

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS-
CAMPUS ITUMBIARA**

**DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUSTAVO RAPHAEL ALVES PAIVA

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE
TOPOLOGIAS CLÁSSICAS DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS
CONHECIDOS QUANDO INTERLIGADAS ENTRE SI: UM ESTUDO
DE CASO**

ITUMBIARA-GO

2021



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gustavo Raphael Alves Paiva

Matrícula: 20151040070174

Título do Trabalho: Análise Teórica-Experimental do Comportamento de Topologias Clássicas de Aterramentos Elétricos conhecidos quando interligadas entre si: Um Estudo de Caso

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data 31/03/2021 (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
(X) Outra justificativa: Todos os trabalhos de conclusão de curso da instituição passam pelo trâmite de submissão do trabalho no repositório digital

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 31/03/2021.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

GUSTAVO RAPHAEL ALVES PAIVA

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE
TOPOLOGIAS CLÁSSICAS DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS
CONHECIDOS QUANDO INTERLIGADAS ENTRE SI: UM ESTUDO
DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica ao Departamento de Áreas Acadêmicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Itumbiara, na área e concentração 30404045. Orientador: Prof. Roberlam Gonçalves de Mendonça.

ITUMBIARA-GO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P149a Paiva, Gustavo Raphael Alves Paiva
Análise teórica-experimental de comportamento de topologias clássicas de aterramentos elétricos conhecidos quando interligadas entre si: um estudo de caso. / Gustavo Raphael Paiva. - Itumbiara, 2021.
144 f. : il. Color.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça.

1. Aterramento elétrico - engenharia. 2. Aterramento elétrico - técnicas de medição. 3. Engenharia elétrica.

I. Título. II. Mendonça, Roberlam Gonçalves de. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.31923

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB1/3266



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise Teórica-Experimental do Comportamento de Topologias Clássicas de Aterramentos Elétricos Conhecidos Quando Interligadas Entre Si: Um Estudo de Caso.

AUTOR: Gustavo Raphael Alves Paiva.

ORIENTADOR: Roberlam Gonçalves de Mendonça.

Aprovado como parte das exigências para obtenção do diploma de Engenheiro Eletricista, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Itumbiara, 26 de fevereiro de 2021.

Roberlam Gonçalves de Mendonça

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Marcos Antônio Arantes de Freitas

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Samuel César Mota de Paula

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Goiânia.

Documento assinado eletronicamente por:

- Samuel Cesar Mota de Paula, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/02/2021 21:20:43.
- Roberlam Goncalves de Mendonca, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/02/2021 21:18:25.
- Marcos Antonio Arantes de Freitas, COORDENADOR - FUC1 - ITU-DAA, em 26/02/2021 21:16:16.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 26/02/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 134832

Código de Autenticação: 166ed390a7



Dedico este trabalho aos meus pais, por
estarem presente nos momentos em que
mais necessitei.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente realizar os agradecimentos aos meus pais, que permitiram que eu chegasse, e tivesse a oportunidade de trilhar o caminho dentro de um curso superior, dando toda a base necessária para tal, e pelos princípios passados ao longo de toda a minha vida que me transformaram num indivíduo melhor.

Agradecer aos meus colegas de classe que me ajudaram nos momentos de maior dificuldade, em específico ao Filipe Santana, que desde o início o curso até o final, estive ao meu lado me ajudando naquilo que tinha mais dificuldade, sendo um grande amigo que o curso me trouxe.

Agradecer ao meu orientador Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça, por todo o auxílio prestado para a construção desse trabalho, e por todos os professores que tive ao longo do curso, pois contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

“Às vezes, a vida vai te acertar um tijolo na cabeça. Não perca a fé. Eu estou convencido de que a única coisa que me fez seguir em frente era que eu amava o que fazia.” (Steve Jobs)

RESUMO

O trabalho em questão tem por objetivo elucidar os principais aspectos e conceitos que envolvem os aterramentos elétricos, fornecendo assim, o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do tema central de trabalho, de realizar a análise comparativa entre o calculado e o obtido na prática, quanto aos resultados de resistência de aterramento para determinadas topologias interligadas.

Dentro do embasamento descrito no trabalho que envolve o tema de aterramentos estão o de apresentar um breve histórico do surgimento do aterramento, o de definir o que constitui, a finalidade, e os dispositivos que estão relacionados com um sistema de aterramento. Após isso, retratar todo o processo para o dimensionamento de uma malha de aterramento, dentro os quais estão a medição da resistividade do solo, estratificação do solo, obtenção da resistividade aparente, e por fim cálculo da resistência de aterramento de acordo com as especificações do solo e dos eletrodos e da geometria escolhida.

Na parte prática é explicitado os principais detalhes quanto a construção das topologias em circunferência, hastes alinhadas e em quadrado vazio, e posteriormente a isso, a medição das resistências de aterramento no método de queda de potencial utilizando o aparelho terrômetro para as malhas isoladas, e posteriormente, interligando as topologias de duas a duas, e ao final das medições é realizado a análise comparativa daquilo que foi calculado com os valores obtidos na aferição. Por fim, relatar como foi a experiência de uma maneira mais genérica quanto a realização do trabalho, colocando as ideias quanto aquilo que poderia ser a continuação a partir do que foi desenvolvido nesse projeto.

Palavras-chave: Topologias. Aterramento. Malhas isoladas. Análise comparativa. Geometria.

ABSTRACT

The work in question aims to elucidate the main aspects and concepts that involve electrical grounding, thus providing the necessary theoretical basis for the development of the central theme of work, to carry out the comparative analysis between the calculated and the obtained in practice, how much results of earthing resistance for certain interconnected topologies.

Within the basis described in the work involving the topic of grounding are to present a brief history of the emergence of grounding, to define what constitutes, the purpose, and the devices that are related to a grounding system. After that, portray the whole process for the dimensioning of a grounding grid, within which are the measurement of the soil resistivity, soil stratification, obtaining the apparent resistivity, and finally calculation of the grounding resistance according to the specifications of the ground and electrodes and the chosen geometry.

In the practical part, the main details regarding the construction of the topologies in circumference, aligned rods, and in an empty square are explained, and after that, the measurement of the grounding resistances in the potential drop method using the earth meter for the isolated meshes, and later, linking the topologies from two to two, and at the end of the measurements, a comparative analysis of what was calculated with the values obtained in the measurement is carried out. Finally, report how the experience was in a more general way as the work was done, putting the ideas as to what could be the continuation from what was developed in this project.

Keywords: Topologies. Grounding. Isolated meshes. Comparative analysis. Geometry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Correntes e Curvas de potencial em uma haste fincada no solo.....	23
Figura 02: Correntes e curvas de potencial com hastes muito próximas.....	24
Figura 03: Correntes e curvas de potencial de hastes em paralelo adotando uma distância mínima recomendada.....	24
Figura 04: Componentes presentes em uma instalação de aterramento elétrico.....	25
Figura 05: Manutenção em uma linha de transmissão utilizando aterramento de trabalho	27
Figura 06: Sistema TN-S.....	29
Figura 07: Sistema TN-C.....	29
Figura 08: Sistema TT.....	29
Figura 09: Desenho esquemático de como atua um SPDA numa edificação.....	31
Figura 10: Pessoa protegida de descargas providas de uma bobina de Tesla por meio de uma gaiola de Faraday.....	34
Figura 11: Volume do cone utilizando o método de ângulo de proteção.....	35
Figura 12: SPDA utilizando Gaiola de Faraday e uma Torre de Franklin.....	34
Figura 13: Exemplos utilizando método da esfera rolante	36
Figura 14: Surto elétrico causando um pico de tensão.....	37
Figura 15: Surto elétrico causando instabilidade na rede.....	37
Figura 16: Norma IEC 479, relação Corrente x Tempo admissível ao ser humano.....	42
Figura 17: Circuito Equivalente da tensão de passo segundo a norma NBR 15751....	43
Figura 18: Representação da tensão de toque por meio de um circuito elétrico.....	46
Figura 19: Influência da umidade no solo.....	49
Figura 20: Comportamento da resistividade de acordo com a temperatura.....	51
Figura 21: Esquema de ligação do Método de Wenner.....	52
Figura 22: Dispersão de corrente no solo utilizando método de Wenner.....	53
Figura 23: Esquema de ligação para medição da resistividade do solo utilizando um terrômetro.....	54
Figura 24: Exemplo de uma Curva da resistividade em função do espaçamento entre hastes.....	57
Figura 25: Exemplo genérico de uma estratificação do solo.....	58
Figura 26: Desenho esquemático de um solo estratificado em duas camadas.....	59
Figura 27: Método de Wenner em solo de duas camadas.....	60
Figura 28: Curvas típicas de resistividade em solos de duas camadas.....	62
Figura 29: Família de curvas para o K negativo.....	63
Figura 30: Família de curvas para o K positivo.....	64
Figura 31: Haste isolada no solo de múltiplas camadas.....	66
Figura 32: Redução de camadas em um solo de multicamadas.....	67
Figura 33: Curvas de Endrenyi para obtenção da resistividade aparente.....	69

Figura 34: Esquema de ligação do método da queda de potencial.....	74
Figura 35: Execução de ligação do método da queda de potencial.....	75
Figura 36: Curva característica da resistência de aterramento em função da distância.....	75
Figura 37: Curvas típicas de resistência de aterramento em função das posições dos eletrodos auxiliares.....	76
Figura 38: Exemplo de uma topologia de aterramento com 4 hastes alinhadas.....	78
Figura 39: Topologia com hastes em circunferência.....	79
Figura 40: Topologia com hastes em triângulo.....	79
Figura 41: Topologia de malha retangular com hastes.....	80
Figura 42: Curvas para determinar K' numa topologia de quadrado vazio de 4 hastes.....	81
Figura 43: Direções e distâncias máximas adotadas para a estratificação do solo.....	83
Figura 44: Resistividade do solo em função do espaçamento.....	86
Figura 45: Família de curvas para K negativo com retas.....	88
Figura 46: Curvas $K \times h$	90
Figura 47: Síntese dos dados de estratificação do solo.....	90
Figura 48: Visão frontal da primeira solda exotérmica.....	93
Figura 49: Visão traseira da primeira solda exotérmica.....	93
Figura 50: Início das escavações para a topologia de hastes alinhadas.....	94
Figura 51: Resultado do primeiro dia das escavações para topologia de hastes alinhadas.....	94
Figura 52: Topologia de hastes alinhadas com cabos e hastes inseridos no solo.....	95
Figura 53: Topologia de hastes alinhadas finalizada.....	96
Figura 54: Cano danificado no momento da escavação de um dos buracos da haste na topologia quadrado vazio.....	97
Figura 55: Buraco ampliado para reparação dos canos.....	97
Figura 56: Novo local para malha quadrado vazio.....	98
Figura 57: Malha de aterramento em quadrado vazio finalizada.....	99
Figura 58: Malha de aterramento em circunferência sob diferentes perspectivas	100
Figura 59: Malha de aterramento em circunferência visão geral.....	100
Figura 60: Malha de aterramento em circunferência no segundo dia de escavações.....	101
Figura 61: Pedras encontradas na escavação da topologia em circunferência.....	101
Figura 62: Maior rocha encontrada na escavação da topologia em circunferência....	102
Figura 63: Topologia em circunferência finalizada.....	103
Figura 64: Desenho da disposição das topologias entre o refeitório e bloco 500.....	104
Figura 65: Curva da resistência de aterramento para topologia em hastes alinhadas (v.01)	105
Figura 66: Curva da resistência de aterramento para topologia em quadrado vazio (v.01)	106
Figura 67: Curva da resistência de aterramento para topologia em hastes alinhadas (v.02)	109

Figura 68: Curva da resistência de aterramento para topologia em quadrado vazio (v.02)	111
Figura 69: Curva da resistência de aterramento para topologia em triângulo (v.02)..	112
Figura 70: Curva da resistência de aterramento para topologia em circunferência (v.02)	113
Figura 71: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada de hastes alinhadas – quadrado vazio (v.02)	115
Figura 72: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada de hastes alinhadas – circunferência (v.02)	116
Figura 73: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada de hastes alinhadas – triângulo (v.02)	117
Figura 74: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada em triângulo – quadrado (v.02)	118
Figura 75: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada em triângulo – circunferência (v.02)	119
Figura 76: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada do quadrado – circunferência (v.02)	121
Figura 77: Curvas de Endrenyi para obtenção da resistividade aparente da malha em hastes alinhadas.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Valores permissíveis de corrente de choque com longa duração	41
Tabela 02: Resistividades típicas do material de recobrimento.....	45
Tabela 03: Resistividades típicas para determinados tipos de solo.....	48
Tabela 04: Influência da umidade no valor de resistividade no solo.....	49
Tabela 05: Influência da temperatura no solo.....	50
Tabela 06: Exemplo fictício de medições de resistividade.....	56
Tabela 07: Desvios relativos das medidas da tabela 06.....	57
Tabela 08: Medições de resistividade na direção 01.....	83
Tabela 09: Medições de resistividade na direção 02.....	84
Tabela 10: Medições de resistividade na direção 03.....	84
Tabela 11: Medições de resistividade na direção 04.....	84
Tabela 12: Média das medições de resistividade.....	84
Tabela 13: Desvio das medições de resistividade em relação a média.....	85
Tabela 14: Nova média das medições de resistividade e desvio recalculado.....	85
Tabela 15: Intersecção das curvas K com a reta 01 apresentando valores de K, h/a e h.....	89
Tabela 16: Intersecção das curvas K com a reta 02 apresentando valores de K, h/a e h.....	89
Tabela 17: Medições da resistência de aterramento na topologia de hastes alinhadas (v.01)	105
Tabela 18: Medições da resistência de aterramento na topologia quadrado vazio (v.01)	106
Tabela 19: Medições da resistência de aterramento interligando em um ponto as topologias hastes alinhadas e quadrado.....	108
Tabela 20: Medições da resistência de aterramento interligando em dois pontos as topologias hastes alinhadas e quadrado.....	108
Tabela 21: Medições da resistência de aterramento na topologia de hastes alinhadas (v.02)	109
Tabela 22: Medições da resistência de aterramento na topologia de quadrado vazio (v.02)	110
Tabela 23: Medições da resistência de aterramento na topologia em triângulo (v.02)	112
Tabela 24: Medições da resistência de aterramento na topologia em circunferência (v.02)	113
Tabela 25: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada de hastes alinhadas - quadrado vazio (v.02)	115
Tabela 26: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada de hastes alinhadas - circunferência (v.02)	116
Tabela 27: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada de hastes alinhadas - triângulo (v.02)	117

Tabela 28: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada em triângulo - quadrado (v.02)	118
Tabela 29: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada em triângulo - circunferência (v.02)	119
Tabela 30: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada do quadrado - circunferência com erro.....	120
Tabela 31: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada do quadrado - circunferência (v.02)	121
Tabela 32: Resumo dos valores de resistência de aterramento das malhas isoladas calculadas	128
Tabela 33: Comparativo dos valores calculados com os dados medidos das resistências de aterramento para as malhas isoladas	131

LISTA DE SIGLAS

CI	Circuitos Integrados
EMI	Interferências Eletromagnéticas
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
DR	Diferencial Residual
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
PE	Condutor de Proteção
NBR	Norma Técnica Brasileira
PC	Personal Computer
RS	Recommendad Standart (Padrão Recomendado)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Internacional de Eletrotécnica)

LISTA DE SÍMBOLOS

V – Unidade de Tensão elétrica expressa em Volts.

A – Unidade de Corrente elétrica expresso em Ampères.

Ω – Unidade para representar os valores de resistência elétrica dado em ohms.

$\Omega.m$ – Unidade para representar os valores de resistividade elétrica em Ohms-metro.

ρ – Símbolo usado para representar a resistividade elétrica.

E_t – Tensão de toque dada em Volts (V).

E_p – Tensão de passo dada em Volts (V).

ρ_{eq} – Resistividade elétrica equivalente dado em $\Omega.m$.

ρ_a – Resistividade aparente dado em $\Omega.m$.

α – Símbolo utilizado para representar a coeficiente de penetração na determinação da resistividade aparente, de unidade adimensional.

β -- Símbolo utilizado para representar o coeficiente de divergência na determinação da resistividade aparente, de unidade adimensional.

$R_{Hastesalinhadas}$ – Resistência elétrica correspondente ao dimensionamento de topologia em hastes alinhadas, dado em Ω .

$R_{circunf}$ – Resistência elétrica correspondente ao dimensionamento de topologia em circunferência, dado em Ω .

$R_{triangulo}$ – Resistência elétrica correspondente ao dimensionamento de topologia em triângulo, dado em Ω .

R_G -- Resistência elétrica correspondente ao dimensionamento de topologia em quadrado vazio primeira forma para solo de duas camadas, dado em Ω .

$R_{quadrado01}$ – Resistência elétrica correspondente ao dimensionamento de topologia em quadrado vazio primeira forma para solos com mais de duas camadas, dado em Ω .

$R_{quadrado02}$ – Resistência elétrica correspondente ao dimensionamento de topologia em quadrado vazio segunda forma, dado em Ω .

R_{1haste} – Resistência elétrica correspondente ao dimensionamento de topologia com haste isolada, dado em Ω .

$R_{hastesalinhadasmed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia isolada de hastes alinhadas, dado em Ω .

$R_{quadrado med}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia isolada em quadrado vazio, dado em Ω .

$R_{triangulomed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia isolada em triângulo, dado em Ω .

$R_{circunferenciamed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia isolada em circunferência, dado em Ω .

$R_{halinhequadrmed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia interligada das malhas em hastes alinhadas com quadrado vazio, dado em Ω .

$R_{halinhecircmed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia interligada das malhas em hastes alinhadas com circunferência, dado em Ω .

$R_{halinhetriangmed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia interligada das malhas em hastes alinhadas com triângulo, dado em Ω .

$R_{quadretriangmed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia interligada das malhas em quadrado vazio com triângulo, dado em Ω .

$R_{triangecircmed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia interligada das malhas em triângulo com circunferência, dado em Ω .

$R_{quadrecircmed}$ – Resistência de aterramento aferida para a topologia interligada das malhas em quadrado vazio com circunferência, dado em Ω .

$R_{equivalente}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, com o intuito de determinar a resistência de aterramento de malhas interligadas utilizando os valores das malhas isoladas, dado em Ω .

$R_{halinhequadr}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de hastes alinhadas e quadrado vazio utilizando os valores das malhas isoladas calculadas, dado em Ω .

$R_{halinhecirc}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de hastes alinhadas e circunferência utilizando os valores das malhas isoladas calculadas, dado em Ω .

$R_{halinhetrician}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de hastes alinhadas e triângulo utilizando os valores das malhas isoladas calculadas, dado em Ω .

$R_{quadretriang}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de quadrado vazio e triângulo utilizando os valores das malhas isoladas calculadas, dado em Ω .

$R_{quadrecirc}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de quadrado vazio e circunferência utilizando os valores das malhas isoladas calculadas, dado em Ω .

$R_{triangecirc}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de triângulo e circunferência utilizando os valores das malhas isoladas calculadas, dado em Ω .

$R_{halinhequadr2}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de triângulo e circunferência utilizando os valores das malhas isoladas medidas com o terrômetro, dado em Ω .

$R_{halinhecirc2}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de hastes alinhadas e circunferência utilizando os valores das malhas isoladas medidas com o terrômetro, dado em Ω .

$R_{halinhetrician2}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de hastes alinhadas e triângulo utilizando os valores das malhas isoladas medidas com o terrômetro, dado em Ω .

$R_{quadretriang2}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de quadrado vazio e triângulo utilizando os valores das malhas isoladas medidas com o terrômetro, dado em Ω .

$R_{quadrecirc2}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de quadrado vazio e circunferência utilizando os valores das malhas isoladas medidas com o terrômetro, dado em Ω .

$R_{triangecirc2}$ – Resistência equivalente utilizando a equação de paralelismo de resistências elétricas, das malhas interligadas de triângulo e circunferência utilizando os valores das malhas isoladas medidas com o terrômetro, dado em Ω .

$erro_{halinhequadr}$ – Erro em porcentagem entre os valores de resistência calculada utilizando o equacionamento de paralelismo e da resistência de aterramento aferida com o terrômetro, para as topologias interligadas de hastes alinhadas e quadrado vazio.

$erro_{halinhecirc}$ – Erro em porcentagem entre os valores de resistência calculada utilizando o equacionamento de paralelismo e da resistência de aterramento aferida com o terrômetro, para as topologias interligadas de hastes alinhadas e circunferência.

$erro_{halinhetriang}$ – Erro em porcentagem entre os valores de resistência calculada utilizando o equacionamento de paralelismo e da resistência de aterramento aferida com o terrômetro, para as topologias interligadas de hastes alinhadas e triângulo.

$erro_{quadretriang}$ – Erro em porcentagem entre os valores de resistência calculada utilizando o equacionamento de paralelismo e da resistência de aterramento aferida com o terrômetro, para as topologias interligadas de quadrado e triângulo.

$erro_{quadrecirc}$ – Erro em porcentagem entre os valores de resistência calculada utilizando o equacionamento de paralelismo e da resistência de aterramento aferida com o terrômetro, para as topologias interligadas de quadrado e circunferência.

$erro_{triangecirc}$ – Erro em porcentagem entre os valores de resistência calculada utilizando o equacionamento de paralelismo e da resistência de aterramento aferida com o terrômetro, para as topologias interligadas de triângulo e circunferência.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS GERAIS	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3 METODOLOGIA	16
2 EMBASAMENTO TEÓRICO	19
2.1 FUNÇÕES DE UM ATERRAMENTO	19
2.2 PRINCIPAIS TIPOS DE ATERRAMENTO	26
2.3 UM POUCO SOBRE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA), SURTOS ELÉTRICOS E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	30
2.4 CHOQUE ELÉTRICO, TENSÃO DE PASSO E TENSÃO DE TOQUE	39
2.5 RESISTIVIDADE DO SOLO	47
2.5.1 Influência da Umidade no Solo	48
2.5.2 A Influência da Temperatura no Solo	49
2.6 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO	51
2.6.1 Cuidados Necessários para a Medição	55
2.7 MÉTODOS DE ESTRATIFICAÇÃO	58
2.7.1 Modelagem de Solos com Duas Camadas	59
2.8 RESISTIVIDADE APARENTE	65
2.9 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO	70
2.9.1 Valores Recomendados para uma Resistência de Aterramento	71
2.9.2 Método da Queda de Potencial para Encontrar Resistência de Aterramento	73
2.9.3 Cálculo da resistência de aterramento	77
3 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA	82
3.1 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE NO SOLO	82
3.1.1 Estratificação do Solo	86
3.2 CONSTRUÇÃO DAS MALHAS DE ATERRAMENTO	91
3.3 OBTENÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTOS PELO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL	105
3.3.1 Medição das resistências de aterramento para as topologias isoladas	109
3.3.2 Medição das resistências de aterramento para topologias interligadas	115
4 SIMULAÇÕES	123
5 ANÁLISE COMPARATIVA TEÓRICO-EXPERIMENTAL DAS MALHAS INTERLIGADAS	131
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES	136
REFERÊNCIAS	138

1 INTRODUÇÃO

Antes de falar propriamente da importância de um aterramento elétrico, e de todos os aspectos importantes a serem destacados que o circundam, é importante explicar um pouco do contexto histórico em função do surgimento do aterramento, em que o mesmo foi evoluindo até chegar nos moldes que está na atualidade.

A aplicabilidade de um aterramento elétrico foi apenas no século XIX, com o aprimoramento e ampliação no uso dos telégrafos, inicialmente contando como ponto de partida o ano de 1820, os sistemas eletromagnéticos de telégrafo com longas distâncias utilizavam dois ou mais condutores para transmissão de sinal e retorno de corrente [1].

Por volta de 1836, um cientista alemão, Karl August Steiheil, iniciou seus estudos para que a terra fosse usada como caminho de retorno para completar o circuito nessas linhas de telégrafo, foi proposto pelo mesmo que a terra fosse um condutor de retorno desde os terminais do cabo fossem enterradas no subsolo [1]. A partir desse avanço o custo que estava associado a essas linhas foi diminuído de forma considerável, pois tornou desnecessário o uso de um condutor, tornando assim mais acessível a disseminação dos telégrafos.

Avançando na linha do tempo, indo para o ano de 1851, com a proliferação dos telégrafos a partir desse ano, havia cerca de 50 companhias em operação nos Estados Unidos, sendo a Western Union Telegraph Company uma das mais reconhecidas, já em 1861 a mesma empresa finalizou a primeira linha de telégrafo transcontinental entre Saint Joseph no estado de Missouri até Sacramento no estado da Califórnia[1].

Apesar de todos os avanços adquiridos até aqui, e mesmo utilizando aterramento elétrico em todas as linhas, ainda havia problemas na maior parte delas, provindas de uma má condutividade do solo devido a um solo seco, e como tentativa de solucionar esse problema era jogado água nas hastes de aterramento para uma melhora na condução de corrente elétrica[1].

Na era da segunda Revolução Industrial, como a eletricidade e as leis de eletromagnetismo ainda estavam no processo de descoberta, os acidentes eram frequentes até mesmo porque a preocupação com a segurança dos funcionários também não era algo colocado como prioridade, para se ter uma melhor noção

máquinas operavam com tensões até 2,5kV com baixa eficiência, além de se encontrar facilmente fios expostos, não havia praticamente nenhum protocolo de segurança, nem uso de equipamentos de proteção coletiva e/ou individual [1]. Em decorrência dessas condições surge a necessidade de melhora no âmbito de segurança das fábricas e também daquilo que está relacionada de forma direta com o uso de energia elétrica, com o intuito de proteger pessoas e posteriormente os equipamentos.

Colocando o foco agora para a proteção de instalações e edificações contra as descargas atmosféricas situando-se ainda na segunda metade do XIX, esse tipo de proteção era muito pouco enfatizado, o que existia era o simples para-raios Franklin e o mesmo atendia as exigências quanto a legislação da época [2]. Em decorrência disso a estrutura toda que formava a rede elétrica era frequentemente danificada por essas descargas, causando a interrupção no fornecimento, e conseqüentemente prejuízo para quem detinha a posse de distribuição da energia elétrica.

Com o intuito de tentar diminuir os prejuízos na rede elétrica causado pelas chuvas, temporais, vendavais e afins, iniciaram-se os estudos aos modos de aterramento elétrico e como o mesmo se comportava durante uma descarga atmosférica [2].

Dentre desses estudos realizados, destaca-se o comportamento de um aterramento muito diferente quando estava sujeito a correntes elétricas de impulso com alta intensidade quando comparadas a correntes de baixa intensidade e frequência[2], mostrando que uma corrente proveniente de uma descarga por se tratar de altas frequências e de alta intensidade modifica de forma significativa os efeitos indutivos presentes, assim como distorções harmônicas em um aterramento, conseqüentemente a dispersão de corrente e das linhas equipotenciais será bem diferente se a corrente for em baixas frequências.

Dentro de todo o contexto apresentado, é importante entender que a evolução do aterramento ocorreu paralelamente com o crescimento na demanda de energia elétrica, quanto mais se necessitou de energia elétrica, mais foi evoluindo os estudos e tecnologias em relação a geração, transmissão e distribuição conforme os anos foram passando, assim como todos os equipamentos que estão envolvidos nesse processo.

O trabalho tem o intuito de apresentar conceitos básicos que estão relacionados com o aterramento elétrico para que passe ao leitor a importância de um aterramento e de que o mesmo vai muito além de um terceiro pino em uma tomada. Outro objetivo é o de realizar uma análise teórica experimental quanto aos valores de resistência elétrica encontrados quando se interligam topologias de aterramentos conhecidas, como a malha em triângulo, hastes alinhadas, quadrado vazio e em circunferência, relatando os pontos mais importantes observados ao longo de todo esse processo, e na parte prática para melhor detalhar o que houve de maior relevância colocar fotos no processo de construção e medições correspondentes.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

De acordo com o desenvolvimento do trabalho adquirir uma noção geral mais aprofundada daquilo que envolve a área de aterramentos elétricos, complementando o conhecimento prévio visto na disciplina dentro da matriz curricular.

Pela implementação na construção de um aterramento elétrico observar, e consequentemente aprender com questões que poderão ocorrer ao decorrer da prática da profissão quando o assunto for direcionado a essa vertente de aterramentos, como cuidados nas medições de resistividade e resistência, o que fazer quando se deparar com solos muito rochosos na construção de uma malha, entre outros. Além de realizar análises em cima daquilo específico proposto pelo projeto, ao finalizar o trabalho estar mais preparado para o exercício da profissão de engenheiro.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentro dos objetivos específicos está descrito tudo aquilo que será realizado dentro do trabalho, desde toda a descrição teórica que envolve aterramentos elétricos de acordo com aquilo que é proposto, até a implementação prática juntamente com as respectivas análises.

Dentre aquilo que será desenvolvido dentro do trabalho está a de inicialmente apresentar um breve histórico, contextualizando o porquê do surgimento do aterramento elétrico, definindo na sequência o que é um sistema de aterramento e qual a finalidade do mesmo.

Após apresentar as definições básicas de um aterramento, será explicitado alguns dos aspectos que o cercam, como a definição de alguns termos que estão diretamente ligados a um projeto de aterramento como a estrutura básica que o constitui, tensão passo, tensão de toque, choque elétrico e SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas).

Depois de explicitar aquilo que envolve um aterramento, é necessário definir uma grandeza fundamental para o desenvolvimento de um projeto que é a resistividade do solo e apresentar os principais aspectos que a envolvam, como aspectos que influenciam no valor final da resistividade, os cuidados para aferição da resistividade do solo em campo além de detalhar como esse processo é realizado, e por fim explicar o que é e como se realiza o processo de estratificação do solo.

Os últimos conceitos a serem apresentados dentro da fundamentação teórica dentro do trabalho são a resistividade aparente e resistividade aparente, ao definir esses conceitos e explicar como os mesmos são calculados juntamente com todos os outros fatores descritos até aqui, é possível dimensionar um projeto de aterramento elétrico.

A implementação prática é dividida em cinco partes em que se constitui da estratificação do solo, da construção das malhas de aterramento, da medição das resistências das topologias isoladas e posteriormente interligadas de duas a duas, do cálculo teórico das resistências de aterramento de todas as configurações vistas na prática, e por fim é realizada a análise teórico-experimental das malhas interligadas.

Na finalização do trabalho estão as considerações finais e sugestões do trabalho, relatando de forma generalizada como foi a experiência, traçando a ideia daquilo que poderia ser feito com intenção de estabelecer a continuidade em cima desse estudo de caso.

1.3 METODOLOGIA

Para a construção de todo o trabalho utilizou-se a bibliografia clássica de aterramentos elétricos nos livros do (KINDERMAN,1995) e do (VISACRO FILHO, 2002), e também o uso das normas NBR 5419/2015 e NBR 5410/2004, e a partir

desses foi possível realizar praticamente todo o embasamento teórico no que diz respeito a parte necessária a ser compreendida para realização da parte prática, isso vale para as medições de resistividade do solo, para assim realizar a estratificação, para construção das malhas de aterramento e por último na medição das resistências de aterramento, assim como para a realização dos respectivos cálculos em cada um dos processos.

Para complementação do embasamento teórico em aspectos como choque elétrico, tensão de passo, tensão de toque, importância de um aterramento elétrico, tipos de aterramentos foram utilizadas outras referências que no decorrer do texto estão especificadas de acordo com que forem citadas.

A partir do embasamento e da parte prática é possível realizar a montagem de todo o corpo do texto, e o mesmo foi estruturado da seguinte forma:

- Embasamento Teórico descrito dentro do capítulo 2;
- Implementação prática descrita em três diferentes capítulos diferentes, onde a coleta dos dados de resistividade, estratificação do solo, construção das malhas de aterramento e a medição das resistências das malhas isoladas e posteriormente interligados estão dispostas dentro do capítulo 3.

Na construção das malhas, medição de resistividade do solo e medição das resistências de aterramento foram utilizados alguns equipamentos dentre os quais se destacam:

- Cabos cobreados nu;
- Hastes de cobre;
- Terrômetro;
- Cavadeira manual, picareta, enxada;
- Cabos de cobre 1.5mm²;
- Kit para solda exotérmica;
- Alicates Molde de solda exotérmica.

E no desenvolvimento do processo da estratificação assim como para a obtenção das resistências de aterramento em campo a plotagem dos gráficos foi por meio de software computacional.

Dentro do capítulo 4 está contido todos os cálculos e simulações no que diz respeito às resistências de aterramento das malhas isoladas de acordo com os dados obtidos de estratificação do solo, e para as resistências com as malhas interligadas utiliza-se a relação de paralelismo de resistências elétricas sob duas perspectivas, na

primeira essa equivalência é calculada de acordo com os dados obtidos da resistência das malhas isoladas calculado pela estratificação, e numa segunda perspectiva a equivalência de paralelismo é realizada utilizando os dados de resistência das malhas isoladas medidas em campo.

No capítulo 5 é realizada as análises teórica-experimental de todas as configurações possíveis das malhas interligadas de duas a duas. É por meio dos erros calculados entre a resistência de aterramento calculada e a aferida que é feita todas as análises.

É importante ressaltar também que excluindo o processo de construção de uma malha de aterramento, todos os outros passos dentro da parte prática foram vistos dentro da disciplina de Aterramentos Elétricos, facilitando assim o desenvolvimento do trabalho.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

É neste capítulo em que será explicitado os principais conceitos que envolvem um aterramento elétrico, além de criar a base teórica de toda a implementação prática realizada dentro do trabalho, é aqui que será apresentado conceitos importantes como resistividade do solo, métodos de estratificação, explicar as funções, tipos de ligações e dimensionamento de um aterramento, discorrer quanto a definição de assuntos relacionados de forma direta como choque elétrico, tensão de passo e tensão de toque, entre outros. Sendo o próximo capítulo responsável por apresentar e analisar todos os dados colhidos referentes aos experimentos práticos, sem que haja a necessidade de explicitar o passo a passo de como foi realizado cada um dos procedimentos.

2.1 FUNÇÕES DE UM ATERRAMENTO

O aterramento elétrico, tem esse nome pois utiliza a terra para realizar a sua função seja para equalização de tensão, escoamento de corrente indesejadas, e/ou para garantia de segurança as pessoas. Em sistemas elétricos não tem necessidade de um ponto estar ligado à terra para funcionar, entretanto para garantia de um potencial com tensão zero volts o condutor neutro é conectado a um eletrodo aterrado, e a concessionária correspondente do seu estado exige que isso seja feito para todas as novas instalações elétricas, não é exigido um projeto de aterramento completo e detalhado, e sim que pelo menos uma haste esteja ligada a terra, assim pensando num todo existindo inúmeros pontos ao longo de toda a cidade aterrados, o potencial zero é estabelecido com sucesso independente das condições do solo de cada um desses pontos.

Por definição de acordo com as normas um aterramento elétrico se constitui de um elemento ou conjunto de elementos, condutores de eletricidade, enterrados nos solos e que tem a capacidade de dispersas as correntes elétricas que são indesejáveis dentro uma instalação/sistema elétrico [3].

Tendo como funções fundamentais [3]:

→ Proteger os equipamentos elétricos dos usuários em eventuais descargas atmosféricas, promovendo um caminho alternativo de baixa resistência para escoamento dessa corrente elétrica até a terra de forma segura;

→ Descarregar cargas estáticas, assim como eventuais fugas de corrente advindas de curto-circuito, das carcaças metálicas de máquinas até a estrutura de aterramento;

→ Promover um melhor funcionamento dos dispositivos de proteção como disjuntores, fusíveis, devido ao escoamento de correntes elétricas indesejáveis serem descarregadas para o aterramento essa corrente que eventualmente possa ser desviada para a terra.

Portanto, um aterramento é fundamental dentro de uma instalação elétrica pois proporciona uma melhor integridade de equipamentos, pessoas e animais, desde que tenha sido realizado um projeto por um profissional qualificado e da maneira que é exigido pelas normas, além disso a manutenção de um aterramento elétrico tem de ser realizada independente da dimensão da instalação elétrica, o que vai modificar de por exemplo uma subestação e uma instalação residencial é a periodicidade em que se realiza a manutenção. Sendo assim, ao realizar a análise do sistema de tempos em tempos é verificado a integralidade e funcionalidade do aterramento.

Numa instalação residencial o condutor terra corresponde ao furo no centro de um tomada, os equipamentos elétricos/eletrônicos que necessitam de aterramento para proteção do equipamento e para evitar o choque elétrico no manuseio do usuário, já vêm de fábrica com o pino correspondente ao terra, e arrancar esse pino para encaixe em uma determinada tomada ou extensão, em eventuais curtos-circuitos do equipamento coloca o indivíduo sob risco de um choque elétrico, lembrando que uma corrente de curto-circuito pode ser similar corrente nominal dependendo da situação, com isso os equipamentos de proteção como disjuntores e fusíveis não serão sensibilizados dentro de um curto prazo de tempo sob essas condições, de acordo com as especificações que os mesmos foram dimensionados.

Um exemplo de que isso possa acontecer é com os motores elétricos facilmente encontrados em oficinas, fábricas e nos eletrodomésticos, nesse equipamento a corrente elétrica circula nas bobinas do estator (parte fixa do motor), e por um processo de indução magnética faz com que o rotor (parte móvel de um motor) rotacione em torno do seu próprio eixo. Dentro desse equipamento elétrico ou em

qualquer um, por efeito joule, a circulação de corrente provoca aquecimento nos condutores elétricos, com isso em uma eventual sobrecarga, a temperatura provocada pela corrente pode ultrapassar o limiar de trabalho do material isolante que reveste os cabos das bobinas, ocasionando microfissuras nos enrolamentos e consequentemente pequenas correntes de curto-circuito aparecem e tendem a sair para carcaça metálica pela mesma ser um bom condutor, além da eliminação de cargas estáticas pelo efeito capacitivo e pela circulação de fluxo magnético provocado quando há a circulação de corrente nas bobinas, devido a esses fatores as carcaças dos motores devem ser aterradas, proporcionando um caminho de menor resistência para escoamento dessas correntes indesejadas, a tinta também é usada nas carcaças para isolar a mesma, entretanto nas condições hostis que um ambiente industrial promove, com o passar do tempo a tinta tende a não resistir, perdendo assim a propriedade isolante, assim nunca se deve descartar o aterramento em um motor.

O aterramento elétrico no setor/instrumentação industrial torna-se indispensável assim como em qualquer tipo de instalação elétrica, devido a sua funcionalidade, e sua ausência ou a instauração de um aterramento que não satisfaz as condições necessárias da instalação, acarreta em outras consequências além de choques elétricos ao usuário, resposta lenta ou ausente dos dispositivos de segurança, dentre os quais se pode destacar[3]:

- A quebra de comunicação entre máquina e PC em modo online, especialmente se o protocolo de comunicação for utilizando cabo RS-232;

- Aquecimento excessivo de equipamentos de potência como inversores, conversores e motores;

- Interferências na imagem e ondulações em equipamentos com monitoramento de vídeo;

- Queima de circuitos integrados (CI's) ou placas eletrônicas sem uma razão imediata;

- Funcionamento irregular, com constantes travamentos, em computadores pessoais e equipamentos digitais;

- Excesso de EMI (interferências eletromagnéticas) geradas;

- Falhas intermitentes, sem um seguimento de padrão.

Além de tudo que foi citado anteriormente na ausência de um aterramento elétrico ou com um sistema inadequado para a instalação, compromete e muito, a confiabilidade do sinal de equipamentos utilizados na instrumentação industrial,

devido a geração de ruídos causados pelo excesso de EMI, sendo isso, algo típico dentro de um ambiente industrial. Esses instrumentos citados anteriormente, costumam operar na comunicação com sinais de tensão e corrente elétrica na unidade respectivamente de mV e mA, conseqüentemente um ruído por menor que seja, altera esse sinal emitido, modificando assim a leitura obtida no equipamento, perdendo assim a sua confiança.

Existem outras técnicas para reduzir esses ruídos e quando são usadas juntamente com um aterramento adequado para a instalação, usualmente costuma solucionar esse tipo de problema, e dentre essas técnicas estão a distribuição dos cabos e tipos de cabos [4].

E em relação aos tipos de cabos aqueles com blindagem possuem grande importância para manutenção da integridade e confiabilidade dos sistemas, se tornando um grande aliado do sistema de aterramento nessas condições impostas dentro da indústria [4].

O ruído que interfere os sinais de comunicação nada mais é que um sinal indesejável seja ele magnético ou elétrico, o qual prejudica o sinal real, e na maior parte dos casos é proveniente de fontes externas presentes em todo canto dentro de uma indústria, dentre essas fontes de ruídos estão motores elétricos, máquinas que utilizam arcos voltaicos, inversores entre outros[4].

Um ponto importante a ser destacado é de que tanto o aterramento da malha de sinal quanto o aterramento do elemento sensor (conexão ao processo), há a necessidade de estarem a pleno funcionamento [4]. E mesmo que o aterramento tenha sido dimensionado e instalado da maneira que atende aos requisitos da instalação, imprevistos acontecem, com isso há a necessidade de revisão e manutenção do sistema de aterramento elétrico regularmente para a garantia de um pleno funcionamento de seu aterramento, conforme já havia sido mencionado.

Por consequência disso, em um ambiente de indústria a necessidade de um bom aterramento é ainda maior, em decorrência da transição do setor industrial para uma automatização de todos os processos dentro das plantas de produção, os equipamentos eletrônicos estão por toda parte, assim se deve considerar na análise de uma eventual falha em um determinado processo, a verificação das condições do aterramento antes de apontar o defeito no equipamento em si.

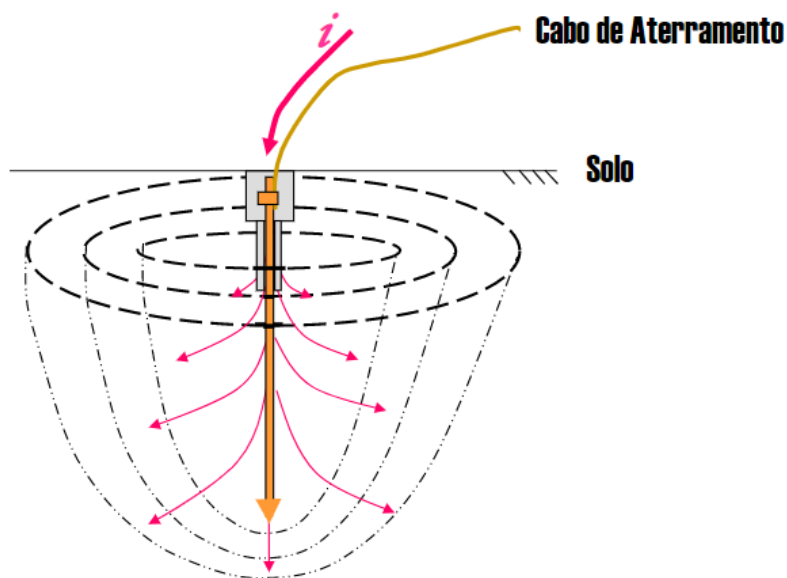
Para dimensionamento e implementação de um aterramento é necessário se atentar em alguns detalhes que são pertinentes desde os equipamentos utilizados

para a construção até como ocorrem a dispersão de corrente e das linhas equipotenciais dentro de um projeto.

Para construir um aterramento devem ser utilizados ferramentas e materiais dentre os quais estão hastes de cobre, cabo de cobre nu, condutor na cor verde-amarela ou verde, kit para solda exotérmica ou terminal à pressão, cavadeira, pá ou enxada, brita, terrômetro, equipamentos de proteção individual (EPI's) como luvas, óculos, capacete, protetor solar, entre outros.

Um projeto de aterramento pode variar desde uma simples haste ou cabo enterrado até uma topologia com um número muito alto de eletrodos, tudo vai depender o tipo de instalação, e condições do solo em que se está inserindo o aterramento, mas antes disso é importante entender como acontece a dissipação de tensão e corrente, o porquê deve ser respeitado uma certa distância quando se utiliza mais de uma haste no projeto. A figura 01 a seguir ilustra um exemplo de como é o comportamento da corrente e das curvas de potencial em um projeto com uma única haste.

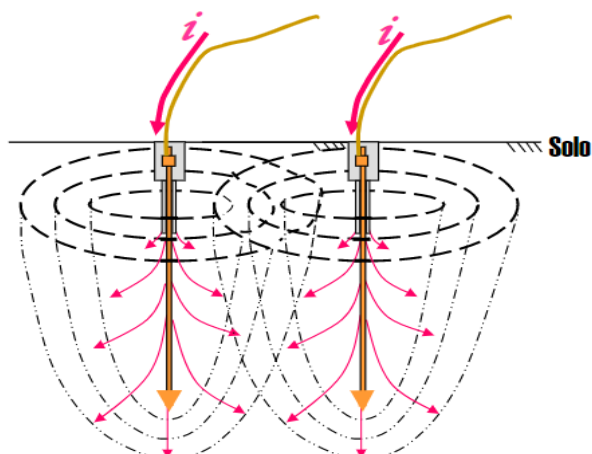
Figura 01: Correntes e Curvas de potencial em uma haste fincada no solo



Fonte [5]

Como foi apresentado na figura 01 é necessário um espaço significativo ao redor da haste fincada para que haja a dissipação total da corrente e do potencial, com isso em mente, ao se inserir mais hastes na sua topologia de aterramento tem de se adotar uma distância mínima. A figura 02 ilustra o comportamento na dissipação de corrente e tensão quando duas hastes interligadas estão muito próximas.

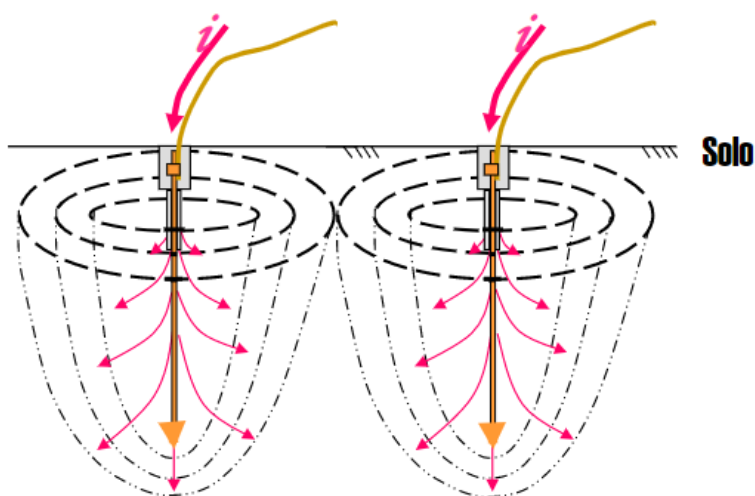
Figura 02: Correntes e curvas de potencial com hastes muito próximas



Fonte [5]

Dentro de uma topologia de aterramento, a interligação de hastes em paralelo diminui de forma significativa no valor da resistência de aterramento, entretanto quando hastes estão muito próximas a tendência é de que isso não ocorra devido a zona de conflito das linhas equipotenciais, ao aumentar a distância entre as hastes, essa zona de conflito diminui, melhorando o funcionamento e diminuindo a impedância do aterramento [5]. A figura 03 na sequência apresenta o que ocorre quando aumenta a distância entre hastes.

Figura 03: Correntes e curvas de potencial de hastes em paralelo adotando uma distância mínima recomendada

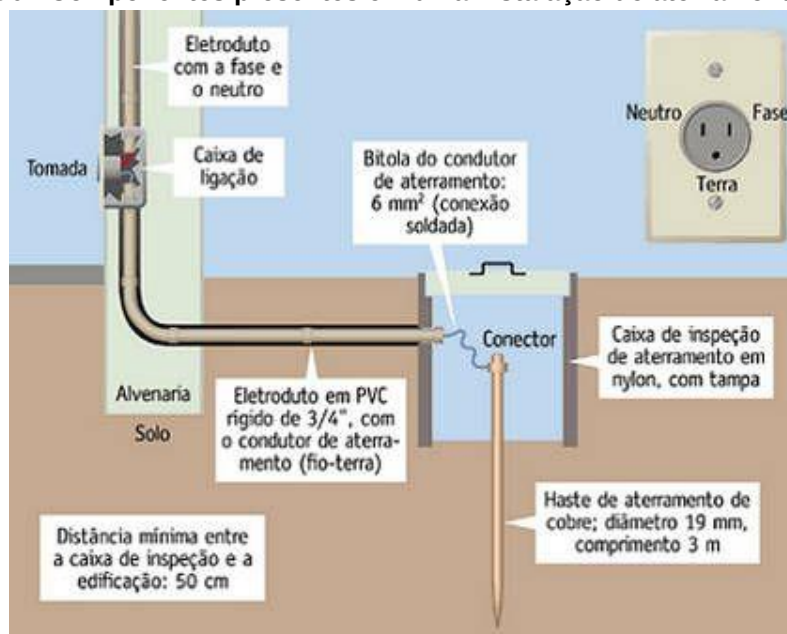


Fonte [5]

Na interligação de hastes alinhadas quanto maior for a distância, melhor será a eficiência do aterramento, e é recomendado para esses tipos de sistema que a menor distância adotada entre hastes seja igual ou maior que o comprimento das mesmas [5]. Em outras palavras, num sistema em que se utiliza hastes com comprimento de 3m, a distância mínima em que se exige entre as hastes seja de no mínimo de 3m, independente de qual for a topologia utilizada.

Em qualquer tipo de instalação elétrica a utilização do aterramento é de suma importância, e em termos construtivos os mesmos são bem similares. São constituídos por uma caixa de inspeção para assim ter acesso a todas as hastes utilizadas na instalação, o cabo de cobre que faz a conexão do quadro de distribuição à malha de aterramento deve possuir isolamento e o mesmo deve ser passado em eletrodutos, todos os pontos de energia como tomadas devem possuir a cabo de aterramento e ponto para conexão. Havendo mais de uma topologia na instalação recomenda-se que se interligue essas malhas por meio de cabo cobreado ou de cobre nu. A figura 04 a seguir ilustra um exemplo de uma instalação de sistema de aterramento constituído por uma haste isolada, seguindo as especificações básicas de um aterramento.

Figura 04: Componentes presentes em uma instalação de aterramento elétrico



Fonte [6]

Para a confecção de um projeto não basta para o projetista apenas saber executar a construção de uma topologia de aterramento, cabe ao profissional conhecimentos específicos como realizar a estratificação do solo no local do aterramento, o porquê do comprimento das hastes, da quantidade de hastes, da topologia escolhida, da distância entre hastes [5]. Todas essas questões abordadas, devem ser questionadas ao projetista por parte do cliente sempre que achar necessário, pois a complexidade de um aterramento é muito maior que uma haste fincada no solo.

Outro aspecto importante a ser ressaltado é de que não existe projeto de aterramento perfeito que vai servir para qualquer tipo de solo, para cada projeto deve ser realizado um projeto em específico, e na parte do desenvolvimento verificar a melhor topologia para aquele tipo de solo.

2.2 PRINCIPAIS TIPOS DE ATERRAMENTO

O aterramento pode ser classificado quanto a seu tipo de ligação e quanto a sua funcionalidade. Em termos de funcionalidade existem três tipos principais de aterramento, que são: aterramento funcional, aterramento de proteção e aterramento de trabalho.

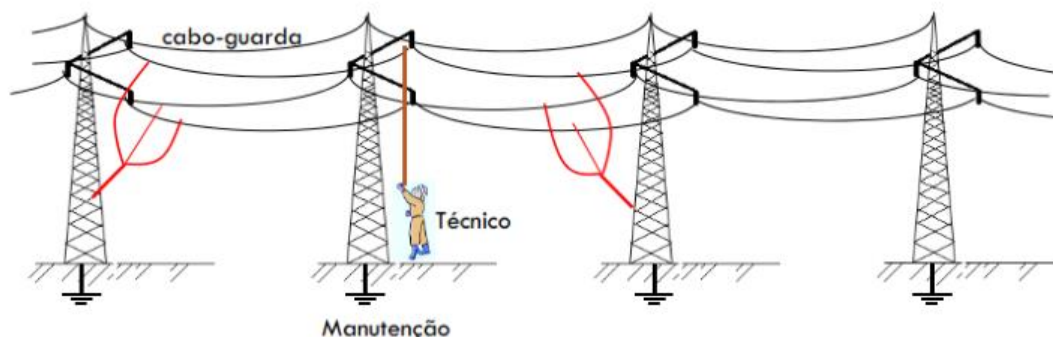
O aterramento funcional consiste na ligação à terra de um dos condutores presentes no sistema elétrico, usualmente esse condutor é o neutro, e esse tipo de aterramento está relacionado com o funcionamento correto, seguro e confiável da instalação [3]. É nesse tipo de aterramento em que há equipotencialização de tensão, com a presença do aterramento é garantido que o condutor neutro obtenha a tensão de 0 volts.

No aterramento de proteção, ocorre a ligação à terra das massas e daqueles elementos condutores estranhos à instalação, em que o objetivo é a proteção contra choques elétricos por contato indireto [3], além de possibilitar um melhor funcionamento dos dispositivos de proteção presentes na instalação.

Já no aterramento de trabalho, esse é um tipo de instalação provisória, tem como objetivo tornar possível sem risco de acidente atividades de manutenção em partes da instalação elétrica que normalmente estão sob tensão, ao finalizar a

manutenção, deve ser desfeito o aterramento [3]. A figura 05 representa um exemplo de um aterramento de trabalho, na manutenção de uma linha de transmissão.

Figura 05: Manutenção em uma linha de transmissão utilizando aterramento de trabalho



Fonte [7]

Nesse tipo de manutenção, no local em que está sendo executada deve seguir os parâmetros na sequência [7]:

- 1º: Dois disjuntores e suas seccionadoras abertas, correspondentes as extremidades das linhas de transmissão;
- 2º: Chaves seccionadoras de aterramento fechadas nas respectivas subestações;
- 3º: Os aterramentos temporários de trabalhos são instalados nas duas torres adjacentes ao local em que se está realizando a manutenção, esse aterramento tem como objetivo eliminar qualquer tipo de tensão residual que estiver nas linhas de transmissão.

Além dos 3 passos citados, o profissional designado para a manutenção deve portar os equipamentos de proteção individual para esse tipo de serviço, pois em eventuais acidentes o profissional está protegido da maneira adequada. Ao finalizar o processo de manutenção, realizar os passos descritos anteriormente do terceiro para o primeiro passo.

Os aterramentos também são classificação quanto ao tipo de ligação como foi descrito nos parágrafos anteriores, mas antes disso, é necessário apresentar conceitos básicos como a diferenciação do condutor terra (PE) do condutor neutro (N), que na sua essência são totalmente distintos. O terra é uma espécie de condutor baseado em hastes metálicas fincadas no solo, que em condições normais de funcionamento da instalação, não há a circulação de corrente elétrica [8]. Já o neutro, um condutor fornecido pela concessionária, vem junto com o condutor fase, tem como

função ser o retorno da corrente elétrica que percorre a instalação, e nem sempre possui a tensão de 0 volts, devido ao desbalanceamento entre as fases [8].

Segundo a norma NBR 5410:2008, correspondente para instalações de baixa tensão, os aterramentos de proteção e funcional, corresponde a três esquemas básicas quanto a ligação que são o TT, TN e IT. A primeira letra corresponde a alimentação em relação à terra, sendo [9]:

- ☐ T – Um ponto está conectado/aterrado de forma direta;
- ☐ I – Ponto não aterrado.

Já a segunda letra corresponde a ligação do aterramento em relação as massas/cargas elétricas, e são definidas por [9]:

- ☐ T – As massas estão diretamente aterradas em qualquer ponto;
- ☐ N – A ligação à terra é feita no ponto de aterramento da alimentação, não há um aterramento próprio da instalação;
- ☐ I – As cargas estão isoladas e não são aterradas.

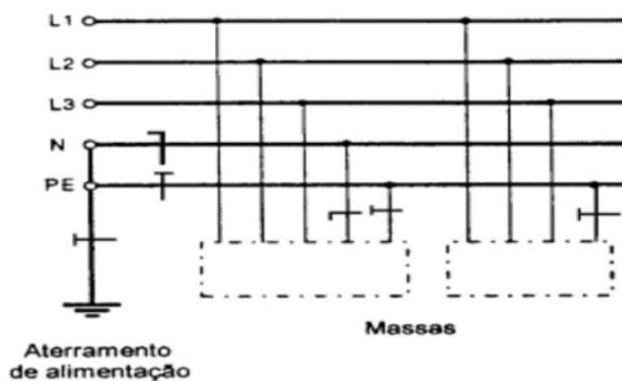
Na presença de outras letras nos sistemas de aterramentos, as mesmas definem a interação entre o aterramento da carga com o aterramento da alimentação, se há a conexão ou não entre eles por meio de condutores, e são definidos [9]:

- ☐ S – O condutor de proteção e do neutro (PE) são condutores separados;
- ☐ C – O condutor de proteção e neutro são definidos por apenas um condutor (PEN).

A partir da definição das letras consegue identificar o esquema de ligação de qualquer sistema. Para resumo, será explicitado apenas os mais utilizados, ilustrando como é feita a ligação dos mesmos.

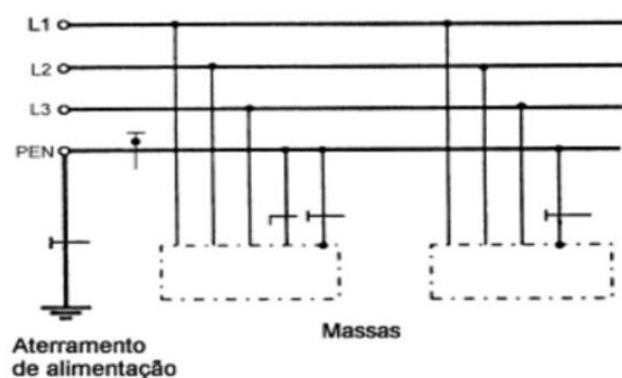
Num sistema TN-S há a conexão do neutro aterrado com o condutor terra correspondente da carga elétrica, nesse tipo de ligação utiliza-se apenas um aterramento, conforme é ilustrado na figura 06. O sistema TN-C bastante similar ao anterior, é regido pela norma, entretanto não é recomendado, nesse esquema de ligação o condutor terra e o condutor neutro são designados pelo mesmo cabo, a notação do elemento de proteção nesse tipo de ligação é definido por PEN ao invés PE(usualmente utilizado), na figura 07 apresenta com detalhes como é feito a ligação desse sistema.

Figura 06: Sistema TN-S



Fonte [9]

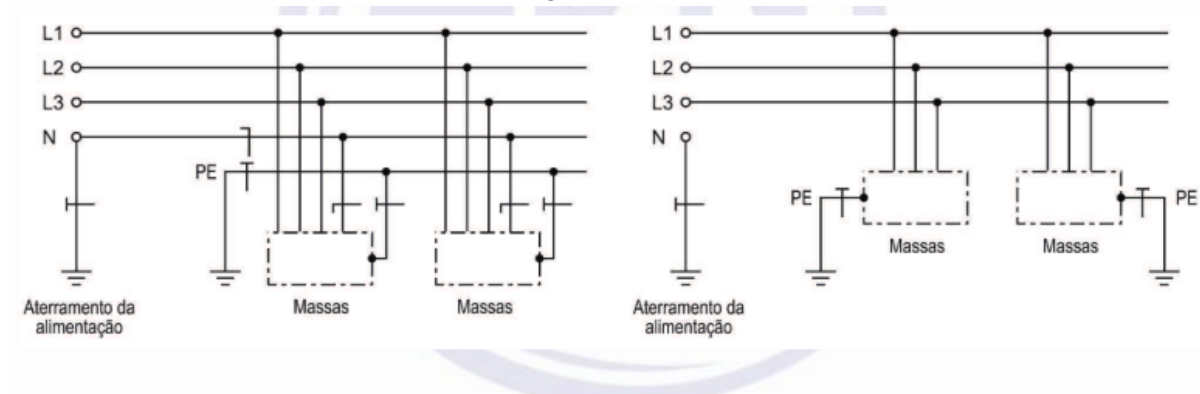
Figura 07: Sistema TN-C



Fonte [9]

No sistema TT dentro das instalações elétricas possui o neutro aterrado, e o condutor de proteção(terra) também aterrado, entretanto diferentemente dos esquemas descritos anteriormente, nesse sistema são dois aterramentos independentes e não são conectados em nenhum ponto, na figura 08 demonstra como é o esquema de ligação desse sistema.

Figura 08: Sistema TT



Fonte [9]

Sabendo como realizar a ligação de um sistema de aterramento dentro de uma instalação, cabe agora entender como é realizado o dimensionamento do condutor de proteção, pois um sistema de aterramento bem elaborado, entretanto utilizando uma bitola de cabo errônea, torna o sistema menos eficiente. A bitola do condutor de proteção pode ser a mesma da empregada dos cabos de alimentação (fase e neutro), entretanto utilizando o que a norma NBR5410, pode se utilizar diâmetros menores dependendo do caso, diminuindo assim custos na instalação. Para especificações com o condutor da fase sendo menor ou igual a 16mm^2 , utilizar a mesma espessura para o condutor de proteção, de 16 a 35mm^2 , utilizar 16mm^2 para proteção como seção mínima, e para condutores maiores que 35mm^2 como seção mínima adotar a relação para proteção de (Seção da fase/2) [9]. Como as bitolas dos condutores são em números comerciais pré-determinados após realizar a divisão nesses casos, escolher a bitola superior mais próxima do encontrado.

Além do aterramento elétrico existem dispositivos e/ou instalações de segurança/proteção que atuam como complemento ou necessitam do aterramento para o seu funcionamento, dentre esses destaca-se o SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas), disjuntor DR (Diferencial Residual) e o DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos), todos esses citados serão explicados no tópico seguinte.

2.3 UM POUCO SOBRE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS(SPDA), SURTOS ELÉTRICOS E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Como afirmado anteriormente, existem elementos que tem por finalidade auxiliar o aterramento ou utilizam o mesmo como ferramenta para o seu funcionamento, dentre esses está o SPDA. Esses sistemas tem objetivo de catalisar eventuais descargas atmosféricas promovendo um caminho seguro para a dissipação dessa corrente preservando estruturas, equipamentos e pessoas.

Os componentes do subsistema de captação dentro dos sistemas de proteção contra descargas são instalados nos cantos salientes, nas pontas expostas e nas

beiradas no nível superior de qualquer fachada [10], e é projetado para oferecer um caminho de menor resistência, quanto menor, melhor, até a terra.

Importante destacar que a instauração de um SPDA não impede a incidência de descargas atmosféricas no local, as mesmas são fenômenos naturais causados pelo atrito nas nuvens no céu e este atrito gera uma grande diferença de potencial com a terra, podendo romper o dielétrico que é o ar por alguns instantes, havendo assim a descarga, e a imprevisibilidade dessas descargas, torna impossível anular por completo a sua incidência, entretanto com a implementação de um SPDA os riscos são minimizados ao máximo para a estrutura em questão e tudo que está contida nela[11]. A figura 09 ilustra como acontece uma descarga e como o SPDA atua para dissipar de forma segura essa corrente elétrica.



Fonte [11]

Sabendo a função básica de um sistema de para-raios, tem de se explicar o tipo de instalação em que é necessário a instauração de um SPDA. Pela NR10 (Norma Regulamentadora) de segurança em instalações e serviços em eletricidade, estabelece que as instalações elétrica com potência superior a 75kW devem possuir e manter os prontosuários das instalações elétricas(PIE), e dentro desses documentos é necessário que contenha o relatório de inspeção do SPDA e do aterramento elétrico,

assim para estruturas com a potência superior a mencionada se deve construir e manter em funcionamento o sistema contra descargas elétricas[12].

Além da questão de potência instalada dentro de uma instalação elétrica, para saber-se há a necessidade ou não da implementação de um SPDA na estrutura, deve ser realizado a análise de gerenciamento de risco do local, todo o passo a passo e respectivos cálculos estão dispostos dentro da norma ABNT NBR 5419-2 de 2015 [13].

O gerenciamento de risco é estruturado sob a perspectiva dos seguintes critérios de perdas [13]:

- R1: Risco de perdas ou danos permanentes relacionados a vidas humanas;
- R2: Risco de perdas do patrimônio cultural;
- R3: Risco de perdas de serviços ao público;
- R4: Risco das perdas econômicas;

O risco R4 mencionado anteriormente, recomenda-se que seja levado em consideração sempre que a vantagem econômica for considerável, sendo assim mesmo que não caia nos critérios de obrigatoriedade de acordo com o gerenciamento do risco calculado, a implementação de um SPDA em instalações elétricas industriais acaba sendo fundamental, pelo fato de haver um grande valor econômico agregado a estrutura nesses ambientes. Lembrando que uma descarga atmosférica pode causar sérios danos a estrutura, dentre alguns deles estão a de [13]:

- Danos mecânicos imediatos, fogo e/ou explosão devido ao plasma quente ou um sobreaquecimento resistivo nos condutores causado pela alta intensidade de corrente elétrica gerado em uma descarga atmosférica;

- Falha ou mau funcionamento de sistemas internos devido a LEMP (Pulso Eletromagnético devidas às descargas atmosféricas);

- Danos a pessoas pelo choque elétrico provocados pelas tensões de passo e de toque resultantes dos acoplamentos resistivos e indutivos;

- Fogo e/ou explosão iniciado por centelhamento causado por sobretensões resultantes de acoplamentos resistivos e indutivos e pela própria passagem da corrente elétrica da descarga atmosférica.

A norma que rege os parâmetros de instalação de um SPDA é a NBR 5419, regulamentada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), com o intuito de minimizar todos os riscos citados anteriormente. Essa norma, é dividida em quatro partes, sendo a parte 1: Princípios gerais, parte 2: Gerenciamento de Risco, parte 3:

danos físicos a estruturas e perigos à vida, parte 4: medidas de proteção contra surto de tensão.

É na parte 3 da norma NBR 5419:2015 está detalhado as questões de proteção no interior e nas redondezas de uma estrutura, com o intuito de atenuar ao máximo os danos físicos e lesões a seres vivos causados pelas tensões de toque e passo [10].

Dentro da norma NBR5419 está descrito que a principal e mais eficaz medida contra os danos físicos (a estrutura) em eventuais descargas atmosféricas é o SPDA, e o mesmo é dividido em dois sistemas de proteção que são o SPDA interno e SPDA externo [10].

O SPDA externo tem como função interceptar uma descarga atmosférica para a estrutura por meio de um sistema de captação, depois disso, conduzir a corrente da descarga atmosférica para a terra de forma segura por meio do subsistema de descida, e por fim, dispersar a corrente da descarga na terra por meio do subsistema de aterramento [10].

Já o SPDA interno tem a função de reduzir os riscos com centelhamentos perigosos quando há a drenagem de uma descarga atmosférica por meio do SPDA externo, utilizando ligações equipotenciais ou com uma distância segura (isolação elétrica) entre os componentes do SPDA externo e outros elementos eletricamente condutores que possam estar dispostas no interior da estrutura que está sendo protegida [10].

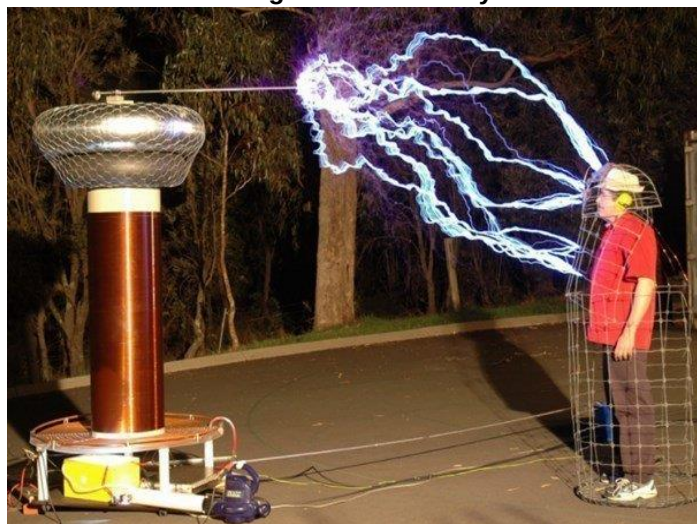
Dentro do sistema de captação de um SPDA externo a norma NBR5419:2015 estabelece os métodos aceitáveis para serem utilizados na determinação da posição desse subsistema, dentre esses métodos estão o de ângulo de proteção, método da esfera rolante e método das malhas [10]. É válido lembrar que a peça utilizada para a captação de uma descarga e o método são variáveis distintas, a peça não está diretamente relacionada com nenhum método.

Segundo a norma, os métodos da esfera rolante e das malhas são adequados para todos os tipos de estrutura, já o método do ângulo de proteção é adequado para aquelas edificações simples e está sujeito aos limites de altura conforme está descrito dentro da parte 3 da NBR5419 de 2015 [10].

O método das malhas foi e ainda é bastante utilizado para sistemas de captação em SPDA externo, o processo consiste de uma configuração de malha como o próprio nome já diz, posicionada no perímetro superior e no topo de uma estrutura, a malha é constituída por cabos de cobre nu ou chapas de alumínio e ainda possui mini captosres nos cantos da estrutura [14].

A utilização do método das malhas em um SPDA externo é baseado na teoria de Faraday, nela explica que o campo elétrico dentro de uma gaiola é zero, mesmo que seja submetido a altas corrente na sua estrutura, entretanto para que isso ocorra, é necessário que a corrente seja distribuída de forma uniforme na superfície, quanto menor a distância entre os condutores maior será o nível de proteção obtida na estrutura [11]. A figura 10 a seguir apresenta um exemplo de uma gaiola de Faraday com a pessoa contida dentro dela sendo protegida a corrente descarregada na estrutura proveniente de uma bobina de Tesla.

Figura 10: Pessoa protegida de descargas providas de uma bobina de Tesla por meio de uma gaiola de Faraday



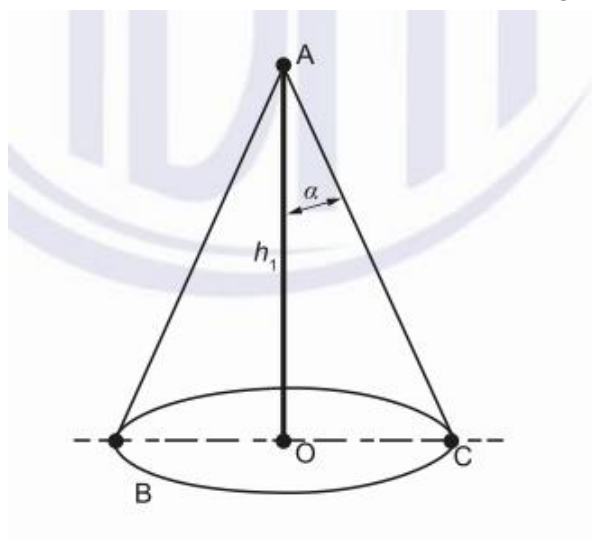
Fonte [11]

O método do ângulo de proteção, conhecido pela antiga norma NBR 5419:2005 por método de Franklin, é constituído de um elemento captor que cria um volume de proteção pela forma de um cone circular onde o vértice está posicionado no eixo do mastro [10].

A figura 11 apresenta o volume de proteção criado por esse método onde o ângulo α é dado na tabela 2 da norma NBR5419:2015-3 de acordo com a classe do SPDA, essa classe é calculado no gerenciamento de risco disposto na NBR 5419:2015-2, a altura h_1 é dado pelo conjunto de comprimento do mastro mais o

captor acima do plano de referência utilizado na instalação, o ponto A é o topo do captor, o ponto B é o plano de referência e por fim OC é o raio da base do cone de proteção[10].

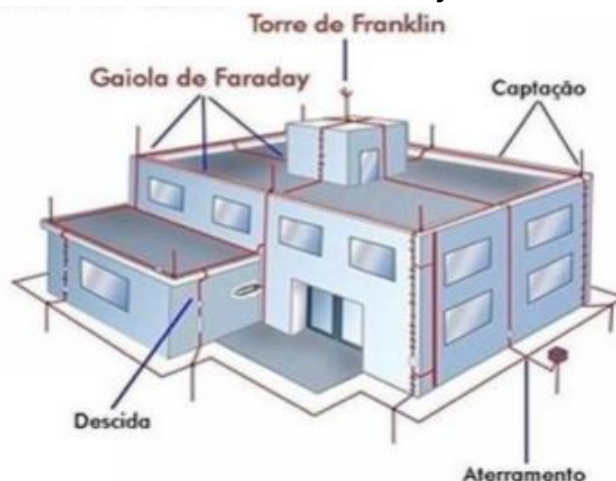
Figura 11: Volume do cone utilizando o método de ângulo de proteção



Fonte [10]

Em uma instalação pode ser implementado mais de um método de captação dentro da estrutura de um SPDA, essa junção acarreta numa maior eficiência do sistema, garantindo uma maior confiabilidade quanto a segurança da estrutura em eventuais descargas que possam ocorrer ao longo do ano, a figura 12 apresenta uma instalação em que há no ponto mais alto uma torre de Franklin(método do ângulo de proteção), e nas áreas mais baixas da cobertura é implementada a gaiola de Faraday, os dois sistemas estão conectados entre si, no desenho também é ilustrado os pontos de descida e a conexão do SPDA com o aterramento.

Figura 12: SPDA utilizando Gaiola de Faraday e uma Torre de Franklin



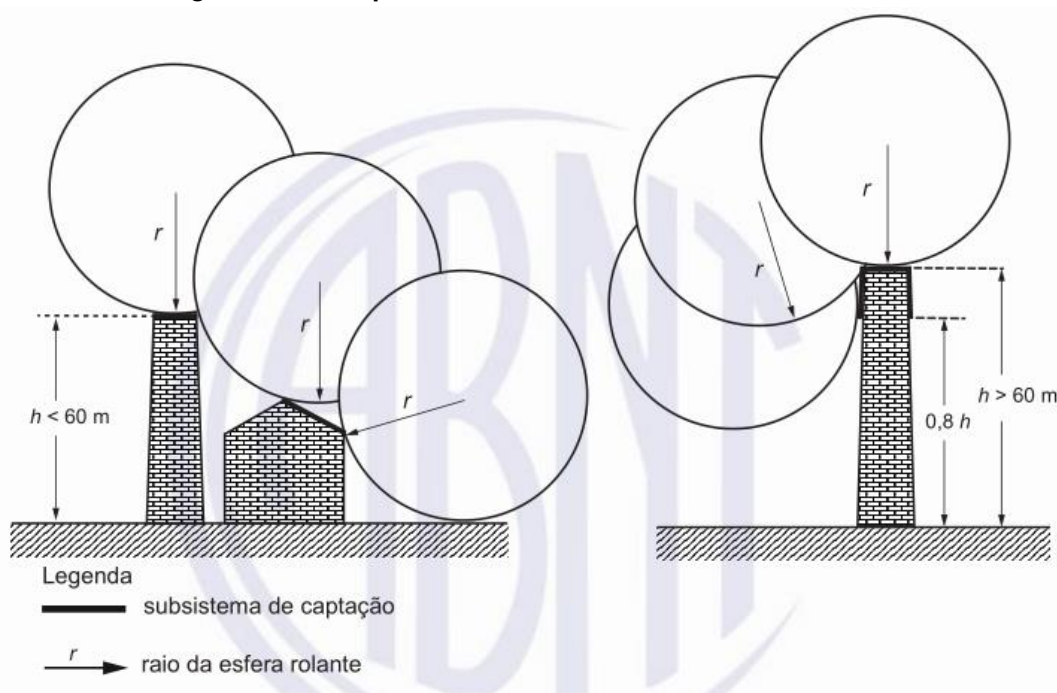
Fonte [15]

Diferente dos outros tipos apresentados anteriormente, o método da esfera rolante (modelo eletrogeométrico) é o mais recente, também trabalha com um elemento captor onde é criada uma esfera fictícia de raio determinado com a classe do SPDA disposto dentro da tabela 2 da NBR5419:2015-3, esta esfera rola no entorno da estrutura ou nos arredores do local que se quer proteger, nesse método é determinado que onde a esfera tocar o raio também poderá tocar [14].

Segundo a NBR5419:2015-3, ao utilizar esse método para edificações superiores a 60 metros de altura há uma maior incidência de descargas atmosféricas na cobertura, em específico nos cantos da estrutura e nas extremidades horizontais da periferia, apenas uma pequena porcentagem de todas as descargas atmosféricas atingirá as laterais da estrutura [10].

As estatísticas também demonstram que a incidência de descargas atmosféricas aumenta de maneira considerável na lateral das estruturas em função da altura da edificação, por esse motivo e pelo que foi descrito no parágrafo anterior, dentro da norma para estruturas acima de 60 metros de altura determina-se que se faça uma proteção 20% da altura total [10]. Um exemplo disso é de que em uma edificação de 100 metros de altura deve-se fazer uma verificação por meio da esfera se há a necessidade de fazer um anel de proteção a 80 metros de altura para evitar as descargas laterais [14]. Na figura 13 apresenta exemplos utilizando o método da esfera rolante.

Figura 13: Exemplos utilizando método da esfera rolante



Fonte [10]

Independente de qual método se utilize na execução de um SPDA há a necessidade de se ligar o processo a um sistema de aterramento, como foi apresentado na figura 12, e a quantidade de hastes instaladas no solo depende das condições impostas no mesmo, da altura da estrutura e da área construída tendo a relação de quanto maior for esse influencia no acréscimo do número de eletrodos.

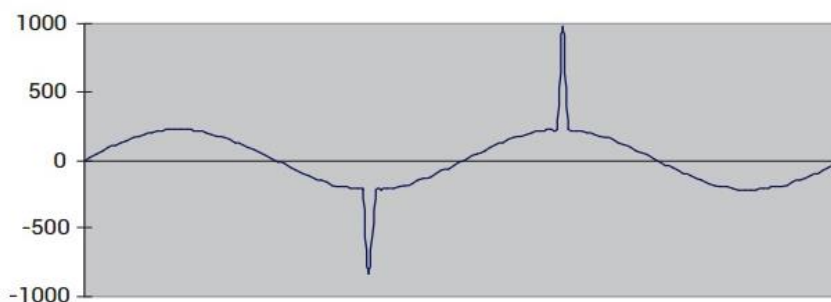
Colocando o foco agora para os surtos elétricos, o mesmo é definido como perturbações que ocorrem na curva senoidal de tensão, resultando assim em rápidos e agudos aumentos no valor de tensão. As descargas atmosféricas são causadoras desses surtos no instante em que caem nas linhas de energia elétrica, aumenta de forma abrupta o valor de tensão, porém outras fontes também causam esses distúrbios dentre os quais estão [16]:

→ Apagões: no instante em há o religamento no fornecimento de energia, a tensão usualmente é maior que a de trabalho em condições normais;

→ Chaveamentos: na partida de máquinas elétricas com potência elevada, assim como em seu desligamento, ocasionam instabilidade na rede elétrica por alguns instantes. As figuras 14 e 15 na sequência ilustram exemplos do que pode acontecer com a forma de onda da tensão quando ocorre um surto elétrico.

Figura 14: Surto elétrico causando um pico de tensão

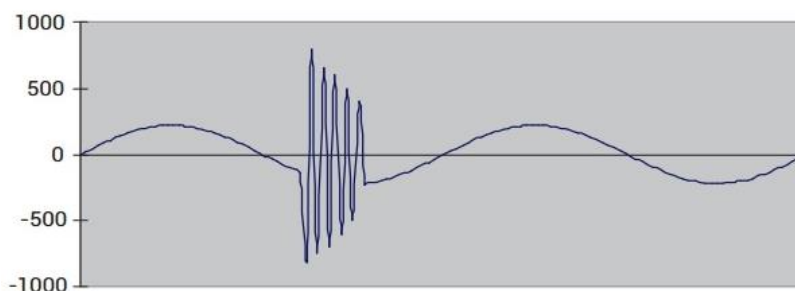
220V(Un)



Fonte [16]

Figura 15: Surto elétrico causando instabilidade na rede

220V(Un)



Fonte [16]

Os surtos sem a devida proteção podem provocar danos em equipamentos elétricos e também na rede elétrica, inclusive no caso em que haja uma pessoa próxima ou em contato com algum tipo de aparelho eletrônico no instante em que se tem a sobretensão, o indivíduo pode sofrer um choque elétrico [16]. E a proteção usada para minimizar ao máximo os efeitos que um surto possa causar, são um bom aterramento, um sistema de SPDA para aquelas instalações que são exigidas perante as respectivas normas, e um dispositivo de proteção contra surtos (DPS).

No dispositivo DPS tem o seu funcionamento a partir da interação dos componentes e materiais internos que o constituem, exemplo de componente é o varistor, equipamento essencial para seu funcionamento. Em ocasiões em que aconteça um surto elétrica, a tensão na rede tem um acréscimo significativo de seu valor em condições normais, por consequência o valor de tensão no DPS está muito acima dos limites operacionais, portanto a resistência no varistor tende a zero, fornecendo um caminho de menor oposição ao fluxo de corrente elétrica, drenando toda a energia excessiva para o sistema de aterramento, mantendo assim os equipamentos da instalação protegidos desse eventual distúrbio na rede, para funcionar o dispositivo deve estar ligado com um dos seus terminais ligado a fase e outro terminal no sistema de aterramento [17].

O DPS é obrigatório em toda instalação de baixa tensão conforme é explicitado na norma NBR 5410, e deve ser instalado preferencialmente após o disjuntor principal no quadro de distribuição para que em casos de defeito ou queima do equipamento e o curto circuito fase-terra se torne permanente, a falta é interrompida pelo disjuntor, preservando a instalação e eventuais acidentes causados pelo curto serão evitados [9].

Diferente do DPS e SPDA, o disjuntor DR(Diferencial Residual) não necessita de um sistema de aterramento para funcionar, entretanto ele atua como um grande aliado do mesmo, pois complementa a ação de proteção quanto ao choque elétrico em situações que o aterramento acaba não atuando, ou em condições em que se tem um aterramento ineficiente na instalação, assim tem como principal objetivo proteger pessoas de eventuais choques elétricos.

Um DR tem como principal função desarmar o circuito em que está ligado caso haja uma fuga de corrente, independente de qual seja a origem dessa fuga o circuito será desenergizado, assim esse dispositivo pode acabar apontando possíveis falhas na instalação como pontos de cabos desencapados que estão tendo contato

com algo da estrutura, provocando assim pequenas correntes de curto-circuito que possam estar despercebidas em um primeiro instante, então caso instaure o dispositivo DR na instalação e o mesmo desarma constantemente em situações que aparentam ser normais, o defeito pode estar na rede e não no aparelho.

De acordo com a norma NBR 5410 o uso de corrente diferencial residual nominal menor ou igual a 30mA é empregado para proteção adicional contra eventuais choques elétricos, e para correntes de 300mA tem a empregabilidade de proteger contra incêndios além de apontar que há fuga de corrente dentro da instalação [9].

O disjuntor DR atua detectando a diferença de corrente entre a entrada (corrente na fase) e saída (corrente retornada pelo neutro) nos respectivos terminais, caso essa fuga seja maior que a explicitada pelos parâmetros de fabricação (também chamada de corrente diferencial residual (IDR)), o disjuntor atua, desenergizando o circuito[18].

No tópico seguinte será apresentado pontos como o porquê acontece o choque elétrico, situações em que possa ocorrer ou não o choque quando o usuário tem contato com partes energizadas, além de diferenciar aspectos de tensão de toque e tensão de passo, apresentando os principais equacionamentos dos mesmos. É importante levar esses aspectos em consideração no projeto de aterramento, principalmente a tensão de passo, quando o projeto tem a finalidade de dissipar/drenar para o solo uma corrente elétrica de alta magnitude como por exemplo a de eventuais descargas atmosféricas.

2.4 CHOQUE ELÉTRICO, TENSÃO DE PASSO E TENSÃO DE TOQUE

O choque elétrico é algo que dependendo da duração e da intensidade pode ser lesivo ao ser humano ou até mesmo fatal, por isso, toda a proteção necessária deve ser implementada nas instalações para que se evite ao máximo acidentes dessa natureza.

Dentro de um aterramento elétrico a tensão elétrica contida no sistema em condições normais é de zero volts, e tudo que estiver conectado eletricamente a ele, também tende a possuir essa mesma tensão. Em um fluxo de corrente elétrica, a mesma procura sempre percorrer o menor caminho e de menor resistência, em um

contato de uma pessoa com a terra ou o chão, dependendo da resistência elétrica no corpo do indivíduo no instante, o caminho de menor oposição possa ser pelo corpo e assim haverá a passagem de corrente quando houver a diferença de potencial.

Nessas condições apresentadas ao ter contato da pele com algo energizado, a corrente elétrica percorre o caminho do condutor alimentado até a terra utilizando o corpo como uma extensão dos cabos, devido a isso acontece o choque elétrico, para evitar esse tipo de acontecimento é necessário criar um caminho alternativo de menor resistência para a circulação de corrente elétrica, dentro das instalações elétricas esse alternativa é o aterramento elétrico.

Os efeitos de um choque elétrico são diversos numa pessoa e depende de uma série de fatores podendo ser um problema mais grave e permanente até algo leve e provisório sem sequelas a longo prazo, as consequências causadas a um ser humano varia de alguns aspectos como o trajeto da corrente elétrica percorrido pelo corpo humano, a intensidade dessa corrente elétrica, tempo de duração do choque elétrico, área de contato do condutor energizado com o corpo, pressão do contato, espécie da corrente, se é alternada ou contínua, a frequência de operação, tensão, condições da pele se está seca ou úmida implica em comportamentos diferentes quanto ao valor de resistência final total do corpo, a região que há o choque, estado de saúde do indivíduo[19].

No instante que a corrente passa pelo corpo pode causar várias consequências, de acordo com a relação de todos os fatores citados no parágrafo anterior, pode gerar no organismo de um animal uma leve queimadura até uma morte praticamente instantânea [19].

Dentre algumas das sequelas mais graves estão a tetanização das fibras musculares onde mesmo após cessar o estímulo o músculo continua contraído, queimaduras de segundo e terceiro grau, eletrólise no sangue que implica na formação de coágulos resultando na redução da circulação sanguínea, o dano parcial ou permanente a alguns órgãos, e pôr fim a fibrilação e parada cardíaca onde dependendo da intensidade da corrente elétrica que eventualmente percorra no coração pode acarretar na parada de seu funcionamento [19].

Dentro do dimensionamento dos equipamentos de proteção a escolha do tempo de eliminação do defeito deve ser realizado de maneira conservativa, levando em consideração a corrente permissível ao ser humana, ou corrente de choque elétrico de curta duração (I_{chcd}), essa corrente é aquela que um cerca de 99.5% da

população acima de 50kg suporta por um período de 0.03 a 3 segundos sem sofrer danos permanentes, também deve ser levado em consideração a corrente de longa duração, ou corrente de choque elétrico de longa duração (I_{chld}), esse tipo de corrente não sensibiliza os equipamentos de proteção e não tem um tempo determinado, portanto há a necessidade da corrente ser permissível aos humanos sem maiores consequências [20].

Em termos técnicos a corrente de longa duração é aquela correspondente ao máximo valor de corrente elétrica que eventualmente circula no corpo sem provocar a fibrilação, se a corrente atingir de forma direta o músculo cardíaco, a mesma atrapalha seu funcionamento em condições normais, os impulsos periódicos responsáveis que regulam as contrações(sístole) e expansões(diástole) desse músculo são alterados sob a influência da corrente [20].

Em condições de fibrilação o coração realiza os batimentos de forma desordenada, acarretando na falha do fluxo vital de sangue por todo o corpo, mesmo após o cessamento da corrente que acarretou na fibrilação, o fenômeno persiste, se encerrando na maior parte dos casos apenas sob o uso de um desfibrilador [20]. Os valores máximos de um choque elétrico são definidos pela norma NBR 15751, conforme é apresentado na tabela 01.

Tabela 01: Valores permissíveis de corrente de choque com longa duração

Limite da corrente de longa duração		
Porcentagem da população que suporta	Homens	Mulheres
99.5%	9mA	6mA
50%	16mA	10.6mA

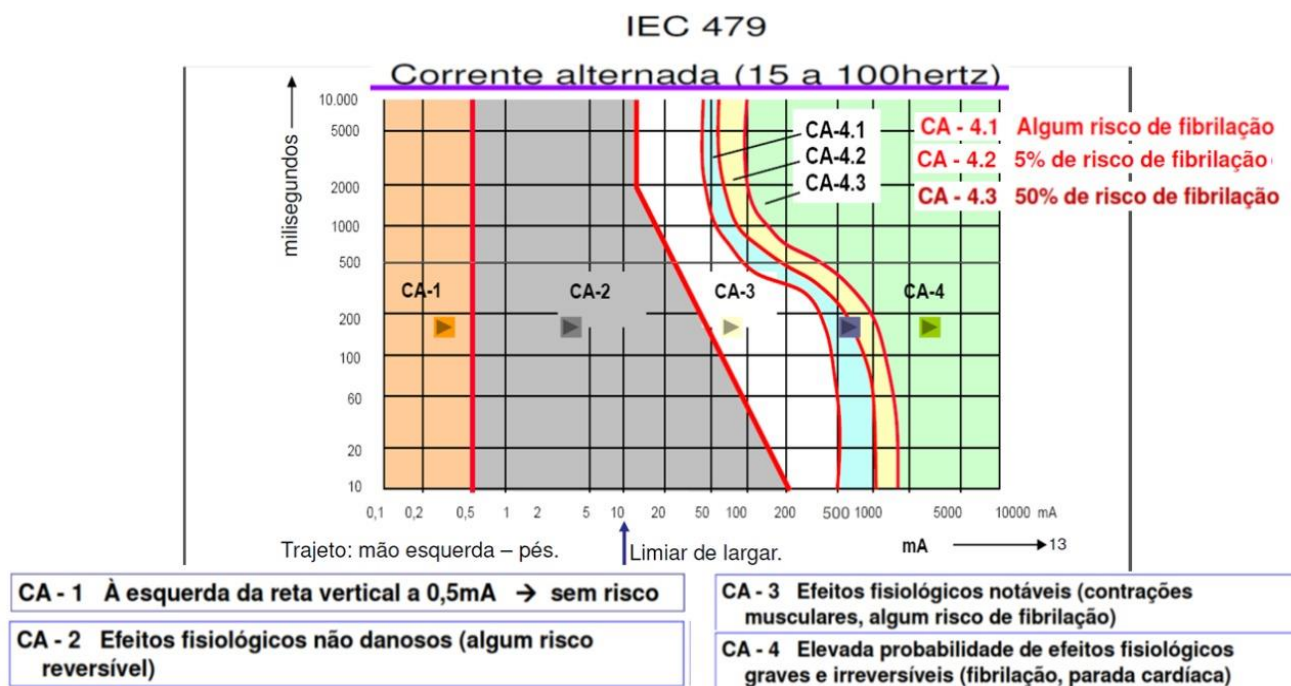
Fonte [20]

Para as correntes de choque de curta de duração com o intervalo de tempo mencionado nos parágrafos anteriores, pode ser utilizado a equação 2.1, para definir o choque permissível ao ser humano nessas condições, o termo t' presente nessa equação corresponde ao tempo necessário para a proteção cessar a falta, em casos de haver um religamento automático inferior ou igual a 0.5 segundos, o tempo a se considerar na equação é a soma dos tempos da falta inicial e das faltas na sequência, para tempos mais que 0.5 s, utilizar o maior tempo entre as diversas faltas. Tem se a seguir a equação 2.1 [20].

$$I_{chcd} = \frac{0.116}{\sqrt{t'}} \quad (A) \quad (2.1)$$

Pela IEC 479, apresenta a relação (tempo x intensidade da corrente) em gráfico da corrente alternada de 15 a 100 Hz (Hertz), e de acordo com o aumento da corrente elétrica menor será o tempo permissível ao ser humano, até um ponto que o tempo admissível é praticamente zero, e os riscos de fibrilação aumentam consideravelmente, a figura 16 ilustra o gráfico apresentando essa relação, e seccionando as áreas que têm um maior risco a um indivíduo, com a corrente percorrendo um trajeto da mão esquerda até os pés.

Figura 16: Norma IEC 479, relação Corrente x Tempo admissível ao ser humano



Fonte [21]

O gráfico ilustrado pela figura 16, divide as regiões da esquerda para a direita, os riscos que uma eventual corrente elétrica alternada possa acarretar de dano à um ser humano. A região CA-1 constituída pela cor laranja com limite de corrente de 0.5mA não apresenta nenhum risco independente do tempo, no trecho CA-2 corresponde a um início de efeitos fisiológicos mas que são reversíveis, em CA-3 começam os efeitos fisiológicos mais graves, e a partir desse já existe algum risco de fibrilação, e por último a CA-4 onde há a elevada probabilidade de danos mais graves

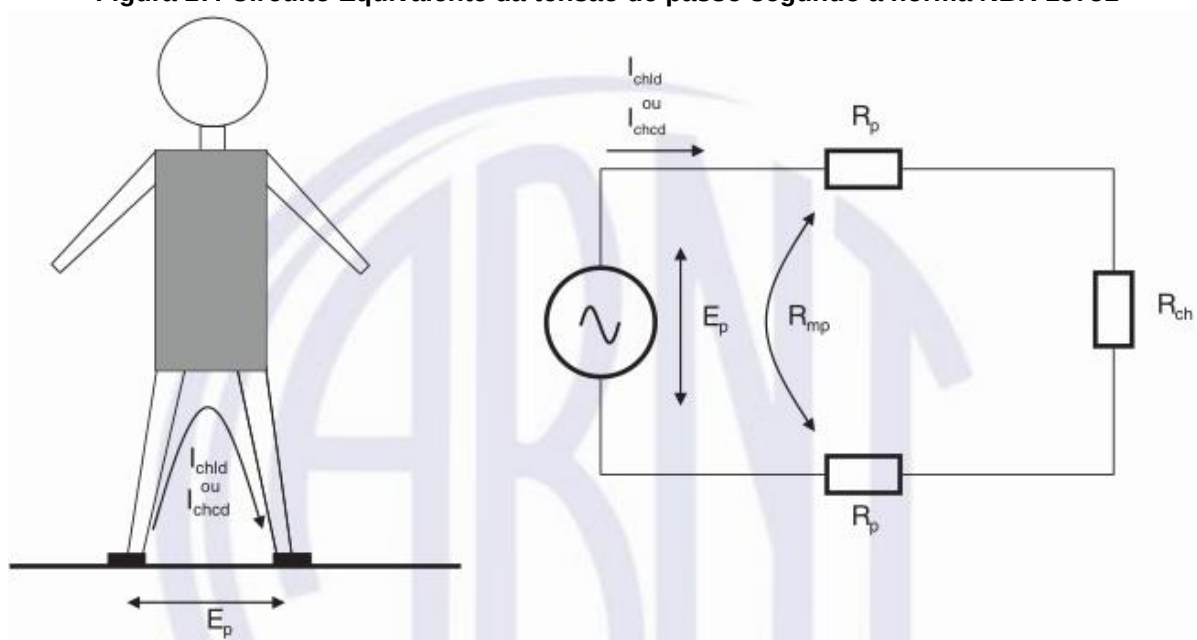
e irreversíveis como a fibrilação, parada cardíaca, parada respiratória entre outros [21].

Mesmo que a figura 16, tenha apresentado um trajeto específico quanto ao percurso da corrente elétrica, a partir do que foi mostrado consegue-se ter uma excelente noção dos níveis de um choque elétrico de curto duração sob corrente alternada em baixas frequências, e saber até que ponto o corpo possa suportar sem sofrer danos irreversíveis, e que correntes com intensidade não muito elevadas também podem causar sequelas ao ser humano.

Em condições de uma falta para a terra, a corrente de curto-circuito é direcionada para o sistema de aterramento, esse fluxo de corrente elétrica no solo, induz tensões no solo em que se está o aterramento, por isso, a malha e os seus arredores devem ser projetados para que as tensões de passo que é a diferença de potencial entre uma pé e outro de um indivíduo, não ultrapasse os valores admissíveis por uma pessoa.

Pela norma da ABNT NBR 15751 de 2013, a tensão de passo pode ser representada por um circuito elétrico equivalente de acordo com os parâmetros resistivos que estão envolvidos no processo, a partir disso, consegue-se dimensionar a máxima tensão de passo admissível por uma pessoa, a figura 17 a seguir ilustra o circuito em questão [22].

Figura 17: Circuito Equivalente da tensão de passo segundo a norma NBR 15751



Fonte [22]

Pelo que foi apresentado na figura 17, os termos nela contida são definidos por [22]:

- E_p : tensão de passo dada em Volts (V);
- R_p : resistência própria de cada pé em função do ponto terra remoto, expressa em ohms Ω ;
- R_{mp} : resistência mútua entre os dois pés, expressa em ohms Ω ;
- R_{ch} : resistência do corpo humano dado em ohms Ω ;
- I_{chcd} : corrente de choque de curta duração admissível pelo corpo, na unidade de ampères (A).

De acordo com os termos especificados a máxima tensão de passo suportado por um humano é dada por [22]:

$$E_p = [R_{ch} + 2(R_p - R_{mp})] * I_{chcd} \text{ (V)} \quad (2.2)$$

A resistência do corpo varia de acordo com as condições apresentadas no indivíduo num determinado instante e também do ambiente em que se está inserido, como por exemplo se a pele está úmida ou seca, se está utilizando algum material isolante como luvas e botas ou não, assim a resistência de ser humano pode variar de 300Ω até algo em torno de $1M\Omega$, apesar de toda essa variação, em condições normais de uma pele seca varia entre 1000Ω a 2000Ω para um homem adulto [22].

A resistência própria de cada pé e a resistência mútuas são calculadas pelas equações a seguir [22]:

$$R_p = \left(\frac{\rho_s}{4b} \right) * C \text{ } (\Omega) \quad (2.3)$$

$$R_{mp} = \left(\frac{\rho_s}{2 * \pi * R_p} \right) * C \text{ } (\Omega) \quad (2.4)$$

Dado que os termos ainda não especificados são compreendidos por [22]:

- b : constante com valor de 0.083m representando um raio de disco metálico, com o intuito de modelar o pé de um ser humano;
- ρ_s : resistividade de recobrimento da superfície do solo, dada em $\Omega.m$;

→ C : fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento, da resistividade dessa camada, e da resistividade na primeira camada.

Em casos em que não há presença de um material de recobrimento, basta utilizar a resistividade da camada superficial do solo, no tópico seguinte será apresentado os principais aspectos que interferem no valor da resistividade, além do passo a passo para a estratificação de solo de duas camadas. A tabela 02 na sequencia apresenta valores típicos em materiais usados normalmente para recobrimento como brita, concreto e asfalto.

Tabela 02: Resistividades típicas do material de recobrimento

Material	Resistividade $\Omega.m$	
	Seco	Molhado
Brita nº1,2 ou 3		3000
Concreto	1200 a 280000	21 a 100
Asfalto	2×10^3 a 30×10^6	3×10^3 a 6×10^6

Fonte [22]

Para determinação do valor da tensão de passo é necessário apresentar a equação de C (fator de redução) um termo adimensional, e é dado por [22]:

$$C = 1 - \left[a * \left(\frac{1 - \frac{\rho_s}{\rho_1}}{2 * h_s + a} \right) \right] \quad (2.5)$$

Visto que os termos expressos na equação são dados por [22]:

→ a : constante com valor de 0.106m;

→ ρ_1 : resistividade da 1ª camada, essa resistividade no próximo tópico será apresentada como é realizado o seu cálculo para solos com duas camadas;

→ h_s : espessura da camada de revestimento superficial, medida em metros (m).

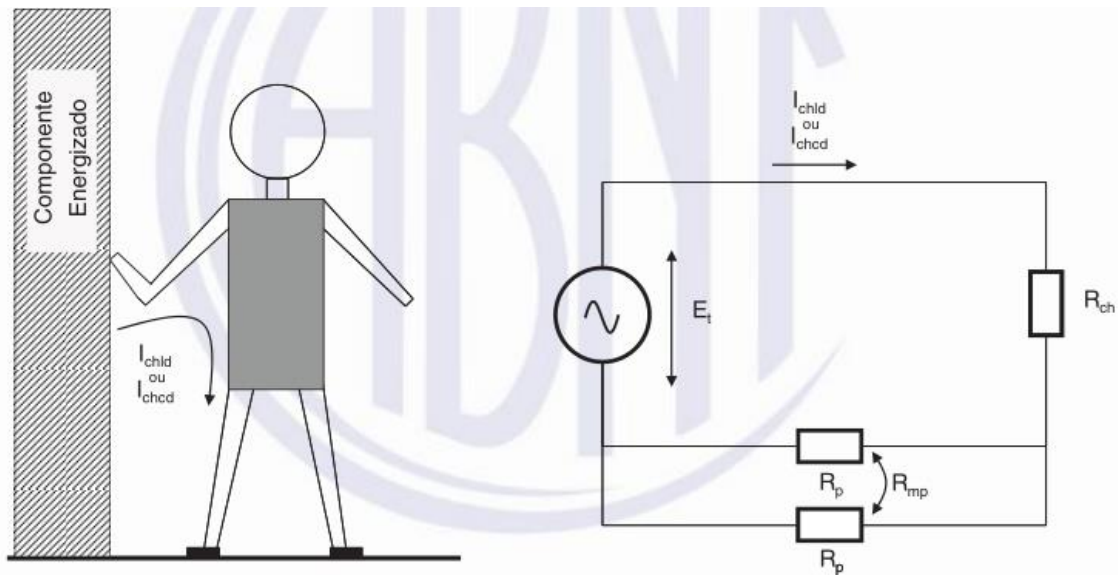
Fazendo algumas considerações a equação da tensão de passo pode ser modificada e ainda mais simplificada, considerando a resistência R_p muito maior que R_{mp} , ao realizar a diferença entre essas resistências, o valor da resistência própria de cada pé prevalece, assim a equação da tensão de passo é dada por [22]:

$$E_P = [R_{ch} + 6(\rho_s * C)] * I_{chcd} (V) \quad (2.6)$$

A partir das equações apresentadas consegue-se calcular a tensão de passo, mostrada na equação 2.2 ou 2.6, e partir disso dimensionar o aterramento para a estrutura esteja dentro dos limites de tensão de passo admissíveis pelas normas.

Assim como a tensão de passo, a tensão de toque (E_t) também pode ser representada por um circuito elétrico, assim é possível calcular da mesma forma os níveis permissíveis ao um indivíduo, pois mesmo com um aterramento na instalação a tensão de toque acontece sempre que uma pessoa tem contato, encoste uma parte do corpo, com um componente ou condutor que esteja energizado, a figura 23 ilustra o circuito equivalente para uma tensão de toque.

Figura 18: Representação da tensão de toque por meio de um circuito elétrico



Fonte [22]

Por meio da figura 18 ilustrada acima, a equação de máxima tensão de toque permissível pelo corpo humano é apresentada por [22]:

→ Para um choque de curta duração:

$$E_t = \left[R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \right] * I_{chcd} \text{ (V)} \quad (2.7)$$

Nas condições em que $R_{mp} \ll R_p$, tem-se:

$$E_t = [R_{ch} + 1.5(\rho_s * C)] * I_{chcd} \text{ (V)} \quad (2.8)$$

→ Para choques com longa duração, a única diferença na equação será a corrente que multiplica o somatório das resistências, que nesses casos é a corrente de choque de longa duração a ser adotada nas equações, assim [22]:

$$E_t = \left[R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \right] * I_{chld} \text{ (V)} \quad (2.9)$$

Quando ocorrer a situação em que $R_{mp} \ll R_p$, adotar a equação como sendo:

$$E_t = [R_{ch} + 1.5(\rho_s * C)] * I_{chld} (V) \quad (2.10)$$

Todos os equacionamentos abordados nesse tópico têm uma importância significativa para a estruturação de um projeto de aterramento e os métodos apresentados não são os únicos existentes, podendo ser substituídos por uma modelagem matemática complexa executada por software que obtém uma resposta mais fiel e detalhada [20]. Contudo na execução dos cálculos das equações mostradas obtém-se um resultado satisfatório, desde que os parâmetros que compõem o cálculo sejam fieis a realidade do projeto em questão.

2.5 RESISTIVIDADE DO SOLO

Nesse tópico será explanado mais sobre o conceito de resistividade de solo e os principais fatores que influenciam, além de apresentar como é realizado a medição da resistividade utilizando um terrômetro e posteriormente colocar todos os passos necessários para a realização da estratificação do solo em duas camadas utilizando curvas.

A resistividade do solo é uma grandeza muito importante dentro dos aterramentos elétricos, é por meio dela que se consegue dimensionar um sistema de aterramento para qualquer tipo de solo. São vários fatores que influenciam na resistividade do solo, dentre os quais, podem ser ressaltados os principais [23]:

- Tipo de solo;
- Teor de umidade;
- Temperatura;
- Concentração de sais dissolvidos na água retida;
- Mistura de diferentes tipos de solo no mesmo local;
- Compactação e pressão.

As diferentes proporções dos itens citados acima influenciam diretamente no valor da resistividade do solo, e a probabilidade de haver solos com mesmo valor de resistividade é bastante baixa, assim há a necessidade de realizar a estratificação do solo todas as vezes que está se dimensionando um determinado aterramento elétrico. A tabela na sequência apresenta valores típicos de resistividade de diferentes tipos de solos.

Tabela 03: Resistividades típicas para determinados tipos de solo

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

Fonte [23]

2.5.1 Influência da Umidade no Solo

A resistividade do solo irá sofrer alterações de acordo com a concentração de umidade no mesmo, isso ocorre em detrimento de um aumento da condutividade elétrica, isso porque uma porcentagem maior de umidade dentro de um solo faz com que os sais que estão presentes nesse meio se dissolvam, e assim, forma um meio eletrolítico que favorece a passagem de corrente elétrica [23].

De acordo com o que explicado, um mesmo solo apresenta diferentes resistividades com a concentração de umidade, em termos práticos um mesmo solo pode apresentar uma série de valores de resistividade ao longo do ano, isso pois devido as estações do ano, existem períodos de chuva e de seca, o que respectivamente diminui e aumenta a resistividade do solo.

Para o dimensionamento de um novo aterramento, no momento em que se realizam as medidas para descobrir a resistividade elétrica do solo, o ideal é que isso seja feito no período de seca de chuvas, dessa forma o valor obtido será o pior em questão em condutividade ao longo do ano, e a geometria que for a escolhida, atenderá as necessidades impostas pelo projetista.

A tabela 04 a seguir apresenta um exemplo de um solo arenoso e a mudança no valor da resistividade de acordo com o índice de umidade por peso presente no solo.

Tabela 04: Influência da umidade no valor de resistividade no solo

Índice de Umidade (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$) (solo arenoso)
0	10,000,000
2.5	1500
5	430
10	185
15	105
20	63
30	42

Fonte [23]

Para ilustrar melhor os dados apresentados na tabela, tem-se a figura 19, mostrando que a resistividade cai de forma exponencial de acordo com o aumento de água presente dentro do solo, assim o aterramento melhora a sua eficiência com o solo úmido, e piora quando o mesmo está seco.

Figura 19: Influência da umidade no solo

Fonte [23]

2.5.2A Influência da Temperatura no Solo

Utilizando o mesmo solo do apresentado na tabela e na figura acima, entretanto agora os dados coletados serão variando a temperatura ao invés da umidade dentro desse solo. A tabela a seguir apresenta os valores encontrados de -15 a 20°C.

Tabela 05: Influência da temperatura no solo

Temperatura (°C)	Resistividade($\Omega.m$) (solo arenoso)
20	72
10	99
0(água)	138
0(gelo)	300
-5	790
-15	3300

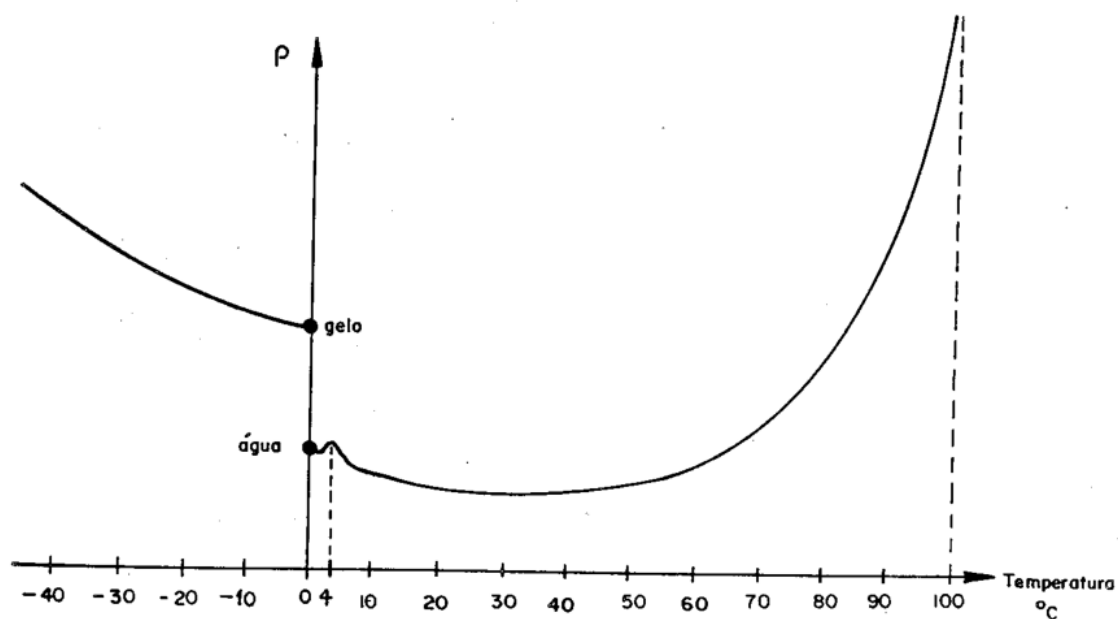
Fonte [23]

Como apresentado na tabela quanto menor for a temperatura, maior será a resistividade do solo, isso é decorrente que a partir de um valor de resistividade mínimo, com o decréscimo de temperatura, acontece uma maior concentração e aglutinação da água, assim é produzido uma dispersão nas ligações iônicas entre os grânulos de terra no solo, resultando assim num acréscimo da resistividade elétrica [23].

É importante ressaltar que no ponto de temperatura de 0°C com a água no estado líquido sofre uma mudança brusca no valor de resistividade ao passar para o estado sólido na mesma temperatura de 0°C. Isso ocorre porque há uma grande mudança no estado da ligação entre esses grânulos que formam a concentração eletrolítica nessa transição, e com valores abaixo de zero quanto menor for as temperaturas o solo se torna mais seco e aumenta assim a sua resistividade [23].

Como foi descrito conforme as temperaturas vão diminuindo há um acréscimo no valor de resistividade elétrica, entretanto no outro lado com as temperaturas mais elevadas próximas de 100 graus a resistividade elétrica também aumenta, porque o estado de vaporização da água começa a acontecer em temperaturas próximas a esse valor dentro do solo, deixando-o mais seco, diminuindo a condutividade presente, elevando a resistividade. O gráfico a seguir explicita com clareza o que afirmado, mostrando o comportamento da resistividade de acordo com a variação da temperatura.

Figura 20: Comportamento da resistividade de acordo com a temperatura



Fonte [23]

De acordo com o que foi apresentado na figura 20, pode-se afirmar que as temperaturas positivas mais elevadas têm um efeito mais significativo na resistividade do solo, tendo um crescimento exponencial em temperaturas maiores que 60 graus. É interessante evidenciar que nesse caso ocorre a interligação de duas influências no solo ao mesmo tempo que são a temperatura e o teor de umidade presentes no mesmo.

2.6 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

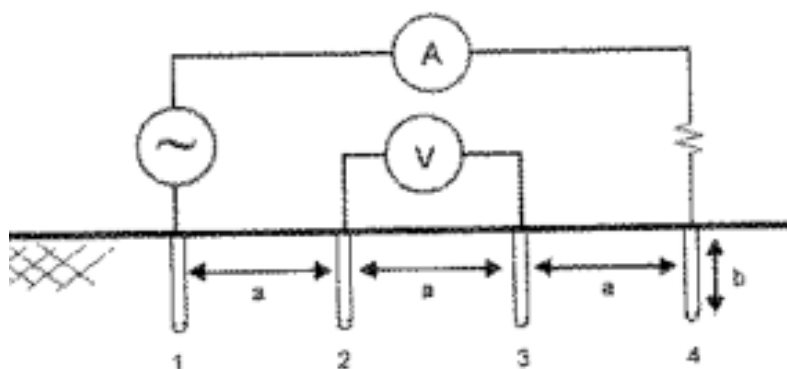
Dentro dos processos para a obtenção da resistividade existentes, se divide em duas principais formas para adquirir esses valores, que são por meio de amostragem do solo e por meio da medição local. Ao realizar a medição da resistividade por amostragem, são feitas análises em laboratório a partir da coleta de uma amostra do solo no qual se tem o intuito de descobrir a resistividade; esse método não foi o utilizado dentro do trabalho, por isso não se entrará em detalhes de como o mesmo funciona.

Já na medição local, a resistividade do solo é obtida por meio de uma injeção de corrente elétrica de valor conhecido no solo; dessa forma, se detecta a queda de tensão obtida, e por consequência encontra a resistência elétrica e ao fim chega-se

na resistividade elétrica, conforme forem realizadas uma série de medições se tem um mapeamento de como o solo em questão se comporta, e partir dessas medições parte para o seguinte passo no aterramento elétrico que é a estratificação do solo.

O procedimento descrito no parágrafo anterior, é o método de Frank Wenner em que são cravadas no solo quatro hastes cilíndricas igualmente espaçadas e colocadas em linha. Ressaltando que se recomenda que o diâmetro das hastes não passe de um décimo do espaçamento entre hastes, assim como a profundidade da haste deve ser de pelo menos um décimo das distâncias entre hastes, para que assim a corrente elétrica consiga percorrer uma profundidade maior, não ficando apenas no nível superficial do solo [24]. A figura abaixo apresenta o esquema de ligação do método de Frank Wenner.

Figura 21: Esquema de ligação do Método de Wenner



Fonte [24]

De acordo com a figura 21, nos terminais 1 e 4 injeta-se corrente no solo, e a queda de tensão causada pela corrente é detectada entre os terminais 2 e 3, assim de acordo com a relação de tensão e corrente, obtém o valor da resistência elétrica no solo. Frank Wenner demonstrou que há uma relação linear entre o valor da resistividade com a resistência que foi medida, dada por [24]:

$$\rho = K' * R \text{ (}\Omega\cdot\text{m)} \quad (2.11)$$

O valor dessa constante K' vai depender da geometria que for instaurada nas medições. Abaixo está a equação que descreve o comportamento dessa constante [24]:

$$K' = \frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (2.12)$$

Dentro dessa equação 2.12, o termo 'a' representa a distância entre as hastes, enquanto o termo 'b' indica a profundidade das hastes, de acordo com os valores dispostos nesses coeficientes a fórmula se torna mais simples.

Por aproximações realizadas por Palmer, ao se considerar o termo 'b' muito maior comparado com 'a', o denominador da constante K, se aproxima de 1, assim a resistividade pode ser denominada nessas condições por [24]:

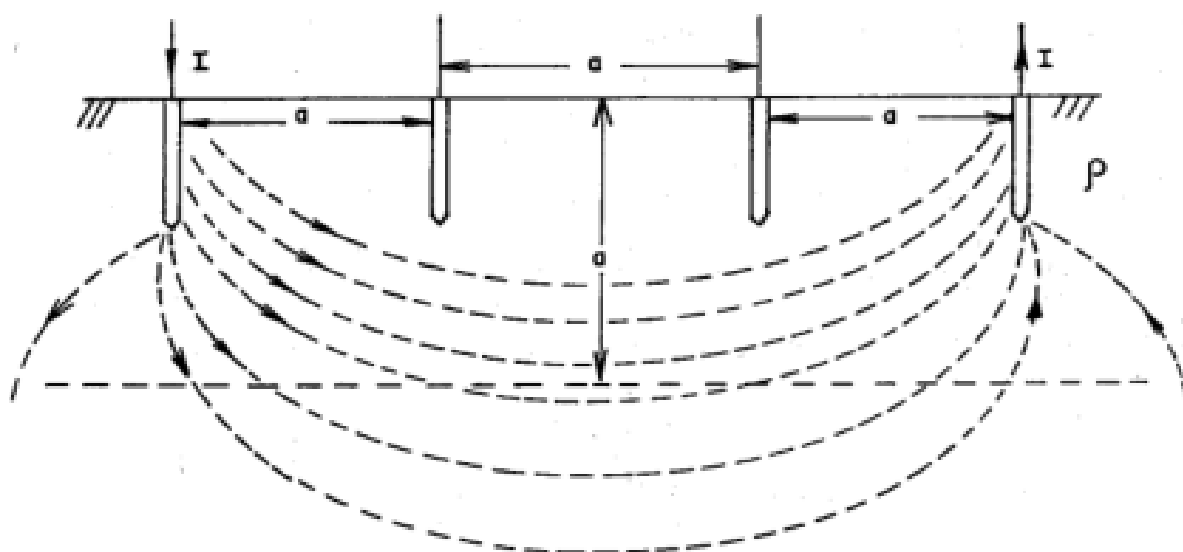
$$\rho \cong 4\pi aR \text{ (}\Omega.m\text{)} \quad (2.13)$$

Palmer também verificou numa segunda situação se 'b' é considerado pequeno comparado com 'a', o denominador tende a 2, assim a resistividade pode ser dada [24]:

$$\rho \cong 2\pi aR \text{ (}\Omega.m\text{)} \quad (2.14)$$

A formulação de Wenner considera o solo homogêneo, contudo os solos de um modo geral não se comportam dessa maneira, usualmente costumam ser estratificados em duas ou três camadas horizontais, para esses tipos de casos ao aplicar o processo de estratificação com curtos espaçamentos entre os eletrodos a corrente injetada dentro do solo flui de forma superficial, portanto os dados medidos de queda de tensão serão influenciados apenas pelo solo mais próximo da superfície, entregando assim um valor errôneo da resistividade e consequentemente um mal dimensionamento do aterramento elétrico. A figura 22 a seguir apresenta o comportamento típico da dispersão de corrente elétrica dentro do solo.

Figura 22: Dispersão de corrente no solo utilizando método de Wenner



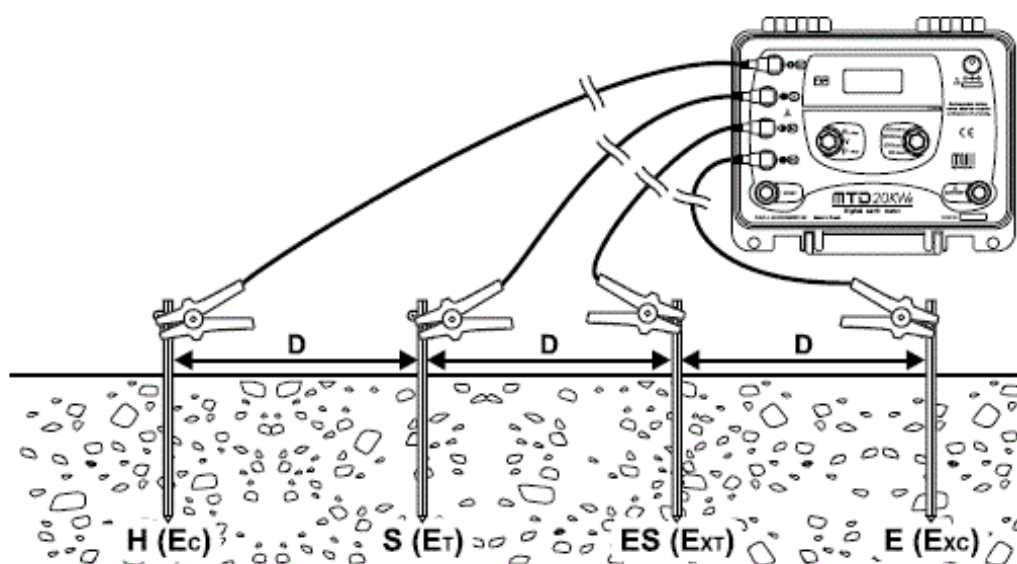
Fonte [23]

Conforme foi apresentado na figura 22, a maior concentração da dispersão de corrente se dá numa relação do distanciamento adotado entre hastes, estima-se que praticamente 58% da distribuição de corrente ocorre dentro de uma profundidade igual ao distanciamento entre os eletrodos [23]. De acordo com essa afirmação quanto maior o espaço disponível mais fidedigno será a resistividade de medição, da real do solo.

Foi explicado o processo para encontrar resistividade pelo método de Wenner, ao invés de utilizar uma fonte de corrente de alternada, um voltímetro e posteriormente a isso realizar o cálculo para encontrar a resistividade em determinado espaçamento entre hastes, utiliza-se o aparelho chamado terrômetro. Nesse tipo de aparelho basta encaixar uma das pontas do condutor nos terminais dispostos no equipamento e a outra ponta nas respectivas hastes, depois disso selecionar o espaçamento das hastes e pressionar o botão necessário para medir a resistividade, o aparelho em questão processa internamente e devolve o valor para o usuário.

A figura 23 a seguir ilustra um desenho esquemático típico de um terrômetro para a medição da resistividade elétrica do solo.

Figura 23: Esquema de ligação para medição da resistividade do solo utilizando um terrômetro



Fonte [25]

2.6.1 Cuidados Necessários para a Medição

Dentro da medição de resistividade utilizando o terrômetro é necessário ter alguns cuidados para a garantia de fidelidade dos dados colhidos, mostrando que esse seja um processo simples deve-se atentar à alguns aspectos, dentro os quais podem ser ressaltados [23]:

- ☐ Nas medições independentes do espaçamento, manter as hastes alinhadas;
- ☐ O espaçamento entre os eletrodos devem ser o mesmo;
- ☐ As hastes devem ser cravadas numa mesma profundidade e se recomenda que seja algo em torno de 20 a 30 cm, para justamente a inserção de corrente atinja a profundidade necessária assim como a medição de queda de tensão seja precisa;
- ☐ Manter as hastes limpas de óxidos e gorduras para facilitar assim o contato com o solo;
- ☐ Anotar as condições do solo no momento em que se está realizando as medições;
- ☐ Verificar o estado da bateria um tempo antes de realizar as medições, para caso necessário realizar a carga da mesma, evitando assim um dia de inatividade quanto a realização das medições;
- ☐ Utilizar equipamentos de proteção individual como luvas e calçados de isolamento no instante da coleta das medidas;
- ☐ Evite que animais e/ou pessoas estranhas se aproximem dos equipamentos no momento das medições.

Todos os aspectos acima colocados em evidência podem aparentar serem desprezíveis em uma primeira análise para aqueles que forem realizar a resistividade de um determinado solo, entretanto o não cumprimento de cada um dos pontos descritos podem alterar o resultado colhido com aquilo que realmente representa o solo, conseqüentemente modificando a efetividade que um determinado projeto de um aterramento possa ter, por isso é necessário muito cuidado ao recolher essas medidas pois esse é um dos processos mais importantes dentro de um aterramento elétrico.

Antes de partir propriamente para os métodos de estratificação do solo que são as direções a serem medidas e o tratamento/análise dos dados colhidos. O número de direções em que se deve realizar varia sob alguns aspectos dentro os

quais estão a importância do local do aterramento, da dimensão do sistema, e da variação acentuada de uma medida para outra de acordo com os respectivos espaçamentos [23].

Em casos de aterramentos pequenos, contendo apenas um ponto de ligação a equipamentos, ou para pequenas instalações elétricas efetuar medidas em três direções diferentes com um ângulo de 60° entre si, já é satisfatório, entretanto para instalações mais importantes como subestações deve-se realizar as medidas no máximo de direções possíveis, para assim ter o detalhamento minucioso do terreno em questão a partir dos dados de resistividade. Nos casos em que se decide realizar o mínimo de medições por quaisquer motivos que sejam, recomenda-se que se realiza a colheita dos dados na direção da linha de alimentação e na direção do ponto de aterramento [23].

Uma vez realizadas as medições, é necessário realizar um tratamento matemático com uso dos desvios relativos para a obtenção dos valores que representam as medições. O primeiro passo é realizar a média aritmética nas direções e em cada um dos espaçamentos. O segundo é o de calcular o desvio em função da média calculada no primeiro passo em cada uma das medidas incluindo todas as direções e espaçamentos adotados. A tabela a seguir apresenta um exemplo fictício de medições incluindo a média dos dados.

Tabela 06: Exemplo fictício de medições de resistividade

Espaçamento a(m)	Resistividade Elétrica Medida ($\Omega.m$)			Resistividade Média ($\Omega.m$)
	1	2	3	
2	360	295	330	328.33
4	470	460	950	588
6	630	575	540	581.67
8	810	942	878	876.66
16	700	516	560	592
32	264	292	105	220.33

Fonte: Autoria própria

Ressaltando que a tabela com os dados acima é apenas pra explicitar com um exemplo os passos necessários quanto ao tratamento dos dados colhidos antes da realização de adotar um dos métodos de estratificação. A próxima tabela contém os desvios relativos de cada um dos dados em função da sua respectiva média, e posteriormente a isso todas as medidas que possuírem desvio superior a 50% devem

ser descartadas, e realizar uma nova média com os dados restantes no espaçamento correspondente. Para calcular o desvio basta seguir a relação:

$$\text{Desvio relativo em \%} = \frac{|\rho_{\text{Presistivmed}} - \rho_{\text{média}}|}{\rho_{\text{média}}} * 100 \quad (2.15)$$

Para reforçar o entendimento da equação do desvio, será feito um exemplo selecionando a resistividade de 460 $\Omega.m$ com espaçamento de 4 metros entre hastes, assim tem-se:

Exemplo:

$$\text{Desvio relativo em \%} = \frac{|460 - 588|}{588} * 100 = 21.76\% \quad (2.16)$$

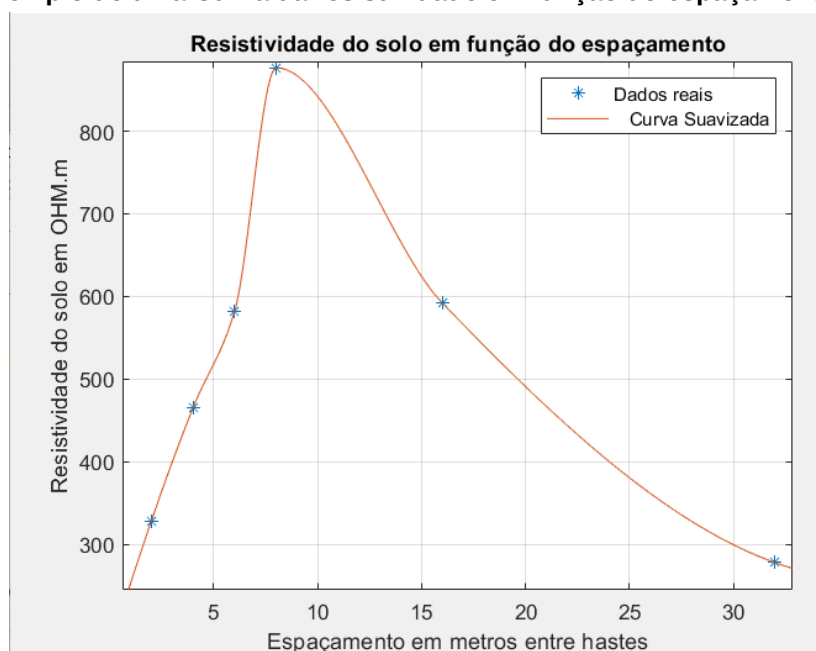
A próxima tabela apresenta todos os desvios calculados da tabela 06, e a nova média nos espaçamentos quando há o desvio superior a 50% das medidas, e na figura 24 apresenta o gráfico com os dados de resistividade em função dos respectivos espaçamentos entre hastes.

Tabela 07: Desvios relativos das medidas da tabela 06

Espaçamento a(m)	Desvios Relativos em %			Resistividade Média ($\Omega.m$)	Resistividade Méd. Recalculada ($\Omega.m$)
	1	2	3		
2	7.78	11.68	1.20	328.33	328.33
4	20.07	21.77	61.56	588	465
6	0.53	8.24	13.83	581.67	581.67
8	7.60	7.45	0.15	876.66	876.67
16	18.24	12.84	5.41	592	592
32	19.82	32.53	52.34	220.33	278

Fonte: Autoria própria

Figura 24: Exemplo de uma Curva da resistividade em função do espaçamento entre hastes



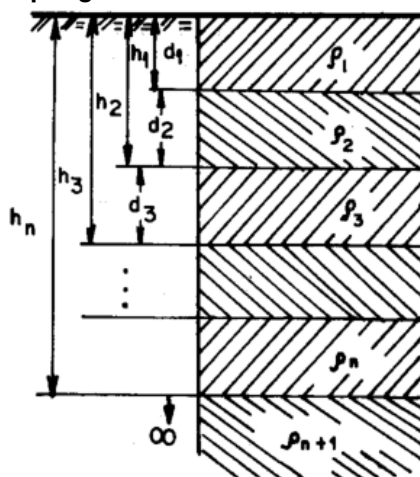
Fonte: Autoria própria

Conforme foi apresentado nos espaçamentos de 4 e 32 m, houve desvio de dados relativos superiores aos de 50%, com isso essas medições foram descartadas e realizadas uma nova média nesses casos, a última coluna da tabela 07, e após isso se traçou a curva apresentada na figura 24, o gráfico contém um caráter de dois trechos distintos um de ascendência e outro de descendência, sendo esse um comportamento típico para um solo de três camadas, de acordo com o que foi explicado até aqui contém-se o necessário para dar início nos métodos de estratificação. Pela explicação dada é demonstrado que há todo um processo que a ser realizado antes de proceder para a estratificação em si, e o quão é importante se atentar nos detalhes que antecedem o mesmo.

2.7 MÉTODOS DE ESTRATIFICAÇÃO

Os solos em virtude da sua modificação ao longo dos anos podem possuir diversas características contidas no mesmo, como já foi afirmado nos tópicos anteriores e a modelagem do solo em camadas estratificadas de forma horizontal tem-se apresentado eficiente no dimensionamento de aterramentos elétricos. A figura 25 abaixo apresenta um exemplo genérico de um solo estratificado.

Figura 25: Exemplo genérico de uma estratificação do solo



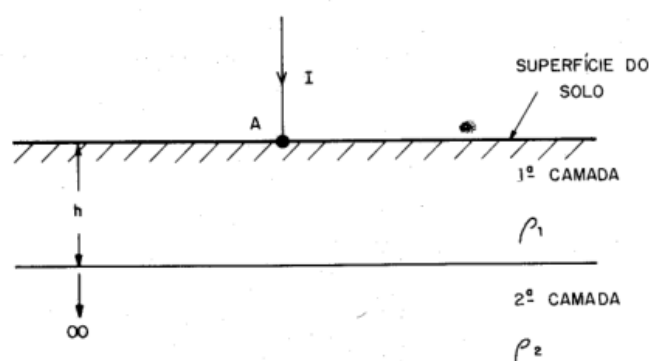
Fonte [23]

Existem alguns métodos de estratificação dentro os quais se destacam a modelagem do solo de duas camadas, método de Pirson e método Yokogawa para solos com três ou mais camadas.

2.7.1 Modelagem de Solos com Duas Camadas

Para este ou qualquer outra modelação a base para a formulação matemática são as teorias do eletromagnetismo. Ao se injetar uma corrente elétrica em um ponto da superfície em um solo de duas camadas, a mesma gera potenciais na primeira que satisfaz o laplaciano de V que é igual a zero ($\nabla^2 V = 0$), também conhecida como Equação de Laplace [23]. Por meio das condições da figura 26 abaixo são desenvolvidos os cálculos para obter a tensão num ponto qualquer da primeira camada.

Figura 26: Desenho esquemático de um solo estratificado em duas camadas



Fonte [23]

O desenvolvimento em si do equacionamento referente a equação de Laplace não será apresentada no trabalho, pois não é o foco do projeto realizar esse tipo de cálculo mais aprofundado nas teorias do eletromagnetismo, sendo assim, a equação de Laplace relativo a tensão em um ponto p qualquer dentro da primeira camada de solo, por um distanciamento ' r ' de uma fonte de corrente ' A ', é dado pela expressão[23]:

$$V_p = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right) \right] \quad (V) \quad (2.17)$$

Dentro da equação x , os termos representam:

$V_p \rightarrow$ Potencial num ponto p genérico da primeira camada do solo;

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividade elétrica da primeira camada;

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividade elétrica da segunda camada;

$h \rightarrow$ Profundidade da primeira camada;

$r \rightarrow$ Distância do ponto p à fonte de corrente elétrica 'A';

$I \rightarrow$ Corrente elétrica dada em Ampères (A);

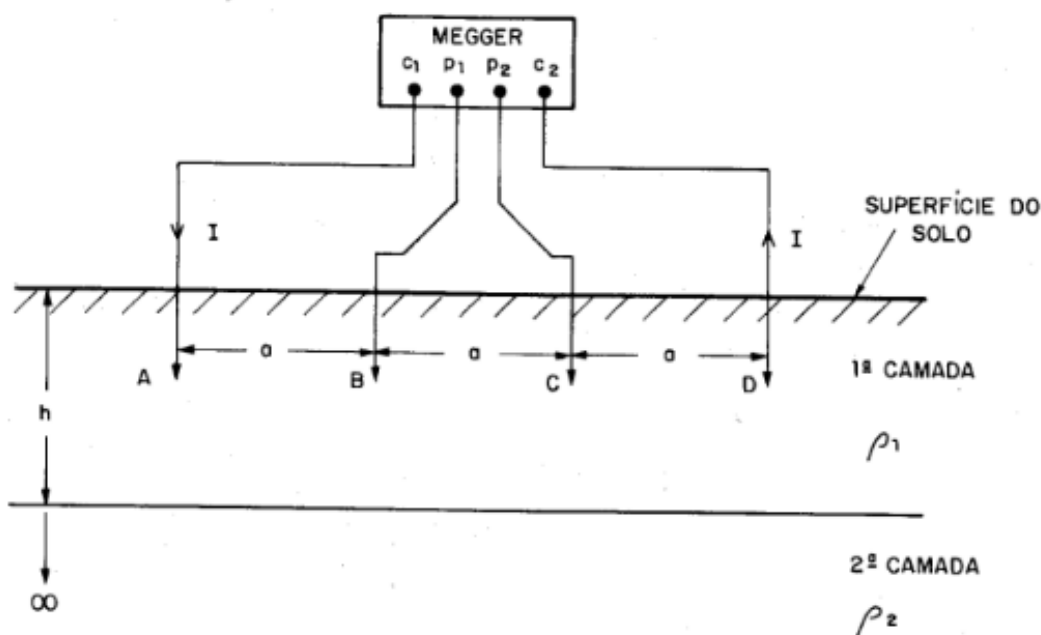
$K \rightarrow$ Coeficiente de reflexão, e o mesmo é dado pela relação:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (2.18)$$

E de acordo com a equação de V_p o coeficiente de reflexão é limitado dentro do intervalo de -1 a 1, assim: $-1 \leq K \leq +1$

Para a estratificação de método de duas camadas usando curvas, a configuração de Wenner é utilizada no processo, e o equacionamento apresentado na sequência é de acordo com a figura abaixo.

Figura 27: Método de Wenner em solo de duas camadas



Fonte [23]

Lembrando que no método de Wenner, nos pontos B e C da figura 27 é medido o potencial do solo, e nos pontos A e D é inserido a corrente elétrica, enquanto o termo 'a' é distanciamento entre os eletrodos. Seguindo como base a equação 2.17, para obtenção do potencial no ponto B é necessário realizar a superposição da

contribuição da corrente elétrica ao entrar pelo ponto A e sair pelo ponto D, com isso, tem-se [23]:

$$V_B = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)}} \right) \right] - \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)}} \right) \right] \quad (V) \quad (2.19)$$

Para a tensão no ponto C, utiliza-se o mesmo princípio de superposição utilizada para obter tensão no ponto B, assim é obtido [23]:

$$V_C = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)}} \right) \right] - \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)}} \right) \right] \quad (V) \quad (2.20)$$

Como o que interessa é a diferença de potencial, ou queda de tensão entre os pontos BC, dado que $V_{BC} = V_B - V_C$, assim a tensão é dada por [23]:

$$V_{BC} = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi a} \left[1 + 4 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right) \right) \right] \quad (V) \quad (2.21)$$

Fazendo uma manipulação simples, isolando ρ_1 de um lado da igualdade, tem-se [23]:

$$\frac{2\pi a \cdot V_{BC}}{I} = \rho_1 * \left[1 + 4 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right) \right) \right] \quad (2.22)$$

Como V_{BC}/I representa a resistência elétrica lida no aparelho em que se está utilizando, substituindo essa relação por R na equação xx, tem-se [23]:

$$2\pi a R = \rho_1 * \left[1 + 4 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right) \right) \right] \quad (2.23)$$

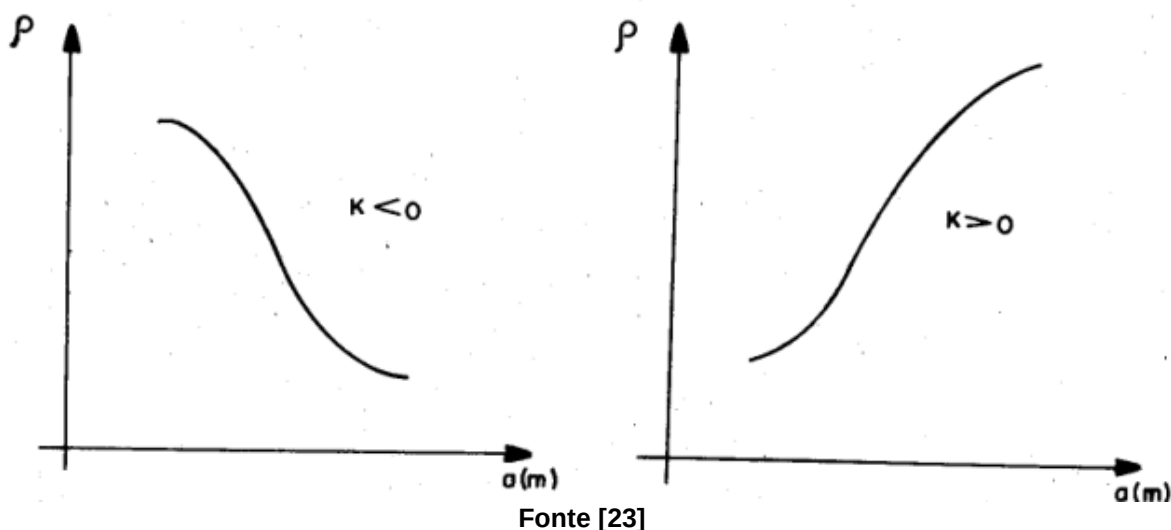
No tópico em que é explicado o método de Wenner, foi apresentado que a resistividade no solo pode ser simplificada para $\rho(a) = 2\pi a R$, quando a profundidade em que as hastes estão inseridas dentro do solo nessa metodologia de Wenner é bem menor em relação ao distanciamento em que se tem entre os eletrodos. Dessa forma, é obtido [23]:

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right) \right) \quad (2.24)$$

A equação 2.24 apresentada acima é de suma importância para o método de estratificação de duas camadas usando curvas, pois apenas a partir dela consegue-se realizar esse procedimento, também é a partir dessa equação é traçado uma família de curvas em duas dimensões com $\frac{\rho(a)}{\rho_1}$ em função de $\frac{h}{a}$, estabelecendo uma variação do coeficiente K, sendo um gráfico para a variação positiva e outro para a negativa. Já foi afirmado que o valor do coeficiente de reflexão relativamente pequena de -1 a 1, assim em cada um dos gráficos consegue-se cobrir toda a faixa de K, sem requisitar um grande esforço computacional. Utilizando um degrau de 0.1 no coeficiente K para plotar cada uma das curvas da equação 2.24 já se adquire um resultado satisfatório para aquilo que o método se propõe.

Para saber qual família de curva utilizar nesse determinado método, é necessário observar o comportamento da resistividade elétrica em função do espaçamento dado entre hastes, ou de forma simplificada $a \times \rho(a)$. A figura 28 a seguir apresenta um exemplo de curvas para cada uma das situações.

Figura 28: Curvas típicas de resistividade em solos de duas camadas

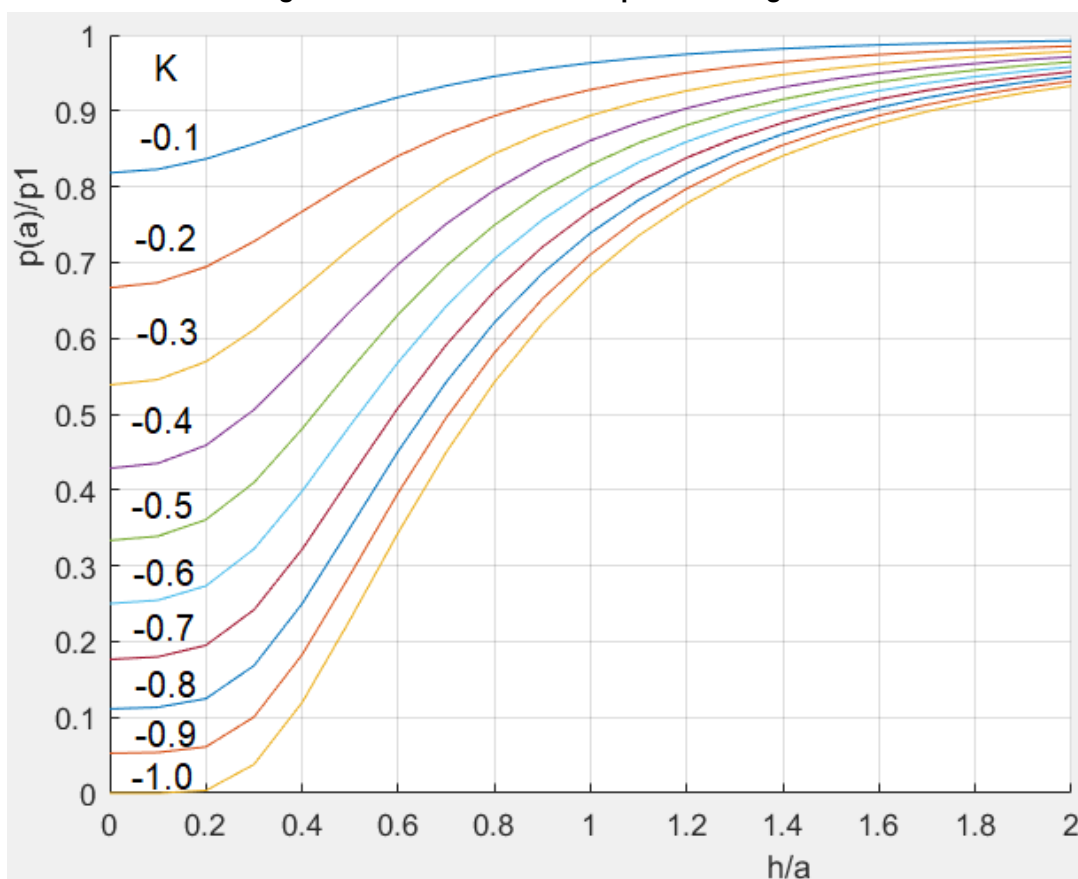


De acordo com a figura 28 apresentada, se a resistividade elétrica diminui com o aumento do espaçamento entre hastes, a família de curvas será com valores negativos de K, e caso ocorra o contrário utilizar a família com valores positivos da constante de reflexão.

Um aspecto importante a ser colocado é de que caso ocorra duas ou mais oscilações ao longo das medições de resistividade, ou seja, caso a resistividade diminua, depois aumente ao longo das medições realizadas ou o contrário também, isso configura um solo de multicamadas, com três ou mais camadas, portanto não deve utilizar este tipo de método para estratificação nesse casos. Em específico do trabalho, como trata-se de um solo de duas camadas, será explicado o passo a passo na sequência da explicação para este método.

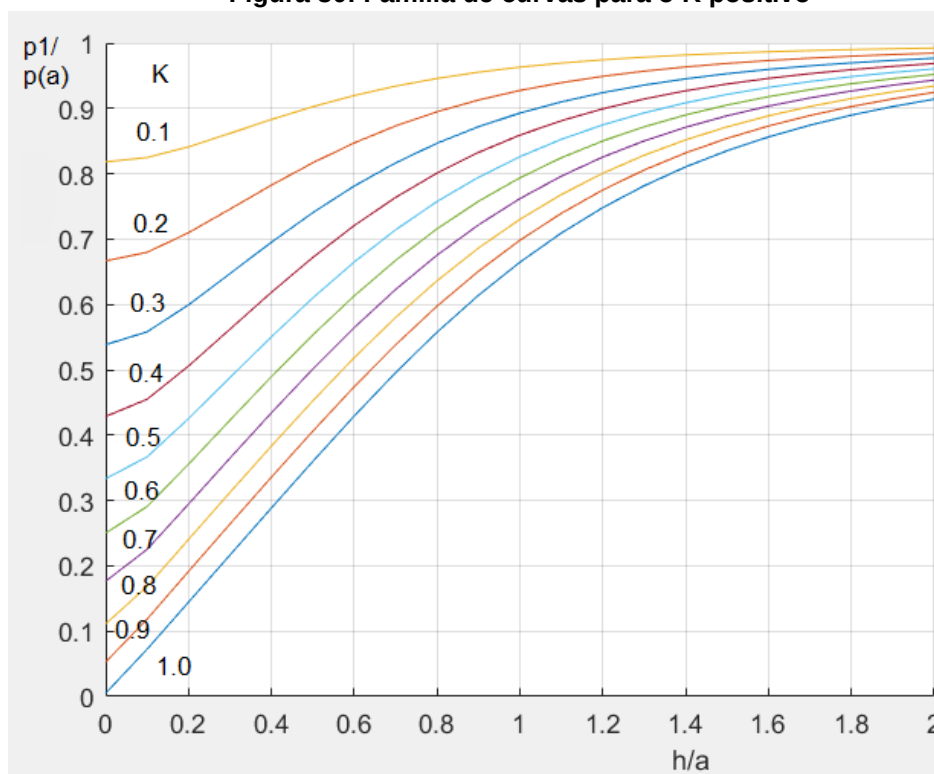
Como foi apresentado há famílias de curvas utilizando a equação 2.24, os gráficos a seguir apresentam as curvas para valores negativos e posteriormente para valores positivos de K.

Figura 29: Família de curvas para o K negativo



Fonte Autoria Própria

Figura 30: Família de curvas para o K positivo



Fonte Autoria Própria

Com as curvas de K apresentadas, basta agora desenvolver os passos em si que são necessários para se estratificar um solo de duas camadas, todos esses passos são descritos dentro do capítulo 3, onde o solo a ser analisado dentro do trabalho será estratificado.

Na próxima seção será explicitado o conceito de resistividade aparente, e como se realiza o cálculo da mesma, que de acordo com a estratificação se obtém um resultado, e posteriormente ao cálculo dessa resistividade, utiliza-se esse valor encontrado para obtenção da resistência de aterramento dimensionado em questão, e a partir do resultado encontrado manipula-se a quantidade, diâmetro, comprimento e material das hastes, mudança de geometria a ser utilizada até atingir o valor desejado no sistema.

Lembrando que as medições de resistividade para a realização da estratificação representam as condições específicas do solo num determinado momento, dessa forma, ao coletar esses dados numa época do ano em que o solo está mais seco, ao fim do dimensionamento do sistema de aterramento o valor da resistência de aterramento obtida, representa a interação da malha com o solo em cima dessas circunstâncias, variando assim, a resistência de uma topologia de aterramento ao longo do ano.

2.8 RESISTIVIDADE APARENTE

O cálculo para a obtenção da resistividade aparente é um dos últimos passos quando se está dimensionando um sistema de aterramento, depois de calculado basta calcular a resistência de aterramento de acordo com a geometria escolhida e as especificações relacionadas as hastes.

Os solos com várias camadas apresentam resistividades aparentes distintas para cada um sistema de aterramento, isso acontece, pois, a passagem de corrente elétrica dos eletrodos depende das características envolvidas numa topologia de aterramento e da composição presente no solo [23].

A topologia de um sistema de aterramento é compreendida como a profundidade de penetração das correntes drenadas no solo, esta profundidade determina as camadas de solo envolvidas com o aterramento, por consequência a resistividade relativa (resistividade aparente) [23].

A resistividade aparente (ρ_a) se define como sendo a resistividade vista pelo aterramento em interação com o solo, dessa forma sob uma mesma geometria de aterramento aplicados em diferentes solos, se obtém diferentes valores de resistividade, confirmando assim, que nem sempre uma malha com mais hastes irá obter uma melhor resposta quanto a resistência de aterramento.

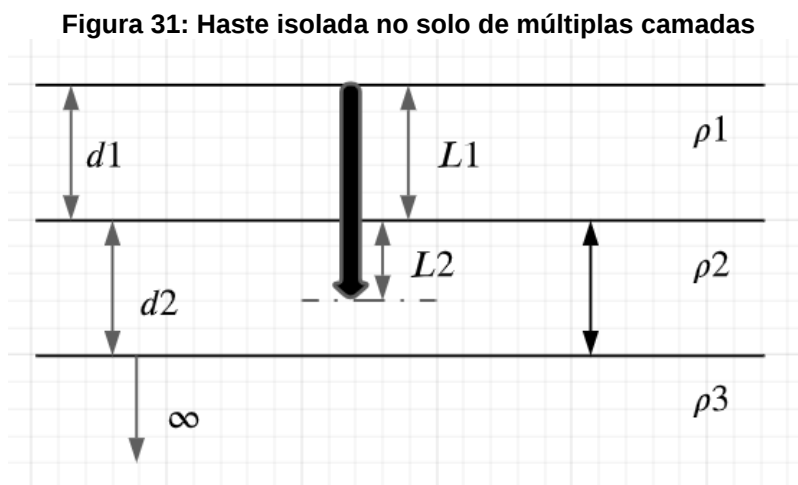
A resistência elétrica de um sistema de aterramento depende de principalmente dois fatores que são a resistividade aparente que o solo apresenta de acordo com as especificações da malha de aterramento escolhida, da geometria e como o sistema está enterrado no solo, portanto, de maneira genérica, a resistência de aterramento é dada pela relação [23]:

$$R_{aterramento} = \rho_a * f(g) \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.25)$$

O termo $f(g)$ corresponde a função que depende da geometria do sistema de aterramento e de como o mesmo é disposto dentro do solo.

Para sistemas de aterramentos que são constituídos apenas por uma haste isolada fincada em solos de múltiplas camadas, a obtenção da resistividade aparente é realizada de maneira bem simples, apenas aplicando a fórmula de Hummel

expressa na equação 2.26, a figura 31 na sequência apresenta um exemplo genérico de situações onde se utiliza essa equação [23].



Fonte Autoria Própria

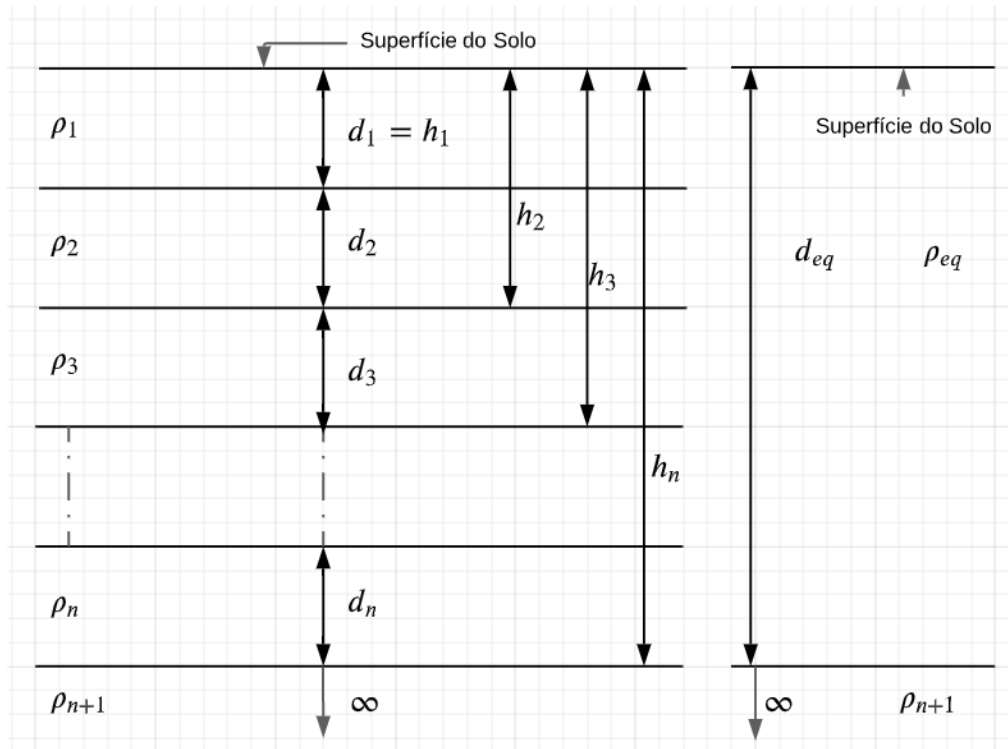
$$\rho_a = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}} \quad (\Omega.m) \quad (2.26)$$

Nesses casos de uma haste isolada a dispersão da corrente elétrica se dá de acordo com a resistividade em cada camada assim como a parcela do comprimento da haste contida em cada uma dessas camadas [23]. Para as demais topologias o procedimento utilizado para a obtenção da resistividade aparente deve ser outro, seguindo uma série de passos que serão descritos na sequência.

Para solos com múltiplas camadas, ou seja, três ou mais camadas, o primeiro passo a ser realizado para obter a resistividade aparente em topologias diferentes da haste isolada, é realizar a redução de camadas. Para os solos estratificados em duas camadas não há a necessidade de realização do mesmo devendo prosseguir nesses casos para o próximo passo que é o cálculo do coeficiente de penetração.

O intuito da redução de camadas é de transformar um solo de muitas camadas em um solo equivalente de duas camadas, para o cálculo da redução usa-se como base a fórmula de Hummel, que nesse caso ao invés de calcular a resistividade aparente, é encontrado uma equivalência das resistividades de cada uma das camadas em apenas um valor, a figura 32 apresenta com detalhes o intuito do que foi descrito acima.

Figura 32: Redução de camadas em um solo de multicamadas



Fonte Autoria Própria

O cálculo da redução é expresso pela equação 2.27 na sequência, e para a equivalência da espessura das camadas, basta somar o valor de cada uma delas antes da união das camadas, como foi ilustrado na figura 32 [23].

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\rho_i}} (\Omega.m) \quad (2.27)$$

Onde os termos não especificados, são [23]:

- d_i : a espessura da i-ésima camada;
- n : número de camadas reduzidas;
- ρ_i : resistividade na i-ésima camada.

Após o cálculo de redução, o próximo passo é realizar o cálculo do coeficiente de penetração, a partir desse termo é indicado o grau de penetração das correntes escoadas pelo sistema de aterramento no solo equivalente, e o mesmo é dado pela relação [23]:

→ Para solos de multicamadas:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} \quad (2.28)$$

→ Para solos de duas camadas:

$$\alpha = \frac{r}{d_1} \quad (2.29)$$

Os coeficientes d_{eq} e d_1 correspondem a espessura das camadas estratificadas conforme está relacionado na figura 32. Já o termo 'r' das equações 2.28 e 2.29 indicam o raio da maior dimensão do aterramento, os sistemas são transformados em anéis equivalentes de Endrenyi, e o raio desse anel equivalente corresponde exatamente ao 'r' na equação para o cálculo do coeficiente de penetração.

O cálculo do raio, dado em metros, varia de acordo com a topologia de aterramento utilizada, para sistemas que usam a configuração de hastes alinhadas com espaçamentos iguais, o raio é calculado pela equação:

$$r = \frac{(n'-1)*e'}{2} \text{ (m)} \quad (2.30)$$

E para as demais configurações, é obtido por [26]:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \text{ (m)} \quad (2.31)$$

Os termos não especificados correspondem a:

- n' : número de hastes alinhadas utilizadas no sistema;
- e' : espaçamento utilizado entre hastes, dado em metros;
- A : área total da malha de aterramento utilizada.

Assim, calculando o raio, volta na equação para calcular o coeficiente de penetração, ao terminar esse processo, parte para o coeficiente de divergência. Esse coeficiente é dado pela relação entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira camada para solos de duas camadas ou para os de múltiplas camadas utiliza-se a resistividade equivalente encontradas nos passos anteriores. Assim o mesmo é dado por [23]:

→ Para solos de duas camadas:

$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (2.32)$$

→ Para solos de múltiplas camadas:

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} \quad (2.33)$$

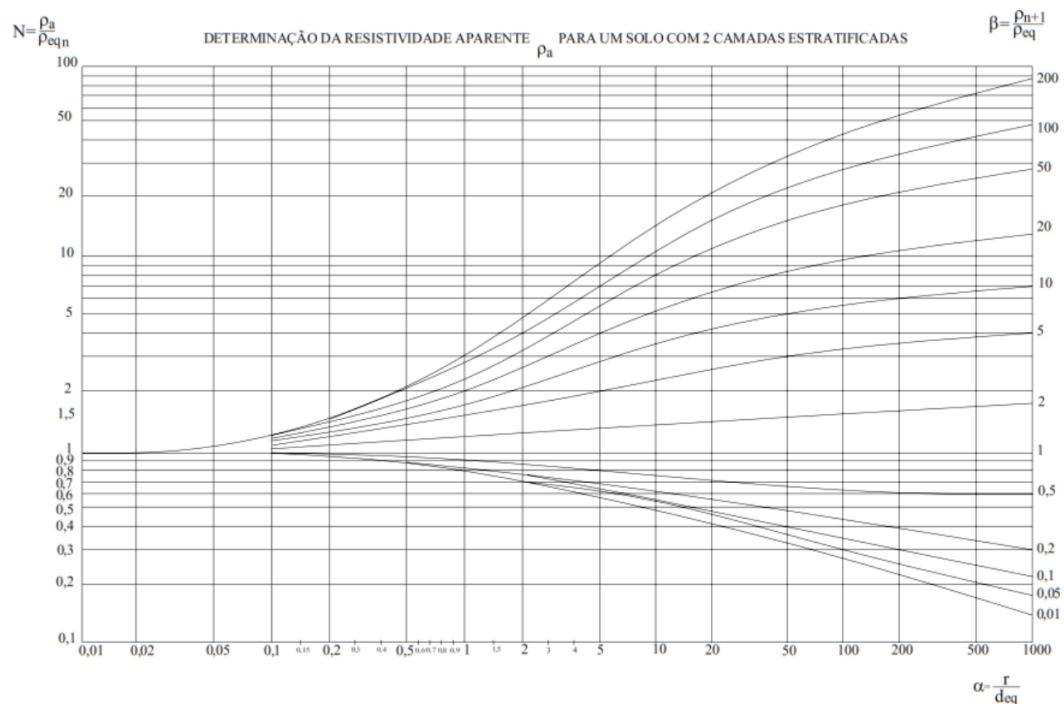
Com o coeficiente de penetração (α) e com o coeficiente de divergência (β) calculados, consegue-se encontrar a resistividade aparente por meio das curvas desenvolvidas por Endrenyi ilustrada na figura 37. Para encontrar a resistividade é necessário primeiro calcular o valor de N, expresso por [27]:

$$N = \frac{\rho_a}{\rho_1} \quad (2.34)$$

$$\rho_a = N * \rho_1 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)} \quad (2.35)$$

E para encontrar o valor de N na figura 33, usa o valor encontrado do coeficiente de penetração no eixo das abscissas, e o no eixo das ordenadas do lado direito estão as curvas do coeficiente de divergência, de acordo com o valor calculado se ajusta para a curva mais próxima ou traça um curva imaginária seguindo a tendência das demais que estão no gráfico.

Figura 33: Curvas de Endrenyi para obtenção da resistividade aparente



Fonte [27]

Após o encontro do ponto correspondente do coeficiente de penetração e da curva correta do coeficiente de divergência, faz-se o encontro e localiza o ponto na figura 33 e relaciona com o eixo das ordenadas do lado esquerdo para a determinação de N, depois disso basta utilizar a equação 2.35 e será obtido o valor da resistividade aparente do sistema de aterramento.

2.9 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Nesse tópico será explicitada mais sobre a resistência de aterramento e dos principais fatores que a englobam, essa variável é a última a ser calculada num dimensionamento de aterramento, e por meio dela consegue-se retirar uma série de conclusões acerca de um sistema de aterramento.

A resistência de aterramento representa um papel fundamental dentro de um sistema de aterramento, assim o valor ôhmico do eletrodo de aterramento juntamente com os níveis de potencial na superfície do solo, são grandezas que ao serem medidas tem o intuito de verificar a eficiência das hastes na dispersão de corrente elétrica, de detectar tensões superficiais que possam oferecer algum tipo de risco aos humanos e/ou animais e na estrutura em si, além de determinar a elevação de potencial do sistema de aterramento em relação a referência do terra [28].

Um ponto importante a ser destacado é de que o valor ôhmico da topologia de aterramento em questão quando analisada não determina a integridade física do sistema de aterramento, pois esse valor lido representa a interação da malha com o solo, portanto a resistência modifica de acordo com as condições presentes no solo.

Uma das formas para a verificação da integridade física da malha de aterramento é analisar pontos da topologia por meio das caixas de inspeção, a partir de uma análise visual consegue-se enxergar falhas mais graves como a perda de contato elétrico do cabo com uma haste, devido a ruptura de uma solda mal feita na construção do aterramento.

Os fatores que influenciam na resistência de aterramento são diversos, entretanto os principais fatores são divididos em dois grupos que são a resistividade do solo nos arredores de onde é construído a topologia e a geometria dos eletrodos quanto a dimensão, formatos e hastes utilizadas [3].

Como a resistividade do solo influencia no valor final da resistência de aterramento, assim todos os fatores que interferem na resistividade também afetam a resistência de um aterramento [3].

Colocando o foco para a estrutura da malha de aterramento em si, alguns fatores influenciam no valor final de resistência, dentre os quais podem ser destacados [3]:

→ Baixa indutância: a mesma é obtida com hastes de aterramento que possuem uma boa condutividade;

→ Baixa impedância: é obtido com o tratamento do solo, resultando numa diminuição da resistividade assegurando uma boa condutividade elétrica do aterramento com o solo;

→ Conectores que não permitam a fuga de tensão;

→ Manter o ambiente onde foi instalado úmido sempre que for possível, um solo úmido diminui a resistência de aterramento e mais importante melhora as condições de condutividade do solo.

Ao realizar todos os passos citados acima garante um bom funcionamento do sistema de aterramento instalado no solo, e como complemento para assegurar o funcionamento pleno do aterramento é realizar de forma periódica a medição da resistência da topologia, a periodicidade será explicitada com mais detalhes no próximo tópico.

2.9.1 Valores Recomendados para uma Resistência de Aterramento

As normas ao longo do tempo sofreram alterações e que o foco deixou de ser o valor numérico (ôhmico) do sistema de aterramento e que passou a se analisar outros aspectos tão importantes quanto essa questão, isso de acordo com a funcionalidade do aterramento elétrico um critério pode até mais relevante que o valor final de resistência elétrica, dentro alguns desses critérios estão a equipotencialização, tensão de passo, tensão de toque, dissipação de corrente, entre outros.

Como foi descrito no parágrafo anterior a menor resistência não deve ser o único intuito no dimensionamento de aterramento sem antes considerar um fator importante que é a distância entre os eletrodos, não adianta escolher uma topologia com número muito alto de hastes dentro de uma área pequena. Como por exemplo é preferível em um sistema de aterramento elétrico onde a funcionalidade é dissipar a corrente de descargas atmosféricas que se tenha um sistema com 20Ω em baixas frequências e baixa impedância para as altas frequências ao invés de um sistema com 15Ω em baixas frequências e alta impedância em altas frequências, essa diferença no valor da impedância ocorre pois dependendo de qual for a frequência, o cabo da malha de aterramento vai ter uma impedância maior devido a reatância indutiva do mesmo

que sofre alteração de acordo com a frequência, aumentando assim a impedância do sistema de aterramento dentro dessa situação específica.

Uma observação quanto a quantidade de eletrodos em uma pequena área é justamente que se não respeitada uma distância mínima das hastes entre si dispersão de corrente do aterramento não acontece da maneira correta como foi apresentada na figura 2, dessa forma pode acarretar na saturação do solo e no aumento da impedância do sistema de aterramento elétrico, além de acrescer os níveis de potencial nessa região e por consequência aumenta os valores de tensão de passo.

Para os sistemas de distribuição de energia elétrica em que há um neutro contínuo e aterrado em vários pontos, estando todos os aterramentos interligados entre si, resultando num auxílio mútuo desses diversos sistemas, assim não há a preocupação quanto ao valor ôhmico desse tipo de instalação, sendo numa média algo em torno de 20 a 50 Ω já atende as necessidade para esse tipo de sistema [3].

Ao longo do ano o solo varia suas propriedades, assim analogamente se obtém variação no valor de resistência de aterramento conforme os meses passam, dessa forma mesmo que tenha sido realizado um projeto bem acabado no dimensionamento e na execução de instauração do sistema de aterramento, é necessário por meio de medições haja a verificação do sistema frequentemente.

Dentro das normas não há uma exigência única quanto a periodização das medições de aterramento, em exclusivo da norma NBR 5419 diz que para instalações no geral as medições devam ocorrer no mínimo a cada 3 anos, e para instalações críticas as medições devem ser a cada 1 ano no mínimo, outras normas especificam tempos de periodicidade, isso não impede que haja medições numa intervalo de tempo menor, para assim ter o controle melhor e garantia de funcionamento do aterramento [3].

Em termos práticos o mais aconselhável é que faça as medições com o solo seco isso vale tanto para as medições de estratificação para dimensionamento do aterramento quanto para as medições de resistência de aterramento, pois sob essas condições o resultado obtido na leitura será mais elevado, aferindo assim o sistema de aterramento possivelmente nas piores condições dentro do ano, assegurando dessa forma que o aterramento tenha pleno funcionamento.

2.9.2 Método da Queda de Potencial para Encontrar Resistência de Aterramento

Os procedimentos utilizados para a obtenção da resistência de aterramento são inúmeros, e o escolhido dentro do trabalho foi o método da queda de potencial. Os parágrafos na sequência apresentam alguns cuidados a serem tomados no momento da medição, e após isso detalha o passo a passo necessário para a execução desse método.

Dentre as principais regras de segurança no momento da medição estão a de [28]:

- Garantir que o sistema de aterramento esteja desconectado do restante da instalação, é necessário que o mesmo seja medido de forma isolada para assim não ter interferências que outros sistemas de aterramento que possam conectadas a este analisado além de evitar eventuais acidentes;

- Evitar realizar essas medições sob condições climáticas adversas, principalmente quando tem risco de incidência de uma descarga atmosférica;

- Utilizar os equipamentos de proteção individual com calçados e luvas com o nível de isolamento compatível com os níveis de tensão que ocorrem no sistema no momento da medição;

- Fazer com que não haja pessoas estranhas ou animas no local nos momentos das medições para que assim seja evitado acidentes;

- E por fim, utilizar os aparelhos compatíveis para realizar esse tipo de medição de acordo com o anexo C da norma NBR 15749, com a intenção de assegurar a fidelidade dos dados colhidos além de manter a segurança dos operadores.

O método da queda de potencial é utilizado com equipamentos específicos, como o terrômetro, o método consiste basicamente de fazer circular uma corrente elétrica dentro de um circuito em que se está conectado em um terminal do terrômetro a malha de aterramento, no outro mede-se a tensão entre a malha e um ponto remoto referencial de terra por meio de um eletrodo inserido no solo, chamado de eletrodo auxiliar de potencial e por fim existe um outro eletrodo responsável por inserir corrente elétrica no solo, a figura 34 ilustra o esquema de ligação de como é realizado este método utilizando o terrômetro [29].

Figura 34: Esquema de ligação do método da queda de potencial

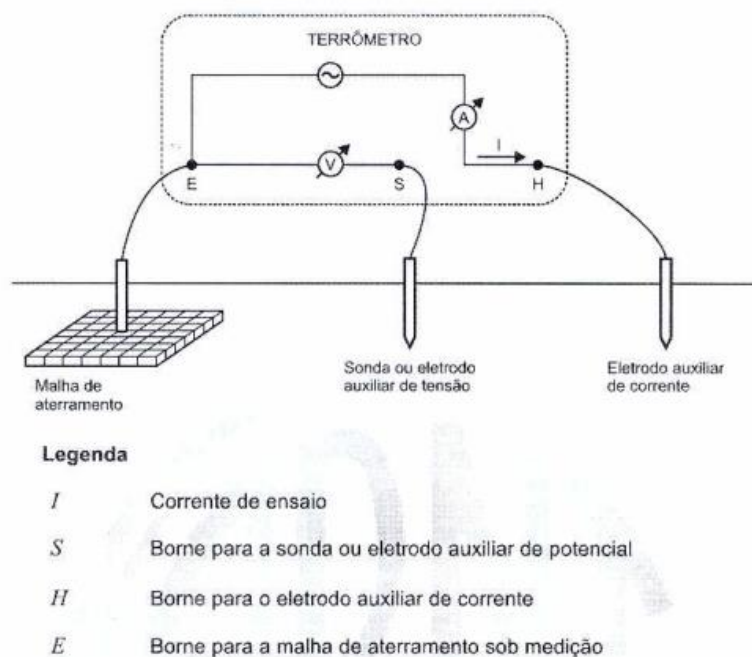


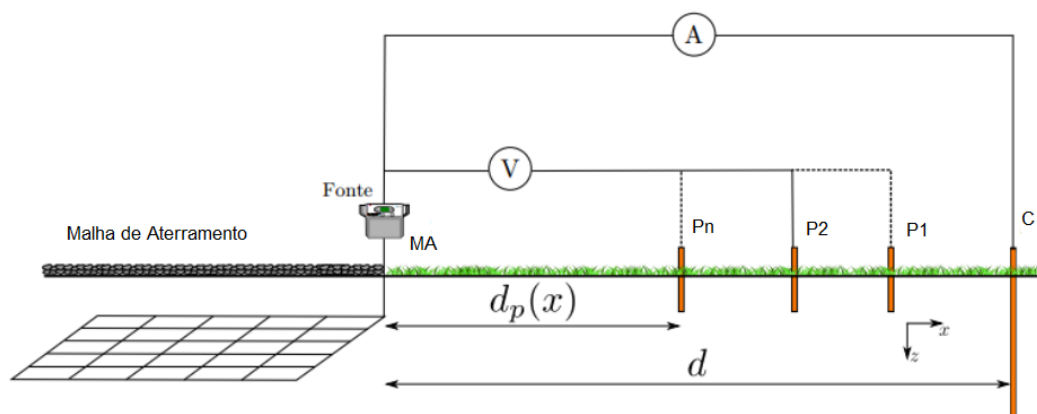
Figura 2 — Método da queda de potencial

Fonte [29]

Os eletrodos auxiliares de tensão e de corrente podem ser constituídos cada um deles de um ou mais hastes metálicas interligadas com o intuito de garantir a menor resistência do conjunto e por consequência uma menor interferência no resultado obtido na leitura [28].

Na execução quanto as realizações das medições o eletrodo auxiliar de corrente é mantido fixo, enquanto o eletrodo auxiliar de tensão é deslocado de acordo com que for progredindo os dados colhidos, no sentido inicial de mais próximo ao eletrodo de corrente até ficar bem próximo a malha de aterramento, movendo a haste de tensão numa linha imaginária entre a topologia de aterramento e o eletrodo de corrente, deslocando de uma medição para outra algo em torno de 5% da distância máxima, que é justamente o espaço em linha reta que há entre o aterramento e a haste de corrente [28]. A figura 35 apresenta como é obtido a curva ilustrada na figura 36, em que a haste determinada como ponto P, é deslocada de mais próxima do eletrodo de corrente até a malha de aterramento, e o ponto C representa o eletrodo de corrente, e o ponto MA é o terminal que se liga na malha de aterramento.

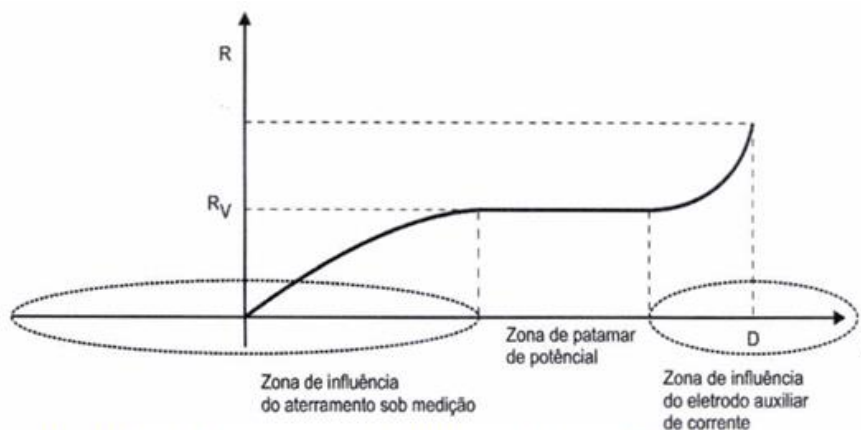
Figura 35: Execução de ligação do método da queda de potencial



Fonte [30] adaptado

Depois de realizar a medição dos potenciais, e conhecendo o valor de corrente elétrica que foi inserida no solo, consegue-se extrair o valor da resistência elétrica, pela relação da lei de Ohm dada por $V=R.I$, onde V é a tensão elétrica, R é a resistência elétrica e I é a corrente elétrica, a partir da obtenção das resistências de acordo com a distância obtém-se uma curva conforme é ilustrado na figura 36. No trabalho foi utilizado um terrômetro para obtenção dos valores de resistência, e por meio do mesmo já obtém-se os valores de resistência de forma direta bastando realizar a ligação conforme foi ilustrado na figura 34.

Figura 36: Curva característica da resistência de aterramento em função da distância



R : Resistência obtida variando a distância da sonda desde a distância $d=D$ até $d=0$ (o eletrodo a medir)

R_v : Valor verdadeiro do aterramento

Fonte [29]

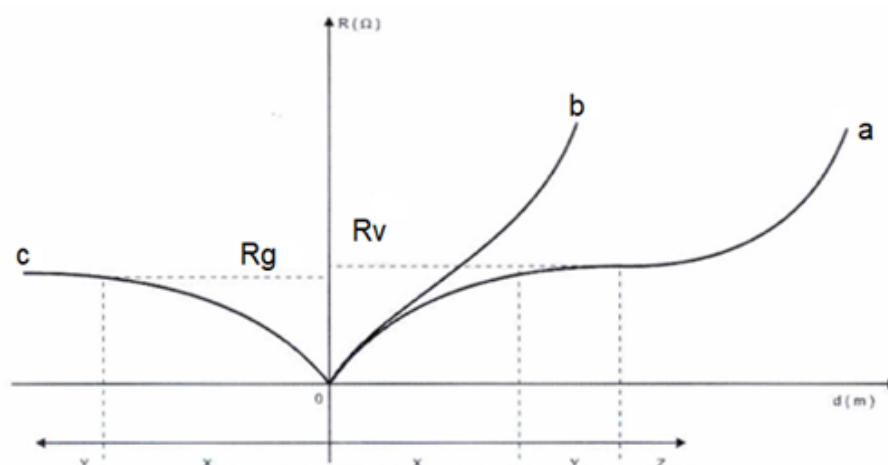
A partir daquilo que foi apresentado na figura 36 consegue-se extrair qual é a real resistência que o aterramento possui sob as condições apresentadas do solo no momento das medições, o ideal é que deva ser realizado medições em diversas direções com o intuito de representar uma fidelidade maior que o aterramento tem em

cima da região que o engloba, entretanto as limitações do local pode impedir que seja realizada as medições por todos os lados.

Conforme foi visto na figura 36 há as zonas de influência sendo inicialmente da malha de aterramento, e no final a influência que ocorre devido ao eletrodo auxiliar de corrente, e na região de patamar tem a estabilização no valor da resistência também chamado de zona de patamar de potencial, nesse trecho que é extraído o valor real da resistência do sistema de aterramento que se está medindo.

Um detalhe importante é que nem sempre ocorre a estabilização perfeita na zona de patamar de potencial, ou seja, não há um conjunto de valores de resistência que apresentem o mesmo valor ôhmico no processo de medição utilizando o método de queda de potencial, assim ao se medir a resistência de uma malha de aterramento na região vista como a zona de patamar de potencial pode ser que ocorra um pequena variação no valor das resistências entre um dado e outro, quando acontece isso, se a discrepância entre esses dados não for muito alta, consegue-se extrair um valor com grande fidelidade daquilo que realmente o sistema apresenta, para determinar a resistência de aterramento basta plotar os dados colhidos e no trecho do gráfico em que mais se assemelha com a zona de potencial, seleciona essas dados e realiza a média a aritmética, esse valor calculado representa a resistência do aterramento.

Figura 37: Curvas típicas de resistência de aterramento em função das posições dos eletrodos auxiliares



Legenda

X: Área de influência do sistema de aterramento sob medição E

Y: Zona de patamar de potencial

Z: Área de influência do eletrodo auxiliar de corrente H

Rv: Resistência de aterramento do sistema sob medição (valor verdadeiro da resistência de aterramento sistema E)

a, b e c: Curvas de resistência de aterramento em função do espaçamento e posição relativa dos eletrodos auxiliares de potencial e de corrente

Fonte [29]

Pelas curvas 'a' e 'b' apresentadas na figura 37, mostram as curvas típicas quando o deslocamento do eletrodo auxiliar de potencial é no mesmo sentido e direção do eletrodo auxiliar de corrente, diferentemente da curva 'c' em que o sentido da haste de potencial é contrário ao da haste de corrente [28].

Ainda analisando o comportamento das curvas desenhadas na figura 37, verifica-se que as curvas 'a' e 'c' ocorrem a estabilização de uma zona de patamar de potencial bem definida, já na curva 'b' não há a estabilização do valor da resistência de aterramento, isso ocorre justamente, pois não há a distância suficiente entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente [28].

Sob as condições apresentadas na curva 'b' a haste deve ser colocada mais distante até que se estabeleça uma zona de patamar definida nas medidas, sendo esse um grande ponto negativo de utilizar esse método para aferição da resistência de aterramento, porque em topologias de aterramentos de grandes dimensões a distância necessária a ser adotada no eletrodo de corrente para que haja a estabilização deverá ser muito maior, e dependendo do local em que o aterramento esteja inserido ocorra essa limitação de espaço, inviabilizando o método.

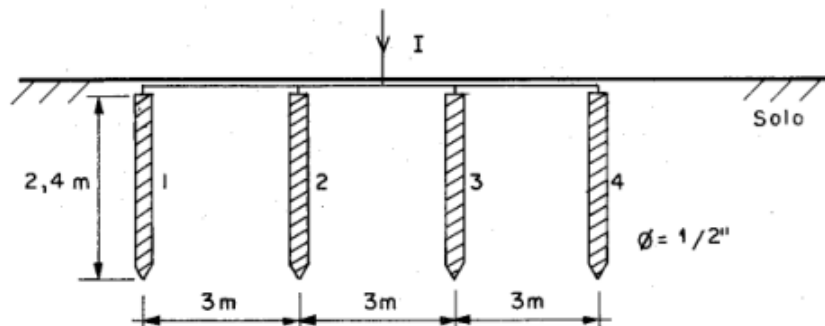
Como contrapartida, destacando como ponto positivo do método é de que o mesmo é fácil de ser realizado no sentido de que com o equipamento correto e alguns cuidados é possível executá-lo, não exigindo uma necessidade de um grande conhecimento técnico, além de que o método apresenta uma boa resposta quanto aquilo que o sistema de aterramento realmente apresenta, atendendo assim, o propósito de realizar medidas ôhmicas na malha de aterramento.

2.9.3 Cálculo da resistência de aterramento

Esse tópico irá apresentar alguns dos principais equacionamentos existentes de diferentes topologias de aterramento. No dimensionamento de um sistema o cálculo da resistência de aterramento é o último antes da execução do projeto, é aqui que se escolhe a topologia, quantidade, diâmetro, comprimento e material de hastes, além do espaçamento entre adotado entre os eletrodos de acordo com a resistência que se deseja obter, respeitando as condições de espaço existentes no local.

Na figura 38 é apresentado como é estruturado uma topologia de aterramento em hastes alinhadas de igual espaçamento entre hastes, e posteriormente como é realizado o cálculo da resistência.

Figura 38: Exemplo de uma topologia de aterramento com 4 hastes alinhadas



Fonte [23]

Para o cálculo da resistência de aterramento para hastes alinhadas, desde que o espaçamento seja muito maior que o comprimento dos eletrodos, basta utilizar a equação na sequência [24]:

$$R_{Hastesalinhadas} = \frac{1 \cdot \rho_a}{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} * [\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{L}{s} * \ln(1.781 * n/e)] \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.36)$$

Dado que os termos da equação 2.36 representam:

$L \rightarrow$ comprimento das hastes em metros (m);

$n \rightarrow$ número de hastes (adimensional);

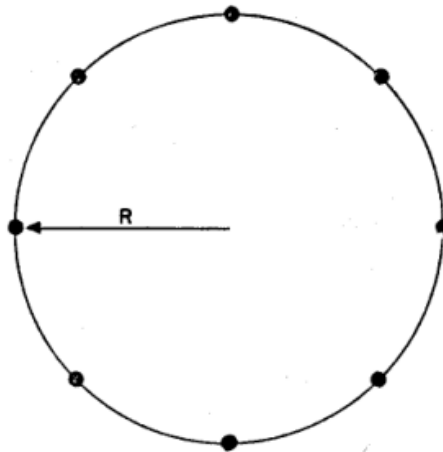
$s \rightarrow$ espaçamento entre as hastes em metros;

$d \rightarrow$ diâmetro das hastes em metros (m);

Lembrando que a resistividade aparente também depende de questões estruturais da malha de aterramento, para obtenção do termo 'r' dentro do coeficiente de penetração.

A próxima malha a ser apresentada é em circunferência, conforme é ilustrado na figura 39, e assim como a topologia em hastes alinhadas o equacionamento que será apresentado é aplicado quando o espaçamento entre hastes é muito maior que o comprimento dos eletrodos.

Figura 39: Topologia com hastes em circunferência



Fonte [23]

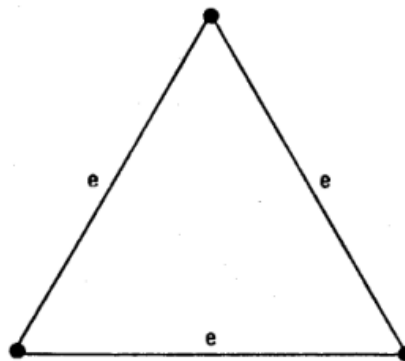
E é dado pela equação [24]:

$$R_{circunf} = \frac{1}{n} \frac{\rho_a}{2\pi L} [\ln(8L/d) - 1 + \frac{L}{s} \ln(2n/\pi)] \quad (\Omega) \quad (2.37)$$

Os termos da equação representam as mesmas variáveis explicadas na malha de hastes alinhadas.

Para a topologia em triângulo, pode ser utilizado com a configuração com 3 ou 6 hastes, entretanto o equacionamento apresentado será para triângulo equilátero com três eletrodos na sua composição, como é ilustrado na figura 40.

Figura 40: Topologia com hastes em triângulo



Fonte [23]

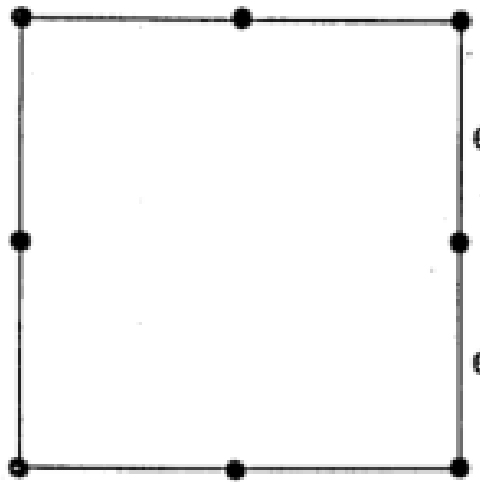
E o equacionamento é dado por [23]:

$$R_{triangulo} = \frac{1}{3} * \left\{ \frac{\rho_a}{2\pi * L} [\ln(8L/d) - 1] + 2Ls \right\} \quad (\Omega) \quad (2.38)$$

A última topologia de aterramento a apresentar os respectivos equacionamentos para obtenção da resistência é a malha em quadrado vazio quando se utiliza 4 hastes, para a realização do cálculo dessa topologia será apresentado dois equacionamentos diferentes.

O primeiro equacionamento do quadrado vazio é da malha de terra retangular com hastes com espaçamento 'e' em metros entre hastes, como apresenta a figura 41 na sequência.

Figura 41: Topologia de malha retangular com hastes



Fonte [23]

E é dado pela equação [31]:

$$R_G = 0.13 * \frac{\rho_a}{\sqrt{A}} * \left(1 - \frac{2*L}{3*\sqrt{A}}\right) * \log_{10}\left(\frac{(2400 * \sqrt{A})}{N}\right) (\Omega) \quad (2.39)$$

Onde termo 'A' representa a área da malha em m², e N indica o número de reticulados idênticos. Para os solos com mais de duas camadas é necessário que se faça uma correção, e essa correção é dado pela relação [31]:

$$R_{quadrado01} = C_R * R_G (\Omega) \quad (2.40)$$

E o termo C_R , calcula-se por:

$$C_R = (\rho_2/\rho_1)^k \quad (2.41)$$

Onde ρ_2 indica a resistividade do solo na segunda camada, e ρ_1 a resistividade na primeira camada, o cálculo de k é dado:

Se $\rho_2 < \rho_1$, k é calculado por [31]:

$$k = [0.59 \log_{10}\left(\frac{15.5}{L}\right)] + \{0.016 * (\log_{10}(4.2L)) * [\log_{10}(N\sqrt{A})]^2\} \quad (2.42)$$

Se $\rho_2 > \rho_1$, k é calculado por [31]:

$$k = [0.57 \log_{10}\left(\frac{8.5}{L}\right)] + \{0.06 * (\log_{10}(10L)) * (\log_{10}(NL))\} \quad (2.43)$$

Após o cálculo k , volta para o termo C_R e por fim realiza-se a operação para saber a equação da resistência de aterramento de uma malha de aterramento com hastes.

Uma segunda maneira de calcular é pela equação [27]:

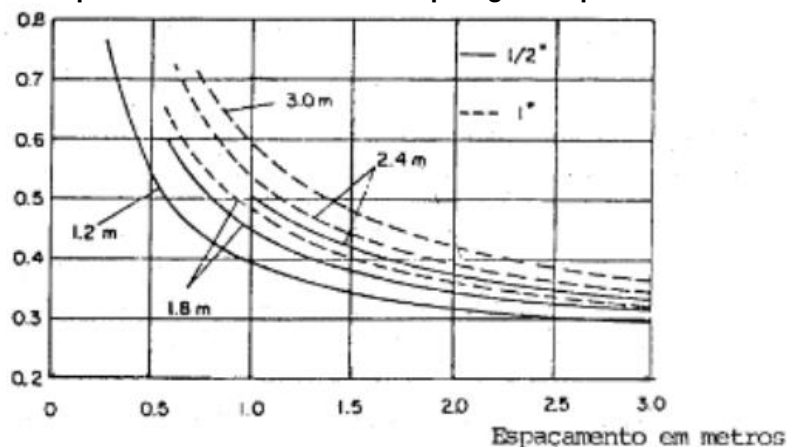
$$R_{quadrado02} = K'' * R_{1haste} \quad (\Omega) \quad (2.44)$$

Onde a resistência de uma haste isolada é dada por [27]:

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2 * \pi * L} * \ln(4L/d) \quad (\Omega) \quad (2.45)$$

E o fator de redução (K'') é obtido por meio das curvas apresentadas na figura 42, onde o fator de redução está no eixo das ordenadas, e o espaçamento entre hastes no eixo das abcissas, nas curvas é especificado qual o comprimento e diâmetro das hastes.

Figura 42: Curvas para determinar K'' numa topologia de quadrado vazio de 4 hastes



Fonte [27]

A partir de tudo que foi apresentado, é possível compreender todos os temas que serão abordados do próximo capítulo, é nele que está a parte de implementação prática e análise comparativa do trabalho, dentre esses assuntos estão a medição de resistividade do solo escolhido, a estratificação do solo, construção das topologias de aterramento, medição da resistência de aterramento das malhas de forma isolada, medição da resistência de aterramento das malhas associadas interligando de duas a duas, cálculo e apresentação de gráficos de tudo aquilo que é relevante para o trabalho, relatando as principais dificuldades ao longo de todo o processo, e pôr fim a realização da análise comparativa entre o aquilo que foi medido e cálculo.

3 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

A partir desse capítulo contém a parte principal do trabalho onde está tudo aquilo realizado na prática com o intuito de ao final de todas as etapas, realizar a análise teórico-experimental quando há a conexão de duas topologias distintas, e destacar pontos importantes que são perceptíveis com muito mais facilidade na prática, como por exemplo na instalação de uma topologia ao realizar as soldas do cabo com as hastes fatores como a quantidade de pólvora, distância entre os itens a serem soldados e desgaste do molde, influenciam de forma direta na qualidade da solda.

Um dos pontos positivos de realizar a parte prática que envolve um sistema de aterramento, é uma melhor fixação de conceitos teóricos apresentados dentro da disciplina de Aterramentos Elétricos, trazendo uma maior segurança para o aluno realizar um projeto de aterramentos após a finalização do curso de graduação em Engenharia Elétrica.

O terreno escolhido para a estratificação e posteriormente para a construção das malhas de aterramento foi entre o bloco 500 e o refeitório do IFG campus Itumbiara, sendo esse o local determinado por haver espaço hábil para a construção da topologia de hastes alinhadas, quadrado vazio e em circunferência, mas o fator determinante foi devido a de já estar instaurada no início do trabalho a malha de aterramento em triângulo no local, diminuindo assim a quantidade de topologias a serem construídas.

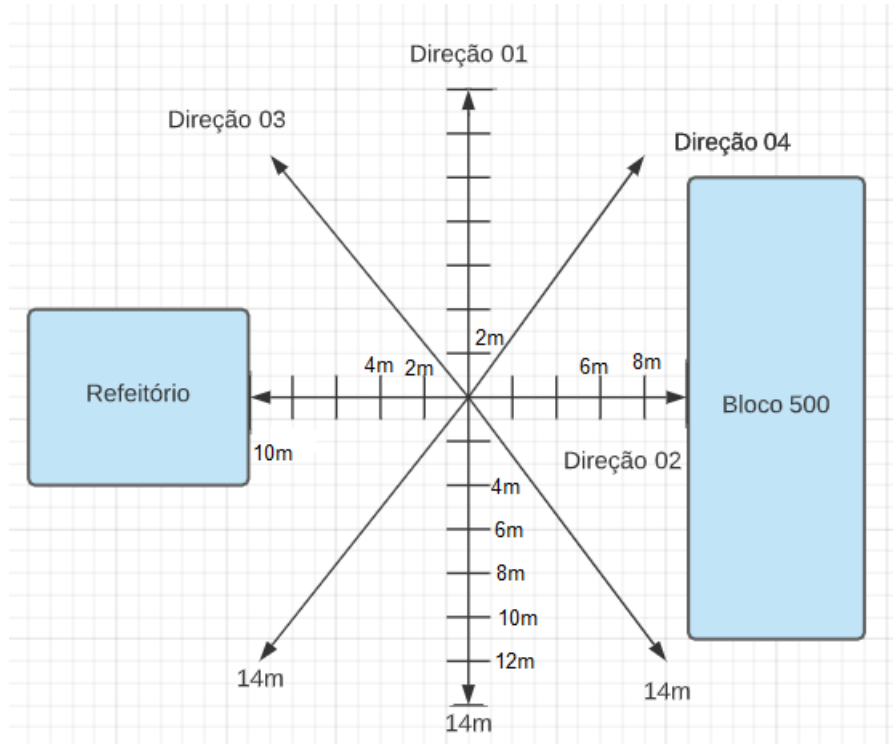
O primeiro passo a ser realizado foi o da estratificação do solo, tema explicado com mais detalhes nas seções 2.6 e 2.7.

3.1 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE NO SOLO

A estratificação do solo foi conforme aquilo que foi explicado no capítulo 2, seguindo o método de Frank Wenner explicado na seção 2.6, utilizando um terrômetro para a medição dos valores de resistividade, para uma dispersão de corrente imersa no solo na profundidade adequada, as hastes foram fincadas no solo a 20 cm da superfície, mantendo todos eletrodos numa mesma profundidade e alinhadas entre si. Como o local escolhido possui uma área relativamente grande, conseguiu-se adotar

uma distância considerável entre as hastes, consequentemente a corrente elétrica injetada no solo atinge uma profundidade significativa retornando assim nas medições de resistividade uma boa representação da estrutura do solo, a figura 43 ilustra as direções adotadas para a estratificação e as respectivas distâncias máximas entre as 4 hastes.

Figura 43: Direções e distâncias máximas adotadas para a estratificação do solo



Fonte Autoria Própria

A variação de uma medição para outra quanto a distância entre hastes foi de 2 em 2 metros, seguindo a relação de 2,4,6,8,10 e 14 metros para três das quatro direções adotadas no processo, e na direção que não foi realizado a medição com distância de 14m entre os eletrodos, foi devido ao fato de limitações de espaço no local, seguindo a relação de medições para essa direção de 2,4,6,8 e 10 metros. A tabela 08 na sequência apresenta os dados de resistividade na direção 01, conforme apresentado na figura 43.

Tabela 08: Medições de resistividade na direção 01

Distâncias (m)	Medições (Ωm)
2	1116
4	1055
6	928
8	629
10	585
14	565

Fonte Autoria Própria

Nas tabelas 09,10 e 11 estão respectivamente, as demais medições da resistividade no solo nas direções 02, 03 e 04.

Tabela 09: Medições de resistividade na direção 02

Distâncias (m)	Medições (Ωm)
2	1143
4	1089
6	1300
8	514
10	567

Fonte Autoria Própria

Tabela 10: Medições de resistividade na direção 03

Distâncias (m)	Medições (Ωm)
2	915
4	853
6	809
8	996
10	692
14	23.3

Fonte Autoria Própria

Tabela 11: Medições de resistividade na direção 04

Distâncias (m)	Medições (Ωm)
2	1056
4	1177
6	1105
8	1201
10	729
14	28.5

Fonte Autoria Própria

Tendo todas as medições o próximo passo é de realizar a média aritmética dos dados de acordo com os respectivos espaçamentos, ou seja, deve se realizar a média de todas as medidas com espaçamento de 2m, depois de 4m, 6m e assim por diante, a tabela 12 apresenta a média de todos dados.

Tabela 12: Média das medições de resistividade

Média das medições	
Distância(m)	Medições (Ωm)
2	1057.5
4	1043.5
6	1035.5
8	835
10	643.25
14	205.6

Fonte Autoria Própria

Como foi apresentado na seção 2.6.1 após a realização da média das medições de resistividade, é necessário realizar um tratamento de descartar os dados que tiverem um desvio superior a 50% em relação a média nos respectivos espaçamentos, esse desvio é calculado de acordo com a equação 2.15, e a tabela 13 apresenta os desvios de todas as medições.

Tabela 13: Desvio das medições de resistividade em relação a média

Desvio da Média em %				
a(m)	Direção 01	Direção 02	Direção 03	Direção 04
2	5.53	8.09	13.48	0.14
4	1.10	4.36	18.26	12.79
6	10.38	25.54	21.87	6.71
8	24.67	38.44	19.28	43.83
10	9.06	11.85	7.58	13.33
14	174.81	xx	88.67	86.14

Fonte Autoria Própria

Como pôde ser observado na tabela 12 em todos os espaçamentos exceto o de 14m não houve um desvio em relação à média superior a 50%, e das medidas da última linha todas as medições tiveram desvio superior ao determinado como máximo, assim ao invés de descartar todos os dados com esse espaçamento, será retirado apenas a medida na direção 01, pois o dado da mesma corresponde a uma resistividade com valor muito superior as outras duas obtidas em outras direções, sendo essa medição a responsável por causar a dispersão acima dos 50% de todas as resistividades com espaçamento de 14m entre hastes. Após o descarte dessa medida deve ser refeita a média das medições nessa linha e refazer o desvio em função da média, a tabela 14 apresenta os novos desvios e a nova média das respectivas medições.

Tabela 14: Nova média das medições de resistividade e desvio recalculado

Novo Desvio em função da média em %					Nova média das medições em (Ωm)
a(m)	Direção 01	Direção 02	Direção 03	Direção 04	
2	5.53	8.09	13.48	0.14	1057.5
4	1.10	4.36	18.26	12.79	1043.5
6	12.80	25.54	23.98	3.83	1035.5
8	24.67	38.44	19.28	43.83	835
10	9.06	11.85	7.58	13.33	643.25
14	xx	xx	10.04	10.04	25.9

Fonte Autoria Própria

Conforme é apresentado na tabela 14, há uma grande variação no valor de resistividade do espaçamento entre hastes de 10m para a medição correspondente ao espaçamento de 14m, de acordo com que foi explicado anteriormente quanto maior

for a distância entre hastes também é maior a profundidade que a corrente elétrica percorre dentro do solo, sendo assim por haver edificações ao lado de onde foi medido os valores de resistividade pode ser que essas construções contidas ao redor estejam afetando as medições na profundidade entre 10 e 14 metros. Uma maneira de comprovar se há realmente essa interferência devido a essa questão e também verificar que os dados de resistividade estão corretos, é a de realizar a estratificação do solo realizando um diferente método do aplicado, entretanto para que o trabalho não ficasse muito extenso, foi escolhido apenas um método para a estratificar o solo. Sendo assim, essa sugestão fica como uma análise para possíveis trabalhos futuros.

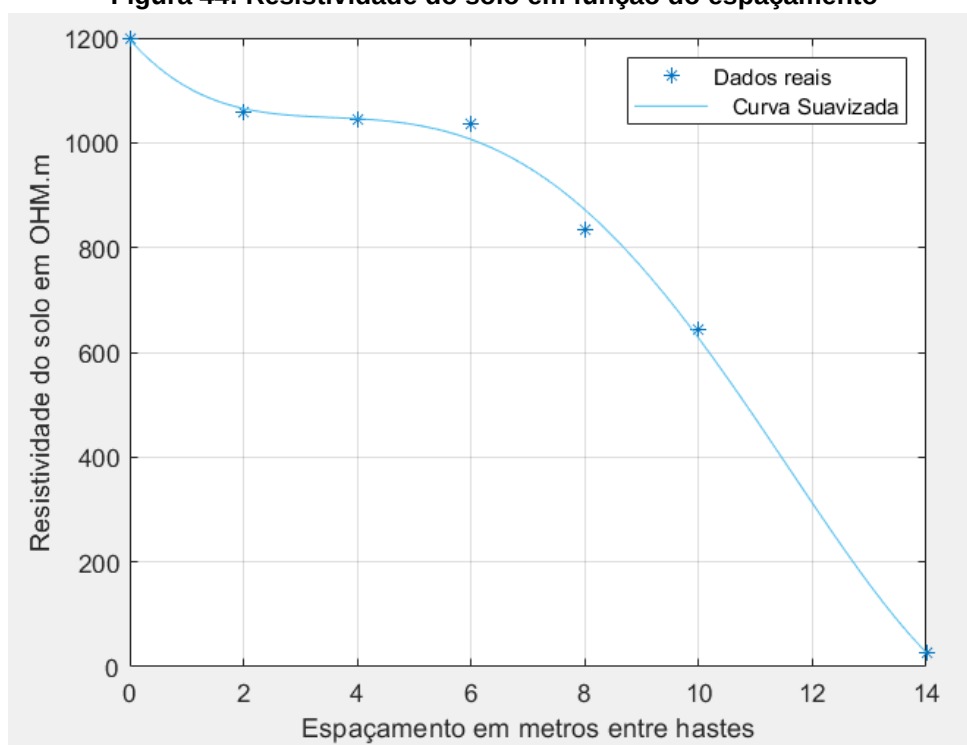
De acordo com os valores estabelecidos na última coluna da tabela 14 é que se realiza a estratificação do solo, e pelo perfil das medições, os dados de resistividade correspondem a um solo típico de duas camadas, onde há o decréscimo no valor de resistividade de acordo com o aumento do espaçamento entre hastes, sem oscilações, ou seja, os dados seguem sempre em queda com o aumento do espaçamento. Os solos com perfil onde a resistividade aumenta conforme é acrescido o espaçamento entre os eletrodos, sem oscilações, também representam um solo de duas camadas, assim como ilustrado foi na figura 32 na seção 2.7.1.

3.1.1 Estratificação do Solo

A partir da manipulação dos dados até chegar nas medidas apresentadas na tabela 14 da seção anterior, é possível realizar a estratificação do solo, e nesse caso em específico fazer a estratificação conforme foi apresentado o passo a passo no tópico 2.7.1, utilizando a método de estratificação com curvas.

O primeiro passo para realização de estratificação para solo de duas camadas é o de realizar uma curva do espaçamento entre hastes em função das respectivas resistividades utilizando os dados da última coluna da tabela 14, mas antes disso, como não há nenhuma medição com espaçamento de 0m entre eletrodos, por isso prolonga a curva traçando uma tendência do gráfico até atingir esse ponto, e esse valor encontrado de resistividade nesse ponto representa a resistividade na primeira camada (ρ_1) [23], a figura 44 apresenta a curva $ax\rho(a)$ já com o prolongamento da curva.

Figura 44: Resistividade do solo em função do espaçamento



Fonte Autoria Própria

De acordo com a curva expressa pela figura 44 o valor da resistividade do solo na primeira camada tem o valor de $\rho_1 = 1200\Omega.m$. Para a plotagem da curva expressa pela figura ilustrada na página anterior, assim como todos os gráficos utilizados no processo de estratificação foram realizados de forma computacional, e na utilização desse programa é possível dar o zoom de preferência e assim identificar pontos importantes como o de cruzamentos de diferentes curvas que serão necessários nos próximos passos da estratificação.

O próximo passo é o de escolher dois diferentes pontos dentro da curva ilustrada na figura 44, anotando assim os valores de um primeiro ponto a_1 e ρ_{a1} e para o segundo ponto a_2 e ρ_{a2} , esses pontos são escolhidos de arbitrária [23], assim os pontos escolhidos foram:

→ 1º Ponto: $\rho_{a1} = 1017\Omega.m$ e $a_1=5.7m$;

→ 2º Ponto: $\rho_{a2} = 993.2\Omega.m$ e $a_1=6.3m$.

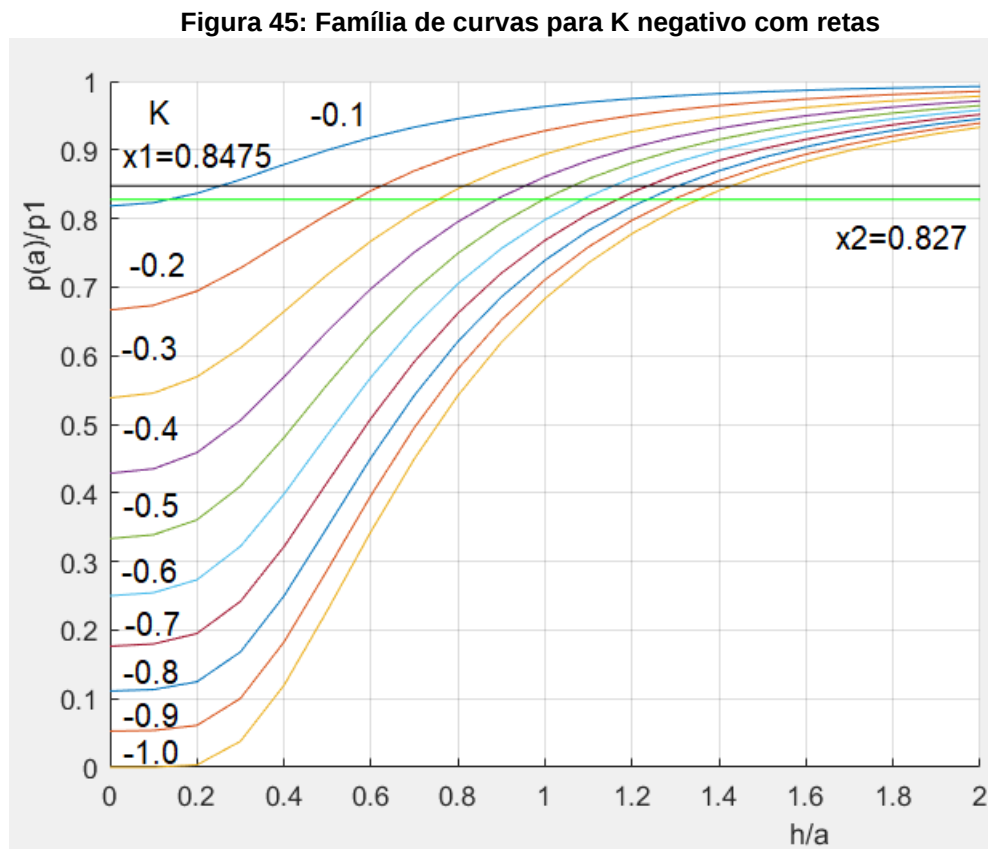
Após a escolha dos pontos, é necessário fazer a intersecção das retas horizontais paralelas ao eixo das abcissas utilizando os valores escolhidos nos pontos, com a família de curvas de K apresentadas nas figuras 29 e 30. Como a curva $ax\rho(a)$ é descendente, as retas devem ser traçadas obedecendo a relação $\rho^{(ax)}/\rho_1$ e a

família de curvas utilizadas para o K negativo, se dentro dos dados dispostos na curva $axp(a)$ fosse apresentado uma curva ascendente as retas deveriam ser traçadas utilizando a relação $\rho^1/\rho(ax)$ e por consequência disso as retas fariam intersecção com a família de curvas para o K positivo [23]. De acordo com os pontos escolhidos, as retas horizontais são dadas por:

$$\rightarrow \text{Reta 01: } \frac{\rho_{a1}}{\rho_1} = \frac{1017}{1200} = 0.8475;$$

$$\rightarrow \text{Reta 02: } \frac{\rho_{a2}}{\rho_1} = \frac{993.2}{1200} = 0.827.$$

Para a plotagem da família de curvas para o K negativo ou positivo utiliza-se a equação 2.24 variando o termo h/a com degrau de 0.1, com intervalo de 0 a 2, e o K com degrau de -0.1, possuindo um intervalo de -0.1 a -1 [23]. Depois da plotagem das curvas, realizar a sobreposição com as retas 01 e 02, a figura 45 ilustra tudo isso.



Fonte Autoria Própria

Após a plotagem do gráfico, anotar numa tabela onde acontece a intersecção das retas com as famílias de curvas de K, fazendo a correspondência em cada linha

da tabela de um lado as curvas que está se referindo de K e na outra coluna colocar onde ocorre a intersecção dentro do intervalo de 0 a 2 para o termo h/a , anotar todos os pontos onde ocorrem esse encontro, para ambas as retas[23]. Um detalhe é de que de acordo com os valores escolhidos de resistividade para traçar a reta, pode ser que não haja a intersecção com todas as curvas de K, assim, a tabela é montada apenas com valores onde ocorra isso.

Depois de estabelecer os pontos de intersecção, é necessário multiplicar os valores de h/a pelos pontos escolhidos inicialmente (a_1 e a_2) nas respectivas retas, assim terá duas tabelas com três colunas cada, sendo com os valores de K, h/a , e h [23]. Por meio do software utilizado para a plotagem consegue-se aumentar a escala do gráfico, assim se enxerga com exatidão os pontos onde há as intersecções, e nas tabelas 15 e 16 apresentam todos esses dados de acordo com a intersecção ilustrada na figura 45.

Tabela 15: Intersecção das curvas K com a reta 01 apresentando valores de K, h/a e h

1° Reta		
$\rho_1=1200\Omega$	$\rho(a_1)=1017\Omega$	$a_1=5.7m$
K	h/a	h
-0.1	0.256	1.4592
-0.2	0.624	3.5568
-0.3	0.814	4.6398
-0.4	0.9542	5.43894
-0.5	1.064	6.0648
-0.6	1.156	6.5892
-0.7	1.236	7.0452
-0.8	1.305	7.4385
-0.9	1.371	7.8147
-1	1.428	8.1396

Fonte Autoria Própria

Tabela 16: Intersecção das curvas K com a reta 02 apresentando valores de K, h/a e h

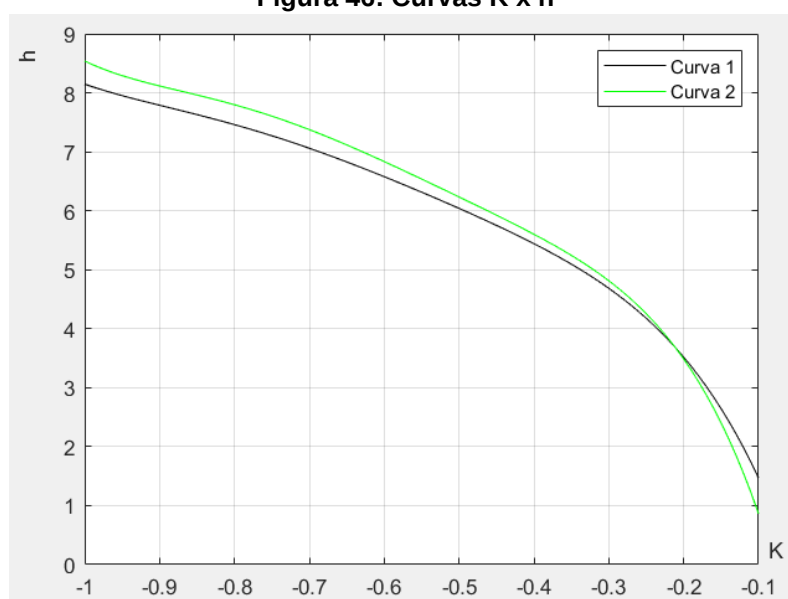
2° Reta		
$\rho_1=1200\Omega$	$\rho(a_2)=993.2\Omega$	$a_1=6.3m$
K	h/a	h
-0.1	0.135	0.8505
-0.2	0.562	3.5406
-0.3	0.754	4.7502
-0.4	0.888	5.5944
-0.5	0.996	6.2748
-0.6	1.087	6.8481
-0.7	1.166	7.3458
-0.8	1.235	7.7805
-0.9	1.293	8.1459
-1	1.354	8.5302

Fonte Autoria Própria

A partir dos valores apresentados nas tabelas 15 e 16 traçar gráficos em um mesma figura utilizando os dados da primeira e terceira coluna de ambas, assim se terá duas curvas com dados de $K \times h$, e o ponto onde as mesmas se cruzam é o que importa para determinar a espessura, profundidade da primeira camada e a resistividade da segunda camada, finalizando assim o processo de estratificação [23]. A figura 46 apresenta as duas curvas de acordo com os dados das tabelas apresentadas anteriormente.

Uma observação importante é de que caso não ocorra a intersecção entre as curvas $K \times h$, basta utilizar pontos diferentes dos escolhidos para a_1 ou a_2 , ou ambos, e repetir os passos subsequentes. Outro detalhe a ser ressaltado é de que uma estratificação não possui valores únicos para a espessura das camadas e nem da resistividade elétrica, isso varia justamente de acordo com os pontos escolhidos dentro do processo de forma aleatória, dessa forma não há apenas uma estratificação correta, desde que seja seguido os passos descritos, o resultado encontrado lhe trará o valor adequado para seguimento no dimensionamento de um aterramento elétrico.

Figura 46: Curvas $K \times h$



Fonte Autoria Própria

Ao realizar um zoom no gráfico verifica-se que o cruzamento das curvas ocorre no ponto onde $K=-0.2112$, e $h=3.68m$, a partir disso se determina a resistividade da segunda camada utilizando esses valores, dentro da equação 2.18, e fazendo uma manipulação básica isolando p_2 se tem:

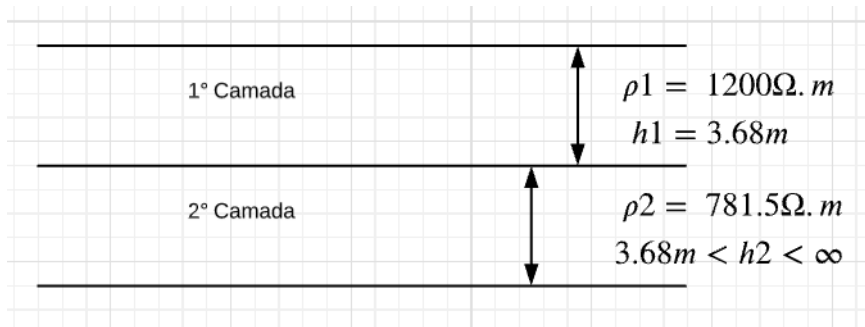
$$\rho_2 = \rho_1 * \frac{(1+K)}{(1-K)} (\Omega.m) \quad (3.1)$$

Substituindo os dados encontrados, tem-se:

$$\rho_2 = 1200 * \frac{1-0.2112}{1+0.2112} = 781.5\Omega.m$$

Dessa forma a estratificação do solo em duas camadas utilizando curvas é finalizado e expresso pela figura 47, contendo os dados que importam que são as resistividades e espessura da primeira e segunda camada.

Figura 47: Síntese dos dados de estratificação do solo



Fonte Autoria Própria

3.2 CONSTRUÇÃO DAS MALHAS DE ATERRAMENTO

As medições de resistência do aterramento dentro do trabalho foram realizadas em cima de 4 diferentes tipos de topologia, dentre elas estão a malha com hastes alinhadas, quadrado vazio, circunferência e em triângulo, e dentre essas malhas de aterramento apenas a topologia em triângulo não foi construída ao longo desse trabalho, já estava instaurada no terreno antes do o início do mesmo.

Um ponto importante a ser destacado é de que as intenções de que um projeto normalmente teria, não foi o foco desse trabalho, como estudar a melhor geometria e quantidade de hastes para o solo em questão, o objetivo foi na construção o de verificar justamente o comparativo entre prática e cálculo da resistência quando há o agrupamento de duas malhas em paralelo, que devido ao fato de não existir o equacionamento quando são agrupadas mais de uma malha, no próximo capítulo haverá a comparação do método de paralelismo de resistência entre as malhas testando se coincide ou não com aquilo aferido na prática, ao realizar essa comparação, os efeitos indutivos da malha são desconsiderados, e ao final da apresentação dos resultados realizar uma análise de acordo com a diferença do calculado com o aplicado.

A construção das topologias de aterramento foi o processo mais dificultoso e demorado para ser realizado dentro do trabalho se iniciando na primeira semana de

outubro e finalizado na segunda metade de dezembro, essa demora foi muito por conta:

→ Da inexperiência para execução desse tipo de sistema;

→ Na realização da construção das topologias foi utilizado maquinários simples como enxada, cavadeira articulada e picareta deixando todo o processo praticamente manual, necessitando assim muita força e resistência física para o desenvolvimento do mesmo;

→ As adversidades ao longo do processo como pedras no solo que dificultam o processo de escavação dos buracos que são instaurados as hastes e os cabos;

→ Conciliação de horários, pois simultaneamente com o desenvolvimento do trabalho, havia o decorrer do período letivo com as respectivas responsabilidades como trabalhos e provas;

A primeira malha construída foi a de hastes alinhadas, tendo como características principais 4 hastes de 5/8 de polegada de diâmetro com 1.5m de comprimento e espaçamento entre as mesmas de 3m, com os cabos enterrados a uma profundidade de 25cm.

Para sua construção o primeiro passo foi o de realizar o corte das hastes, pois se utilizou hastes com 3m de comprimentos e posteriormente o corte dos cabos conforme as dimensões especificadas, feito isso, o próximo passo é o de fazer a solda exotérmica entre os cabos e as hastes.

Na solda exotérmica se teve algumas dificuldades na execução das primeiras soldas, quanto a qualidade da mesma, assim foi observado na prática que fatores como posicionamento da haste, dos cabos dentro do molde, qualidade do molde, e quantidade de pólvora influenciam no resultado final obtido da solda, e ao final de cada uma das soldas é necessário limpar o excesso de material contido no molde para que não comprometa a solda seguinte. E para a realização de uma solda exotérmica é necessário a pólvora, o pavio para a ignição, o conjunto do alicate e molde, e algo para realizar o fogo como um palito de fósforo ou isqueiro.

As primeiras soldas serviram exatamente como experiência para a realização de ajustes daqueles parâmetros citados no parágrafo anterior, até que se atinja uma qualidade na solda que satisfaça as exigências de um sistema de aterramento, a figura 48 apresenta a parte frontal da primeira solda realizada, e a figura 49 ilustra a parte traseira da solda, é relevante apresentar essas duas perspectivas para demonstrar na prática, a importância de analisar a qualidade da solda como um todo.

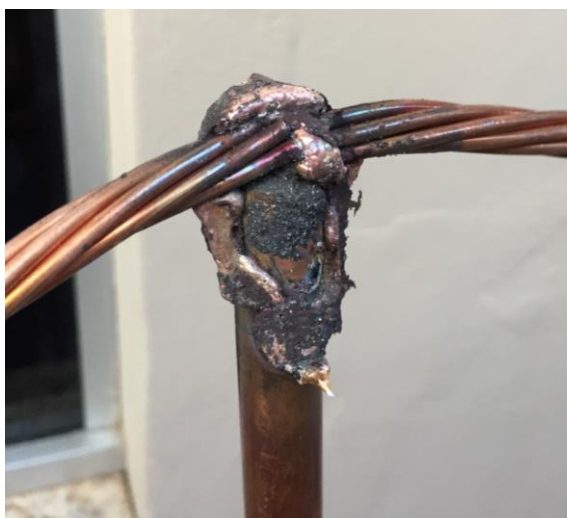
Por meio dessas figuras é possível verificar que no lado frontal da solda, a mesma preenche bem o espaço correspondente a região da haste e do cabo e está sem rachaduras significativas, assim essa parte da solda está apta para ser usada para uma topologia de aterramento, porém na figura 52 já é apresentado praticamente o contrário, onde o conteúdo da solda não é suficiente para recobrir o espaço onde está a haste o cabo, por consequência disso não há a fixação adequada entre essas partes, e na manipulação dos cabos para instalar no local onde ficará o sistema de aterramento, ou com o passar do tempo o cabo em parte ou em sua totalidade poderá se desprender facilmente da haste, afetando significativamente no valor final de resistência de aterramento, devendo assim para esse caso, remover todo o material dessa solda, e a realizar uma nova solda antes de instalar as hastes no solo.

Figura 48: Visão frontal da primeira solda exotérmica



Fonte Autoria Própria

Figura 49: Visão traseira da primeira solda exotérmica



Fonte Autoria Própria

Um dia após a fixação dos cabos com as hastes por meio das soldas exotérmicas, foi escolhido o local específico de escavação dentro do espaço contido entre o bloco 500 e o refeitório do IFG campus Itumbiara para instauração da topologia de hastes alinhadas, também teve início no mesmo dia as escavações para instalar os cabos e as hastes utilizando os devidos equipamentos de proteção individual (EPI's) como luvas, botas, óculos de proteção, boné e protetor solar, nessa data em específico por estar no início do período chuvoso o solo ainda estava muito seco, e a temperatura estava bastante elevada sendo isso algo típico de todo o processo de construção das malhas, dificultando o andamento das escavações.

O que ajudou e bastante o processo de construção isso vale tanto para a topologia de hastes alinhadas quanto para as outras foi a presença de uma mangueira próxima ao local de onde as malhas foram instaladas, a partir disso jogando água no local de escavação o solo ficou mais úmido diminuindo a dificuldade do mesmo, a figura 50 apresenta o início das escavações.

Figura 50: Início das escavações para a topologia de hastes alinhadas



Fonte Autoria Própria

Por conta da água de fácil acesso no local, o andamento conseguido ao final do dia foi além do esperado, praticamente finalizando as trincheiras onde ficaram os cabos e os buracos das hastes já inicializados, tendo como previsão para a finalização dessa topologia mais um dia de serviço caso não ocorra nenhum imprevisto, a figura 51 apresenta o resultado adquirido ao final desse dia.

Figura 51: Resultado do primeiro dia das escavações para topologia de hastes alinhadas



Fonte Autoria Própria

Um dos pontos interessantes apresentados na figura 51 é de que pela falta de experiência na construção de uma malha de aterramento, os segmentos que interligam as hastes e que recebem os cabos não ficaram perfeitamente alinhados, muito por conta da grama ali presente em que no momento que são feitos os buracos no solo pela quantidade de raízes presentes próximas a superfície o corte no chão tende a sair torto, para evitar que isso tivesse acontecido o que deveria ser feito seria retirar toda a grama e as raízes ali presentes e depois fazer os buracos mais fundos mantendo em linha reta, entretanto o que importa mais para uma topologia com hastes alinhadas, como o próprio nome já diz, é o alinhamento entre as hastes, assim aumentando o buraco e fazendo os ajustes de um pouco para o lado consegue-se fazer com que as hastes alinhadas entre si.

Na semana seguintes foi finalizado as trincheiras e os buracos das hastes, fazendo o ajuste necessário para as mesmas permanecessem alinhadas, independente dos desvios dos cabos que as conectam entre si, a figura 52 apresenta a malha com os buracos finalizados e já com as hastes e cabos inseridos no mesmo, e na figura 53 ilustra a topologia finalizada coberta com terra, podendo a partir disso, seguir adiante para a construção da próxima topologia.

Figura 52: Topologia de hastes alinhadas com cabos e hastes inseridos no solo



Fonte Autoria Própria

Figura 53: Topologia de hastes alinhadas finalizada



Fonte Autoria Própria

Nesse segundo dia de escavações não houveram imprevistos significantes, como resumo daquilo que foi realizado nesse dia é de que foi se deu a continuidade de atividades em relação ao primeiro dia, fazendo as correções necessárias para manter as hastes alinhadas.

É importante explicar que para a topologia em hastes alinhadas, assim como as demais malhas construídas de que os cabos estão enterrados a uma profundidade

de 25cm, ao invés do mínimo de 50cm que é exigido na norma NBR15751, assim como as hastes foram cerradas com o comprimento de 1.5m, isso aconteceu pela comodidade de ser um trabalho acadêmico e por não operar como aterramento elétrico em uma instalação, optou-se por essas especificações com o intuito de facilitar a construção das respectivas malhas, e dentro daquilo que é a proposta do trabalho essas questões construtivas não afetam o resultado final.

A próxima topologia construída é a do quadrado vazio, com 4 hastes de 1.5m de comprimento, diâmetro 5/8 de polegada, e cada lado do quadrado possui 3 metros, com os cabos enterrados a uma profundidade de 25cm assim como na primeira malha. No primeiro dia de escavações em questões de desenho da geometria foi muito melhor da apresentada na malha de hastes alinhadas, com alguns detalhes acertados, essa questão foi solucionada, entretanto nesse mesma data aconteceu algo que atrasou e muito o andamento do processo, que foi a perfuração de um dos canos e rachadura de outro cano que vinha da caixa d'água do campus, conforme é apresentado na figura 54, esse acidente ocorreu no instante que se estava realizando o buraco para colocação de uma das hastes, onde a pá da cavadeira bateu nos canos e danificou os mesmos, a uma profundidade aproximada de 80cm da superfície.

Figura 54: Cano danificado no momento da escavação de um dos buracos da haste na topologia quadrado vazio



Fonte Autoria Própria

E devido a esse incidente, para a reparação dos canos o buraco teve de ser aumentado, conforme é apresentado na figura 55, e o andamento na construção das topologias interrompido até o instante em que isso fosse solucionado, outro detalhe é de que praticamente todo o serviço realizado na topologia em quadrado vazio no dia

foi perdido, pois a malha teve de ser deslocada para evitar que esse incidente acontecesse novamente.

Figura 55: Buraco ampliado para reparação dos canos



Fonte Autoria Própria

Essa ampliação do buraco apresentado na figura 58 no qual aconteceu o dano nos canos foi realizada no mesmo dia do incidente, para que fosse possível o reparo dos mesmos, o diâmetro da escavação foi muito maior à apresentada, entretanto não foi obtido registros no momento do conserto.

Na figura 56 é ilustrado com destaque o deslocamento realizado na construção dessa topologia e onde ocorreu o dano nos canos, para que assim fosse evitado qualquer possibilidade de acontecer novamente um incidente similar ao ocorrido, aproveitando daquilo que tinha sido iniciado anteriormente, apenas um segmento de reta do quadrado e dois buracos das hastes incompletos.

E no desenvolvimento do quadrado vazio nesse novo local, a atenção redobrada, e a força física diminuída no momento da escavação onde compreende as hastes, além de que qualquer barulho diferente, foi interrompido e verificado se tinha acontecido algo, mesmo que tenha se perdido um tempo fazendo isso, foi muito melhor prevenir, do que ter que passar pelo mesmo transtorno novamente.

Figura 56: Novo local para malha quadrado vazio



Fonte Autoria Própria

A partir desse ponto até a finalização dessa topologia gastou dois dias e sem mais imprevistos, conseguindo um resultado satisfatório quanto a fidelidade em relação a geometria da malha, conforme é ilustrado na figura 57.

Figura 57: Malha de aterramento em quadrado vazio finalizada



Fonte Autoria Própria

Ao terminar essa malha, fica faltando apenas a topologia em circunferência, sendo essa a mais trabalhosa das três topologias construídas, dentre os fatores que dificultam o processo estão o da malha ter um número maior de hastes, por consequência uma maior área deve ser escavada em comparação as outras, pelo fato do desenho da topologia que agora diferentemente das anteriores seu contorno é em

curva ao invés de em linha reta, e também pela dificuldade de escavação devido quantidade absurda de pedras encontradas no local e de tamanhos variados.

A malha de aterramento em circunferência consiste de 6 hastes de 1.5m de comprimento com diâmetro de 5/8 de polegada, com espaçamento entre hastes de 3m e com cabos enterrados a 25cm da superfície.

No primeiro dia o objetivo foi de traçar todo o contorno da circunferência e que fosse numa profundidade que sob uma eventual chuva o trabalho não fosse desfeito, e para a realização desse traçado se utilizou uma mangueira de água como guia para desenhar o círculo, a partir da relação da fórmula do comprimento de uma circunferência dado pela equação:

$$C'' = 2\pi r'' \text{ (m)} \quad (3.2)$$

Onde C'' é o comprimento e r'' é o raio da circunferência, como a topologia irá conter 6 hastes espaçadas de 3 metros entre si, o comprimento total da circunferência será de 18m, e utilizando a equação 3.2 calcula-se para encontrar o raio correspondente, assim:

$$r'' = \frac{C''}{2\pi} = \frac{18}{2 \cdot 3.1415} = 2.86m \quad (3.3)$$

Com o valor do raio obtido, faz a medição com auxílio de uma trena da ponta da mangueira até a metragem correspondente do raio, e em seguida marca esse ponto, é necessário que isso seja feito com duas pessoas para facilitar o processo, assim enquanto um indivíduo fica no centro da circunferência rotacionando em 360 graus mas permanecendo no mesmo ponto, o outro fica na extremidade fazendo o contorno da circunferência, assim enquanto vai se deslocando a água marca no solo o desenho, é importante manter a mangueira esticada para realizar da maneira correta o contorno, na figura 58 é ilustrado a circunferência de diferentes perspectivas, e na figura 59 uma visão geral da circunferência ao final do primeiro dia de escavações.

Figura 58: Malha de aterramento em circunferência sob diferentes perspectivas



Fonte Autoria Própria

Figura 59: Malha de aterramento em circunferência visão geral



Fonte Autoria Própria

Após esse primeiro dia de escavações até que os trabalhos fossem retomados, houve um hiato de aproximadamente um mês, muito por conta do final do semestre letivo no curso assim não se tinha muito tempo para dar andamento no projeto, e quando ocorreu uma brecha a chuva impediu que fosse realizado algo, por isso parte daquilo realizado, se perdeu nesse intervalo de tempo, entretanto o importante que é o desenho da circunferência foi mantido.

No segundo de escavações o trabalho foi em função de reforçar o contorno, deixando o mesmo mais fundo, e dando início aos buracos das hastes, conforme é apresentado na figura 60, até esse momento, as escavações ocorreram com um bom andamento sem grandes empecilhos que atrasassem o processo.

Figura 60: Malha de aterramento em circunferência no segundo dia de escavações



Fonte Autoria Própria

Conforme se aumentou a profundidade dos buracos das hastes utilizando a cavadeira, também foi acrescida a dificuldade no processo, devido a quantidade significativa de pedras de diversos tamanhos nesses buracos, e como naturalmente a escavação tende a ficar mais lenta conforme a profundidade aumenta pelas limitações da ferramenta, por ter pedras isso ficou ainda mais dificultoso, atrasando a finalização dessa topologia em aproximadamente dois dias a mais de trabalho, a figura 61 apresenta a quantidade de pedras com tamanho relativamente grande encontradas no decorrer da escavação.

Figura 61: Pedras encontradas na escavação da topologia em circunferência



Fonte Autoria Própria

Ao longo das escavações de acordo com que se encontrava uma nova pedra, a cavadeira foi se danificando até o ponto de trincar e quebrar a maior parte de uma das pás dessa ferramenta, deixando o procedimento ainda mais lento a partir desse ponto. Para finalizar, em um dos buracos encontrou-se uma rocha com diâmetro bem superior a das encontradas anteriormente, a uma profundidade de 60cm da superfície, para conseguir retirar a mesma do solo, foi gasto praticamente um dia de serviço, e depois de retirá-la, o andamento da escavação desse último buraco decorreu bem sem maiores imprevistos, na figura 62 é ilustrada o tamanho da rocha segurando-a alinhada com o tronco no rumo do peito de um indivíduo de um 1.9m de altura, para assim conseguir ter uma boa noção de seu tamanho por meio da foto.

Figura 62: Maior rocha encontrada na escavação da topologia em circunferência



Fonte Autoria Própria

A topologia em circunferência se tornou um desafio de acordo com alguns empecilhos que foram surgindo ao longo do caminho, entretanto essas dificuldades trouxeram uma bagagem fundamental para a carreira como engenheiro, a partir do desenvolvimento do trabalho se adquiriu um conhecimento prático muito além daquilo visto dentro da disciplina de aterramentos elétricos, aumentando assim ainda mais a relevância do trabalho sob uma perspectiva pessoal, a figura 63 apresenta a topologia em circunferência finalizada.

Figura 63: Topologia em circunferência finalizada

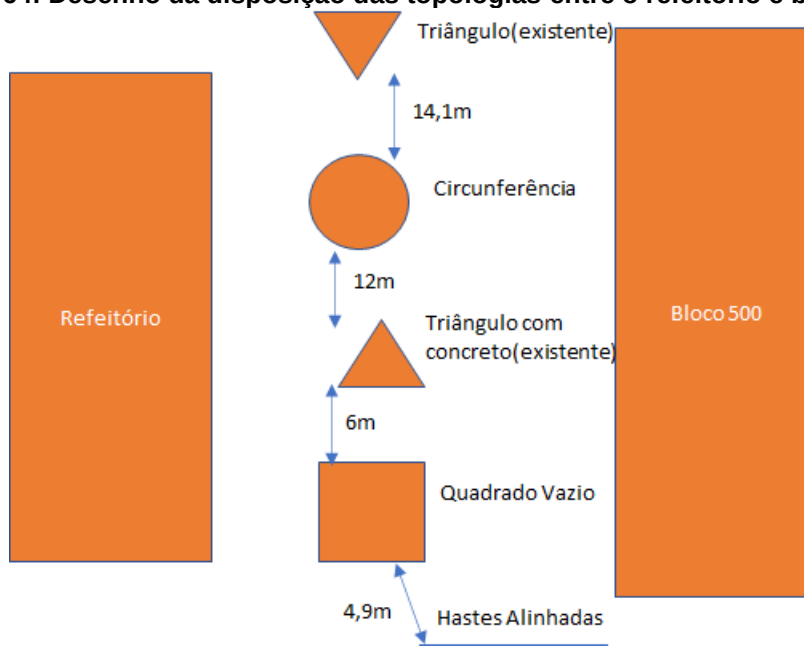


Fonte Autoria Própria

Um dos pontos positivos de se construir todas as topologias descritas ao longo dessa seção é de que além de contribuir para o conhecimento pessoal, deixa como legado para a instituição essas malhas de aterramento construídas, podendo ser utilizadas para inúmeros experimentos, podendo assim, contribuir para um melhor aprendizado dos alunos que cursarão a disciplina de aterramentos elétricos dentro do curso de engenharia.

Na figura 64 é ilustrado como as topologias ficaram dispostas dentro do espaço existente entre o refeitório e o bloco 500, inclusive nesse território já havia instalada as malhas em triângulo e triângulo com concreto em torno das hastes (não foi utilizada no processo para medição e análise da resistência de aterramento) antes do início do processo de construção das malhas descritas nessa seção.

Figura 64: Desenho da disposição das topologias entre o refeitório e bloco 500



Fonte Autoria Própria

Ao finalizar as malhas de aterramento o próximo passo é de realizar as medições da resistência de aterramento seguindo o método da queda de potencial explicitado na seção 2.9.2, isso para as topologias isoladas e posteriormente interligando-as de duas a duas.

3.3 OBTENÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTOS PELO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL

As resistências de aterramento das malhas construídas foram medidas por meio do equipamento terrômetro seguindo o método da queda de potencial e adotando o esquema de ligação apresentado na figura 34, em que é utilizado 3 terminais do aparelho, onde um deles é ligado na malha de aterramento, um fixo que determina o eletrodo de corrente, e por último o terminal que corresponde ao eletrodo auxiliar móvel de tensão. Para as medições foi adotado um deslocamento de 2 em 2 metros para a haste de tensão entre uma medida e outra, e uma distância máxima de 20 metros entre o haste fixa de corrente e a malha que está se medindo a resistência de aterramento, isso ocorreu para as todas as configurações, exceto para a topologia do quadrado vazio em que a distância máxima adotada foi de 18m devido às limitações do terreno de acordo com o ponto escolhido dentro da malha para realizar as medições, a princípio foi determinada essas distâncias para realizar as medições num número maior de direções, tendo assim um mapeamento melhor quanto ao comportamento da topologia no local. A primeira malha a realizar as medições foi a de hastes alinhadas e conforme é apresentado na tabela 17.

Tabela 17: Medições da resistência de aterramento na topologia de hastes alinhadas (v.01)

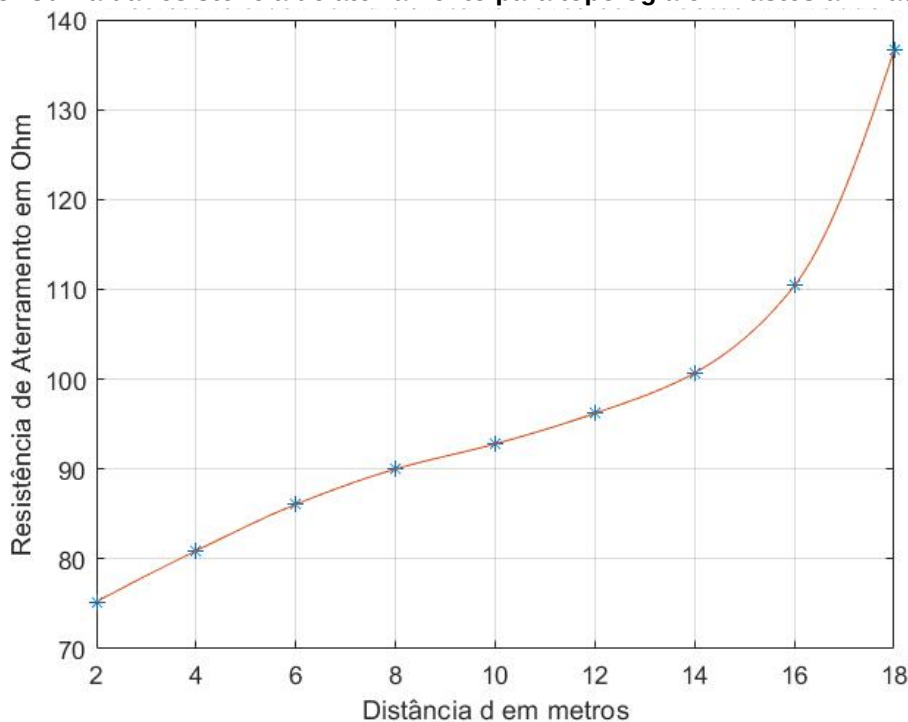
Hastes alinhadas				
Distância (m)	Medição 1(Ω)	Medição 2(Ω)	Medição 3(Ω)	Média(Ω)
18	152.3	123.8	133.7	136.60
16	116.8	105.9	108.6	110.43
14	102.4	99.8	100	100.73
12	96.9	95.8	96.1	96.27
10	93.2	92.4	93	92.87
8	90.1	88.7	91.2	90.00
6	86.8	84.9	86.5	86.07
4	82.7	79.3	80.7	80.90
2	76.5	73.7	75.5	75.23

Fonte Autoria Própria

É a partir dos dados de resistência apresentados na média das medições da última coluna fazendo relação com a primeira da tabela 17 que se faz o gráfico apresentado na figura 36 e se extrai a zona de patamar de potencial, e consequentemente a resistência de aterramento da malha em questão sob as

condições apresentadas no solo no instante das medições, e dessa medida em específico a curva com os dados é ilustrada na figura 65.

Figura 65: Curva da resistência de aterramento para topologia em hastes alinhadas (v.01)



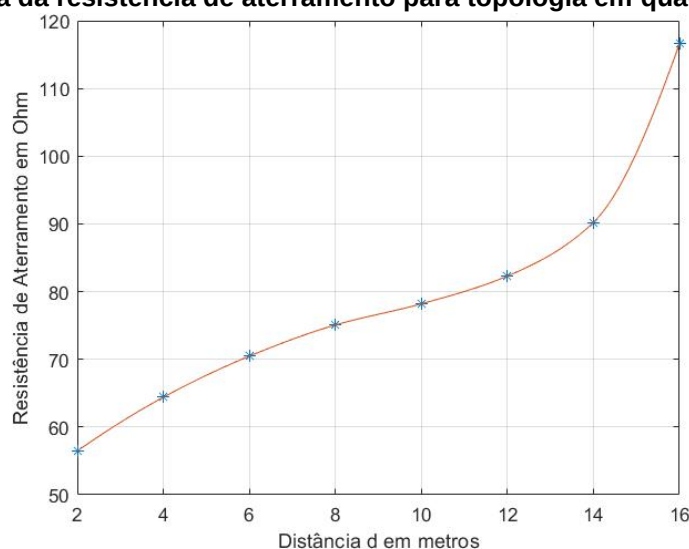
Fonte Autoria Própria

A próxima topologia a ser medida os valores de resistência foi a do quadrado vazio assim como a configuração de hastes alinhadas as medidas foram em três direções diferentes, mas devido as limitações do terreno a distância adotada entre a malha e o eletrodo de corrente foi de 18 metros, a tabela 18 apresenta os dados de resistência obtidos para essa malha de aterramento, e posteriormente na figura 66 é ilustrado o gráfico com esses dados.

Tabela 18: Medições da resistência de aterramento na topologia quadrado vazio (v.01)

Quadrado				
Distância (m)	Medição 1(Ω)	Medição 2(Ω)	Medição 3	Média(Ω)
16	111.3	125.7	112.8	116.60
14	88.7	92.9	89.1	90.23
12	81.7	82.8	82.4	82.30
10	77.2	79.1	78.3	78.20
8	73.5	76.5	75.2	75.07
6	67	73.9	70.5	70.47
4	57.8	70.3	65.1	64.40
2	50.2	63	56.2	56.47

Fonte Autoria Própria

Figura 66: Curva da resistência de aterramento para topologia em quadrado vazio (v.01)**Fonte Autoria Própria**

As medições após a topologia do quadrado vazio foram realizadas em apenas duas direções como pode-se observar nas tabelas 17 e 18, não há grande dispersão entre duas das três direções de dados colhidos, isso se deve ao fato de que as direções escolhidas para a realização das medições são relativamente próximas umas às outras, dessa forma a resposta de interação com o solo resulta em um comportamento similar quanto aos valores de resistência.

Um detalhe importante das medições apresentadas é de que não houve a estabilização de uma zona de patamar de potencial bem definida, ilustradas nas figuras 65 e 66, de acordo com a distância adotada entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente não foi suficiente para haver a estabilização esperada, assim como já havia sido ilustrado na figura 37, e isso se repetiu para as todas as medições nas configurações restantes com as topologias isoladas e interligadas com essa distância máxima de 20 metros entre a malha de aterramento e eletrodo de potencial, com isso optou-se por não colocar todos os exemplos no trabalho com essa distância mencionada justamente para não ficar repetitivo, com uma quantidade significativa de tabelas e gráficos que sequer foram utilizados para a obtenção das resistências de aterramento.

Para a medição das resistências com as topologias interligadas foi utilizado um cabo de cobre de 1.5mm^2 para realizar essa ligação, mesmo que na norma NBR15751 estabeleça que seja utilizado no mínimo de 38mm^2 para cabos de aço protegido contra corrosão e de 50mm^2 para cabos de cobre para malhas de aterramento, utilizou-se os cabos de 1.5mm^2 pelos fatores de:

- Haver disponibilidade do material no campus;
- Por se tratar de ser um trabalho apenas experimental não há um problema em não seguir a norma nesse quesito;
- Pela questão de utilizar o cabo de 1.5mm² não há diferença significativa no resultado do experimento.

Outro detalhe importante verificado nas medições com distância de 20m entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente, é de que no instante em que se estava realizando as medidas para as malhas interligadas utilizando o cabo de cobre de 1.5mm², não houve diferença significativa entre os valores de resistência quando se interliga as malhas de aterramento seja usando um ou dois cabos de 1.5mm², lembrando que para o caso de utilizar dois cabos, os mesmos foram conectados em diferentes pontos das duas topologias em análise, a tabela 19 ilustra um exemplo disso ao apresentar os dados para a topologia interligada entre hastes alinhadas e triângulo com um cabo interligando as mesmas, e na tabela 20 é apresentado os dados para a topologia interligada de hastes alinhadas com triângulo utilizando dois cabos conectados em diferentes pontos das malhas.

Tabela 19: Medições da resistência de aterramento interligando em um ponto as topologias hastes alinhadas e quadrado

Hastes alinhadas e triângulo			
Distância (m)	Medição 1(Ω)	Medição 2(Ω)	Média(Ω)
18	87.4	78.5	82.95
16	59.5	55.8	57.65
14	48.6	49.1	48.85
12	43.5	45.3	44.4
10	40.4	42.7	41.55
8	38.2	40.7	39.45
6	36.1	38.4	37.25
4	33.3	35.4	34.35
2	27.1	28.7	27.9

Fonte Autoria Própria

Tabela 20: Medições da resistência de aterramento interligando em dois pontos as topologias hastes alinhadas e quadrado

Hastes alinhadas e triângulo			
Distância (m)	Medição 1(Ω)	Medição 2(Ω)	Média(Ω)
18	87.9	77.8	82.85
16	60.3	55.5	57.9
14	49.3	48.8	49.05
12	44.1	45	44.55
10	41.1	42.4	41.75
8	38.7	40.4	39.55
6	36.6	38	37.3
4	33.8	35	34.4
2	27.7	28.3	28

Fonte Autoria Própria

A dispersão entre os dados apresentados é muito pequena sendo a maior delas menor de 1Ω , e essa diferenciação pode ser devido a alguns fatores como a impedância dos cabos, local onde o eletrodo auxiliar de potencial é instalado no momento na medição e o próprio erro que está contido no aparelho, de acordo com isso, não há a necessidade de conectar com dois diferentes cabos para se obter a resistência de aterramento utilizando apenas um cabo é o suficiente para encontrar a resistência que está se analisando.

3.3.1 Medição das resistências de aterramento para as topologias isoladas

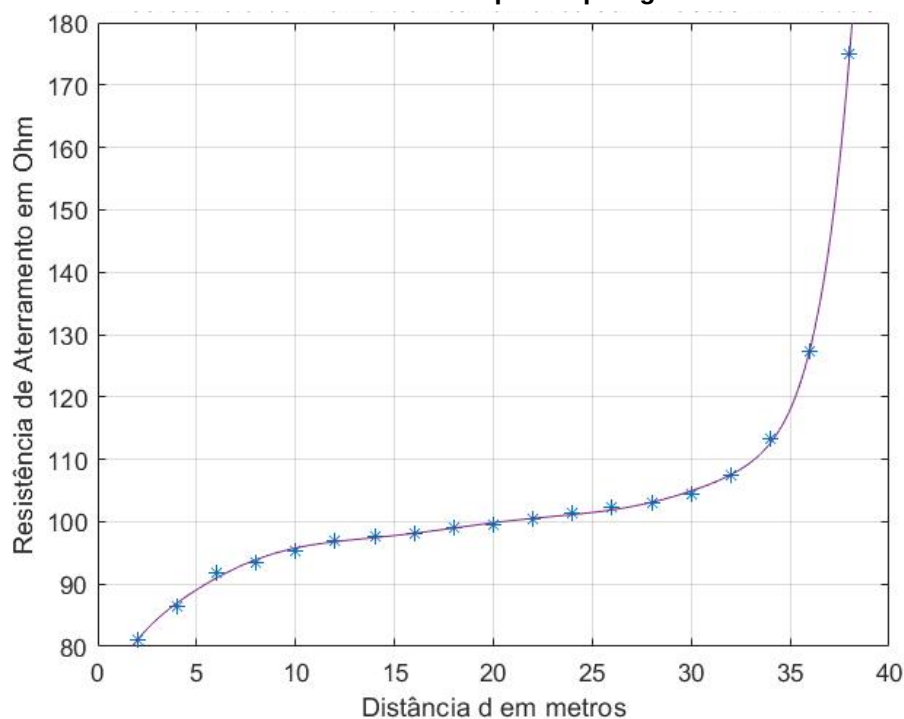
Como foi apresentado anteriormente com a distância de 20 metros entre a topologia e a haste de corrente, não ocorreu a estabilização para se extrair a resistência de aterramento, assim é necessário realizar todas as medições novamente com uma distância maior a escolhida anteriormente, portanto para evitar que ocorra a mesma situação, foi adotado uma distância de 40 metros entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente, para todas as configurações as medições foram realizadas em uma direção com 2 metros de espaçamento entre um valor colhido e outro, na tabela 21 está apresentado os valores obtidos nessas circunstâncias para a topologia de hastes alinhadas, e na figura 67 está a curva desses dados.

Tabela 21: Medições da resistência de aterramento na topologia de hastes alinhadas (v.02)

Hastes Alinhadas	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	174.9
36m	127.3
34m	113.2
32m	107.4
30m	104.5
28m	103.1
26m	102.3
24m	101.3
22m	100.4
20m	99.5
18m	99
16m	98.2
14m	97.7
12m	97
10m	95.4
8m	93.5
6m	91.8
4m	86.5
2m	81.1

Fonte Autoria Própria

Figura 67: Curva da resistência de aterramento para topologia em hastes alinhadas (v.02)



Fonte Autoria Própria

Com uma distância maior por meio daquilo que foi apresentado na figura 67, consegue-se visualizar diferenças nítidas quando se compara com aquilo ilustrado na figura 65, como a tendência de uma zona de patamar de potencial com a distância aumentada é muito mais nítida, e mesmo que não tenha se estabilizado em um único valor por mais de uma medição, seleciona um trecho da curva na figura 70 em que há uma dispersão mínima entre os dados e apresenta praticamente uma reta horizontal dentro do gráfico correspondendo a aquilo que seria a zona de patamar de potencial em teoria, assim seleciona esse dados, e realiza a média aritmética dos mesmos para a obtenção da resistência de aterramento para a topologia, outro critério utilizado em todos os casos para a conseguir a resistência é de manter em torno de 2.5Ω no máximo, a diferença ôhmica entre o primeira e última medida de resistência selecionada.

Adotando como amostra as resistências de 12m a 20m, tem-se:

12m→97 Ω , 14m→97.7 Ω , 16m→98.2 Ω , 18m→99 Ω , 20m→99.5 Ω ;

Fazendo a média desses valores, obtém-se:

$$R_{hastesalinhadasmed} = \frac{97+97.7+98.2+99+99.5}{5} = 98.28\Omega \quad (3.4)$$

Esse valor de 98.28 Ω corresponde a resistência de aterramento para a topologia de hastes alinhadas de acordo com as condições do solo apresentadas no

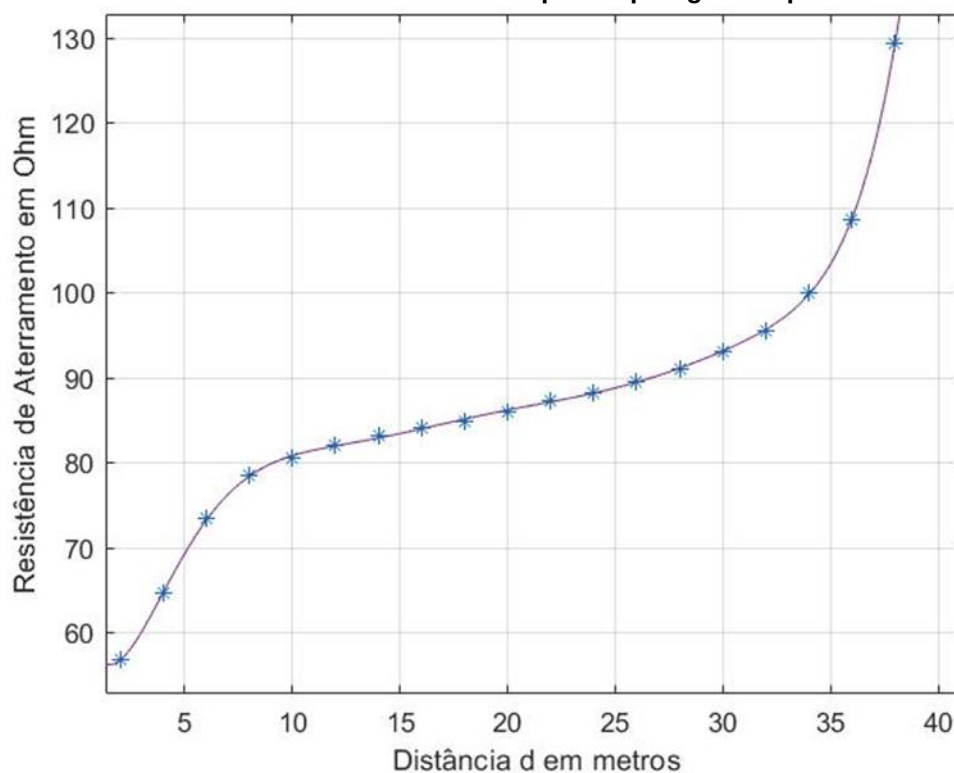
momento das medições. A próxima malha a se ter as medições é a de quadrado vazio apresentado pela tabela 22, e a curva correspondente na figura 68.

Tabela 22: Medições da resistência de aterramento na topologia de quadrado vazio (v.02)

Quadrado	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	129.3
36m	108.6
34m	100
32m	95.6
30m	93.1
28m	91.1
26m	89.5
24m	88.3
22m	87.3
20m	86
18m	84.9
16m	84.2
14m	83.1
12m	82
10m	80.5
8m	78.5
6m	73.4
4m	64.6
2m	56.8

Fonte Autoria Própria

Figura 68: Curva da resistência de aterramento para topologia em quadrado vazio (v.02)



Fonte Autoria Própria

É interessante observar que o perfil da curva das medições de resistência de aterramento varia de acordo com a topologia que se está se realizando as medidas, isso também vale para a zona de patamar de potencial, em algumas topologias estará

mais estabelecida em outras nem tanto, na região de estabilização em relação a quantidade de medidas nesse trecho da curva também varia, isso será visto com clareza, de acordo com a apresentação de cada uma das topologias.

O caso das medições de resistência de aterramento do quadrado se assemelha a malha de hastes alinhadas, pois não há uma zona de patamar de potencial se estabelecendo em um mesmo valor por mais de uma medição, inclusive na topologia de quadrado vazio, a estabilidade é menor da apresentada nas hastes alinhadas. De acordo com isso, o trecho em que mais se aproxima de uma estabilização dentro da curva apresentada na figura 68, é nas medidas de 14m a 18m, assim fazendo a média das mesmas, tem-se:

$$R_{\text{quadrado med}} = \frac{83.1+84.2+84.9}{3} = 84.06\Omega \quad (3.5)$$

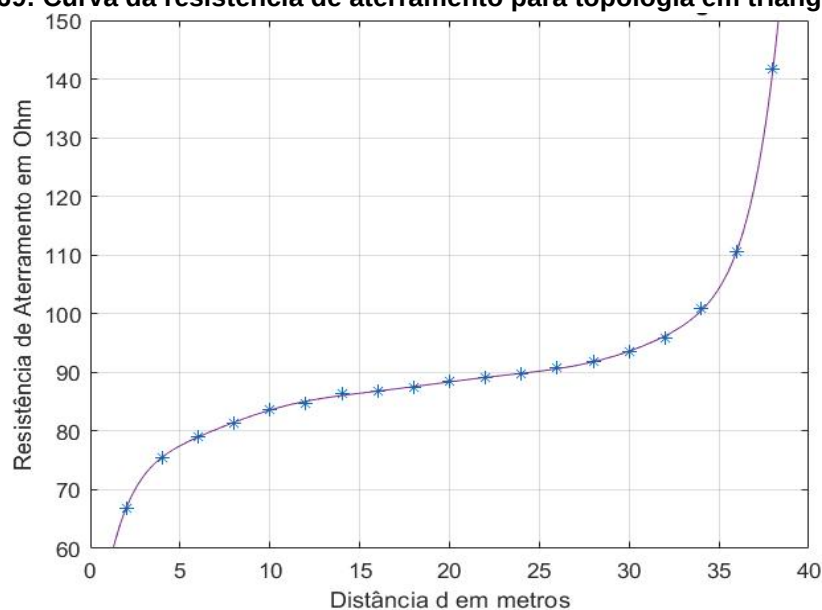
Assim como no caso das hastes alinhadas, após o cálculo da média no trecho selecionado se tem a resistência de aterramento, e 84.06Ω é a resistência para a topologia em quadrado vazio.

A topologia na sequência a apresentar os dados é em triângulo, uma malha de aterramento que não foi construída dentro do processo descrito neste trabalho, mas é uma configuração importante dentro dos objetivos do mesmo, sendo assim, os dados das medições estão dispostos na tabela 23 e na figura 69.

Tabela 23: Medições da resistência de aterramento na topologia em triângulo (v.02)

Triângulo	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	141.6
36m	110.6
34m	100.9
32m	95.9
30m	93.6
28m	91.9
26m	90.8
24m	89.7
22m	89.1
20m	88.5
18m	87.4
16m	86.9
14m	86.3
12m	84.8
10m	83.7
8m	81.4
6m	79.1
4m	75.5
2m	66.9

Fonte Autoria Própria

Figura 69: Curva da resistência de aterramento para topologia em triângulo (v.02)**Fonte Autoria Própria**

O trecho dentro da curva ilustrada na figura 72 que mais se aproxima a uma estabilização, é compreendido entre as medições de 14m a 20m, onde há uma variação no valor da resistência um pouco de 2Ω nesse intervalo, assim a resistência de aterramento do triângulo é dada por:

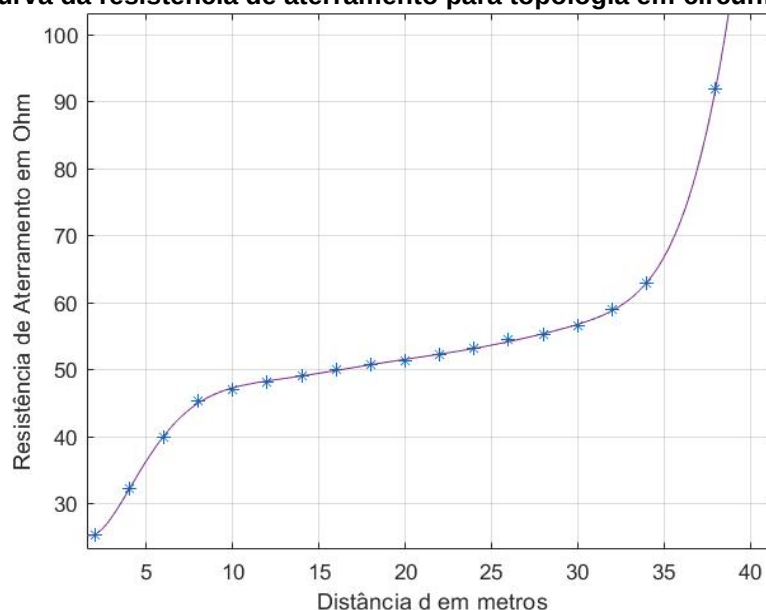
$$R_{triangulomed} = \frac{86.3+86.9+87.4+88.5}{4} = 87.2\Omega \quad (3.6)$$

Por último se tem das malhas isoladas, a topologia em circunferência, e seus dados de medição de resistência de aterramento são apresentados na tabela 24 e figura 70 na sequência.

Tabela 24: Medições da resistência de aterramento na topologia em circunferência (v.02)

Circunferência	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	91.9
36m	XX
34m	62.9
32m	59
30m	56.6
28m	55.2
26m	54.4
24m	53.2
22m	52.3
20m	51.3
18m	50.8
16m	50
14m	49.1
12m	48.2
10m	47.1
8m	45.3
6m	39.9
4m	32.2
2m	25.4

Fonte Autoria Própria

Figura 70: Curva da resistência de aterramento para topologia em circunferência (v.02)

Fonte Autoria Própria

Em específico dessa topologia no momento em que se estava realizando as medições, a resistência de aterramento correspondente a distância de 36m não foi aferida conforme é apresentado na tabela 24, isso ocorreu devido ao fato que no deslocamento da haste de potencial correspondente a essa medida, havia uma passarela de concreto no local onde se devia inserir o eletrodo de tensão, impossibilitando assim a medição da resistência nesse ponto, esse mesmo empecilho ocorreu em outras configurações como será apresentado na sequência do trabalho.

Selecionando as resistências correspondentes as medições de 14 a 20m, para obtenção da resistência de aterramento tem-se:

$$R_{\text{circunferenciamed}} = \frac{49.1+50+50.8+51.3}{4} = 50.3\Omega \quad (3.7)$$

Dentro das malhas isoladas pode-se fazer algumas observações, dentre elas a de que o comportamento expresso nas curvas das medições de resistência se diferencia de acordo com a topologia de aterramento que está realizando as medições, a partir disso se tem a conclusão que cada malha entrega uma resposta muito diferente de interação com o solo, e essas características apresentadas serão distintas em cada tipo de solo mesmo que seja mantido as questões construtivas da malha de aterramento.

Outro ponto importante a ser ressaltado é que a topologia em circunferência obteve uma zona de potencial mais bem definida, com uma dispersão menor dos dados de resistência entre uma medida e outra quando comparada a topologia de quadrado vazio, com isso se tem a percepção de que ao utilizar o método de queda

de potencial para a obtenção da resistência de aterramento não necessariamente com o aumento de número de hastes haverá a necessidade de uma maior distância entre a malha e o eletrodo de corrente para se extrair a resistência da malha, novamente como afirmado no parágrafo anterior, depende muito mais de como se dá a interação da topologia com o solo em questão.

3.3.2 Medição das resistências de aterramento para topologias interligadas

Partindo agora para as topologias interligadas, dentro desse processo todas as configurações interligando as malhas de duas a duas seguiu-se sob uma mesma metodologia de medição onde a distância entre a malha e o eletrodo de corrente, assim como a quantidade de direções na medição são os mesmos das topologias isoladas. Para interligar as malhas foi usado um cabo de cobre com isolação de PVC de 1.5mm², e a primeira configuração a se realizar medições interligando as malhas, foi a de hastes alinhadas e quadrado, os resultados obtidos para essa configuração é apresentado na tabela 25 e figura 71.

Tabela 25: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada de hastes alinhadas - quadrado vazio (v.02)

Hastes Alinhadas com Quadrado	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	109.3
36m	71.9
34m	60.5
32m	55.5
30m	52.9
28m	51.7
26m	50.6
24m	50
22m	49
20m	48.3
18m	47.7
16m	47.1
14m	46.7
12m	46
10m	45.7
8m	44.5
6m	43.3
4m	41.2
2m	38.9

Fonte Autoria Própria

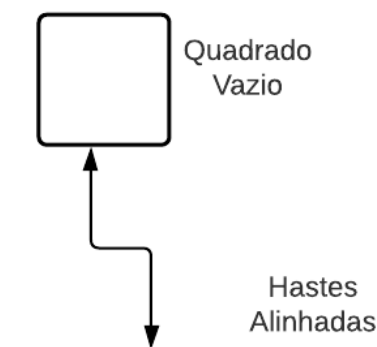
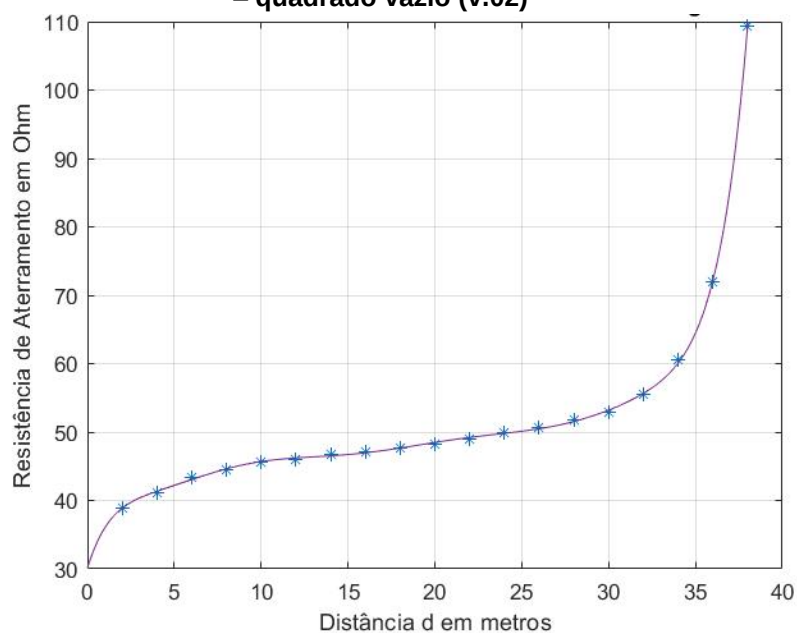


Figura 71: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada de hastes alinhadas – quadrado vazio (v.02)



Fonte Autoria Própria

Para se obter a resistência da configuração hastes alinhadas – quadrado vazio, seleciona os dados apresentados na tabela 25 correspondentes as resistências de 12m a 20, assim tem-se:

$$R_{halinhequadrmed} = \frac{46+46.7+47.1+47.7+48.3}{5} = 47.16\Omega \quad (3.8)$$

A próxima configuração interligada a se medir as resistências, foi a topologia hastes alinhadas – circunferência, tabela 26 e figura 72 são expressos os dados correspondentes a essa malha de aterramento.

Tabela 26: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada de hastes alinhadas - circunferência (v.02)

Hastes Alinhadas com Circunferência	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	91.2
36m	53.3
34m	41.5
32m	36.4
30m	33.7
28m	32.4
26m	31.9
24m	31.8
22m	31.5
20m	31.5
18m	31.5
16m	31.5
14m	31.4
12m	31.3
10m	31
8m	30.6
6m	29.9
4m	28.3
2m	26.8

Fonte Autoria Própria

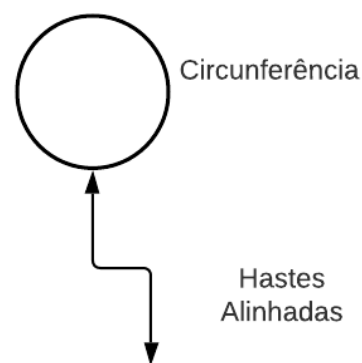
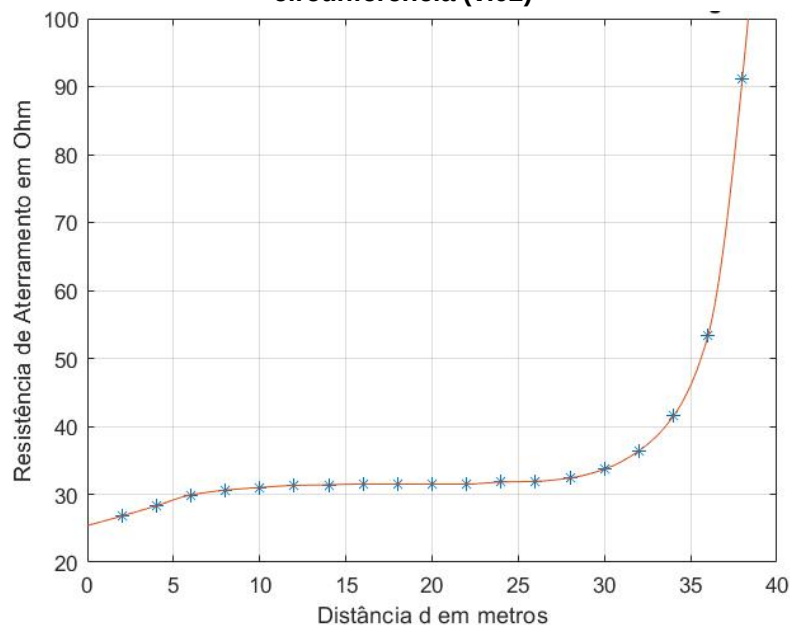


Figura 72: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada de hastes alinhadas – circunferência (v.02)



Fonte Autoria Própria

Conforme apresentado no gráfico da figura 72, quando se fez a interligação das topologias hastes alinhadas com circunferência, houve a estabilização ideal da zona de potencial, onde a resistência de 31.5Ω se estabeleceu por quatro medições compreendidas no intervalo de 16m a 22m, como é apresentado na tabela 26, assim:

$$R_{halinhecircmed} = 31.5\Omega \quad (3.9)$$

Seguindo na relação das malhas interligadas, a próxima a apresentar os dados colhidos, é a interligação de hastes alinhadas com triângulo apresentados na tabela 27 e figura 73.

Tabela 27: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada de hastes alinhadas - triângulo (v.02)

Hastes Alinhadas com Triângulo	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	102.1
36m	80.4
34m	68.7
32m	58.4
30m	52.6
28m	50.2
26m	48.7
24m	47.7
22m	47
20m	46.4
18m	45.9
16m	45.2
14m	44.7
12m	44.2
10m	43.5
8m	42.7
6m	41.6
4m	40.4
2m	33.9

Fonte Autoria Própria

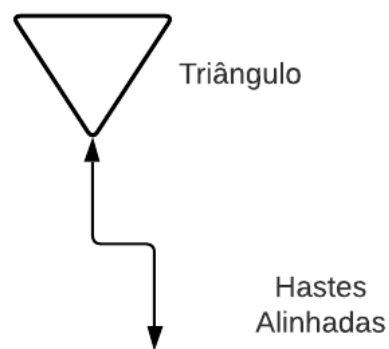
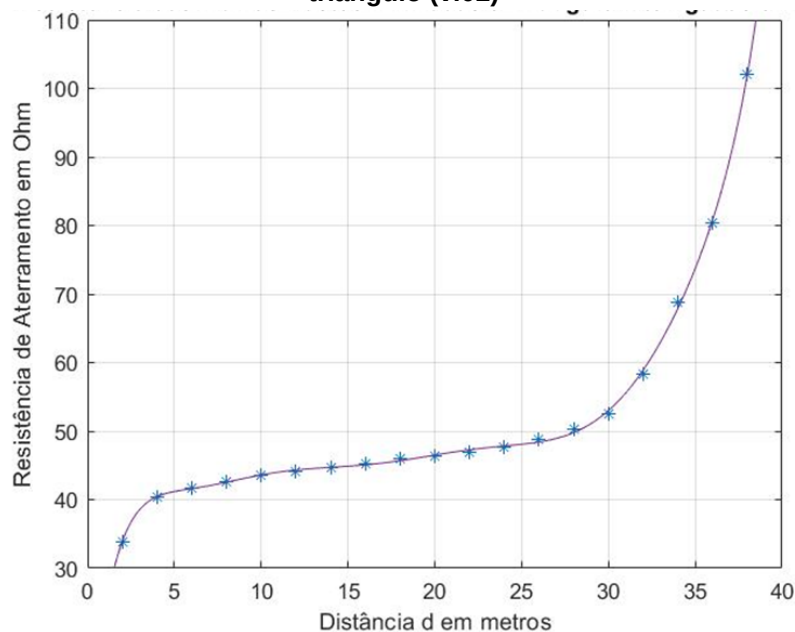


Figura 73: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada de hastes alinhadas – triângulo (v.02)



Fonte Autoria Própria

O intervalo da curva que mais se aproxima da zona de potencial é nas medições de 12m a 20m, assim a média fica:

$$R_{halinhetriandmed} = \frac{44.2+44.7+45.2+45.9+46.4}{5} = 45.28\Omega \quad (3.10)$$

Depois de realizar essa topologia interligada, todas as configurações possíveis de duas a duas relacionadas a malha de hastes alinhadas foram apresentadas. Com isso dando sequência nas malhas interligadas, a próxima a ser apresentada é em triângulo conectada ao quadrado vazio, as medições quanto a essa topologia são expostas na tabela 28 e figura 74.

Tabela 28: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada em triângulo - quadrado (v.02)

Quadrado com Triângulo	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	94.7
36m	70.8
34m	53.6
32m	48.5
30m	46.2
28m	44.5
26m	43.9
24m	43.2
22m	42.7
20m	42.4
18m	41.8
16m	41.5
14m	41
12m	40.4
10m	39.7
8m	38.8
6m	37.6
4m	35.8
2m	31.6

Fonte Autoria Própria

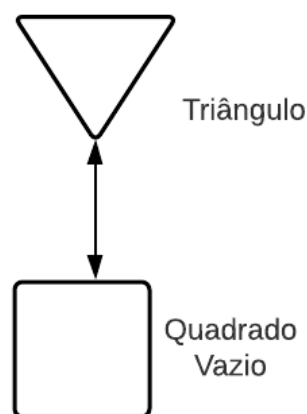
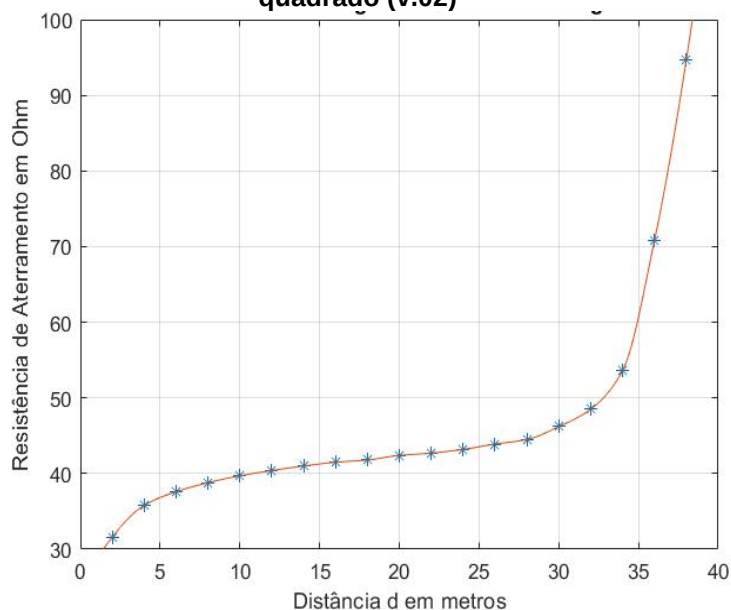


Figura 74: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada em triângulo – quadrado (v.02)



Fonte Autoria Própria

Selecionando as medições de 12m a 20m, e realizando a média das mesmas resulta em:

$$R_{quadretriangmed} = \frac{40.4+41+41.5+41.8+42.4}{5} = 41.42\Omega \quad (3.11)$$

Na configuração triângulo interligado com circunferência, aconteceu um empecilho que já havia ocorrido na malha isolada de circunferência, devido a direção escolhida para as medições, o dado correspondente a distância de 34m não foi colhido pelos mesmos motivos apresentados no caso anterior. Os dados correspondentes a topologia interligada triângulo-circunferência é apresentado na tabela 29 e figura 75.

Tabela 29: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada em triângulo - circunferência (v.02)

Triângulo com Circunferência	
Distância	Medições em Ω
38m	77.8
36m	49.6
34m	...
32m	41.6
30m	39.3
28m	38
26m	36.9
24m	35.9
22m	35.2
20m	34.5
18m	33.8
16m	33.2
14m	32.5
12m	31.9
10m	31.2
8m	30.5
6m	27.9
4m	23.1
2m	17.17

Fonte Autoria Própria

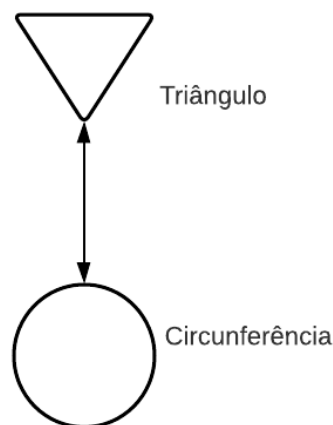
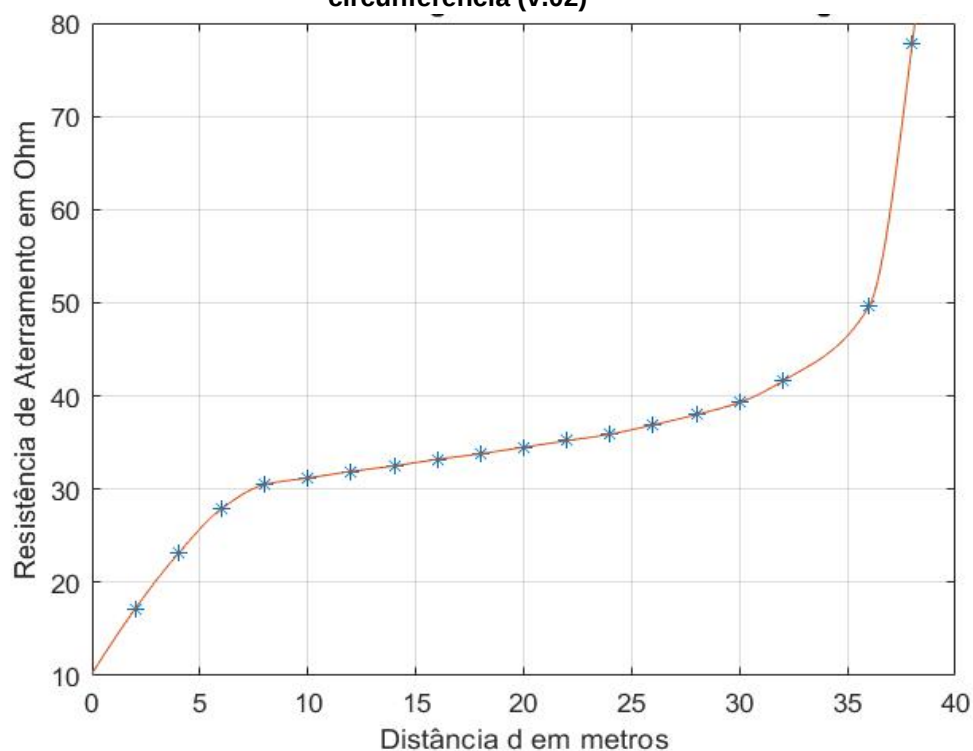


Figura 75: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada em triângulo – circunferência (v.02)



Fonte Autoria Própria

Fazendo a média das medições de 12m a 18m, tem-se:

$$R_{triangecircmed} = \frac{31.9+32.5+33.2+33.8}{4} = 32.85\Omega \quad (3.12)$$

Por último, está a configuração de topologia do quadrado vazio conectado com a circunferência, dentro das medições dessa malha de aterramento interligada aconteceu algo que foi exclusivo, conforme foi apresentado em todas as medições anteriores, de acordo com que a distância entre o eletrodo de tensão se aproxima da malha de aterramento, o valor ôhmico das resistências seguem a tendência de diminuir a cada uma das medidas até a última leitura. Entretanto nas medições dessa malha ocorreu um erro, os dados colhidos seguiram conforme o esperado até a leitura correspondente a resistência da distância de 18m, nessa transição de 18m para 16m a resistência aumentou seu valor, e se estabilizou até a medida referente a 10m, e após isso, voltou a cair até a última medição, os dados correspondentes a essa configuração estão dispostos na tabela 30.

Tabela 30: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada do quadrado - circunferência com erro

Quadrado com Circunferência	
Distância	Medições em Ω
38m	73.5
36m	52
34m	43
32m	37.9
30m	34
28m	30.6
26m	27.1
24m	24.9
22m	24.4
20m	25.5
18m	27.3
16m	28.1
14m	28.1
12m	28.1
10m	28.1
8m	27.7
6m	26.5
4m	23.9
2m	20.1

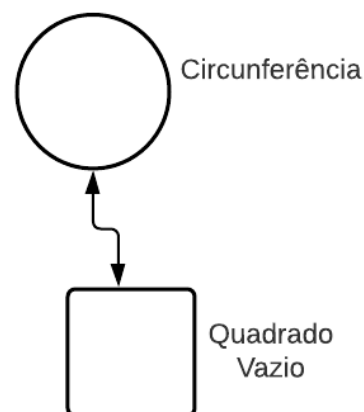
Fonte Autoria Própria

Quando acontece algo semelhante ao que foi exposto na tabela 30, os dados obtidos nas medições devem ser descartados, e realizar novas medidas com uma direção deslocada a da anterior, ou realizar com uma direção completamente diferente comparada as medições que obtiveram essa oscilação, e essa interferência é decorrente a algo presente no solo como um formigueiro, ou algo similar presente nos pontos em que o eletrodo de tensão está inserido, havendo assim uma maior resistência de contato entre a haste de tensão e o solo, consequentemente resulta num acréscimo no valor lido de resistência.

Para obtenção da resistência da topologia como teve uma interferência na primeira leitura como foi apresentado na tabela 30, escolheu-se a mesma direção das medições correspondentes a topologia triângulo-circunferência, para a obtenção da resistência de aterramento na configuração quadrado-circunferência, os dados do mesmo estão apresentados na tabela 31 e figura 76.

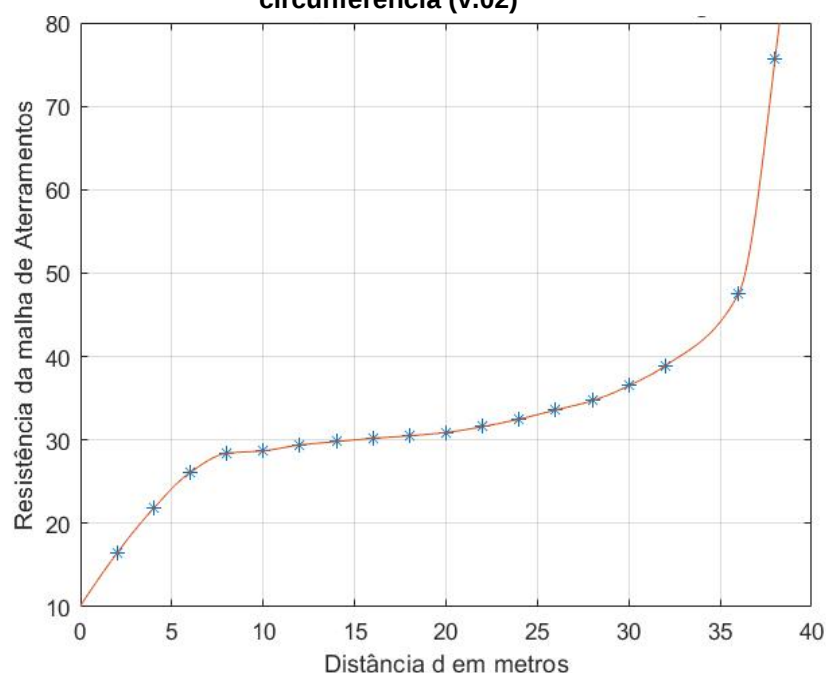
Tabela 31: Medições da resistência de aterramento na topologia interligada do quadrado - circunferência (v.02)

Quadrado com Circunferência	
Distância (m)	Medições em Ω
38m	75.7
36m	47.5
34m	...
32m	38.9
30m	36.5
28m	34.7
26m	33.6
24m	32.5
22m	31.6
20m	30.9
18m	30.5
16m	30.2
14m	29.8
12m	29.4
10m	28.7
8m	28.4
6m	26.1
4m	21.8
2m	16.44



Fonte Autoria Própria

Figura 76: Curva da resistência de aterramento para topologia interligada do quadrado – circunferência (v.02)



Fonte Autoria Própria

Fazendo uma média das medições de 12m a 20m, tem-se:

$$R_{quadrecircmed} = \frac{29.4 + 29.8 + 30.2 + 30.5 + 30.9}{5} = 30.16\Omega \quad (3.13)$$

As diferentes configurações de malhas de aterramento apresentadas passa a percepção da grande variabilidade que pode acontecer quanto ao perfil das curvas da resistência em função da distância, e que dificilmente se terá um curva ideal como foi apresentada na figura 39 onde a zona de patamar de potencial é constituída por um

valor único de resistência durante algumas medições mesmo que tenha sido adotado uma distância considerável entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente, isso ocorreu dentro das medições abordadas apenas em uma topologia dentre as quatro topologias isoladas e as seis topologias interligadas.

Ao final da apresentação dos valores das resistências das topologias interligadas, ressaltar dois pontos que já eram esperados, e foram comprovados nas medições, que são uma melhor estabilidade da zona de patamar, em que nesse trecho da curva há uma menor dispersão entre os valores ôhmicos das resistências quando comparadas as malhas isoladas, outro ponto é de que o valor correspondente da resistência de aterramento das topologias interligadas, é bem menor quando comparado a cada uma das configurações quando vistas de forma isolada.

Outro detalhe importante é de que mesmo com a distância máxima aumentada entre a malha de aterramento e o eletrodo auxiliar de corrente de 20m para 40m na maioria dos casos não houve a estabilização perfeita da zona de potencial, dentre algumas das justificativas estão a de o método em si utilizado demandar uma grande distância para ocorrer a estabilização ideal e dependendo da área disponível no terreno isso pode se tornar inviável, outra questão é de que as topologias de aterramento presentes no local podem estar interferindo nas medições pelas distâncias que as mesmas estão entre si, e por fim os prédios ao lado também podem estar influenciando nesses valores.

Uma das maneiras de tentar melhorar os resultados é de alguma maneira aumentar essa distância máxima entre a topologia e o eletrodo de corrente, outra sugestão é modificar o método e/ou utilizar outros equipamentos para a realização das medições de resistência, um equipamento que poderia ser utilizado para extrair a resistência é um transformador isolado ao invés do terrômetro permitindo assim um valor mais elevado de tensão e corrente inserido no solo, verificando dessa forma se a interferência seria atenuada ou não, e ao comparar esses dados também atesta que o terrômetro é fidedigno as condições presentes no solo, contudo isso não foi aplicado ao trabalho por questões da falta desse equipamento, e para que o trabalho não ficasse muito extenso optou-se por realizar as medições de resistência apenas utilizando o terrômetro e pelos resultados obtidos já se obtém aquilo que é o suficiente para a proposta do trabalho, assim essas sugestões ficam como uma possibilidade de um possível trabalho futuro.

4 SIMULAÇÕES

Nessa seção está presente o cálculo de todas as resistências de aterramento, isso engloba as malhas isoladas e também as malhas interligadas. Iniciando a apresentação dos equacionamentos pelas topologias isoladas, mas antes disso, é necessário apresentar o cálculo da resistividade aparente em cada uma das malhas, pois a mesma depende da estratificação do solo e também das características construtivas da malha conforme foi descrito na seção 2.8.

Iniciando os cálculos da resistência de aterramento na topologia de hastes alinhadas, a mesma tem as seguintes características construtivas:

- Sistemas com 4 hastes;
- Hastes de 1.5m de comprimento, 5/8 de polegada de diâmetro;
- Espaçamento entre hastes de 3 metros.

O primeiro passo para a obtenção da resistividade aparente é de realizar a redução de camadas, mas como a estratificação do solo explicitada na seção 3.1.1 retrata um solo de duas camadas, não é necessário realizar essa redução, assim o próximo passo a se realizar é o cálculo de coeficiente dado pela equação 2.28 apresentada na seção 2.8, e os dados da estratificação são expostos na figura 50 dentro da seção 3.1.1, assim o coeficiente de penetração é compreendido por:

$$\alpha = \frac{r}{d_1} = \frac{r}{3.68} \quad (4.1)$$

Para o cálculo do termo 'r' para uma topologia em hastes alinhadas basta utilizar a equação 2.31 da seção 2.8, assim tem-se:

$$r = \frac{(n'-1)*e'}{2} = \frac{(4-1)*3}{2} = 4.5m \quad (4.2)$$

Substituindo 4.2 em 4.1, é obtido:

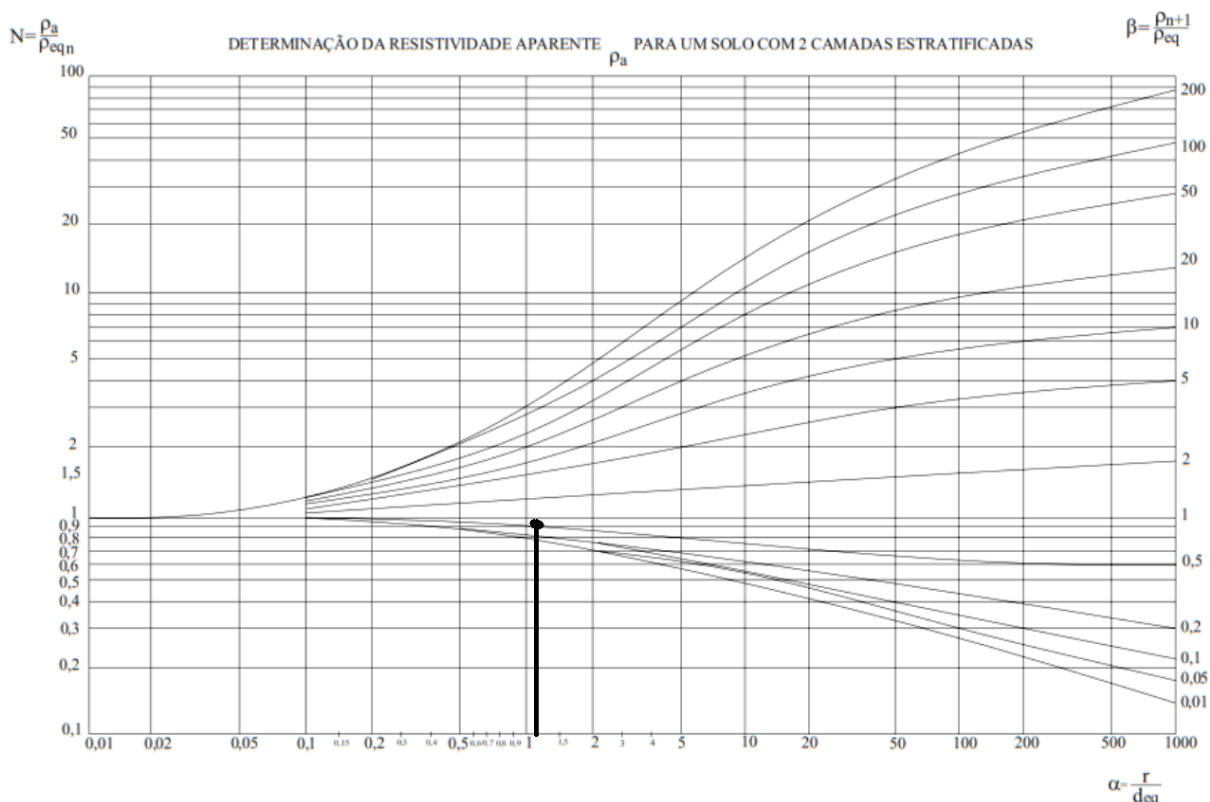
$$\alpha = \frac{r}{d_1} = \frac{4.5}{3.68} = 1.222 \quad (4.3)$$

Após a determinação de α , deve-se realizar o cálculo do coeficiente de divergência, esse termo será o mesmo para a obtenção da resistividade aparente em todas as malhas isoladas, pois o mesmo não depende de questões estruturais da topologia, e sim dos dados de resistividade calculados na estratificação como foi apresentado na equação 2.32, assim substituindo os dados da estratificação expostos na figura tem-se:

$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{781.5}{1200} = 0.6512 \quad (4.4)$$

Por último para obtenção da resistividade aparente utiliza-se a equação 2.35 da seção 2.8, mas antes disso é necessário utilizar os dados encontrados para determinar o termo 'N', obtido dentro das curvas de Endrenyi para obtenção da resistividade aparente demonstrado na figura 37 da mesma seção correspondente aos equacionamentos ligados a resistividade aparente, a curva a ser escolhida vai de acordo com o valor determinado de β e no eixo das abscissas marca o ponto correspondente ao α , e no canto esquerdo das ordenadas faz a relação para encontrar o valor de 'N', a figura 77 apresenta o ponto correspondente ao termo N de acordo com os dados obtidos da malha de aterramento em hastes alinhadas.

Figura 77: Curvas de Endrenyi para obtenção da resistividade aparente da malha em hastes alinhadas



Fonte [18]

Pelo que foi apresentado na figura 77, o valor de $N \approx 0.9$, assim utilizando a equação 2.35, tem-se:

$$\rho_{a(\text{hastinhas})} = N * \rho_1 = 0.9 * 1200 = 1080 \, \Omega.m \quad (4.5)$$

A partir da obtenção da resistividade aparente calcula-se a resistência de aterramento da topologia em hastes alinhadas, e de acordo com as características construídas adotadas, e pela estratificação feita no solo, se extrai esse valor de resistência, assim substituindo os dados na equação 2.36, tem-se:

$$\begin{aligned}
R_{Hastesalinhadas} &= \frac{1 * \rho_a(halinhadas)}{n * 2 * \pi * L} * [\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{L}{s} * \ln(1.781 * n/e)] \\
R_{Hastesalinhadas} &= \frac{1 * \rho_a(halinhadas)}{4 * 2 * \pi * 1.5} * [\ln\left(\frac{(8 * 1.5)}{(0.625 * 2.54 * 10^{-2})}\right) - 1 + \frac{1.5}{3} * \ln((1.781 * 4)/e)] \\
R_{Hastesalinhadas} &= 0.16 \rho_a(halinhadas) \\
R_{Hastesalinhadas} &= 0.16 * 1080 = 172.8 \, \Omega
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Dando prosseguimento no cálculo das resistências, a próxima é em quadrado vazio, a topologia é constituída por:

- Sistema de 4 hastes;
- Hastes de 1.5m de comprimento, 5/8 de polegada de diâmetro;
- 3 metros de lado do quadrado.

O termo 'r' do coeficiente de penetração do quadrado vazio, é dado por:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (\text{m}) \tag{4.7}$$

Onde a área A do quadrado corresponde a:

$$A_{quad} = lado * lado = 3 * 3 = 9m^2 \tag{4.8}$$

Substituindo (4.8) em (4.7), tem-se:

$$r = \sqrt{\frac{A_{quad}}{\pi}} = \sqrt{\frac{9}{3.1415}} = 1.69m \tag{4.9}$$

Utilizando o que foi obtido em (4.9) em (4.1), é obtido:

$$\alpha = \frac{r}{d1} = \frac{1.69}{3.68} = 0.46 \tag{4.10}$$

O coeficiente é o mesmo do calculado para as hastes alinhadas, assim dando prosseguimento para a determinação de N utilizando o mesmo raciocínio apresentado na figura 77 com os valores apresentados do coeficiente de penetração e divergência para a malha em quadrado, é obtido pelo gráfico das curvas de Endrenyi $N \approx 0.94$, assim a resistividade aparente dessa topologia, é dada por:

$$\rho_a(quadvaz) = N * \rho_1 = 0.94 * 1200 = 1128 \, \Omega.m \tag{4.11}$$

Na seção 2.9.3 foi apresentado duas maneiras para o cálculo da resistência de aterramento para quadrado vazio, utilizando a primeira maneira apresentada na seção, por meio da equação 2.39, assim tem-se:

$$\begin{aligned}
R_G &= 0.13 * \frac{\rho_a}{\sqrt{A}} * \left(1 - \frac{2 * L}{3 * \sqrt{A}}\right) * \log_{10}\left(\frac{(2400 * \sqrt{A})}{N}\right) \\
R_G &= 0.13 * \frac{\rho_a}{\sqrt{A}} * \left(1 - \frac{2 * 1.5}{3 * \sqrt{9}}\right) * \log_{10}\left(\frac{(2400 * \sqrt{9})}{1}\right)
\end{aligned} \tag{4.12}$$

$$R_G = 0.111\rho_{a(quadvaz)} \quad (4.13)$$

Adotando a resistividade aparente encontrada em (4.24) e substituindo em (4.11) se obtém:

$$R_G = 0.111\rho_{a(quadvaz)} = 0.111 * 1012 = 133.72 \Omega \quad (4.14)$$

Para a topologia em triângulo as especificações são dadas por:

- Sistema com 3 hastes;
- Hastes com 1.5m de comprimento, e 5/8 de polegada de diâmetro;
- 3 metros lado do triângulo.

O termo 'r' dentro do coeficiente de penetração para essa topologia é dada pela equação 4.7, utilizando assim a mesma fórmula adotada para a malha em quadrado vazio, e como a malha de aterramento possui os lados de mesmo comprimento, a área de um triângulo equilátero é dada por:

$$A_{triangulo} = (lado)^2 \frac{\sqrt{3}}{4} = 3^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} = 3.89m^2 \quad (4.15)$$

Substituindo (4.15) em (4.7), é obtido:

$$r = \sqrt{\frac{A_{triangulo}}{\pi}} = \sqrt{\frac{3.89}{\pi}} = 1.11m \quad (4.16)$$

Adotando (4.16) em (4.1), resulta em:

$$\alpha = \frac{r}{d1} = \frac{1.11}{3.68} = 0.301 \quad (4.17)$$

Pelos valores encontrados nos coeficientes e utilizando as curvas da figura 33, resulta em $N \approx 0.98$, assim a resistividade aparente para essa topologia, corresponde a:

$$\rho_{a(triang)} = N * \rho_1 = 0.98 * 1200 = 1176 Ohm.m \quad (4.18)$$

De acordo com a equação 2.38, assim a resistência de aterramento para a topologia em triângulo, é dada por:

$$R_{triangulo} = \frac{1}{3} * \left\{ \frac{\rho_a}{2 * \pi * L} [\ln(8L/d) - 1] + 2Ls \right\}$$

$$R_{triangulo} = \frac{1}{3} * \left\{ \frac{\rho_{a(triang)}}{2 * \pi * 1.5} [\ln(8 * 1.5 / (0.625 * 2.54 * 10^{-2})) - 1] + 2 * 1.5 * 3 \right\}$$

$$R_{triangulo} = 0.19\rho_{a(triang)} + 3 \quad (4.19)$$

Substituindo (4.18) em (4.19), obtém-se:

$$R_{triangulo} = 0.19 * 1176 + 3 = 226.44 \Omega \quad (4.20)$$

Por último do cálculo das resistências das malhas isoladas, se tem a topologia em circunferência, onde a mesma possui como características:

- Sistema com 6 hastes;
- Hastes de 1.5m de comprimento e 5/8 de polegada de espessura;
- Espaçamento de 3m no enlace da circunferência;
- Raio de circunferência de 2.86m.

O termo 'r' dentro do coeficiente de penetração é calculado da mesma maneira que as topologias em quadrado vazio e em triângulo, e sua área é dada por:

$$A_{circunferencia} = \pi(raio)^2 = 3.1415 * (2.86)^2 = 25.78m^2 \quad (4.21)$$

Substituindo (4.21) em (4.7), resulta-se em:

$$r = \sqrt{\frac{A_{circunferencia}}{\pi}} = \sqrt{\frac{25.78}{\pi}} = 2.87m \quad (4.22)$$

Colocando o valor obtido de (4.22) em (4.1), assim tem-se:

$$\alpha = \frac{r}{d_1} = \frac{2.87}{3.68} = 0.614 \quad (4.23)$$

De acordo com os valores de coeficientes encontrados, pelo gráfico das curvas de Endrenyi, $N \approx 0.93$, dessa forma a resistividade aparente para a topologia em circunferência corresponde a:

$$\rho_{a(circunf)} = N * \rho_1 = 0.93 * 1200 = 1116 \text{ Ohm.m} \quad (4.24)$$

A partir daquilo que foi calculado utilizando a equação 2.37 para a determinação da resistência da topologia em circunferência, é obtido:

$$R_{circunf} = \frac{1}{n} \frac{\rho_{a(circunf)}}{2\pi L} [\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{L}{s} \ln\left(\frac{2n}{\pi}\right)]$$

$$R_{circunf} = \frac{1}{6} * \frac{\rho_{a(circunf)}}{2\pi * 1.5} [\ln\left(\frac{(8 * 1.5)}{(0.625 * 2.54 * 10^{-2})}\right) - 1 + \frac{1.5}{3} \ln\left(\frac{(2 * 6)}{\pi}\right)]$$

$$R_{circunf} = 0.11 \rho_{a(circunf)} \quad (4.25)$$

Substituindo o valor de (4.24) em (4.25), resulta em:

$$R_{circunf} = 0.11 \rho_{a(circunf)} = 0.11 * 1116 = 122.76\Omega \quad (4.26)$$

Em resumo, as resistências calculadas das topologias isoladas, por meio das condições apresentadas na estratificação e das respectivas características construtivas obtiveram resultados ilustrados na tabela 32 de:

Tabela 32: Resumo dos valores de resistência de aterramento das malhas isoladas calculadas

N° de Hastes	Topologia	Resistência de Aterramento em Ω
4	Hastes Alinhadas	172.8
4	Quadrado Vazio	133.72
3	Triângulo	226.44
6	Circunferência	122.76

Fonte Autoria Própria

Para a obtenção das resistências das malhas interligadas, utiliza-se a equação de paralelismo entre duas resistências elétricas, dada pela equação:

$$R_{equivalente} = \frac{R_{malha01} * R_{malha02}}{R_{malha01} + R_{malha02}} (\Omega) \quad (4.27)$$

É realizado os cálculos utilizando a equação 4.27 primeiramente realizando as operações da equivalência resistiva para as topologias interligadas com os valores apresentados dentro da tabela 32, e posteriormente se realiza as operações de paralelismo de acordo com os valores ôhmicos das resistências medidos nas malhas isoladas esses valores de medição estão descritos dentro da seção 3.3.

A intenção de calcular o paralelismo das resistências utilizando duas maneiras distintas é de apresentar a análise comparativa entre teórico e experimental das resistências primeiro sob as condições no momento que se foi realizado a estratificação do solo, e posteriormente realizar a análise em cima das condições presentes no solo no momento em que foi realizado as medições de resistência de aterramento.

Iniciando a equivalência das resistências de aterramento das malhas interligadas de acordo com os valores teóricos obtidos nesta seção e descritos dentro da tabela 32, começando pela ligação da topologia em hastes alinhadas e quadrado vazio, é obtido:

$$R_{halinhequadr} = \frac{R_{Hastesalinhadas} * R_G}{R_G + R_{Hastesalinhadas}}$$

$$R_{halinhequadr} = \frac{172.8 * 133.72}{172.8 + 133.72} = 75.38\Omega \quad (4.28)$$

Dando prosseguimento nas contas, realizando a operação para a interligação da topologia em hastes alinhadas com circunferência, resulta em:

$$R_{halinhecirc} = \frac{R_{Hastesalinhadas} * R_{circunf}}{R_{Hastesalinhadas} + R_{circunf}}$$

$$R_{halinhecirc} = \frac{172.8 * 122.76}{172.8 + 122.76} = 71.771\Omega \quad (4.29)$$

Por último das configurações que envolvem as hastes alinhadas, está a conexão da mesma com a malha em triângulo, e sua resistência é dada por:

$$R_{halinhetrian} = \frac{R_{Hastesalinhadas} * R_{triangulo}}{R_{Hastesalinhadas} + R_{triangulo}}$$

$$R_{halinhetrian} = \frac{172.8 * 226.44}{172.8 + 226.44} = 98.01\Omega \quad (4.30)$$

Prosseguindo no paralelismo das resistências de aterramento, para as topologias de quadrado vazio e triângulo conectadas, tem-se:

$$R_{quadretriang} = \frac{R_G * R_{triangulo}}{R_G + R_{triangulo}}$$

$$R_{quadretriang} = \frac{133.72 * 226.44}{133.72 + 226.44} = 84.07\Omega \quad (4.31)$$

Realizando o paralelismo entre a topologia em circunferência e quadrado vazio, obtém-se:

$$R_{quadrecirc} = \frac{R_G * R_{circunf}}{R_G + R_{circunf}}$$

$$R_{quadrecirc} = \frac{133.72 * 122.76}{133.72 + 122.76} = 64\Omega \quad (4.32)$$

E para finalizar é apresentado a equivalência quando se conecta a malha em triângulo e circunferência:

$$R_{triangeirc} = \frac{R_{circunf} * R_{triangulo}}{R_{circunf} + R_{triangulo}}$$

$$R_{triangeirc} = \frac{122.76 * 226.44}{122.76 + 226.44} = 79.6\Omega \quad (4.33)$$

É realizado a equivalência das malhas conectadas a partir desse ponto, utilizando os valores obtidos nas medições em campo das resistências de aterramento das topologias isoladas, iniciando-se pela interligação das hastes alinhadas com quadrado, utilizando os dados obtidos em (3.4) e (3.5) na seção 3.3, o paralelismo entre essas topologias é calculado por:

$$R_{halinhequadr2} = \frac{R_{hastesalinhadasmed} * R_{quadrado}med}{R_{hastesalinhadasmed} + R_{quadrado}med}$$

$$R_{halinhequadr2} = \frac{98.28 * 84.06}{98.28 + 84.06} = 45.3\Omega \quad (4.34)$$

Prosseguindo nos respectivos cálculos, realizando a paralelismo entre a resistência da malha de hastes alinhadas e em circunferência, por meio dos valores encontrados em (3.4) e (3.7), se tem:

$$R_{halinhecirc2} = \frac{R_{hastesalinhadasmed} * R_{circunferenciamed}}{R_{hastesalinhadasmed} + R_{circunferenciamed}}$$

$$R_{halinhecirc2} = \frac{98.28 * 50.3}{98.28 + 50.3} = 33.27\Omega \quad (4.35)$$

Realizando o paralelismo entre a topologia de hastes alinhadas e triângulo, a partir dos dados expressos em (3.4) e (3.6), assim resulta em:

$$R_{halinhetrician2} = \frac{R_{hastesalinhadasmed} * R_{triangulomed}}{R_{hastesalinhadasmed} + R_{triangulomed}}$$

$$R_{halinhetrician2} = \frac{98.28 * 87.2}{98.28 + 87.2} = 46.2\Omega \quad (4.36)$$

Para calcular a resistência equivalente entre as malhas quadrado vazio e triângulo, usa-se as resistências encontradas em (3.5) e (3.6), assim obtém-se:

$$R_{quadretriang2} = \frac{R_{quadradomed} * R_{triangulomed}}{R_{quadradomed} + R_{triangulomed}}$$

$$R_{quadretriang2} = \frac{84.06 * 87.2}{84.06 + 87.2} = 42.8\Omega \quad (4.37)$$

Realizando a resistência equivalente da topologia quadrado com circunferência, por meio das equações 3.5 e 3.7, se tem:

$$R_{quadrecirc2} = \frac{R_{quadradomed} * R_{circunferenciamed}}{R_{quadradomed} + R_{circunferenciamed}}$$

$$R_{quadrecirc2} = \frac{84.06 * 50.3}{84.06 + 50.3} = 31.46\Omega \quad (4.38)$$

E por fim das equivalências entre duas topologias isoladas, se tem a interligação das malhas de aterramento em triângulo e circunferência, por meio dos valores encontrados em (3.6) e (3.7), assim:

$$R_{triangeirc2} = \frac{R_{circunferenciamed} * R_{triangulomed}}{R_{circunferenciamed} + R_{triangulomed}}$$

$$R_{triangeirc2} = \frac{50.3 * 87.2}{50.3 + 87.2} = 31.89\Omega \quad (4.39)$$

Nesta seção foi apresentada todos os cálculos de resistências de aterramento para as topologias isoladas, e posteriormente, de duas formas distintas as resistências para as malhas interligadas seguindo o equacionamento de paralelismo para duas resistências elétricas, na próxima seção será realizado a análise comparativa daquilo obtido nos cálculos e nas medições em específico para as topologias conectadas, ressaltando os pontos mais importantes sob cada uma das configurações.

5 ANÁLISE COMPARATIVA TEÓRICO-EXPERIMENTAL DAS MALHAS INTERLIGADAS

Este capítulo é um dos mais importantes no trabalho, pois realiza as principais análises quanto a comparação entre aquilo que foi calculado com o que foi aferido utilizando um terrômetro, em específico das malhas interligadas, sendo esse o principal objetivo do trabalho, de fazer as respectivas comparações e que mesmo que se faça a desconsideração dos efeitos indutivos dentro de cada uma das topologias, verificar se o equacionamento de paralelismo de resistências elétricas é válido ou não para representar a interligação de duas diferentes topologias de aterramento, sendo tudo que foi apresentado até esse ponto um embasamento para realizar as respectivas análises, e para se ter um melhor entendimento quanto aos principais aspectos que envolvem um aterramento, e sua importância para as instalações elétricas.

Fazendo um comparativo entre os valores calculados e as resistências medidas em campo para as topologias isoladas, sendo os valores da esquerda os aqueles que foram calculados e os da direita os valores medidos, tem-se na tabela 33:

Tabela 33: Comparativo dos valores calculados com os dados medidos das resistências de aterramento para as malhas isoladas

Topologia	Resistência calculada em Ω	Resistência medida em Ω
Hastes Alinhadas	172.8	98.28
Quadrado Vazio	133.72	84.06
Triângulo	226.44	87.2
Circunferência	122.76	50.3

Fonte Autoria Própria

Em percentual têm-se o comparativo entre as resistências:

$$R_{hastesalinhadasmed} = 0.568R_{hastesalinhadas}$$

$$R_{quadradovaziomed} = 0.628R_{quadrado}$$

$$R_{triangulomed} = 0.39R_{triangulo}$$

$$R_{circunferenciamed} = 0.41R_{circunferencia}$$

Em todas as configurações de malha de aterramento isoladas, os seus valores absolutos das resistências calculadas e aquilo que foi aferido obteve uma diferença significativa entre si, uma das justificativas para isso ocorrer é o fato de que as

resistências calculadas são de acordo com a estratificação realizada no solo, e no momento em que foi executada a estratificação estava no final do período de seca estando assim o solo mais rígido e com menos umidade, o que resulta num acréscimo das respectivas resistências de aterramento quando calculadas nos respectivos equacionamentos, e no instante em que foram medidas as resistências de aterramento estava no verão, estação do ano em que se predomina a maior concentração de chuvas que deixam o solo úmido, que por consequência diminui o valor das resistências nas malhas de aterramento, conforme foi apresentado na seção 2.5.1 a umidade no solo influencia diretamente no valor final de resistividade do solo, e como a resistência de aterramento e resistividade estão relacionadas, o valor final de resistência de uma topologia também é afetado.

Um aspecto interessante é o fato de que as malhas de aterramento quando se compara os resultados calculados com os medidos em percentual nota-se que esses valores são bem distintos entre si, variando de 40% a 63% entre si, concluindo que o solo úmido age de forma distinta em cada uma das topologias analisadas.

Assim como para as topologias isoladas, as malhas interligadas possuem uma discrepância significativa das resistências medidas e calculadas de acordo com a estratificação do solo, pelo mesmo motivo do que foi apresentado nos parágrafos anteriores, sendo todos os respectivos cálculos de resistência apresentados no capítulo 4, como um dos exemplos para representar essa diferença, selecionando as resistências obtidas em (4.34) e (4.28), tem-se:

$$R_{halinhequadrmed} = 47.16\Omega \times R_{halinhequadr} = 75.38\Omega$$

Em termos percentuais:

$$R_{halinhequadrmed} = 0.62R_{halinhequadr}$$

Devido a essa diferença entre o valor ôhmico daquilo que foi calculado, como tentativa de comprovar que a ligação de duas diferentes malhas se equipara ao equacionamento do paralelismo de duas resistências elétricas, utiliza-se os valores das resistências medidas nas malhas isoladas, cálculos esses realizados no capítulo 4, utilizando os valores das resistências medidas nas malhas isoladas, e posteriormente calcula-se o paralelismo das resistências das malhas envolvidas e compara-se com o valor aferido no instante em que há a interligação entre as diferentes configurações de malhas. Na primeira análise comparativa o valor de $R_{halinhequadr2}$ se aproxima e muito de $R_{halinhequadrmed}$, com o intuito de se mensurar

essa pequena diferença, basta realizar o erro entre as medidas em percentual, dessa forma tem-se:

$$\begin{aligned} erro_{halinhequadr} &= \left(1 - \frac{R_{halinhequadr2}}{R_{halinhequadrmed}}\right) * 100 \\ erro_{halinhequadr} &= \left(1 - \frac{45.3}{47.16}\right) * 100 = 3.94\% \end{aligned} \quad (5.1)$$

O erro entre o calculado e o medido seguindo a lógica descrita no parágrafo anterior, é consideravelmente baixo, com erro inferior a 5%, e com diferença ôhmica entre essas resistências menor que 2, essa diferença pode ser pela aproximação na extração da resistência de aterramento pelo método de queda de potencial, pois como não houve uma estabilização ideal da zona de potencial, foi obtido o valor de resistência a partir da média do trecho da curva da resistência em função da distância do eletrodo de potencial em que houve uma menor dispersão entre uma medição e outra em cima daquilo que representa a zona de potencial dentro das respectivas curvas, conforme foi explicado na seção 3.3, outros quesitos são a impedância no cabo que faz a interligação entre as malhas, o erro que está intrínseco no aparelho terrômetro, e os efeitos indutivos estão sendo desprezados, devido a tudo isso, a margem de erro calculado em (3.53), é considerada aceitável para a validação do paralelismo entre duas resistências elétricas ser utilizada em dimensionamentos de projetos que envolvam a conexão de duas topologias de geometrias distintas, entretanto é necessário fazer a análise e realizar o erro em todas as topologias interligadas abordadas no trabalho, para se ter uma conclusão mais concreta, quanto a essa afirmação.

Na topologia interligada da malha em hastes alinhadas e circunferência realizando a mesma análise da junção das hastes alinhadas com quadrado, o erro entre $R_{halinhecirc2}$ e $R_{halinhecircmed}$ é dado por:

$$\begin{aligned} erro_{halinhecirc} &= \left(1 - \frac{R_{halinhecircmed}}{R_{halinhecirc2}}\right) * 100 \\ erro_{halinhecirc} &= \left(1 - \frac{31.5}{33.27}\right) * 100 = 5.32\% \end{aligned} \quad (5.2)$$

O erro calculado nessa junção de malhas continua baixo, e em termos da diferença no valor da resistência, comparando os dois casos apresentados, o valor medido das malhas interligadas e o calculado utilizando as resistências aferidas das malhas isoladas, a diferença continua em torno de 2 Ω .

Dando prosseguimento nas análises, na interligação da topologia em hastes alinhadas com triângulo o erro entre $R_{halinhethrian2}$ e $R_{halinhethrian}$ é dado por:

$$\begin{aligned} erro_{halinhethriang} &= \left(1 - \frac{R_{halinhethrianmed}}{R_{halinhethrian2}}\right) * 100 \\ erro_{halinhethriang} &= \left(1 - \frac{45.28}{46.2}\right) * 100 = 2\% \end{aligned} \quad (5.3)$$

O erro entre a medição das malhas unidas e o paralelismo das medições das malhas isoladas continua baixo, e em termos de valores absolutos menos de 1 Ω .

Nas malhas conectadas em quadrado vazio e triângulo, o erro entre as resistências $R_{quadretriang2}$ e $R_{quadretriangmed}$, apresentado em:

$$\begin{aligned} erro_{quadretriang} &= \left(1 - \frac{R_{quadretriangmed}}{R_{quadretriang2}}\right) * 100 \\ erro_{quadretriang} &= \left(1 - \frac{41.42}{42.8}\right) * 100 = 3.22\% \end{aligned} \quad (5.4)$$

Novamente o erro está inferior aos 5% e com uma diferença de 1.38 Ω , seguindo até esse momento a margem de que nenhum dos erros relativos calculados atingiram o desvio superior aos 6%, e em valores ôhmicos não ultrapassaram a marca de 2 Ω .

Na interligação entre a topologia em quadrado vazio e circunferência, o erro presente nas resistências $R_{quadrecirc2}$ e $R_{quadrecircmed}$ é dado por:

$$\begin{aligned} erro_{quadrecirc} &= \left(1 - \frac{R_{quadrecircmed}}{R_{quadrecirc2}}\right) * 100 \\ erro_{quadrecirc} &= \left(1 - \frac{30.16}{31.46}\right) * 100 = 4.13\% \end{aligned} \quad (5.5)$$

E por último na interligação da malha em triângulo e circunferência, o erro entre $R_{triangecirc1}$ e $R_{triangecircmed}$ corresponde a:

$$\begin{aligned} erro_{triangecirc} &= \left(1 - \frac{R_{triangecirc1}}{R_{triangecircmed}}\right) * 100 \\ erro_{triangecirc} &= \left(1 - \frac{31.89}{32.85}\right) * 100 = 2.92\% \end{aligned} \quad (5.6)$$

O erro relativo máximo em percentual encontrado nessa seção foi de 5.32% correspondente a junção das topologias de hastes alinhadas com circunferência, entretanto não foi o maior erro em valores ôhmicos, o que possui essa marca é a junção das topologias quadrado vazio e hastes alinhadas com erro em ohms de 1.86, sendo assim, de acordo com todos os erros calculados pode-se afirmar com maior

propriedade, mesmo que seja desprezado os efeitos indutivos presentes nas malhas, que existe a equiparação entre a equivalência de resistências elétricas paralelas, utilizando os valores das resistências das malhas isoladas, pela fórmula apresentada na equação 4.27 no capítulo 4, para a obtenção da resistência quando há a interligação de topologias de aterramento com diferentes geometrias.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

O trabalho em questão possibilitou que houvesse de acordo com aquilo que foi proposto, que fosse agregado um certo conhecimento até então não adquirido, mesmo que dentro da disciplina de aterramentos elétricos tenha sido aplicado os seus principais conceitos, na parte prática em específico da construção de uma topologia de aterramento não foi aplicado dentro da disciplina, até mesmo por uma questão de falta de tempo hábil. Sendo assim, após a construção e medição de resistência das topologias isoladas e interligadas de duas a duas, trouxe um sentimento de sentir-se mais preparado para se dimensionar e executar um projeto de sistema de aterramento elétrico.

De acordo com a medição da resistência de aterramento sob as diferentes topologias, verificou-se o quão distinto é o comportamento das curvas da resistência em função da distância, sendo em uns casos a zona de patamar de potencial mais estabilizada e em outros bem menos, comprovando assim, que cada uma das malhas de aterramento além de entregar um valor diferente de resistência, tem um comportamento específico de interação com o solo de acordo com as especificações de geometria, e da quantidade, diâmetro, comprimento das hastes.

É importante reafirmar que não existe uma malha de aterramento perfeita, depende da justamente da composição do solo e de como a topologia se comporta quanto a dispersão das linhas equipotenciais e da corrente elétrica, e que nem sempre um número maior de hastes representará um menor resultado de resistência, como comprovação disso, em específico daquilo que foi aferido nas medições, está a malha em triângulo utilizando uma haste a menos entregou um menor valor ôhmico de resistência comparada a malha em hastes alinhadas, e comparando com malha em quadrado vazio praticamente obteve o mesmo resultado, contendo nessa topologia uma haste a mais também que a malha em triângulo.

De acordo com as análises comparativas, e principalmente com os erros calculados no capítulo 5, verificou-se que a método para determinar a resistência equivalente de duas resistências paralelas, se equipara para determinar a resistência de aterramento das topologias quando se interliga as mesmas, e como ideia daquilo que poderia ser uma continuação desse trabalho para embasar com maior propriedade isso, seria instaurar as malhas de aterramento num diferente solo, e realizar as mesmas análises presentes nesse projeto.

Uma boa proposta de sugestão para trabalho futuro é a de realizar as medições de resistividade elétrica para obtenção da estratificação do solo, utilizando diferentes métodos e/ou equipamentos para que ao final possa confrontar os resultados descritos dentro desse trabalho com os novos valores calculados, assim como seguir diferentes métodos e/ou equipamentos para obtenção da resistência elétrica, como um exemplo do equipamento que possa ser utilizado é o de usar um transformador isolado no lugar do terrômetro, realizando ao fim dos dados colhidos as respectivas análises dos resultados obtidos em cada dos equipamentos e/ou métodos.

Dentre outras propostas para realização de trabalhos futuros tendo como base o que foi construído neste trabalho está o de acompanhar e realizar as respectivas análises do comportamento das associações das topologias de aterramento ao longo de um ano, e/ou analisar o comportamento das associações das malhas com frequências elevadas, ou também realizar as respectivas análises dos potenciais de passo presentes nas associações das malhas simulando condições de uma descarga atmosférica.

REFERÊNCIAS

- [1] - Portal da eletricidade. Aterramento elétrico - Origens. As Origens do Aterramento Elétrico, março de 2017. Disponível em: <<http://universoeletrotechnica.blogspot.com/2017/03/aterramento-eletrico-origens.html>>, acessado em 20 de agosto de 2020.
- [2] - JUNIOR, José Saverio Spozito. Sistema de Aterramento com cabo contrapeso representado por linhas de transmissão implementado em matlab com circuitos em cascata de pi. Dissertação em Engenharia Elétrica. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira-SP 2012. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~luis.nodari/Aterramento%20el%C3%A9trico/317-dissertacao_josesaveriospozitojr.pdf>, acessado em 22 de agosto de 2020.
- [3] - ATERRAMENTO. Apostila de Aterramentos da Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aterramento.pdf>>, acessado em 25 de agosto de 2020.
- [4] - CARDOSO, Matheus. INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE. A Importância do Aterramento Elétrico na Instrumentação Industrial, 2018. Disponível em: <<https://instrumentacaoecontrole.com.br/aterramento-eletrico/>>, acessado em 26 de agosto de 2020.
- [5] - SlidePlayer. Eletronorte, Divisão de Transmissão de Marabá - CPAM. SEMANA INTERNA DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES - SIPAT, Tema: Aterramento Elétrico, 2014. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1241862/>>, acessado em 26 de agosto de 2020.
- [6] - Empresa Santa Luiza. FAZFÁCIL. Saiba escolher o material certo para o aterramento elétrico, maio de 2014. Disponível em: <<https://br.pinterest.com/pin/643381496752489113/visual-search/?x=12&y=10&w=394&h=316&cropSource=6>>, acessado em 30 de dezembro de 2020.
- [7] - MENDONÇA, Dr. Eng Roberlam Gonçalves de. Aula 2- Sistemas de Aterramentos, Finalidades e Classificação. Bacharelado em Engenharia Elétrica, Disciplina de Aterramentos Elétricos. IFG – Instituto Federal de Goiás, 2019.
- [8] - Portal Eletricista, Dicas Gerais sobre instalação elétrica. Importância do Aterramento Elétrico nas instalações elétricas, fevereiro de 2014. Disponível em:

<<https://www.portaleletricista.com.br/aterramento-eletrico/>>, acessado em 28 de agosto de 2020.

[9] - ABNT NBR 5410. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma BRASILEIRA nº5410. Instalações elétricas de baixa tensão, versão corrigida de março de 2008.

[10] - ABNT NBR 5419-3. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma BRASILEIRA nº5419-3. Proteção contra descargas atmosféricas, Parte 03: Danos físicos a estruturas e perigos à vida, versão de junho de 2015.

[11] - Mundo da Elétrica. O que é SPDA (Sistema de proteção contra descargas atmosféricas)? Disponível em: <

[12] - NR10. Norma Regulamentadora nº10. Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Versão Comentada por João G. Cunha 1ª Edição, agosto de 2006.

[13] - ABNT NBR 5419-1. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma BRASILEIRA nº5419-1. Proteção contra descargas atmosféricas, Parte 01: Princípios gerais, versão junho de 2015.

[14] - SANTOS, Moacir. FM, FAMS ENGENHARIA E PROJETOS. SPDA - O que é um Subsistema de Captação, agosto de 2018. Disponível em: <<https://engfam.com.br/subsistema-de-captacao/>>, acessado em 30 de dezembro de 2020.

[15] - IMPACTORAIO, Soluções em sistemas de proteção. Os para-raios. Disponível em: <<http://impactoraio.com.br/spda-externogaiola-de-faradaymastro-de-franklin/>>, acessado em 01 de setembro de 2020.

[16] - ENGEREY, PAINÉIS ELÉTRICOS. Saiba o que é um surto elétrico e como se proteger dele! Novembro de 2017. Disponível em: <

os%20raios%2C,cargas%20el%C3%A9tricas%20e%20o%20seu%20descarregame
nto.%20More%20>, acessado em 01 de setembro de 2020.

[17] - Mundo da Elétrica. Dispositivo de proteção contra surtos (DPS), como funciona? Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/dispositivo-de-protecao-contrasurtos-dps-como-funciona/>>, acessado em 02 de setembro de 2020.

[18] - MARTINHO, Meire. Abracopel, Tecnologia. Conceitos e aplicações de dispositivos de corrente diferencial-residual (DR), março de 2013. Disponível em: <<https://abracopel.org/blog/tecnologia/conceitos-e-aplicacoes-de-dispositivos-de-corrente-diferencial-residual-dr/>>, acessado em 02 de setembro de 2020.

[19] - THOMÉ, Pedro. BELINE, Ederaldo Luiz. XII EEPA, Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial, EPA- De Campo Mourão para o mundo. Choque Elétrico: causas, consequências e seus efeitos para o corpo humano. Campo Mourão, Paraná, novembro de 2018. Disponível em: <http://anais.unespar.edu.br/xii_eeпа/data/uploads/artigos/8-engenharia-do-trabalho/8-08.pdf>, acessado em 02 de janeiro de 2021.

[20] - MODENA, Jobson. SUETA, Hélio. Revista: O setor elétrico, março 2011. Especial FIEE 2011. Aterramentos elétricos, Capítulo III - Projeto de eletrodo de aterramento(malhas) de subestações de energia elétrica: cálculos de tensões permissíveis, correntes de choque elétrico, tensões de passo e toque. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2011/Artigos%20de%20Periodicos/modenaprojetoll.pdf>>, acessado em 03 de setembro de 2020.

[21] - MENDONÇA, Dr. Eng Roberlam Gonçalves de. Aula 1.1-Aterramentos Elétricos. Bacharelado em Engenharia Elétrica, Disciplina de Aterramentos Elétricos. IFG – Instituto Federal de Goiás,2019.

[22] - ABNT NBR 15751. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma BRASILEIRA nº15751. Sistemas de aterramentos de subestações - Requisitos, versão agosto de 2013.

[23] - KINDERMAN, Geraldo. CAMPAGNOLO, Jorge Mário. Aterramento Elétrico. Professores da Universidade Federal de Santa Catarina, 3º edição modificada e ampliada. SAGRA – D.C. LUZZATO Editores, Porto Alegre 1995.

[24] - VISACRO FILHO, Silvério. ATERRAMENTOS ELÉTRICOS, Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento. Artliber Editora Ltda, São Paulo 2002.

[25] - BOTELHO, Teresa. Segurança em Eletricidade (NR10), Medindo a resistividade do solo, outubro de 2014. Disponível em: <<https://eletricidade2332.blogspot.com/2014/10/medindo-resistividade-do-solo.html>>, acessado em 04 de setembro de 2020.

[26] - MENDONÇA, Dr. Eng Roberlam Gonçalves de. Aula 10-Resistividade Aparente. Bacharelado em Engenharia Elétrica, Disciplina de Aterramentos Elétricos. IFG – Instituto Federal de Goiás, 2019.

[27] - NTC-60. Norma Técnica CELG nº60. CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. Critérios para projetos e procedimentos para execuções de Aterramentos de Redes Aéreas e Subestações de Distribuição, versão março de 2008.

[28] - MODENA, Jobson. SUETA, Hélio. Revista: O Setor Elétrico, junho de 2011. Segurança em trabalhos com eletricidade: Profissionais com próteses metálicas podem executar serviços com a técnica de linha viva? Aterramentos Elétricos, Capítulo VI - Métodos normalizados para medição de resistência de aterramento. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2011/Artigos%20de%20Periodicos/modenametodosVI.pdf>>, acessado em 05 de setembro de 2020.

[29] - ABNT NBR 15749. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma BRASILEIRA nº15749. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento, versão de setembro de 2009.

[30] - COELHO, Rooney Ribeiro Albuquerque. Aplicação do Método dos Elementos Finitos como Auxílio ao Projeto e ao Comissionamento de Sistemas de Aterramento Elétrico. Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/12858/1/2015_dis_rracoelho.pdf>, acessado em 04 de janeiro de 2021.

[31] - MENDONÇA, Dr. Eng Roberlam Gonçalves de. Aula 08-Formulação Matemática, Resistência de Aterramento. Bacharelado em Engenharia Elétrica, Disciplina de Aterramentos Elétricos. IFG – Instituto Federal de Goiás, 2019.

[32] - Saber elétrica.com.br, Aprendendo e Ensinando. Funcionamento Aplicação e Função do Disjuntor DR. Disponível em:
<<https://www.sabereletrica.com.br/funcionamento-do-disjuntor-dr/#:~:text=O%20disjuntor%20DR%20possui%20como,levar%20um%20choque%20nesse%20local>>, acessado em 03 de setembro de 2020.

[33] - ATHOSELECTRONICS. Aterramento Elétrico - O que é e como fazer. Disponível em: <<https://athoselectronics.com/aterramento-eletrico/>>, acessado em 03 de setembro de 2020.

[34] - CHOQUE ELÉTRICO. Disponível em:
<<http://www.wdz.eng.br/WDK/MateriaisEletricos.pdf>>, acessado em 03 de setembro de 2020.

[35] - MENDONÇA, Dr. Eng Roberlam Gonçalves de. Aula 11-Dimensionamento de Sistemas de Aterramento. Bacharelado em Engenharia Elétrica, Disciplina de Aterramentos Elétricos. IFG – Instituto Federal de Goiás, 2019.

[36] - ELETRO ENERGIA, Materiais Elétricos. Aterramento Elétrico: Você entende a sua importância? Julho de 2020. Disponível em:
<<https://eletroenergia.com.br/aterramento/aterramento-eletrico-voce-realmente-entende-a-sua-importancia/>>, acessado em 10 de setembro de 2020.

[37] - MUNDO DA ELÉTRICA. Aterramento elétrico, tipos e usos. Disponível em:
<<https://www.mundodaeletrica.com.br/aterramento-eletrico-tipos-e-usos/>>, acessado em 10 de setembro de 2020.

[38] - Tecнораioabc. Aterramento Elétrico Industrial. Disponível em:<<http://www.tecnoraioabc.com.br/aterramento-eletrico/aterramento-eletrico-industrial>>, acessado em 10 de setembro de 2020.

[39] - BUSS, Gabriel Augusto. Aterramento Elétrico: Aplicação em estabelecimentos assistenciais de saúde. Dissertação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2016. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/168185/341348.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>, acessado em 11 de setembro de 2020.

[40] - FOXLUX. A importância do aterramento para a segurança do sistema elétrico. Disponível em: <<https://www.foxlux.com.br/blog/dicas/importancia-aterramento-para-seguranca-sistema-eletrico/>>, acessado em 11 de setembro de 2020.

[41] - RGE Engenharia, Qualidade e Segurança. ATERRAMENTO ELÉTRICO SPDA. Disponível em: <<http://www.rgengenharias.com.br/aterramento-eletrico-spda>>, acessado em 11 de setembro de 2020.