o método que leva à curva “c”, o percentual de erro pode sofrer um aumento, pois com uma área maior a probabilidade de uma possível alteração de tipo de solo também aumenta.

Para longas distâncias, é válido considerar o acoplamento entre cabo, eletrodos e solo. Porém o item 6.1.8.4 da NBR 15749 aponta que quando a resistência medida é superior à 10Ω os efeitos de acoplamento são desconsiderados. Uma vez que a medição máxima obtida para o caso estudado é de 15Ω , podem ser desprezados os acoplamentos, conforme tratativa da norma.

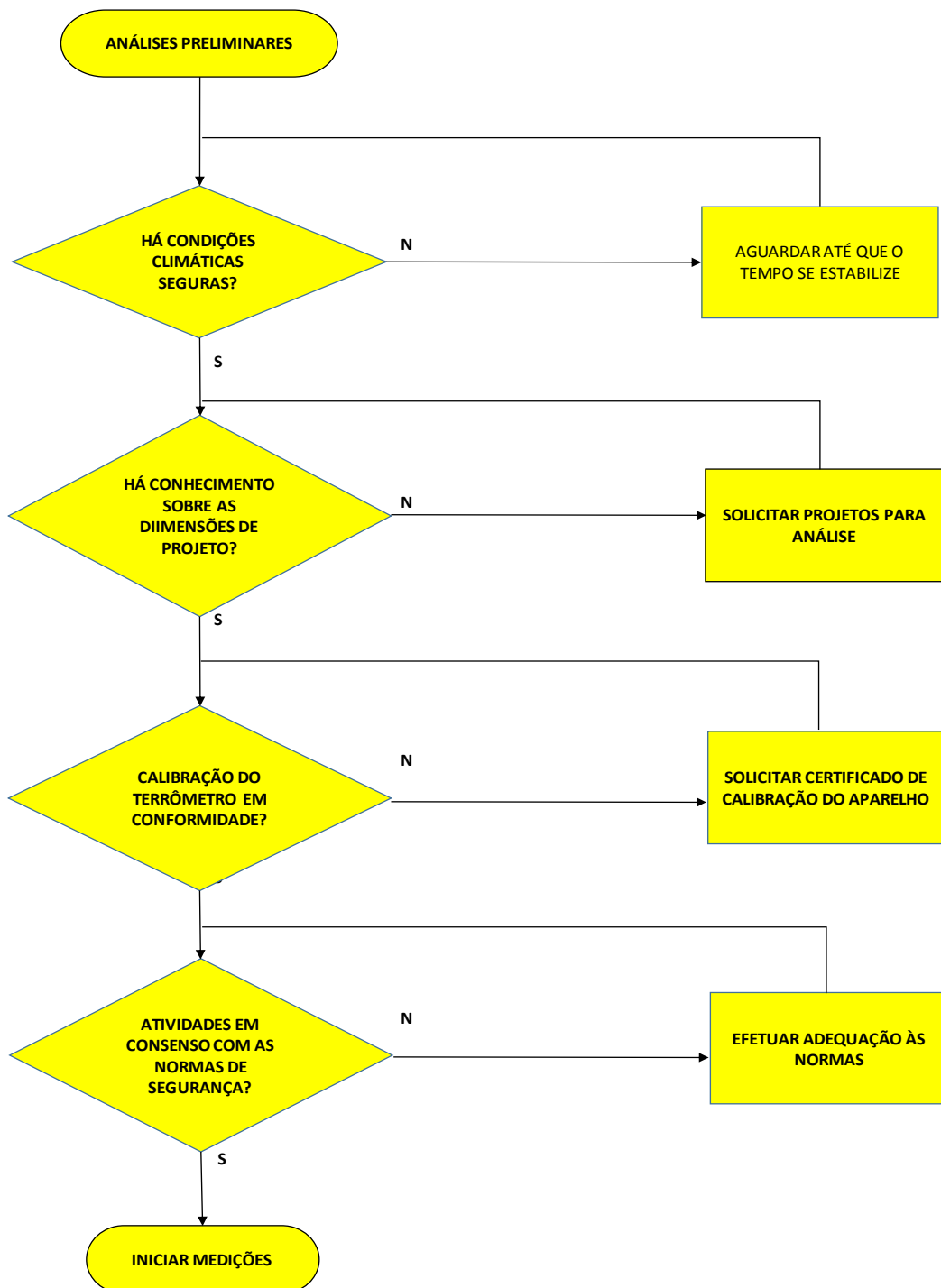
Sendo assim, para o caso em estudo, segundo a norma são necessárias as adequações nos condutores do equipamento de medição e no método de medição empregado.

4.3 ADEQUAÇÕES DE EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

A fim de adequar o método de medição à NBR 15749, são propostos alguns fluxogramas para auxiliar o enquadramento das ações a serem tomadas durante o processo de medição.

O primeiro fluxograma (figura 32) está relacionado com as ações a serem tomadas antes da execução, propriamente dita, da medição da resistência de aterramento. Neste fluxograma estão presentes ações de análises relativas às condições climáticas e condições técnicas, que se tomadas evitariam o desperdício de tempo, caso um dos itens propostos não esteja em conformidade com a norma.

Figura 32 – Fluxograma de análise preliminares.



Fonte: Autoria Própria.

Analisando os passos propostos no fluxograma, e visto que primeiramente climáticas deve ser realizada uma análise em relação às condições. Há referências tanto na NBR 5422 como na NBR 15749 que mencionam não efetuar medições em

condições adversas de tempo, uma vez que os operadores dos aparelhos de medição terão contato direto com o subsistema de descida do SPDA para efetuar a medição. Caso haja uma mudança brusca de tempo, todas as atividades de campo voltadas à medição devem ser canceladas.

É necessário conhecimento das dimensões do sistema de aterramento, para que se possa avaliar as condições do terrômetro. As dimensões do sistema de aterramento serão as variáveis que irão condicionar o posicionamento das hastes de corrente e potencial, uma vez que a ABNT 15749 menciona que a haste de sondagem de corrente auxiliar deve estar a uma distância de no mínimo à três vezes o maior comprimento do sistema de aterramento.

Também é preciso ter a convicção de que o aparelho encontra-se em condições de uso, bem como, verificar a validade do certificado de calibração, à fim de garantir a obtenção de medições confiáveis

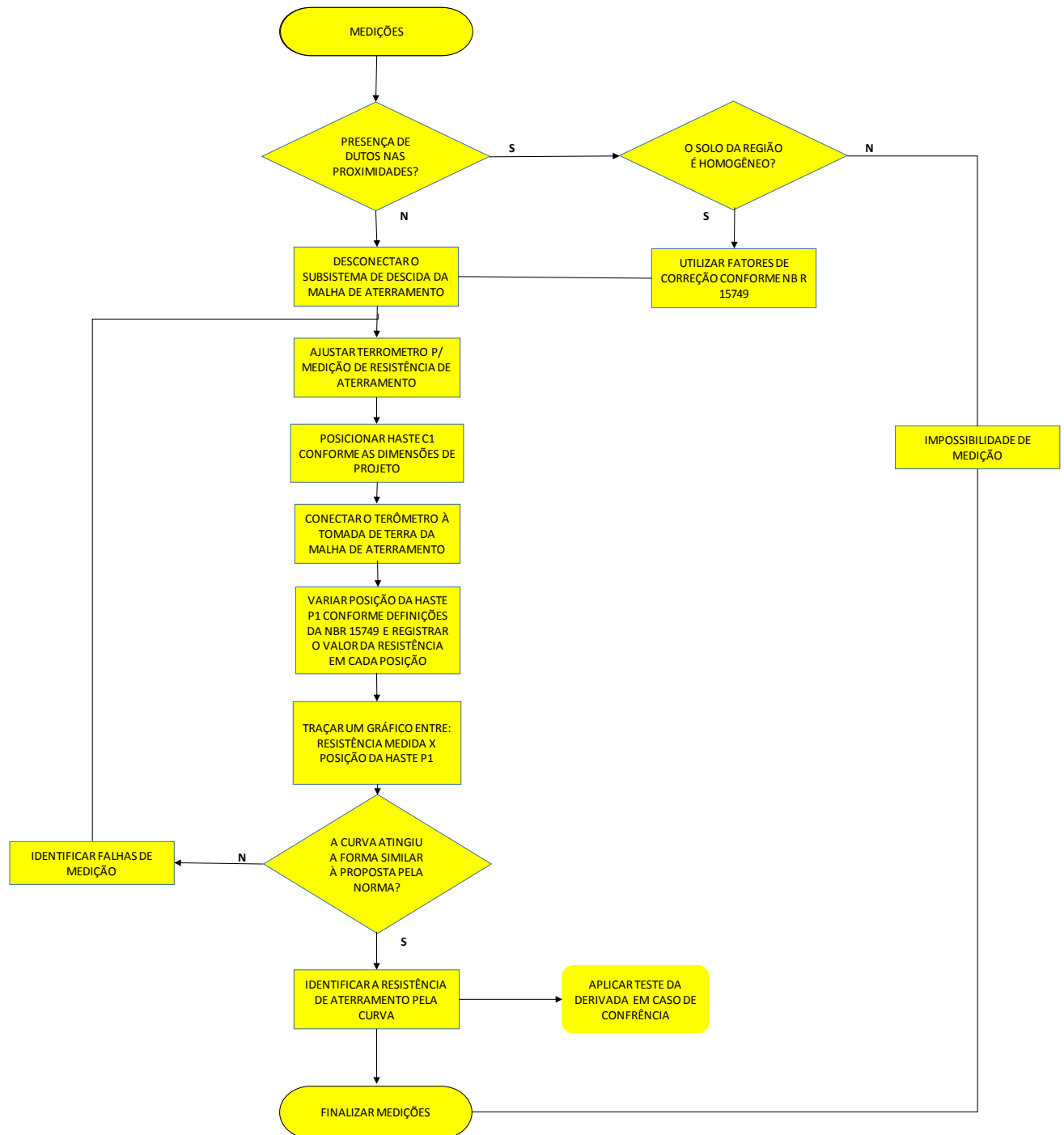
A última condição para iniciar as atividades, diz respeito às normas de segurança para medição. Existem, conforme a NBR 15749 seção 5, tratativas que deverão ser homologadas por um Técnico ou um Engenheiro de Segurança do Trabalho através de dois documentos: uma Análise Preliminar de risco (APR) e uma Permissão de Trabalho (PT). Com essas análises preliminares é possível saber se a equipe operacional tem condições de ir à campo ou não.

Caso todas as condições sejam atendidas é possível iniciar o processo de medição de resistência de aterramento por estrutura da Linha de Transmissão. Para o procedimento de medição também é proposto um fluxograma intitulado como fluxograma de medição (figura 34).

Conforme o fluxograma de medição, a primeira condição pode de ser constatada somente com o reconhecimento de campo. Caso haja presença de dutos, canos ou similares, é necessário a verificação da possibilidade de correção de medição utilizando constantes fornecidas pela própria NBR 15749. Porém, esta correção apenas funciona em solos homogêneos, o que na prática é algo difícil de encontrar. Então, caso haja algum duto próximo, ocorre a impossibilidade de medição para solo não estratificado. O objeto enterrado próximo à malha de aterramento, funciona como agente de interferência para dispersão do campo eletromagnético em relação ao meio em que se encontra, alterando os resultados reais de medição. Este fator, é algo que

limita e dificulta as medições da resistência de aterramento para estruturas localizadas em zona urbana, por exemplo.

Figura 33– Fluxograma de medição.



Fonte: Autoria própria.

Segundo o Item 9.7 da NBR 5422 se os cabos para raios já encontram –se lançados é necessário realizar a desconexão entre o subsistema de descida e a malha de aterramento (NBR 5422, 1985, p.20). Sendo assim, para garantir a segurança e a incerteza de medição o SPDA é desconectado ao aterramento como é citado no fluxograma.

Para o terrômetro utilizado nas medições é necessário um ajuste específico para medição de resistência de aterramento. Que seria seleção da opção para resistência de aterramento em uma chave específica encontrada no terrômetro. Além disso também é preciso adequar os cabos conforme as dimensões do sistema de aterramento.

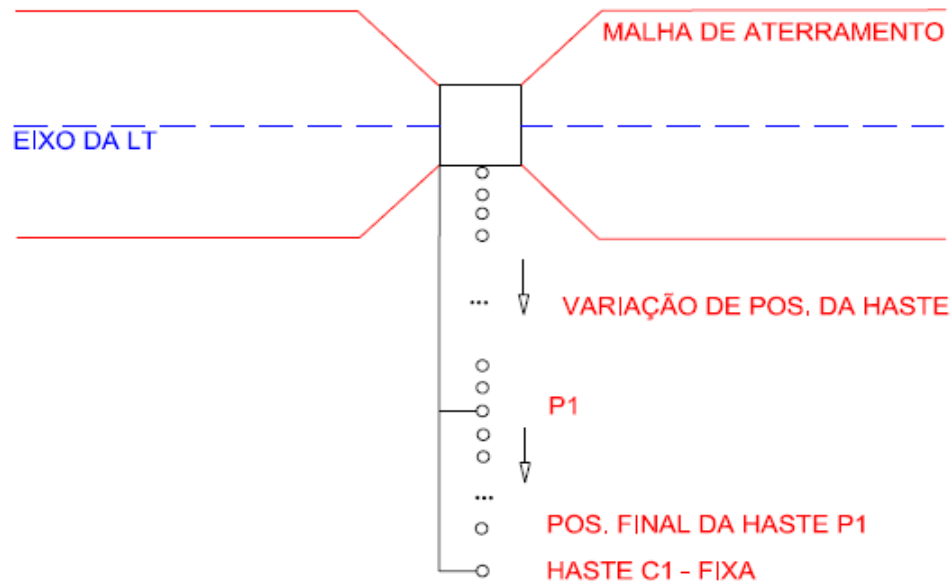
Caso a curva de resistência levantada não seja similar a curva proposta em norma, recomenda –se a verificação da fonte de erro, e reinicialização do procedimento de medição a partir da conferência de ligação do terrômetro conforme expresso no fluxograma de medição.

Para realizar a medição é necessário optar qual o sentido de medição será tomado. Caso existam obstáculos frente à medição sistema de aterramento, há possibilidade de variação da haste de potencial “P1” para o lado contrário de onde a haste sondagem corrente está locada. Contudo, é preferível que o eletrodo de sondagem de tensão varie sua posição no mesmo alinhamento e no mesmo sentido frente à haste fixa de corrente. A figura 33 ilustra a maneira cujo a haste deve ser variada em relação à sonda de corrente e à malha de aterramento.

Após a curva atingir o patamar desejado, é possível determinar o intervalo “y” cujas as resistências encontradas mostram valor real de resistência de aterramento em função da posição da haste de sondagem de potencial P1 que foi encontrado de maneira prática. O fluxograma dá também a ação facultativa de conferência da veracidade do ponto encontrado pelo método da derivada mencionado no item 4.2 deste trabalho.

O método da queda de potencial utilizado para medição da resistência de aterramento, se seguido conforme às diretrizes da NBR 15749, é metodologia mais eficiente dentre as propostas sugeridas pela norma, uma vez que, as demais proposições citadas pela ABNT em sua normativa, não são compatíveis com as características construtivas da LT que é objeto de estudo.

Figura 34 – Esquema de variação da haste P1.



Fonte: Autoria própria.

Caso o objeto de análise fosse a impedância equivalente de aterramento entre as 53 estruturas da LT e como ocorre a interligação dos sistemas pelo cabo guarda, era possível a medição da impedância desta LT utilizando o método de injeção de alta corrente. Porém a LT possui 14km, ou seja, a outra subestação seria utilizada como eletrodo de corrente e não localiza-se ao menos à 20km, o que impossibilita e inviabiliza a execução deste método de medição. Esta metodologia corresponde ao item 6.2.4 da NBR 15749.

Para verificação do método medição, podem ser utilizados os modelos matemáticos descritos no item 4.1, uma vez que a empresa responsável projeto, disponibilizou um relatório de sondagem que consta o substrato ao redor de cada estrutura contendo também sua respectiva estratificação. Então, há possibilidade de serem calculadas todas as resistividades aparentes de cada estrutura uma vez que todos os dados de projeto são conhecidos.

A resistência de aterramento encontrada pela curva poderá ser comparada com o resultado obtido através dos modelos matemáticos; Ainda há possibilidade utilizar o teste da derivada proposto sobre a curva levantada através do método de medição da NBR 15749. Este teste retornará o ponto em que a derivada da curva é nula, logo, este ponto ou este intervalo garante (locação ótima de haste de potencial). Em termos mais empíricos o teste da derivada mostra a posição que haste deve ser fixada para retornar o valor real da resistência de aterramento.

5 CONCLUSÃO

A realização do estudo de caso no presente trabalho, da referida linha de transmissão, possibilitou a compreensão das diretrizes a serem seguidas para elaboração e execução de projetos, bem como do método correto de medição a ser utilizado conforme as normas vigentes para os respectivos sistema de aterramentos utilizados em linhas de transmissão.

O modelo matemático baseado nas características físicas tanto do sistema de aterramento quanto do solo fornece a possibilidade de calcular a resistência de aterramento para os dois tipos de projetos (aterramento rural e aterramento urbano).

Além do modelo matemático outra consideração importante se refere a realização de um levantamento do tipo específico de solo da região. Neste levantamento é importante considerar o tipo de solo existente na região e o modelo de estratificação de substrato local, presente nos arredores da LT, através de estudos de campo (relatórios de sondagem, estudos de umidade, etc.). Se a linha de transmissão dispuser de um relatório de sondagem, é possível obter um modelo estratificado do solo e conseqüentemente, obter um valor de resistividade aparente. Caso não exista um relatório de sondagem é necessária a realização de medições de resistividade de solo, conforme a norma NBR 7117. A resistividade do solo é um item importante para dimensionar o sistema de aterramento, pois influencia diretamente na resistência de aterramento obtida.

Para a linha de transmissão em questão é sugerido o reestudo do modelo de sondagem, bem como, a execução de novas medições de resistividade de solo, a fim de obter um valor de resistência de aterramento adequado, uma vez que, conforme as análises apresentadas no estudo realizado, houveram algumas desconformidades em relação ao aparelho de medição e ao método de medição utilizado. Com o valor calculado é possível avaliar se os projetos (urbano e rural) são adequados para a resistência de aterramento exigida pelas partes envolvidas no empreendimento e se estão de acordo com as normas vigentes.

Após análise da NBR 15749, foi possível concluir que o método de medição e o aparelho de medição (terrômetro) utilizados para construção da LT em questão, se

encontram fora das condições propostas pela presente norma. Para assegurar a confiabilidade das medições de resistência de aterramento, é necessária a readequação tanto do método de medição, quanto do terrômetro. Os fluxogramas apresentados na análise deste trabalho fornecem as ações necessárias para adequação do terrômetro e do método de medição, perante a NBR 15749.

Por fim, conforme levantamentos e discussões apresentadas no presente trabalho fica evidente a importância de disseminar e conscientizar projetistas, executores, agentes fiscalizadores de obras e empresários, sobre a utilização das normas técnicas e em particular para o presente estudo a NBR 15749, visando a confiabilidade e conformidade, segundo um órgão de normalização técnica brasileiro (ABNT), para a execução e projeto do sistema de aterramento.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NORMA BRASILEIRA REGULAMENTDORA (NBR) 15749. Medição da Resistência de Aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistema de Aterramento.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NORMA BRASILEIRA REGULAMENTDORA (NBR) 6457. Amostras de Solo – Preparação para ensaios de Compactação e ensaios de Caracterização.** Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NORMA BRASILEIRA REGULAMENTDORA (NBR) 7117. Medição da Resistividade do Solo Pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner).** Rio de Janeiro, 1981.

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

ARTICLE ARCHIVE, I. **Insulator Failure Modes.** Disponível em: <<http://www.inmr.com/insulator-failure-modes> >. INMR, 2017. Acesso em: 05/2018

ABRADEE. **Redes e energia Elétrica.** Disponível em: <http://www.abra-dee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>. Acesso em 03/18.

BERARDO, B. L. **Estudo do Aterramento dos Pés de Torres de Linhas de Transmissão frente às Descargas Atmosféricas.** Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (Unesp). Bauru, 2012.

DALZIEL, C. F. **Effects of Electric Shock on Man.** Universidade da Califórnia. Berkeley, 1956.

ELAT, Disponível em: <http://www.inpe.br/ranking>. Acesso em: 04/18

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

FLUKE, Disponível em: <<http://www.fluke.com/fluke/brpt/solutions/earthground>>. Acesso em: 05/2018.

HABITISSIMO. “**Medição de Aterramento – Terrômetro de Haste – método de Wenner**”. Disponível em: www.fotos.habitissimo.com.br. Disponível em: 06/2018.

INMET, Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 04/2018.

INPE, Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>. Acesso em:04/2018.

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

LAUD. **A escala BWG**. LAUD Arames 2018. Disponível em: <http://www.laudarames.com.br/Escala_BWG.html >. Acesso em: 06/2018.

MELLO, C. **Você sabe o que é um OPGW e como a Eletronet Transporta dados por meio dele?** ELETRONET, 2017. Disponível em: <<http://eletronet.com/en/voce-sabe-o-que-e-um-cabo-opgw-e-como-a-eletronet-transporta-dados-por-meio-dele>>. Acesso em: 04/2018.

MERLIN, V. L. **Generalidades sobre aterramento de Sistemas elétricos**. Disponível em: <<https://engenheirosassociados.com.br/home/index.php/2017/07/23/generalidades-sobre-aterramento-de-sistemas-eletricos/> >. Acesso em: 05/2018

MOLIN, J. P, RABELLO, L. M. **Estudos sobre a mensuração da Condutividade Elétrica do Solo**. Eng. Agrícola. Jaboticabal, v.31, n1, p.90-101, 2011.

MURAT, K; DAVARCI, I; KIRECCIN; AKCAY, A. B; TURHANOGLU, S; TUZCU, K; HAKIMOGLU, S; AKKUCUK, S, AYDOGAN A. **Desenvolvimento de Fibrilação Ventricular por cauda de etomidato para indução anestésica: um efeito colateral muito raro, relato de caso**.Revista Brasileira de Anestesiologia. Rio de Janeiro, v.64, n.2, p.365-368, 2014.

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.

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

TELETECHNO. Disponível em:<<http://teletechnonet.com/en/products/optical-fiber-composite-ground-wire-opgw> >. Acesso em: 05/2018.

VASCONCELLOS, F.M; MOREIRA, F. A. **Avaliação e Dimensionamento de Sistemas de Aterramento para Redução de Desligamentos de Linhas de Transmissão por Backflashover: estudos de caso para uma LT de 138kV.** 12º Latin-American Congress on Electricity Generation na Transmission. Clagtee, 2017.

ANEXO A – Escala BWG

Para referência de dimensão de cabos e arames de aço carbono, a escala utilizada para medição de espessura do condutor, é a escala AWG (American Wire Gauge) (LAUD,2018).

Porém para arames galvanizados, que são destinados à ambientes agressivos, a escala de referência é denotada BWG (Birmingham Wire Gauge). Foi o primeiro sistema de medidas de arames reconhecido como padrão no mundo todo, sua origem se dá na cidade inglesa de Birmingham na Inglaterra (LAUD,2018). Costuma –se utilizar a escala BWG para arames e

Segue tabela comparativa entre as unidades utilizadas para padronização de medidas de bitola de arames e cabos.

Figura 35 - Relação entre escalas BWG/SWG/AWG

Fio	BWG (mm)	AWG (mm)	SWG (mm)	Fio	BWG (mm)	AWG (mm)	SWG (mm)
1	7,62	7,35	7,62	19	1,07	0,91	1,02
2	7,21	6,54	7,01	20	0,89	0,81	0,91
3	6,58	5,83	6,40	21	0,81	0,72	0,81
4	6,05	5,19	5,89	22	0,71	0,64	0,71
5	5,59	4,62	5,39	23	0,64	0,57	0,61
6	5,16	4,12	4,88	24	0,56	0,51	0,56
7	4,57	3,67	4,47	25	0,51	0,46	0,51
8	4,19	3,26	4,06	26	0,46	0,40	0,46
9	3,76	2,91	3,66	27	0,41	0,36	0,42
10	3,40	2,59	3,25	28	0,36	0,32	0,38
11	3,05	2,30	2,95	29	0,33	0,29	0,35
12	2,77	2,05	2,64	30	0,30	0,25	0,32
13	2,41	1,83	2,34	31	0,25	0,23	0,30
14	2,11	1,63	2,03	32	0,23	0,20	0,27
15	1,83	1,45	1,83	33	0,20	0,18	0,25
16	1,65	1,29	1,63	34	0,18	0,16	0,23
17	1,47	1,15	1,42	35	0,13	0,14	0,21
18	1,24	1,02	1,22	36	0,10	0,13	0,19

Fonte: “A escala BWG” (LAUD, 2018)

ANEXO B – Terrômetro

O terrômetro utilizado para as medições do trabalho analisado, foi um terrômetro da marca Instrum Modelo TMD 20KW. Este modelo de terrômetro possui quatro faixas de medição, e sua capacidade é de 0 à 20000 Ω . A primeira faixa de medição consegue obter valores de 0 à 20 Ω . A segunda faixa de medição é capaz de apresentar medições de 0 à 200 Ω . A terceira faixa de medição possui um intervalo de medição de 0 à 2000 Ω . Por fim a última faixa de medição varia de 0 à 20000 Ω , conforme manual de operações do aparelho.

A precisão deste aparelho de medição é de aproximadamente 1,5% para mais e para menos, com uma precisão de fundo de escala de 0,5%. O terrômetro fornece em suas saídas um sinal de onda quadrada com tensão eficaz de 105V e *duty cycle* de 50%. A frequência de operação do aparelho é de 150 Hz, com variações para mais e para menos de 1,5%. O intervalo de temperatura de operação aceitável é de 0°C à 50°C, além disso o termômetro é capaz de operar em ambientes com umidade relativa de até 90%.

A maior dimensão de medição que o terrômetro é capaz, levando e considerando os cabos fornecidos de fábrica, para um aterramento com comprimento linear de 10m. Se o sistema de medição ultrapassar esta máxima distância, deverá ser realizada a substituição dos cabos providos de fábrica, por cabos maiores. Estes cabos devem ser de bitola 2,5mm², isolados capacidade de isolamento de 750V.

Figura 36 - Terrômetro utilizado nas medições.



Fonte: (HABITISSIMO, 2018)