

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS –
CAMPUS DE ITUMBIARA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FILIPE SANTANA DE MORAIS

**ANALISE COMPARATIVA TEÓRICO-EXPERIMENTAL ENTRE AS
PRINCIPAIS TOPOLOGIAS UTILIZADAS EM ATERRAMENTOS ELÉTRICOS**

ITUMBIARA

2021

**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: Filipe Santana de Moraes

Matrícula: 20151040070158

Título do Trabalho: ANÁLISE COMPARATIVA TEÓRICO-EXPERIMENTAL ENTRE AS PRINCIPAIS TOPOLOGIAS UTILIZADAS EM ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (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.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

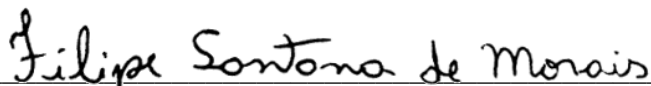
O/A referido/a autor/a declara que:

- 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, 02 / Fevereiro / 2021.

Local

Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

FILIPPE SANTANA DE MORAIS

**ANALISE COMPARATIVA TEÓRICO-EXPERIMENTAL ENTRE AS PRINCIPAIS
TOPOLOGIAS UTILIZADAS EM ATERRAMENTOS ELÉTRICOS**

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 de concentração 30404045.

Orientador: Prof. Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça.

ITUMBIARA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M828a Morais, Filipe Santana de

 Análise comparativa teórico-experimental entre as principais topologias utilizadas em aterramentos elétricos. / Filipe Santana de Morais – Itumbiara, 2021.

 104p. : 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. Sistemas de energia elétrica - Proteção. 2. Método comparativo. 3. Linhas elétricas subterrâneas.

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

CDD 621.317

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara

Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



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 Comparativa Teórico-Experimental entre as Principais Topologias Utilizadas em Aterramentos Elétricos.

AUTOR: Filipe Santana de Moraes.

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, 21 de janeiro de 2021.

Roberlam Gonçalves de Mendonça

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Claudio Roberto Pacheco

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Victor Régis Bernadeli

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Documento assinado eletronicamente por:

- Claudio Roberto Pacheco, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/01/2021 17:54:09.
- Victor Regis Bernardeli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/01/2021 13:21:28.
- Roberlam Goncalves de Mendonca, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/01/2021 18:36:03.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/01/2021. 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: 124506

Código de Autenticação: c0dc08492f



Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, ao meu irmão e aos meus pais que me apoiaram e incentivaram a realiza-lo.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Itumbiara, pelas oportunidades oferecidas de crescimento pessoal e profissional. Ao Professor Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça, meu orientador, pelas conversas e orientações durante todo o trabalho. Aos meus pais Cristiano e Lucilene por todo apoio e incentivo do decorrer de todos esses anos, mesmo nos momentos mais difíceis. Em especial ao meu pai, um exemplo de humildade e dedicação, que não mediu esforços para contribuir no meu crescimento profissional.

Aos colegas de curso pelo apoio, parceria e convivência harmoniosa. Ao meu amigo Gustavo Paiva que esteve presente do início ao fim do trabalho, exemplo de perseverança e determinação. E a todos os professores do IFG que contribuíram para o crescimento profissional.

*“Pensava que nós seguíamos caminhos já feitos,
mas parece que não os há. O nosso ir faz o
caminho.” (C. S. Lewis)*

RESUMO

Para validação de conceitos relacionados a aterramentos elétricos é de suma importância a realização de testes e análises práticas. Sendo assim, este trabalho tem o objetivo de realizar uma análise comparativa teórica-experimental entre as topologias clássicas de aterramentos elétricos: hastes alinhadas, triângulo, quadrado e circunferência. Para desenvolvimento do estudo, o trabalho é dividido em sete etapas, entre elas tem-se o embasamento teórico, medições de campo e estratificação do solo, simulações computacionais, implementação prática, medições de resistências dos sistemas de aterramentos, análise comparativa teórica-experimental e conclusões. Através do estudo de cada topologia é possível verificar a influência de fatores como espaçamento, quantidade, comprimento e diâmetro das hastes. Por meio dos resultados obtidos as expectativas foram atendidas. A discrepância entre resultados teóricos e experimentais foram devidos a condições climáticas (temperatura e umidade) do solo, existência de tubulações hidráulicas e elétricas no terreno estudado, imperfeições de alinhamento e distâncias das hastes de cada malha, além da existência de muitas pedras e possíveis cupinzeiros internos ao solo. Entre as topologias estudadas, o sistema desenvolvido em circunferência apresentou os melhores resultados teóricos e experimentais, se comparada as demais topologias desenvolvidas.

Palavras-chave: Topologias de Aterramentos. Malhas isoladas. Comparativo teórico-experimental.

ABSTRACT

For the validation of concepts related to electrical grounds, it is extremely important to carry out tests and practical analyzes. Therefore, this work aims to carry out a theoretical-experimental comparative analysis between the classic topologies of electrical grounds: aligned rods, triangle, square and circumference. For the development of the study, the work is divided into seven stages, among which there is the theoretical basis, field measurements and soil stratification, computer simulations, practical implementation, resistance measurements of the grounding systems, theoretical-experimental comparative analysis and conclusions. Through the study of each topology it is possible to verify the influence of factors such as spacing, quantity, length and diameter of the rods. Through the results obtained, expectations were met. The discrepancy between theoretical and experimental results was due to climatic conditions (temperature and humidity) of the soil, existence of hydraulic and electrical pipes in the studied terrain, imperfections of alignment and distances of the rods of each mesh, in addition to the existence of many stones and possible termite mounds internal to the ground. Among the studied topologies, the system developed in circumference presented the best theoretical and experimental results, when compared to the other developed topologies.

Keywords: Grounding topologies. Isolated meshes. Theoretical-experimental comparison.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de componentes de um sistema de aterramento	6
Figura 2 - Esquema TN-S.....	7
Figura 3- Esquema TN-C	8
Figura 4 - Esquema TT.....	8
Figura 5 - Esquema IT	8
Figura 6 - Subsistemas de um SPDA	10
Figura 7 - Método da esfera rolante	11
Figura 8 – DPS modelo 5SD7	12
Figura 9 - Descargas diretas	13
Figura 10 - Descargas indiretas	13
Figura 11 - Corrente de fuga por contato direto	15
Figura 12- Corrente de fuga por contato indireto	15
Figura 13 – Atuação do dispositivo DR	16
Figura 14 - DR 5SU1.....	16
Figura 15 - Conceito de funcionamento do DR.....	17
Figura 16 - Reações no corpo humano devido ao choque elétrico	18
Figura 17 - Possíveis caminhos para circulação de corrente elétrica no corpo	19
Figura 18 - Conceito de tensão de passo	20
Figura 19 - Conceito de tensão de toque	21
Figura 20 – Representação de um cubo homogêneo	23
Figura 21 - Resistividade por percentual de umidade	25
Figura 22 - Resistividade x temperatura.....	26
Figura 23 - Configuração de Wenner	27
Figura 24 - Configuração de Schlumberger	28
Figura 25 – Horizontes de um perfil de um solo	29
Figura 26 – Exemplo 1 - curva de resistividade x espaçamento	30
Figura 27 - Curvas de k negativo.....	31
Figura 28 - Curvas de k positivo	32
Figura 29 – Pontos de espaçamentos a1 e a2 na curva de resistividade x espaçamento	32
Figura 30 - Pontos de espaçamentos a3 e a4 na curva de resistividade x espaçamento	33
Figura 31 - Curvas Padrão	35
Figura 32 - Curvas Auxiliares	35
Figura 33 – Curva $\rho(a)$ x a em escala logarítmica	36

Figura 34 - curva $\rho(a)$ x a – demarcação do polo O1	37
Figura 35 - curva $\rho(a)$ x a e curva auxiliar.....	38
Figura 36 – Curva $\rho(a)$ x a com a demarcação do ponto O2	39
Figura 37 - Representação de camadas do solo, com diferentes resistividades	40
Figura 38 - Representação do solo de um sistema reduzido a duas camadas.....	41
Figura 39 - Curvas de Endrenyi.....	43
Figura 40 - Haste cravada no solo	44
Figura 41 - Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes	44
Figura 42 - Superfícies equipotenciais de duas hastes	45
Figura 43 - Parâmetros das mútuas entre as hastes "h" e "m"	46
Figura 44 - Triângulo equilátero.....	48
Figura 45 - Curva dos K x espaçamento para configuração em triângulo	48
Figura 46 - Quadrado vazio	49
Figura 47 - Curva dos K x espaçamento para configuração em quadrado vazio	49
Figura 48 - Circunferência com 9 metros de raio	50
Figura 49 - Curvas K x espaçamento para circunferência: raio 9 metros.....	50
Figura 50 – Expressões para configurações em estrela de 4 pontos.....	51
Figura 51 – Expressões para configurações em circunferência.....	51
Figura 52 - Expressões para configurações em hastes alinhadas	51
Figura 53- Expressões para configurações em malha por reticulado	51
Figura 54 - Expressões para configurações em malha por reticulado	51
Figura 55 - Expressão configuração em quadrado de sistemas de aterramentos.....	52
Figura 56 - Localização da área estratificada	56
Figura 57 - Referência de direções das medições de aterramentos elétricos.....	56
Figura 58 - Perfil de resistividade x espaçamento	58
Figura 59 – Curvas típicas do solo de duas camadas:	60
Figura 60 - Curva prolongada de resistividade x espaçamento	60
Figura 61 – Ilustração do ponto 1 e do ponto 2 na curva de resistividade x espaçamento.....	61
Figura 62 - Linhas paralelas, cortando as curvas de k.....	62
Figura 63 - Ponto de cruzamento das curvas auxiliares [h x K].....	63
Figura 64 - Ilustração da estratificação do solo	63
Figura 65 - Configuração em hastes alinhadas	65
Figura 66 – Curvas de Endrenyi: valor de N para hastes alinhadas	66
Figura 67 - Configuração em triângulo	67
Figura 68 - Curvas de Endrenyi: valor de N para triângulo	69

Figura 69 - Configuração em quadrado	70
Figura 70 - Curvas de Endrenyi: valor de N para quadrado	71
Figura 71 - Configuração em circunferência	73
Figura 72 - Curvas de Endrenyi: valor de N para circunferência	74
Figura 73 - Localização das topologias no terreno	77
Figura 74 - Escavação das trincheiras	78
Figura 75 - Escavação em forma geométrica de triângulo	79
Figura 76 - Escavação em forma de hastes alinhadas	79
Figura 77 - Escavação em forma geométrica de quadrado	80
Figura 78 - Escavação em forma geométrica de circunferência	80
Figura 79 - Sistema de canalização danificado	81
Figura 80 - Pedras encontradas nas escavações	82
Figura 81 - Molde Cadin utilizado para realização de soldas	83
Figura 82 - Pó exotérmico, disco metálico e palito ignitor	83
Figura 83 - Ilustração da parte superior e da parte inferior do molde	84
Figura 84 - Tipos de conexões realizadas com molde	84
Figura 85 – Escavações das configurações em quadrado e em circunferência	85
Figura 86 - Medição da resistência de aterramento por queda de potencial	86
Figura 87 - Descrição do método de medição de resistência de aterramentos	87
Figura 88 - Medição de resistência de aterramentos elétricos	87
Figura 89 - Curva característica teórica de resistência de aterramento	88
Figura 90 - Resistências medidas hastes alinhadas para 1º caso	90
Figura 91 - Resistências medidas configuração em triângulo para 1º caso	91
Figura 92 – Resistências medidas hastes alinhadas e linha de tendência	93
Figura 93 - Resistências medidas configuração em triângulo e linha de tendência	94
Figura 94 - Resistências medidas configuração em quadrado e linha de tendência	95
Figura 95 - Resistências medidas configuração em circunferência e linha de tendência	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistividade do material de recobrimento	22
Tabela 2 - Resistividade de acordo com tipo de solo	24
Tabela 3 - Resistividade por percentual de umidade	24
Tabela 4 – Variação da resistividade pela temperatura	25
Tabela 5 - Respostas obtidas para o Exemplo 1	53
Tabela 6 - Resistividades obtidas através das medições do solo	57
Tabela 7 - Desvios relativos das medições de resistividade do sono	57
Tabela 8 - Desvios relativos corrigido das medições de resistividade do sono	58
Tabela 9 - Resistividades médias x espaçamento	58
Tabela 10 - Ponto 1 e ponto 2 extraídos da curva de resistividade x espaçamento	61
Tabela 11 - Valores auxiliares k , h/a e h	62
Tabela 12 – Resistências para espaçamento 3 de metros	75
Tabela 13 – Resistências para espaçamento 4 metros	75
Tabela 14 - Resistências espaçamento de 5 metros	76
Tabela 15 - Resistências medidas configuração em hastes alinhadas para 1º caso	90
Tabela 16 - Resistências medidas configuração em triângulo para 1º caso	91
Tabela 17 - Resistências medidas para configuração em hastes alinhadas	92
Tabela 18 - Resistências medidas para configuração em triângulo	93
Tabela 19 - Resistências medidas para configuração em quadrado	94
Tabela 20 - Resistências medidas para configuração em circunferência	95
Tabela 21 - Valores médios de resistências para cada sistema de aterramento	96
Tabela 22 - Resultados obtidos para as configurações de aterramentos	97
Tabela 23 - Comparativo porcentual para as configurações de aterramentos	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

DPS – Dispositivo de Proteção Contra Surtos

DR – Dispositivo Diferencial Residual

IEC – *International Engineering Consortium* (Consórcio Internacional de Engenharia)

IEEE – *Institute of Engineering Electrical and Electronic* (Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica)

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora aprovada pela ABNT

SPDA – Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

LISTA DE SÍMBOLOS

β – Coeficiente de divergência

α – Coeficiente de penetração

I_{choque} – Corrente de choque

N_G - Densidade de descargas atmosféricas para a terra

d_{eq} Distância equivalente

Ω – Ohms (Unidade de medida da Resistência)

$\Omega.m$ – Ohms metro (Unidade de medida de resistividade)

kg – Quilograma

R_T – Representação geral de resistência de sistema de aterramentos

$R_{1\text{haste}}$ - Resistência elétrica de uma haste

R_{eqO} - Resistência de aterramentos configuração em circunferência - método de curvas

$R_{\text{eq}\square}$ - Resistência de aterramentos configuração em quadrado - método de curvas

$R_{\text{eq}\Delta}$ - Resistência de aterramentos configuração em triângulo - método de curvas

R_C - Resistência de sistema de aterramentos configuração em circunferência

R_{HA} – Resistência de sistema de aterramentos configuração em hastes alinhadas

R_Q - Resistência de sistema de aterramentos configuração em quadrado

R_{Tr} - Resistência de sistema de aterramentos configuração em triângulo

R_{eq} - Resistência equivalente

ρ_a – Resistividade aparente

ρ – Resistividade do solo

ρ_{eq} – Resistividade equivalente

ρ_s – Resistividade superficial do solo

E_p – Tensão de passo em Volts (V)

E_t – Tensão de toque em Volts (V)

R_v - Valor verdadeiro do aterramento

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2. JUSTIFICATIVA	3
1.3. METODOLOGIA	4
2 REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 Conceitos gerais de aterramentos	5
2.2 Dispositivos de proteção que complementam o aterramento Elétrico	9
2.2.1 SPDA	10
2.2.2 DPS	12
2.2.3 DR	14
2.3 Choque elétrico	18
2.3.1 Tensão de passo	20
2.3.2 Tensão de toque	21
2.4 Resistividade do solo	23
2.5 Métodos de medição de resistividade do solo	26
2.6 Estratificação do solo	28
2.6.1 Métodos de estratificação	30
2.6.1.1 Método de duas camadas e método de Pirson	30
2.6.1.2 Métodos gráfico de Yokogawa	34
2.7 Resistividade aparente	40
2.8 Geometrias de sistemas de aterramentos	43
3. TOPOLOGIAS CLÁSSICAS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS	55
3.1 Delimitação do terreno	55
3.2 Medições de Campo	56
3.3 Estratificação do solo	59
3.3.1 Método de duas camadas por curva	60
4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	64
4.1 Hastes alinhadas	64
4.2 Triângulo	67
4.3 Quadrado	70
4.4 Circunferência	72
4.5 Variação de espaçamento, comprimento e diâmetro das hastes	75

5. IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA	77
5.1 Escavações das trincheiras.....	78
5.2 Solda de cabos e hastes.....	82
5.3 Instalação dos sistemas de aterramentos nas trincheiras	85
6. MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTOS	86
6.1 Método da queda de potencial.....	86
6.2 Resultados experimentais	89
6.2.1 Primeiro caso.....	89
6.2.2 Segundo caso	92
7. RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA TEÓRICA EXPERIMENTAL	97
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
8.1 Propostas para trabalhos futuros.....	102
REFERÊNCIAS	103
ANEXO A.....	105
ANEXO B	106

1. INTRODUÇÃO

As estatísticas mostram que a cada 50 mortes por raios no mundo, uma é no Brasil, o país campeão mundial em incidência de raios, atingido por 78 milhões de descargas atmosféricas por ano. No país, esse fenômeno mata em média 110 pessoas, deixam 200 feridos e um prejuízo de um bilhão de reais por ano. A maior parte das mortes está concentrada na área rural, que representa 26% dos casos e em segundo lugar nas residências com 21% dos casos (ELAT, 2020).

Para obter proteção contra correntes elétricas decorrentes de descargas atmosféricas é preciso de um sistema de aterramento que forneça um caminho seguro e de baixa impedância, assim provendo proteção para seres humanos, animais e bens materiais contra falhas na instalação elétrica.

Devido a constante modernização dos sistemas de energia elétrica tem-se exigido cada vez mais segurança, estabilidade e operação econômica. Um sistema de aterramento sólido é uma contramedida muito importante e fundamental para garantir a operação segura e confiável dos sistemas de energia e garantir a segurança do ser humano na situação de uma falha no sistema de energia; sendo fundamental para diminuir interferências eletromagnéticas. Desta forma, no estudo de sistemas de aterramentos elétricos é realizado comparações entre topologias e análise comparativa teórica-experimental dos resultados.

Nesse trabalho é apresentado os resultados teóricos e experimentais obtidos através das simulações computacionais e das construções das topologias clássicas: hastes alinhadas, quadrado, triângulo e circunferência, verificando-se qual destes sistemas oferecem os melhores caminhos para a passagem de corrente elétrica.

Este trabalho de conclusão de curso contribui para o desenvolvimento de conhecimento teórico e prático, considerando a realização de análises, contestações, comparações de resultados obtidos e a utilização de materiais e equipamentos necessários para realização de medições, aquisições de dados e comparações de resultados teóricos-experimentais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo teórico-experimental entre as topologias clássicas de aterramentos elétricos: hastes alinhadas, triângulo, quadrado e circunferência.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudo das Normas Regulamentadoras que regem o setor;
- Estudo sobre as técnicas e métodos básicos de aterramentos elétricos
- Medições de campo e estratificação do solo em estudo;
- Cálculo das resistências teóricas das topologias;
- Executar as configurações clássicas de aterramento;
- Medir as resistências dos sistemas clássicos de aterramentos;
- Analisar os resultados teóricos-experimentais das configurações clássicas de aterramentos;
- Apresentar as conclusões extraídas dos sistemas de aterramentos;

1.2. JUSTIFICATIVA

O trabalho busca contribuir como referencial para realização de futuros trabalho na área de aterramentos elétricos através de estudos e execuções de topologias clássicas de aterramento na prática. Considerando o desenvolvimento constante de tecnologias e equipamentos elétricos é perceptível a carência, quanto a estudos referentes aos sistemas de aterramentos, muito importante para que os sistemas de proteções funcionem de maneira adequada, como o Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas - SPDA e o Dispositivo de Proteção contra Surtos - DPS.

Este estudo tem como principal finalidade encontrar os melhores resultados dentre as topologias desenvolvidas e a comprovação da efetividade da análise teórica-experimental. Sobretudo, independentemente dos resultados obtidos, este projeto possui grande importância para a aprendizagem, na absorção de conhecimento teórico e prático na área de projetos de aterramentos.

1.3. METODOLOGIA

Para realização do estudo utilizou-se das normas ABNT NBR 5410/2004, ABNT NBR 5419/2015, ABNT NBR 15751/2013 e ABNT NBR 7117/2012 que regem a instalação, manutenção e medição do aterramento, e da literatura existente para implementação da pesquisa. O desenvolvimento deste trabalho obedece aos seguintes passos apresentados a seguir:

- Referencial Teórico;
- Topologias Clássicas de Sistemas de Aterramentos
 - Delimitação do Terreno;
 - Medições de Campo;
 - Estratificação do Solo;
 - Método de Pirson;
- Simulações Computacionais;
- Implementação Prática;
- Resultados de Resistências Experimentais;
- Análise Comparativa Teórica-Experimental e Conclusões.

Para o desenvolvimento da implementação prática e das simulações fez-se necessário à utilização dos seguintes equipamentos e ferramentas:

- Terrômetro EM4055: medição da resistividade e resistência do solo;
- Cavadeira articulada, picareta e enxadão: furação do solo;
- Hastes de cobre de 1,5 metros: construção dos sistemas de aterramentos;
- Cabo de Cobre de 5/8": interligação das hastes;
- Solda Exotérmica;
- Computadores e softwares para registro, análises e simulações dos resultados obtidos através dos dados coletados.

Somente o terrômetro EM4055 foi emprestado pelo IFG - Itumbiara, todos os demais equipamentos e ferramentas são de responsabilidade do estudante.

Para obtenção dos resultados práticos e teóricos, foram de suma importância todos os conteúdos e técnicas apresentados na disciplina de aterramentos, juntamente com os demais materiais disponibilizados nas literaturas estudadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos gerais de aterramentos

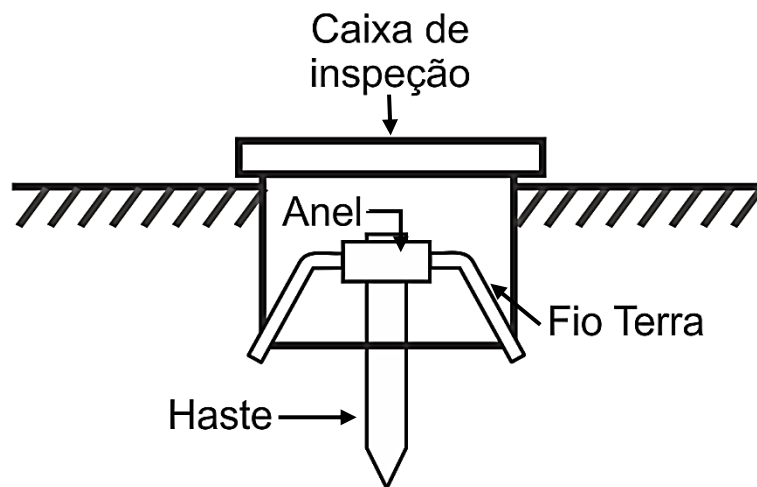
O aterramento elétrico é o responsável por fornecer caminhos de dispersão para correntes de falhas e descargas atmosféricas, a fim de estabilizar o potencial e atuar como um ponto de referência com zero potencial; assim garantindo a operação segura do sistema de energia e equipamentos elétricos, a segurança dos operadores do sistema de energia e outras pessoas.

No setor industrial, devido a grande quantidade de equipamentos elétricos, é de suma importância a existência de um aterramento adequado a instalação. Nos motores elétricos, por exemplo, suas carcaças são aterradas de modo a proporcionar um caminho de menor resistência para escoamento de correntes indesejadas e proteger tanto os equipamentos quanto aos indivíduos, caso a sua isolação seja comprometida.

Nas residências, por norma a maioria dos equipamentos elétricos utilizados possuem um pino central por onde é conectado ao sistema de aterramento com a função de proteger o equipamento e evitar que ocorra o choque elétrico, e a inexistência do sistema de aterramento ou a falta do pino do aterramento, quando se utiliza uma extensão com apenas dois pinos, por exemplo, pode colocar a vida do usuário em perigo. No Brasil tem-se vários casos de mortes por choque elétricos, nas residências destaca-se principalmente na utilização de máquinas de lavar, onde devido a utilização de equipamentos inadequados como extensões, a falta de um sistema de aterramento e falta de um sistema de proteção DR (dispositivo diferencial residual) muitos foram eletrocutados e alguns vieram a óbito, assim como o caso divulgado pelo ISTOÉ: de Fabiana Lucas, que morreu a caminho do Hospital Municipal Carlos Jereissati, em Mucambo (CE) no dia 13 de outubro de 2019 devido a descarga elétrica ao tentar ligar uma máquina de lavar.

O sistema de aterramento é obtido por dispositivos de aterramento enterrados no solo, sendo formado por um único condutor de metal ou um grupo de condutores de metais, a Figura 1 a seguir, ilustra um sistema de aterramento, composto por uma haste, fio terra, anel de ligação e caixa de inspeção

Figura 1 - Ilustração de componentes de um sistema de aterramento



Fonte: Autoria Própria

A parametrização correta é de suma importância para se obter um bom funcionamento do sistema, o que requer que o sistema seja projetado e executado por um profissional qualificado, habilitado e capacitado. Segundo (VISACRO, 2002) o aterramento pode ser classificado em três grupos principais:

- Aterramento de proteção: Proteger as pessoas contra choques elétricos por contato indireto, além de possibilitar um melhor funcionamento dos dispositivos de proteção presentes na instalação elétrica;
- Aterramento funcional: consiste na ligação à terra do condutor neutro do sistema elétrico, é através desse sistema que é garantido que o neutro possuirá 0 Volts, fornecendo uma referência “fixa” para tensão, contribuindo para o bom funcionamento dos equipamentos;
- Aterramento de trabalho: É uma instalação provisória usado em manutenção das instalações, como em linhas de transmissão e distribuição (NR10 – Instalações Energizadas). Tem por objetivo aterrar a rede de energia elétrica, protegendo contra uma eventual energização acidental, diminuindo o risco da ocorrência de acidentes elétricos na realização de uma manutenção elétrica.

Um sistema de aterramento também é classificado quando ao tipo de esquema, segundo a norma NBR 5410 podem ser do tipo TT, TN e IT. A primeira letra corresponde a alimentação em relação à terra, podendo ser:

- T = um ponto diretamente aterrado
- I = isolamento de todas as partes vivas em relação à terra ou aterramento de um ponto através de impedância.

A segunda letra corresponde a situação das massas da instalação elétrica em relação à terra, podendo ser:

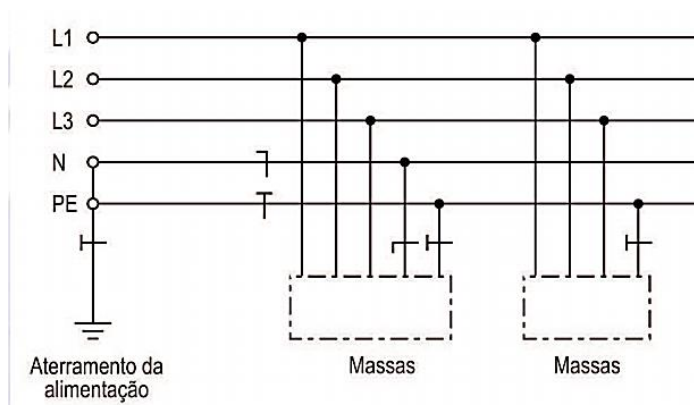
- T = massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de um ponto da alimentação;
- N = massas ligadas ao ponto da alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o ponto neutro);

Pode existir a presença de outras letras no sistema de aterramento, que definem a disposição do condutor neutro e de proteção combinadas em um único condutor (PEN), sendo definidos como:

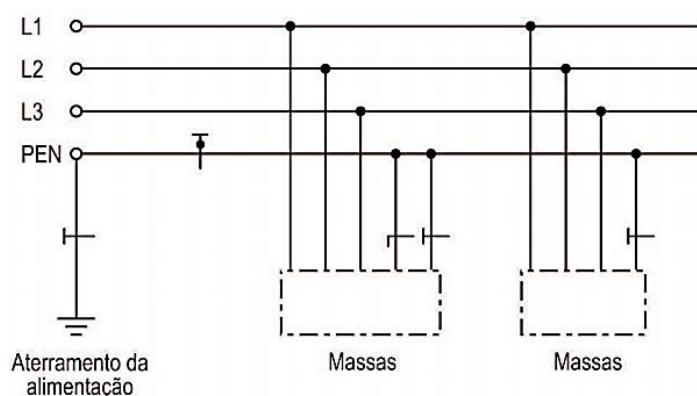
- S = funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos (PE);
- C = funções de neutro e de proteção combinadas em um único condutor (condutor PEN).

Ambos os esquema TN-S e TN-C possuem o ponto neutro diretamente aterrado, mas se diferenciam, pois no esquema TN-S ilustrado na Figura 2 o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos, já no esquema TN-C ilustrado na Figura 3 o condutor neutro e o condutor de proteção são combinados em um único condutor.

Figura 2 - Esquema TN-S

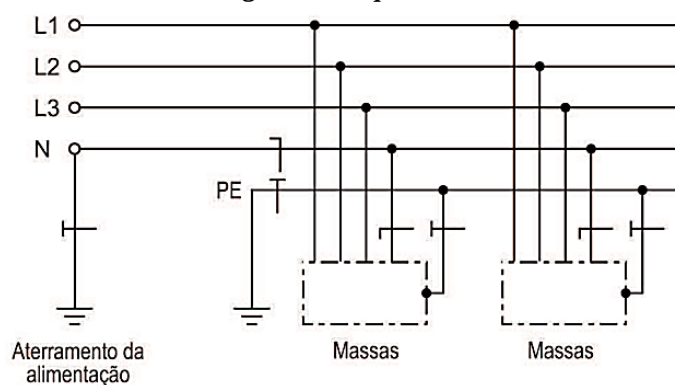


Fonte: Autoria Própria

Figura 3- Esquema TN-C

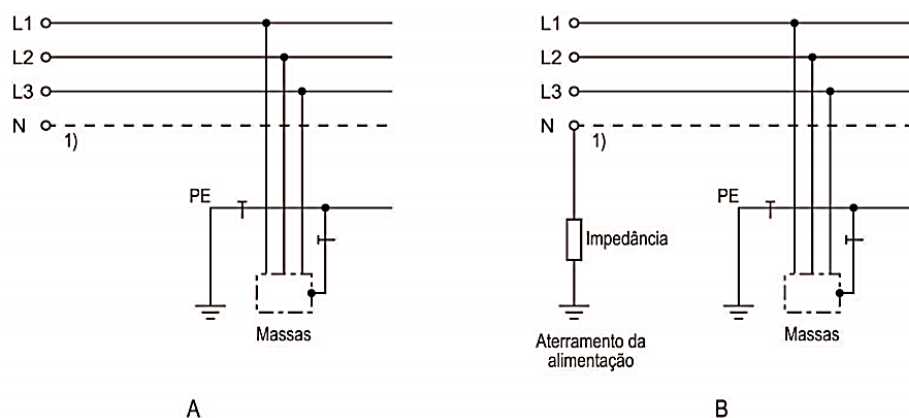
Fonte: Autoria Própria

Por outro lado, assim como é ilustrado a seguir, na Figura 4, o esquema TT possui um ponto da alimentação diretamente aterrado, estando as massas da instalação ligadas a eletrodo(s) de aterramento eletricamente distinto(s) do eletrodo de aterramento da alimentação

Figura 4 - Esquema TT

Fonte: Autoria Própria

No esquema IT ilustrado na Figura 5, todas as partes vivas são isoladas da terra (A) ou um ponto da alimentação é aterrado através de impedância (B).

Figura 5 - Esquema IT

Fonte: Autoria Própria

Além das atribuições mencionadas anteriormente, é necessário que o engenheiro eletricitista projetista disponha de arcabouço teórico e prático de modo a atender as normas vigentes e projetar um sistema seguro e eficiente, não basta somente saber executar a construção da topologia de aterramento, cabe ao profissional conhecimentos específicos sobre a realização da estratificação do solo em análise, saber usufruir das expressões matemáticas das configurações de aterramentos elétricos, a busca pela topologia mais adequada ao tipo de aterramento desejado, considerando as características do solo, a quantidade de hastes necessárias para construção, a distância mínima a ser respeitada, do diâmetro das hastes, entre outras análises dependentes do tipo de aterramento desenvolvido.

De modo geral um aterramento deve atender aos seguintes objetivos: obter uma baixa resistência de aterramento, manter potenciais dentro dos limites de segurança, proporcionar um caminho de escoamento para terra, usar a terra como retorno de corrente no sistema e escoar cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos;

Para construção de um sistema de aterramento faz-se necessário a utilização de materiais como hastes de aterramento, condutores de cobre nu, terminais de pressão ou kit para solda exotérmica, ferramentas para escavação das trincheiras como perfurador de solo, enxada, picareta, entre outros, equipamento de medição terrômetro e os equipamentos de proteção individual.

Sendo assim, um sistema de aterramento pode assumir inúmeras configurações, variando de uma simples hastes isolada até sistemas de grandes malhas interligadas, podendo variar a quantidade, o diâmetro e o comprimento das hastes e a distância entre elas, além da possibilidade de utilizar topologias diferentes (hastes alinhadas, triangulo, quadrado, circunferência, entre outras).

2.2 Dispositivos de proteção que complementam o aterramento Elétrico

Além do aterramento existem sistemas e dispositivos de proteção que complementam o sistema de aterramento. Entre eles, é apresentado o SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas), DR (Dispositivo Diferencial Residual) e o DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos).

2.2.1 SPDA

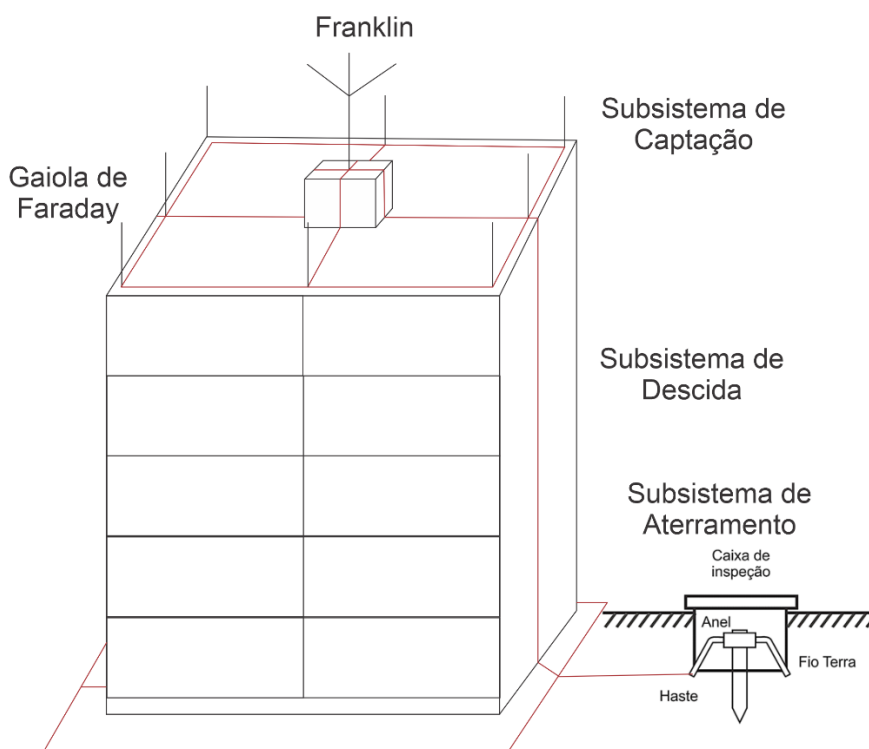
Segundo a ABNT NBR 5419 (Proteção contra descargas atmosféricas) o SPDA consiste em um sistema utilizado para reduzir danos físicos devido as descargas atmosféricas em uma estrutura e para que o SPDA funcione corretamente é necessário que a instalação possua um sistema de aterramento bem dimensionado. O SPDA é composto por 3 subsistemas, que são ilustrados na Figura 6.

Subsistema de captação: parte de um SPDA externo usando elementos metálicos como hastes, condutores em malha ou cabos em catenária, projetados e posicionados para interceptarem descargas atmosféricas.

Subsistema de descida: parte de um SPDA externo que tem como objetivo conduzir a descarga atmosférica do subsistema de captação ao subsistema de aterramento.

Subsistema de aterramento: parte de um SPDA externo que tem como objetivo conduzir e dispersar a descarga atmosférica no solo.

Figura 6 - Subsistemas de um SPDA



Fonte: Autoria Própria

A norma regulamentadora de segurança em instalações e serviços em eletricidade, estabelece que as instalações elétricas com potência superior a 75kW devem possuir e manter

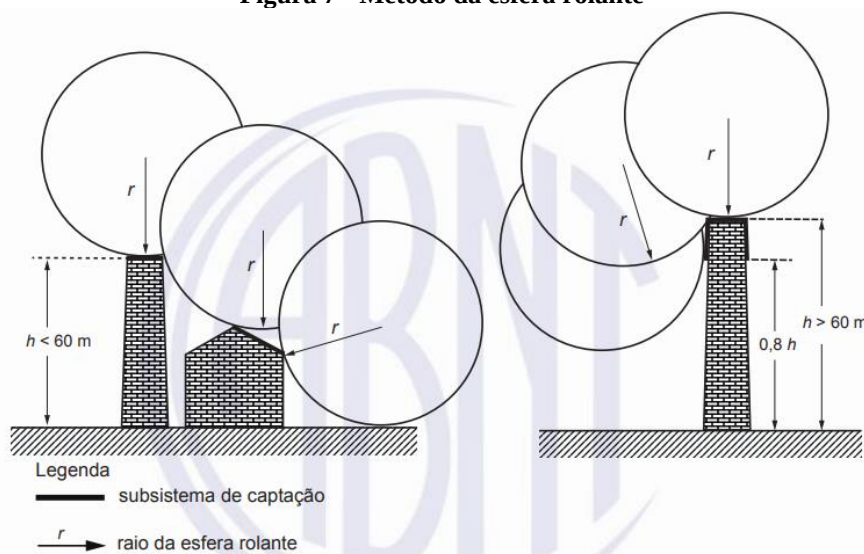
os prontos das instalações elétricas (PIE), no qual esses documentos exigem o relatório de inspeção do SPDA e do aterramento elétrico. Sendo assim, para potência superior a mencionada deve-se construir e manter em funcionamento o sistema SPDA.

Para o dimensionamento desses sistemas destacam-se três métodos, que são o método da gaiola de Faraday, o método de Franklin, ilustrados na Figura 6, e o método da esfera rolante ilustrado na Figura 7.

O método da gaiola de Faraday consiste de um sistema de captos formados por condutores horizontais que são interligados em forma de malha, sendo que quanto menor a distância entre os condutores maior será o nível de proteção obtida na estrutura. O método de Franklin é constituído por um captor no centro do edifício, que limita a sua aplicabilidade devido a sua área de captura ser menor que comparo ao método da gaiola de Faraday, é construído com intuito de proteger o volume de um cone, sendo que o topo do cone é localizado no captor.

O método da esfera rolante, ilustrado na figura 7, é o mais novo e consequentemente o menos utilizado, consiste em rolar-se uma esfera imaginária por todas as partes externas da edificação, o raio da esfera é definido de acordo com o nível de proteção desejado, os pontos onde a esfera tangencia a estrutura são considerados os locais onde a maior probabilidade de ocorrer descargas atmosféricas e são nesses locais onde devem ser instalados os captos (ABNT NBR 5419).

Figura 7 - Método da esfera rolante



Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015

Para tornar o sistema SPDA mais eficiente é utilizado a combinação de mais de um método, assim como ilustrado na Figura 6, sendo que o captor de Franklin é instalado no ponto mais alto do edifício e os captosres do método da gaiola de Faraday se localizam em volta do edifício, em suas extremidades.

2.2.2 DPS

O DPS ou dispositivo de proteção contra surtos, ilustrado na Figura 8, atua quando ocorre um aumento de forma brusca do valor da tensão elétrica, com o objetivo de proteger o sistema e os equipamentos. É composto por um varistor que é um resistor elétrico variável, no qual seu valor varia de acordo com a tensão, quando o surto acontece na rede, a tensão é extremamente alta, e quando essa tensão passa pelo DPS sua resistência tende a zero, assim oferecendo um caminho com menor oposição a passagem de corrente elétrica, dessa forma toda a energia é escoada pelo sistema de aterramento.

O surto elétrico pode ser definido como sendo um distúrbio na rede elétrica, que provoca uma variação brusca na curva senoidal da tensão elétrica, na maioria das vezes esses distúrbios são causados por descargas atmosféricas, mas também podem ser causados por apagões no momento do religamento da rede elétrica e por partidas de máquinas elétricas de grande porte.

Figura 8 – DPS modelo 5SD7



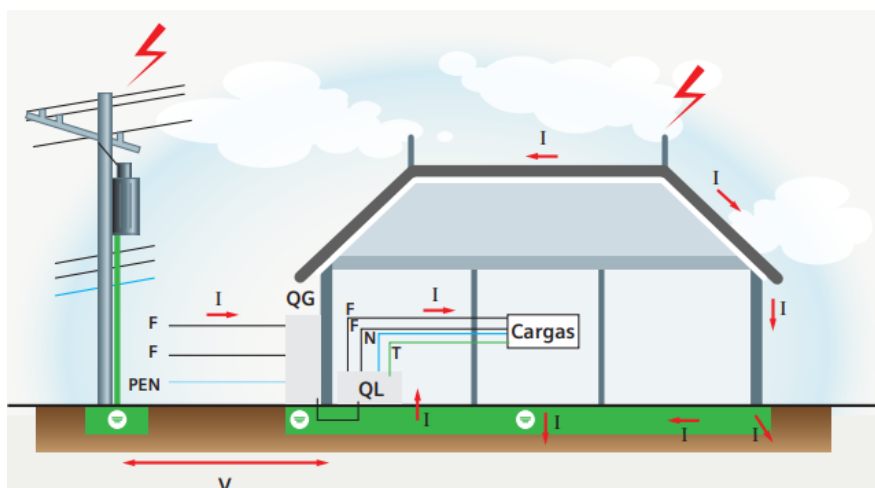
Fonte: Catálogo Siemens, 2017

O DPS como já mencionado é o dispositivo com a função de proteger as instalações elétricas e equipamentos contra as sobretensões transitórias e também escoar correntes de surto. Mas, para que o DPS atue corretamente, protegendo a instalação elétrica, é necessário que o sistema de aterramento e a equipotencialização da planta atuem corretamente. Esses sistemas

são responsáveis por coibir diferenças de potencial danosas, seja para segurança das pessoas, seja para o bom funcionamento dos equipamentos.

As sobretensões transitórias podem ser geradas através de descargas diretas ou descargas indiretas, como é ilustrado a seguir na Figura 9 e na Figura 10.

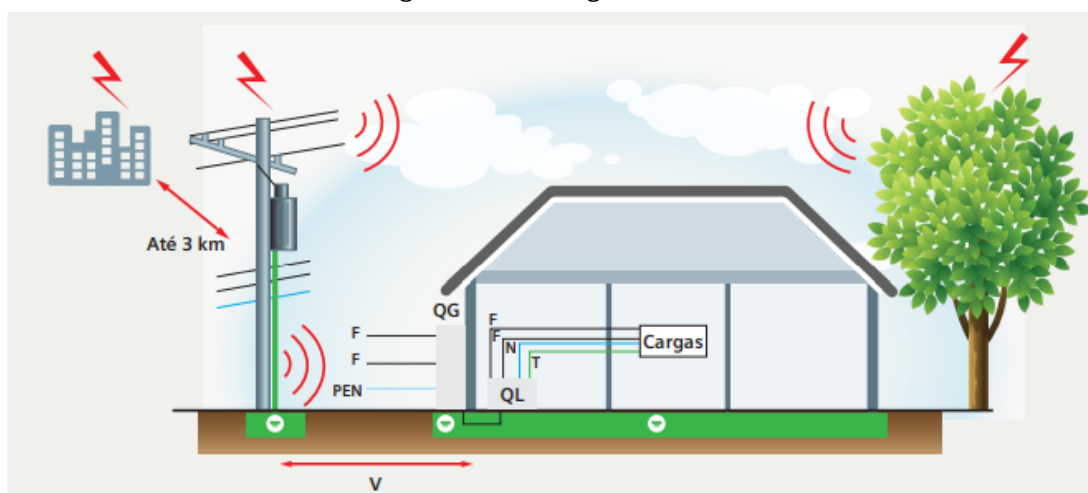
Figura 9 - Descargas diretas



Fonte: Catálogo Siemens, 2017

As descargas diretas ocorrem quando o raio cai diretamente sobre o imóvel ou em sua proximidade imediata, como na estrutura do prédio ou na própria rede elétrica. Embora seja naturalmente a situação de menor incidência estatística, é a mais violenta e que traz os maiores riscos, pois sua energia é muito grande, uma vez que 50% dos raios ultrapassam os 25kA de pico e 1% chegam a ultrapassar valores de 180kA (Catálogo Siemens, 2017).

Figura 10 - Descargas indiretas



Fonte: Catálogo Siemens, 2017

As descargas indiretas são muito presentes no setor residencial, onde o surto de tensão chega ao imóvel através da rede de alimentação elétrica, resultante de um raio que caiu em uma

região distante. Em outras palavras, não é necessário que o raio caia sobre a sua casa para provocar danos. Do ponto da descarga elétrica direta até um raio de 3 km de distância, as instalações elétricas poderão sofrer influências nocivas por efeito eletromagnético o que pode levar à perda de equipamentos eletroeletrônicos (Catálogo Siemens, 2017).

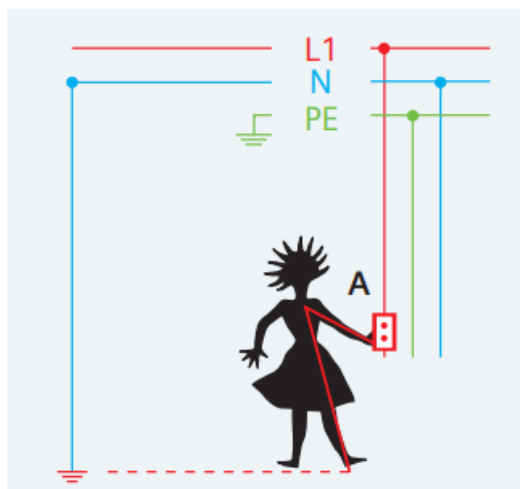
Para avaliação da necessidade de possuir um DPS é analisado a densidade de descargas atmosféricas para a terra (N_G) de uma região ou área, que corresponde a quantidade de descargas por km² em um ano. Este parâmetro é contemplado nas condições de influências externas catalogadas na ABNT NBR 5419-2.

2.2.3 DR

Os dispositivos DR (diferencial residual) protegem contra os efeitos nocivos das correntes de fuga à terra garantindo uma proteção eficaz tanto aos usuários quanto aos animais domésticos. Diferentemente do SPDA e do DPS o dispositivo diferencial residual não necessita do sistema de aterramento para que funcione, mas para garantir a proteção das pessoas contra choques elétricos é importante que ambos trabalhem em conjunto, um complementando o outro.

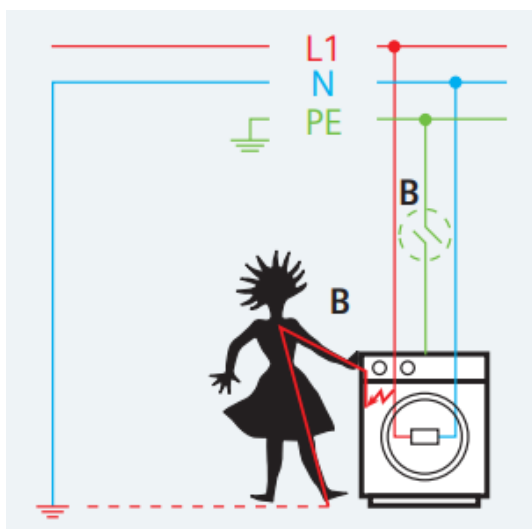
A destruição de equipamentos e ocorrência de incêndios muitas vezes são causadas por correntes de fuga à terra em instalações mal feitas, subdimensionadas, com má conservação ou envelhecimento. Essas correntes causam riscos às pessoas, provocam o aumento de consumo de energia, aquecimento indevido, destruição da isolação, podendo até ocasionar incêndios, e os dispositivos DR foram criados para monitorar e interromper esse tipo de corrente.

As correntes de fuga que provocam riscos às pessoas são causadas por duas circunstâncias, do contato direto ou do contato indireto, a seguir na Figura 11 e ilustrado um exemplo de contato direto, na Figura 12 é ilustrado um exemplo de contato indireto e na figura 13 é ilustrado um exemplo de atuação do DR.

Figura 11 - Corrente de fuga por contato direto

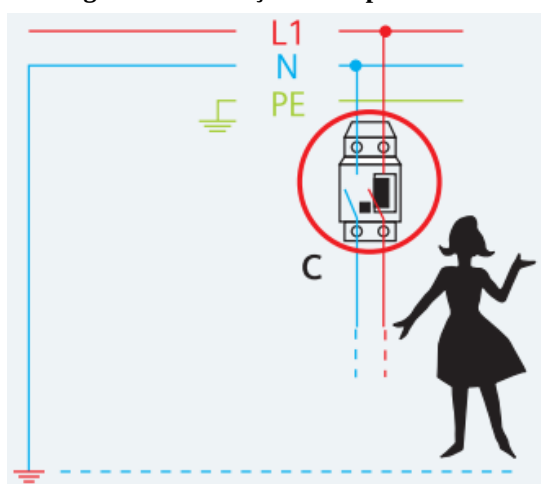
Fonte: Catalogo Siemens, 2019

O contato direto ocorre quando há falha de isolamento ou remoção das partes isolantes, com toque acidental da pessoa em parte energizada.

Figura 12- Corrente de fuga por contato indireto

Fonte: Catalogo Siemens, 2019

O contato indireto ocorre através do contato da pessoa com a parte metálica (carcaça do aparelho), que estará energizada por falha de isolamento, com interrupção ou inexistência do condutor de proteção (terra - PE).

Figura 13 – Atuação do dispositivo DR

Fonte: Catálogo Siemens, 2019

Assim que identificado a corrente de fuga o DR atua quase que instantaneamente, protegendo as pessoas e os animais que tiverem contato acidental com a parte energizada da rede elétrica.

A seguir na Figura 14 é ilustrado o Disjuntor DR 5SU1 da Siemens, que é um dispositivo de seccionamento mecânico que além da proteção contra corrente de fuga, também atua na ocorrência de sobrecarga e de curto circuito.

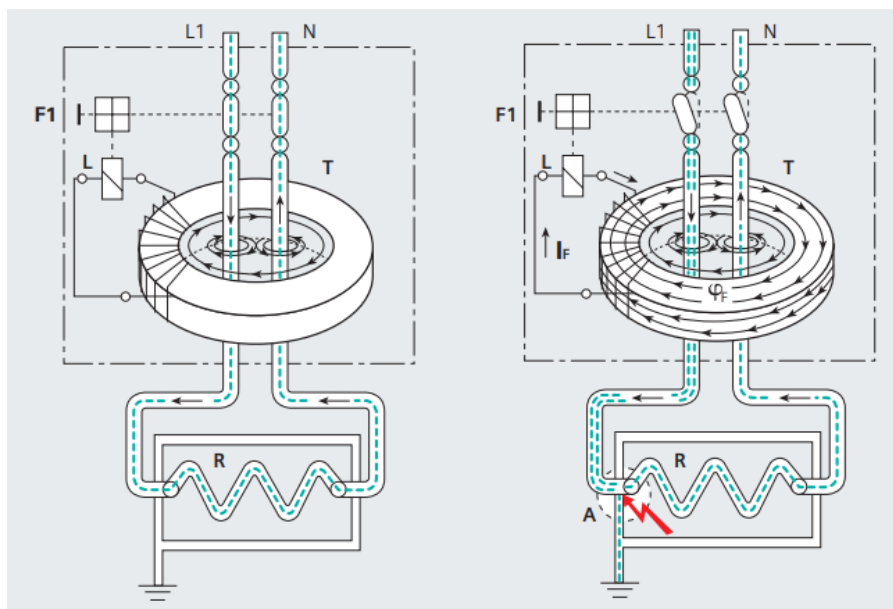
Figura 14 - DR 5SU1

Fonte: Catálogo Siemens, 2019

Os dispositivos DR de corrente residual nominal máxima de 30mA são usados para a proteção pessoal contra os efeitos dos choques danosos. Já os Disjuntores DR com uma corrente residual máxima acima de 30mA, tais como 100mA, 300mA e 500mA são usados como proteção preventiva contra incêndio no caso de falha de isolamento (Catálogo Siemens, 2019).

Segundo a Lei de Kirchhoff a somatória vetorial das correntes que passam pelos condutores ativos no núcleo toroidal é praticamente igual a zero (existem correntes de fuga naturais não relevantes). A seguir, na Figura 15 é ilustrado o princípio de funcionamento do DR, que é baseado de modo que quando ocorrer uma corrente de fuga a somatória será diferente de zero, o que irá induzir no secundário uma corrente residual que provocará, por eletromagnetismo, o disparo do Dispositivo DR (desligamento do circuito), desde que a fuga atinja a zona de disparo do Dispositivo DR, conforme norma ABNT NBR NM 61008 o Dispositivo DR deve operar entre 50% e 100% da corrente nominal residual - I_n (Catálogo Siemens, 2019).

Figura 15 - Conceito de funcionamento do DR



Fonte: Catálogo Siemens, 2019

- $F1$ – Dispositivo DR de proteção contra a correntes de fuga à terra
- T – Transformador diferencial toroidal
- L – Disparador eletromagnético
- R – Carga
- A – Fuga à terra por falha da isolação
- ϕ_F – Fluxo magnético da corrente residual
- I_F – Corrente secundária residual induzida

Segundo a ABNT NBR 5410 a instalação do DR é obrigatória nos alimentadores de áreas perigosas, que são listados no item 5.1.3.2.2 da norma NBR 5410 e apresentados a seguir:

1. Em circuitos que sirvam a pontos de utilização situados em locais que contenham chuveiro ou banheira.
2. Em circuitos que alimentam tomadas situadas em áreas externas à edificação.
3. Em circuitos que alimentam tomadas situadas em áreas internas que possam vir a alimentar equipamentos na área externa.
4. Em circuitos que sirvam a pontos de utilização situados em cozinhas, copas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e demais dependências internas normalmente molhadas ou sujeitas a lavagens.

2.3 Choque elétrico

Choque elétrico é a reação do organismo quando há passagem de corrente elétrica através do corpo, utilizando o mesmo como condutor. Os efeitos do choque elétrico são variáveis, o seu acontecimento pode causar até mesmo a morte, dependendo de fatores como o percurso e a intensidade da corrente elétrica no corpo, tempo de duração, frequência elétrica, tensão, umidade da pele e resistência do ser humano em contato (Kindermann, 1995). A seguir, na Figura 16 é ilustrado um quadro com registro das consequências da corrente elétrica no corpo humano.

Figura 16 - Reações no corpo humano devido ao choque elétrico

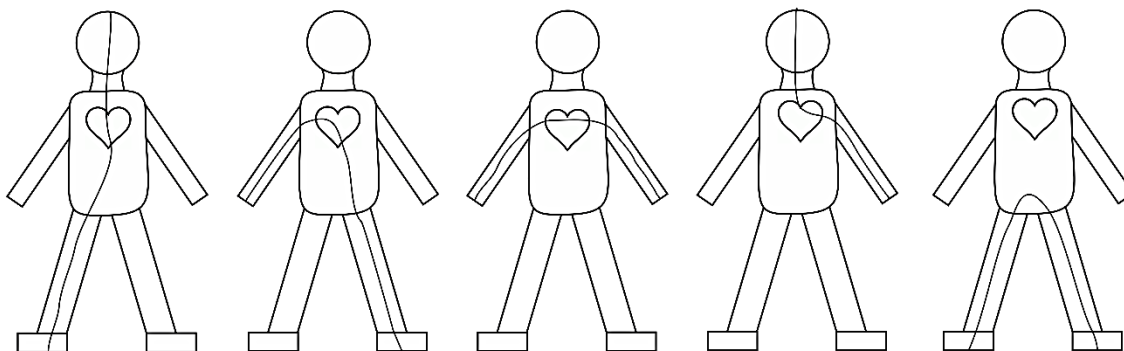
Corrente Elétrica (mA)		Reação Fisiológica	Consequências	Salvamento	Resultado mais Provável
CA	CC				
<25	<80	1mA: Sensação de formigamento 5 a 15mA: Contrações musculares 15 a 20mA: Contração violenta e impossibilidade de soltar eletrodo. Problemas respiratórios	Proximo a 25mA pode haver asfixia e morte aparente	Respiração artificial	Restabelecimento
25 a 80	80 a 300	Sensação insuportável Contração muscular violenta Asfixia	Morte Aparente	Respiração artificial	Restabelecimento
>80	>300	Asfixia imediata Fibriação ventricular Alterações musculares Queimaduras	Morte Aparente	Respiração artificial Massagem cardiaca	Se levado ao Hospital e feita desfibrilação: Restabelecimento
Correntes da ordem de Amperes		Queimaduras Necrose dos tecidos Asfixia imediata Fibriação ventricular	Morte Aparente Dependendo da extensão: sequelas e morte	Respiração artificial Massagem cardiaca Tratamento hospitalar	Recuperação difícil Atrofia muscular Morte

Fonte: Kindermann 1998 – adaptado

Quando uma pessoa entra em contato direto com um equipamento energizado (desconsiderando a intervenção de equipamentos de proteção) haverá passagem de corrente elétrica através do corpo, e seu valor dependerá diretamente da resistência do caminho

percorrido. A seguir, na Figura 17 é ilustrado os possíveis caminhos por onde a corrente elétrica pode circular pelo corpo.

Figura 17 - Possíveis caminhos para circulação de corrente elétrica no corpo



Fonte: Autoria Própria

Evidentemente os experimentos para determinação de correntes que causariam uma fibrilação ventricular não poderiam ser realizados em seres humanos e, por isso vários animais como porcos, cães, bezerros e ovelhas foram utilizados no estudo para determinação dos níveis de tolerabilidade do organismo à corrente elétrica. A partir desses experimentos, Charles Dalziel chegou-se a uma importante equação que possibilita calcular a máxima corrente elétrica suportada por uma pessoa de 50 kg ou mais de modo que não ocorra a fibrilação durante o tempo em que a pessoa estiver submetida ao choque, que é apresentada a seguir: (ABNT NBR 15751, 2013)

$$I_{\text{choque}} = \left(\frac{116}{\sqrt{t}} \right) \text{ [A]} \quad (1)$$

Sendo I_{choque} a corrente em miliamperes (mA) e t em segundos (s);

A determinação dos níveis de corrente que percorrerá o corpo, quando a contato direto, pode ser determinada pela lei de ohms, por exemplo, hipoteticamente se o nível de tensão for de 127Vca e a resistência do corpo de 1000 ohms conforme mencionado em ABNT NBR 15751, 2013, tem-se que o nível de corrente será de:

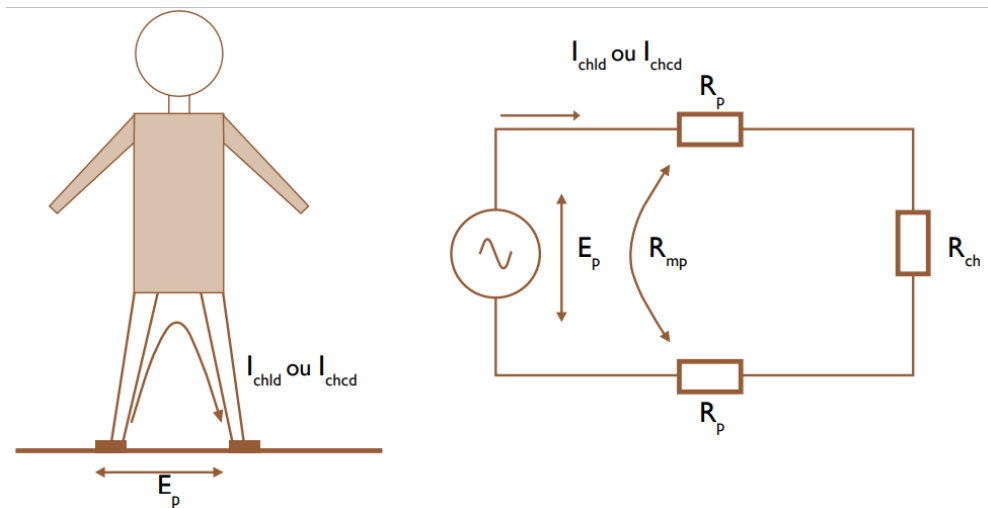
$$I_{\text{choque}} = \left(\frac{127}{1000} \right) = 127\text{mA(rms)}$$

2.3.1 Tensão de passo

Na ocorrência de uma falta para à terra, a corrente de curto circuito é direcionada para o aterramento, o que gera tensões no solo. Sendo assim a malha de aterramento deve ser projetada de forma que essas tensões não atinjam valores superiores aos permissíveis. Essa tensão é chamada de tensão de passo que pode ser definida como sendo a diferença de potencial entre um pé e o outro de uma pessoa.

De acordo com a ABNT NBR 15751 de 2013, uma pessoa pode ser representada por um circuito elétrico equivalente resistivo, ilustrado na Figura 18, dessa forma sendo possível obter a equação que se define a máxima tensão de passo permissível.

Figura 18 - Conceito de tensão de passo



Fonte: ABNT NBR 15751, 2013

A máxima tensão de passo permissível pelo corpo humano é dada pela equação:

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

Onde:

- R_{ch} é a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1.000 Ω , expressa em ohms (Ω);
- R_p é a resistência própria de cada pé com relação ao terra remoto, expressa em ohms (Ω);
- R_{mp} é a resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms (Ω);
- I_{chcd} é a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

As resistências própria e mútua dos pés são dadas por:

$$R_p = \left(\frac{\rho_s}{4b} \right) * C \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$R_{mp} = \left(\frac{\rho_s}{2\pi * R_p} \right) \quad [\Omega] \quad (4)$$

Onde:

- R_{mp} é a resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms (Ω);
- b é igual a 0,083 m (raio do disco metálico – modelo estabelecido para o pé humano);
- d_p é a distância entre os dois pés (1 m);
- ρ_s é a resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega \times m$), conforme Tabela 2 (caso não haja recobrimento, utilizar resistividade da camada superficial do solo).
- C é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento (Equação 10)

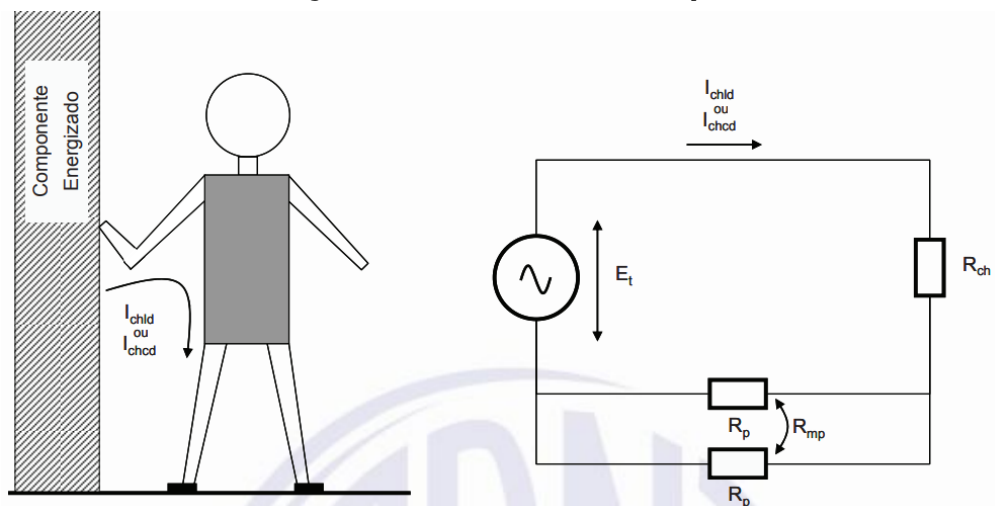
Considerando R_{mp} desprezível quando comparada a R_p , tem-se:

$$E_p = [R_{ch} + 6 * \rho_s * C] * I_{chcd} \quad [V] \quad (5)$$

2.3.2 Tensão de toque

A tensão de toque ocorre quando uma pessoa toca em um componente energizado, não importando se foi por um curto ou longo período de tempo. De acordo com a ABNT NBR 15751 de 2013, uma pessoa e um componente energizado podem ser representados por um circuito elétrico equivalente resistivo, ilustrado na Figura 19, dessa forma sendo possível obter a equação que se define a máxima tensão de toque permissível.

Figura 19 - Conceito de tensão de toque



Fonte: ABNT NBR 15751, 2013

A máxima tensão de toque permissível pelo corpo humano é dada por:

Curta duração:

$$E_{tcd} = \left[R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \right] * I_{chcd} \text{ [V]} \quad (6)$$

Considerando $R_{mp} \ll R_p$ tem-se:

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 * \rho_s * C) * I_{chcd} \text{ [V]} \quad (7)$$

Para choques de longa duração a equação é semelhante, mudando apenas a corrente utilizada no cálculo, que passa a ser a corrente de longa duração:

$$E_{tcd} = \left[R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \right] * I_{chcd} \text{ [V]} \quad (8)$$

Considerando $R_{mp} \ll R_p$ tem-se:

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 * \rho_s * C) * I_{chcd} \text{ [V]} \quad (9)$$

A seguir na Tabela 1 é mostrado os valores de resistividade para cada tipo de material de recobrimento e na Equação 10 é ilustrado a expressão para cálculo do fator de redução C.

Tabela 1 - Resistividade do material de recobrimento

Material	Resistividade $\Omega \times m$	
	seco	molhado
Brita nº 1, 2 ou 3		3 000
Concreto	1 200 a 280 000	21 a 100
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10×10^3 a 6×10^6

Fonte: ABNT NBR 15751, 2009

Equação para cálculo do fator de redução C que é utilizado para realização do cálculo da tensão de passo e da tensão de toque:

$$C = 1 - 0,106 * \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 * h_s + 0,106} \right] \quad (10)$$

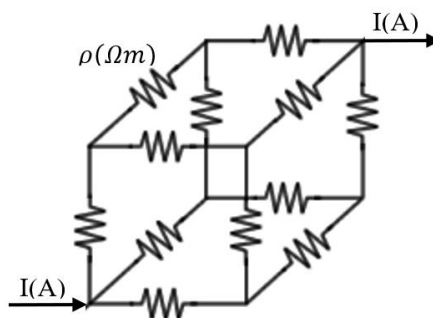
Onde:

- ρ_1 é a resistividade da 1ª camada ($\Omega \times m$)
- ρ_s é a resistividade do revestimento da camada superficial (em $\Omega \times m$), conforme Tabela 1
- h_s é a espessura da camada de revestimento superficial (m)

2.4 Resistividade do solo

O dimensionamento do sistema de aterramento é dependente das propriedades elétricas do solo, pois, o sistema ficara imerso na terra. A resistividade do solo é definida como a resistência elétrica entre as faces de um cubo de solo homogêneo, com arestas iguais a 1m, e sua unidade é o $\Omega.m$ (Visacro, 2002). A seguir, na Figura 20 é ilustrado um cubo com faces iguais, de valor ρ , onde tem-se que a corrente I (A) é injetada de um lado, atravessa as faces do cubo e consequentemente tem-se a mesma corrente I (A) no outro lado do cubo.

Figura 20 – Representação de um cubo homogêneo



Fonte: Autoria Própria

A resistividade de um material não está relacionada ao seu tamanho e forma geométricos, mas é relevante apenas para sua propriedade. No entanto, sua resistência é determinada pelo tamanho e forma geométricos. A condutividade de um material é a recíproca da resistividade, medida em S/m. A resistividade do solo é dependente de suas características e composição. A resistividade de um solo geralmente varia de 100 a 1000 $\Omega.m$, sendo muito superior por exemplo ao cobre, que apresenta resistividade média de $0,167\mu\Omega.m$ (VISACRO, 2002).

A seguir na Tabela 2 é mostrado os valores das resistividades do solo de acordo com sua composição.

Tabela 2 - Resistividade de acordo com tipo de solo

Tipos de solo	Faixa de resistividades Ωm
Água do mar	menor que 10
Alagadiço, limo, húmus, lama	até 150
Água destilada	300
Argila	300 – 5 000
Calcário	500 – 5 000
Areia	1 000 – 8 000
Granito	1 500 – 10 000
Basalto	a partir de 10 000
Concreto	Molhado ^a : 20 – 100 Úmido: 300 – 1 000 Seco: 3 000 – 2 000 000

Fonte: ABNT NBR 7117, 2012.

A resistividade do solo muda em uma ampla faixa e é influenciada pelo tipo de solo, teor de água retida, temperatura, tipo e teor de sal dissolvido na água retida, mistura de diferentes solos na área, tamanho e distribuição de partículas do solo, essas variáveis devem ser levadas em consideração na realização de um projeto de aterramento.

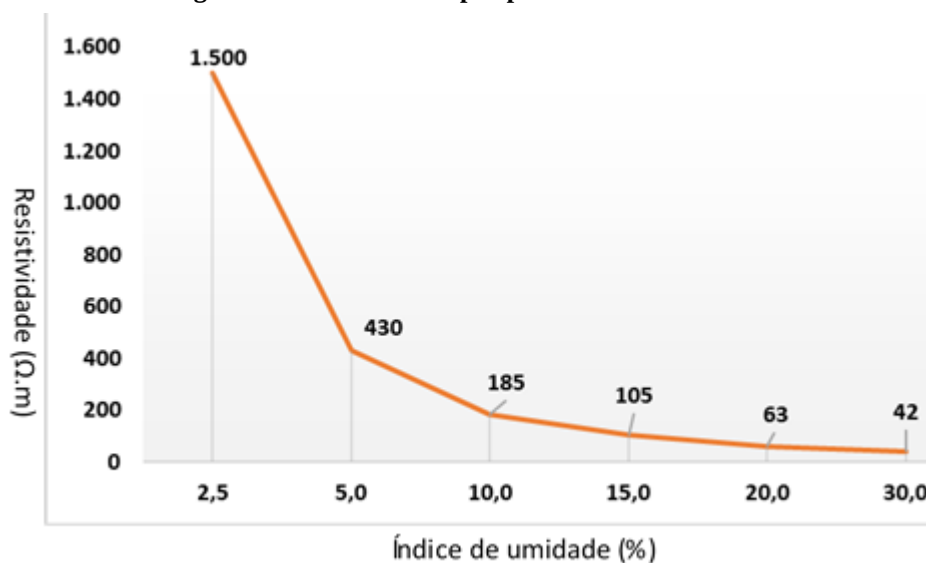
A resistividade de um terreno é inversa a porcentagem de umidade contida do mesmo, para que a eletrólise se estabeleça é essencial a existência da água e dos sais minerais que vão prover os íons da mistura (VISACRO, 2002). Sendo assim quanto mais úmido for o terreno menor será seu valor de resistividade, ou vice-versa, de modo que em períodos chuvosos a resistividade do solo será menor que nos períodos de seca. A seguir, através da Tabela 3 e da Figura 21 é possível observar o comportamento da influência descrita anteriormente, da umidade sobre a resistividade do solo arenoso.

Tabela 3 - Resistividade por percentual de umidade

Índice de umidade (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$) Solo Arenoso
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: Kindermann 1998

Figura 21 - Resistividade por percentual de umidade



Fonte: Kindermann 1998 – adaptado

Assim como é possível perceber, na Tabela 3 leva-se em consideração uma faixa de índice de umidade de 0 a 30% por peso, pois o solo no estado natural dificilmente atingira umidade superior a 40% por peso ou será completamente seco (Kindermann, 1998).

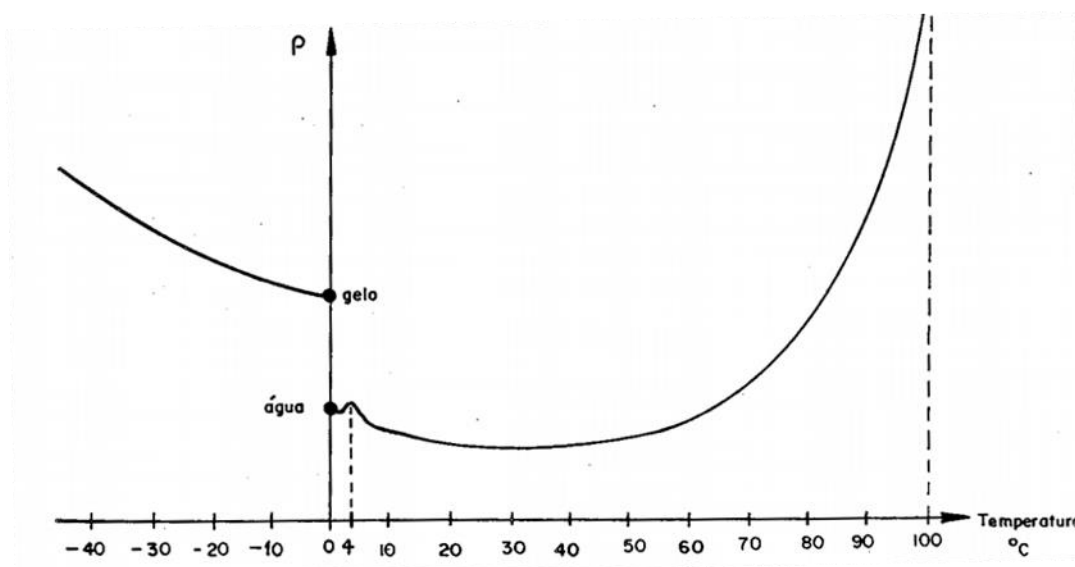
Considerando o mesmo solo utilizado para construção da Tabela 3 e Figura 21, a seguir na Tabela 4 e Figura 22 agora são ilustrados o comportamento da resistividade do solo de acordo com a variação de temperatura.

Tabela 4 – Variação da resistividade pela temperatura

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

Fonte: Kindermann, 1998

Figura 22 - Resistividade x temperatura



Fonte: Kindermann 1998

Analisando a Figura 22, ilustrada acima, percebe-se o comportamento da resistividade, para temperaturas elevadas, valores superiores a 90°C a resistividade aumenta bruscamente, ocorrendo formação de bolhas internas e assim dificultando a condução de corrente elétrica pelo solo. Observa-se também que resistividade aumenta gradativamente para temperaturas inferiores a 0°C, pois a água contida no solo tende a congelar.

2.5 Métodos de medição de resistividade do solo

Entre os diversos métodos para realização da medição da resistividade do solo, os mais conhecidos e aceitos devido a eficiência das informações fornecidas são: a configuração de Wenner e a configuração de Schlumberger, sendo que para a realização da medição utiliza-se 4 eletrodos em ambos os casos (ABNT NBR 7117, 2012).

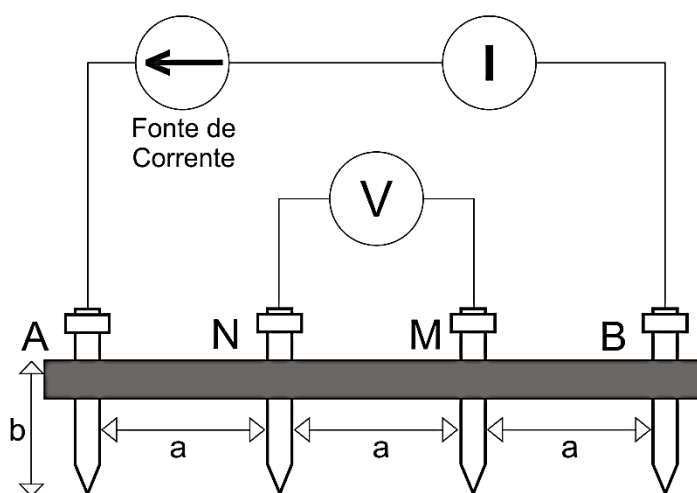
A metodologia adotada por Frank Wenner em 1915 consiste em localizar os eletrodos em uma linha reta e igualmente espaçados, conforme ilustrado na Figura 23. Dessa forma, os eletrodos de corrente e tensão devem ser progressivamente separados de um ponto central fixo, chamado ponto de exploração máxima. Para calcular a resistividade do solo, a expressão matemática usada é (ABNT NBR 7117, 2012):

$$\rho = \left(\frac{4\pi \cdot R \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \right) \quad (11)$$

Onde R corresponde ao valor lido do terrômetro ou à razão entre a diferença da tensão e da corrente injetada, se cada um desses valores foi medido independentemente: “ a ” é a distância de separação entre os eletrodos e “ b ” a profundidade do enterro dos eletrodutos. Quando a profundidade “ b ” é pequena, se comparada à distância “ a ”, ou seja, $a > 20 * b$, o valor da resistividade pode ser calculado como: $\rho = 2 * \pi * R * a$;

Os eletrodos A e B (externos) são utilizados para injetar a corrente e os eletrodos M e N (centrais) servem para medir a diferença de potencial, que, ao ser dividida pela corrente injetada, fornece um valor de resistência R .

Figura 23 - Configuração de Wenner



Fonte: Autoria Própria

No método de Schlumberger, assim como de Wenner, os eletrodos de emissão de corrente e de medição de tensão estão localizados em uma linha reta. A variante desse arranjo resulta em que a separação entre os eletrodos é, embora simétrica, desigual para a correspondente entre os eletrodos de tensão e entre os eletrodos de corrente, conforme a Figura 24.

Os eletrodos de medição devem estar localizados próximos aos seus equivalentes de emissão, aumentando assim a tensão lida pelo equipamento, o que é uma vantagem do método, uma vez que os valores muito baixos, típicos da aplicação de métodos de grandes separações de Wenner diminui a confiabilidade do valor gerado pelo instrumento, porque em alguns casos ele tende a se aproximar de sua própria precisão. Assim, em medições nas quais uma exploração é planejada em grandes profundidades, é recomendado o uso do método Schlumberger. Utiliza-se também quando os aparelhos de medição são pouco sofisticados (Moreno Ospina, 2007).

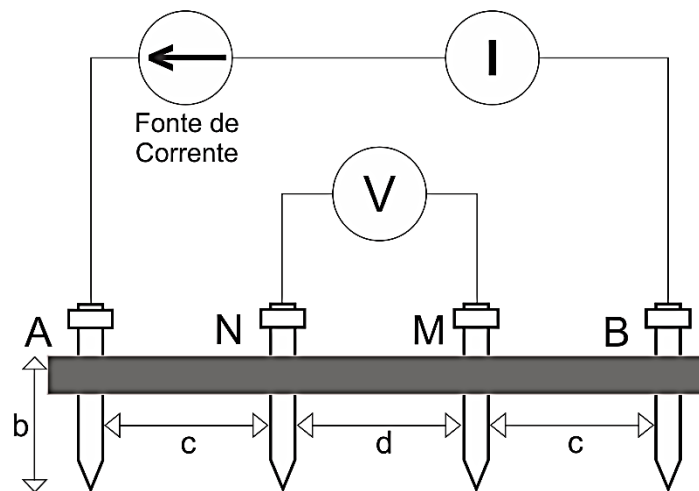
Apesar de o método apresentar grandes vantagens sobre outros métodos comumente usados, sua aplicabilidade também é limitada pela potência do instrumento, que determinará a capacidade de injeção de corrente e medição de tensão. O procedimento para obter o modelo de terreno consiste em separar progressivamente os eletrodos em torno de um ponto central permanente, chamado ponto de exploração máxima.

Se a profundidade “b” do eletroduto for pequena comparada as separações “d” e “c”, então a resistividade do solo pode ser calculada pela seguinte equação (ABNT NBR 7117, 2012):

$$\rho = \left[\pi * \frac{d(c + d)}{c} \right] * R; \quad (12)$$

Sendo que: “R” é o valor lido pelo terrômetro, “c” é separação entre os eletrodutos de corrente a sua correspondente de tensão, “d” é a separação entre os eletrodutos de tensão e “b” a profundidade das hastes no solo.

Figura 24 - Configuração de Schlumberger

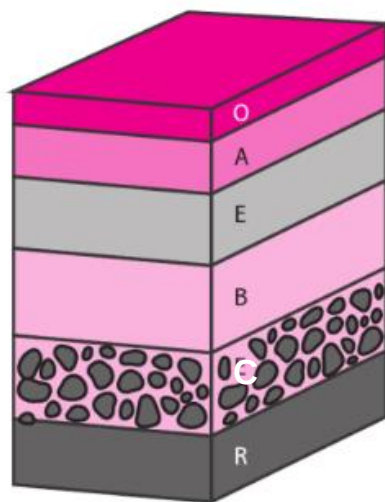


Fonte: Autoria Própria

2.6 Estratificação do solo

O solo é um sistema complexo, possui uma configuração que deve ser vista além de sua camada superficial, os solos evoluídos possuem várias camadas sobrepostas, denominadas horizontes, na sua composição as camadas mais comumente presente são ilustradas a seguir, na Figura 25: (Schwanke, 2013)

Figura 25 – Horizontes de um perfil de um solo



Fonte: Schwanke, 2013 – modificado

- O – Horizonte caracterizado pelo acúmulo de matéria orgânica (decomposta ou não) sobre o solo mineral.
- A – Horizonte com elevada atividade biológica, em que se encontra uma mistura de matéria orgânica com frações minerais.
- E – Horizonte mineral com cores mais claras, devido a perda de argila, óxidos, ferros ou matéria orgânica.
- B – Horizonte mineral caracterizado pelo acúmulo de argila e baixo teor de matéria orgânica.
- C – Material inconsolidado, pouco afetado pelos organismos, mas que pode estar bem intemperizado (regolito).
- R – Horizonte constituído por camada mineral coesa, rochas (material de origem).

Devido ao solo ser composto por várias camadas, que são formados pela ação simultânea de processos físicos, químicos e biológicos, faz-se necessário a realização da estratificação do solo, onde cada camada possuirá seu valor de resistividade de acordo com a profundidade.

A medição de resistividade do terreno é realizada seguindo a configuração de Wenner ou de Schlumberger, o resultado se torna melhor com o aumento do número de medições, por isso geralmente são realizadas em várias direções: horizontal, vertical e nas diagonais. Após, é necessário realizar a média dos valores obtidos nas várias direções medidas, mas antes é verificado o desvio padrão dos valores obtidos, os que possuem desvio superior a 50% da média são descartados e após é feita uma nova média dos valores para cada espaçamentos de medição.

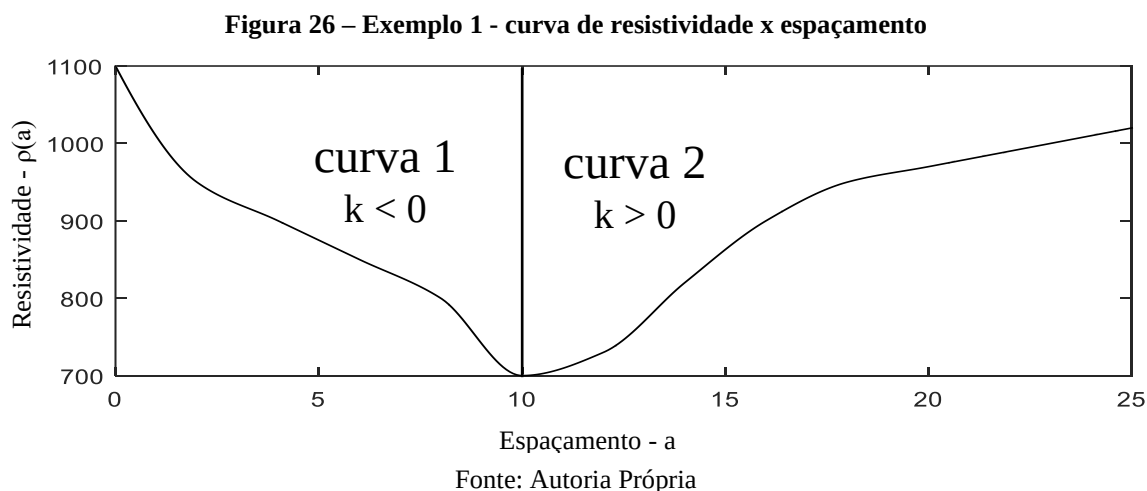
2.6.1 Métodos de estratificação

Entre os métodos de estratificação destaca-se o método de duas camadas, o método de Pirson e o método gráfico de Yokogawa. O método de duas camadas não será tratado separadamente, pois está incluso na explicação do método de Pirson.

2.6.1.1 Método de duas camadas e método de Pirson

O método de Pirson nada mais é do que uma extensão do método de duas camadas, que utiliza-se da estratégia de dividir a curva $\rho(a)$ x a em vários trechos ascendentes e descendentes, permitindo que seja analisado como uma sequência de curvas de solo equivalentes a duas camadas, a seguir é apresentado o passo a passo para realização de uma estratificação segundo o método de Pirson.

Após as medições, com os valores médios plota-se a curva $\rho(a)$ x a , essa curva pode assumir um comportamento crescente, decrescente ou ambos em uma única curva. Através dessa curva verifica-se o coeficiente de reflexão: k , que será negativo para uma curva decrescente e positivo para uma curva crescente. A seguir na Figura 26 tem-se um exemplo de uma curva de resistividade x espaçamento, a qual assume comportamento decrescente na parte 1 e crescente na parte 2.



Para se obter o coeficiente de espaçamento é necessário escolher arbitrariamente dois valores de espaçamentos pertencentes ao intervalo da curva em análise. Para curvas decrescentes o valor do coeficiente de reflexão é obtido utilizando a seguinte equação:

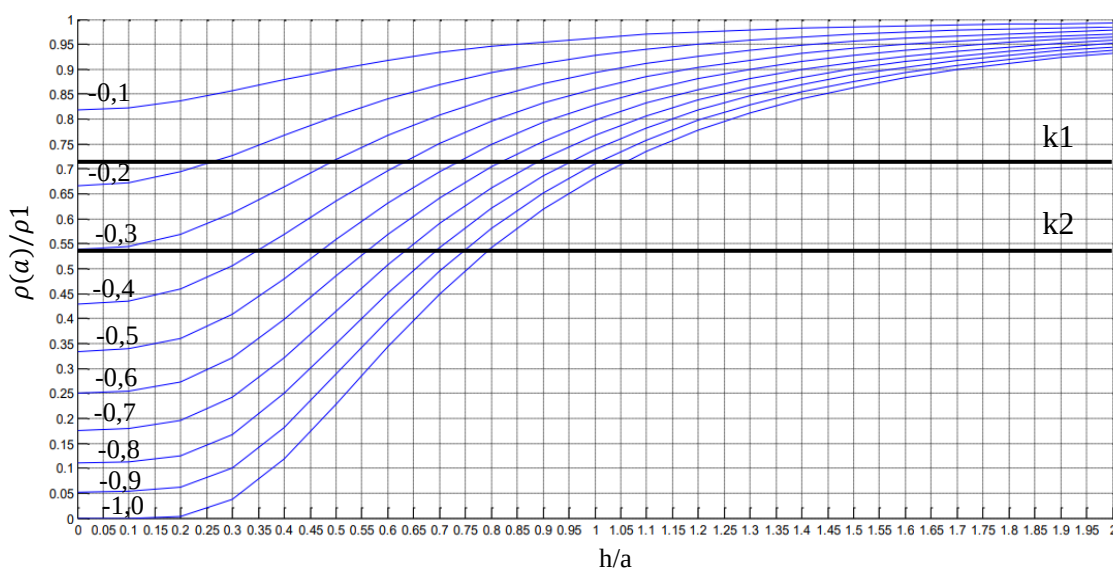
$$k_{(negativo)} = \frac{\rho(a)}{\rho} \quad (13);$$

Onde $\rho(a)$ é a resistividade referente ao ponto de um dos espaçamentos escolhidos e ρ é o valor de resistividade para o espaçamento no ponto inicial de cada trecho da curva (para o primeiro trecho a resistividade no ponto 0 é obtida prolongando a curva com auxílio de programas computacionais). Para curvas crescentes o valor do coeficiente de reflexão é obtido através da equação inversa, ilustrada a seguir:

$$k_{(\text{positivo})} = \frac{\rho}{\rho(a)} \quad (14)$$

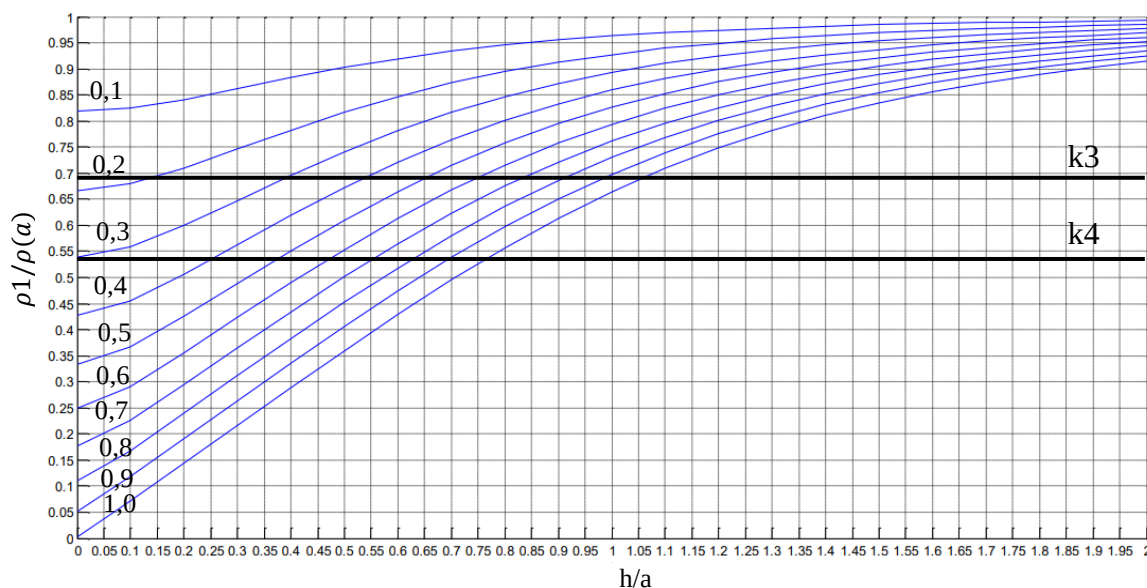
Utiliza-se os valores de $k_1, k_2 \dots k(n)$ obtidos (sendo n um número inteiro e maior que 0), entra-se nas curvas teóricas correspondentes e traça-se as linhas paralelas ao eixo da abscissa, estas retas cortam as curvas distintas de k . Tem-se as curvas de k podem ser negativas ou positivas, assim como é ilustrado na Figura 27 e na Figura 28. Traçado as linhas paralelas, procede-se a leitura de todos os valores específicos k e h/a correspondentes.

Figura 27 - Curvas de k negativo



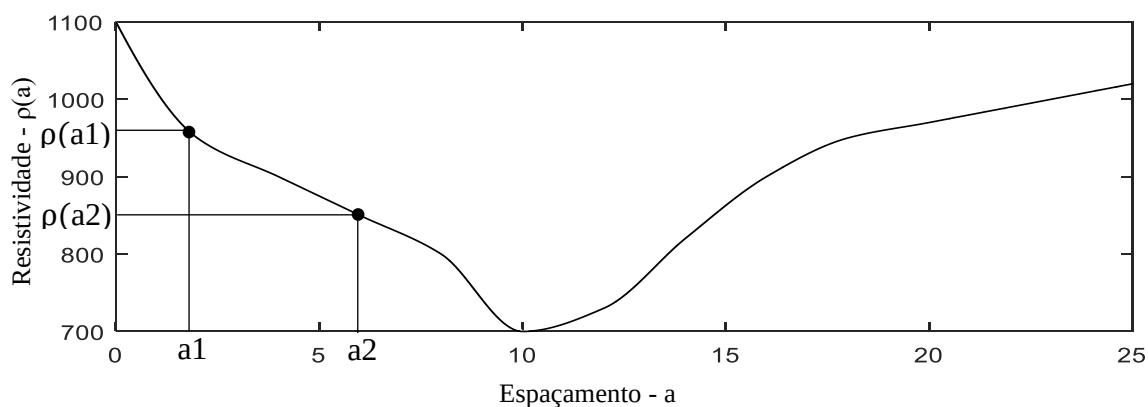
Fonte: Própria autoria

Figura 28 - Curvas de k positivo



Fonte: Própria autoria

A seguir, é ilustrado na Figura 29 os pontos de espaçamentos a_1 e a_2 , escolhidos arbitrariamente, e através da curva extraí-se $\rho(a_1)$ e $\rho(a_2)$, utilizados para obtenção de k_1 e k_2 .

Figura 29 – Pontos de espaçamentos a_1 e a_2 na curva de resistividade x espaçamento

Fonte: Autoria Própria

Para o primeiro trecho da curva, do exemplo da Figura 26, tem-se que $k_1 = \frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$ e $k_2 = \frac{\rho(a_2)}{\rho_1}$ e utiliza-se das curvas de k negativo ilustrado na Figura 27 para obter os valores específicos K e h/a correspondentes. Após, multiplica-se todos os valores de h/a encontrados pelos valores de espaçamentos. Plota-se as curvas de $K \times h$ no mesmo gráfico e observa-se o ponto de intersecção (extraí-se da intersecção os valores de $k_{1(intersecção)}$ e $a_{1(intersecção)}$) e

registra seus valores de k e h , assim sendo possível obter o valor de resistividade do próximo trecho. Assim tem-se a resistividade ρ_2 é:

$$\rho_2 = \rho_1 * \frac{1+k_1(intersecção)}{1-k_1(intersecção)} \quad (15)$$

$$a_{1(intersecção)} = d1 = h1 \quad (16)$$

Obs.: Caso o sistema possui-se apenas duas camadas, a estratificação do solo terminaria nesse ponto, para estratificação de solos com mais de duas camadas, segue o passo a passo apresentado a seguir.

É determinado a abscissa do ponto de inflexão no segundo trecho da curva. O Ponto de transição at é obtido analisando a curva e será utilizado para obter a profundidade da próxima camada “h2”. Considerando o segundo trecho da curva $[\rho(a) \times a]$, deve-se achar a resistividade equivalente vista pela terceira camada. Assim, estima-se a profundidade da segunda camada ($h2$), aplicando-se a expressão matemática do método de Lancaster - Jones, tem-se:

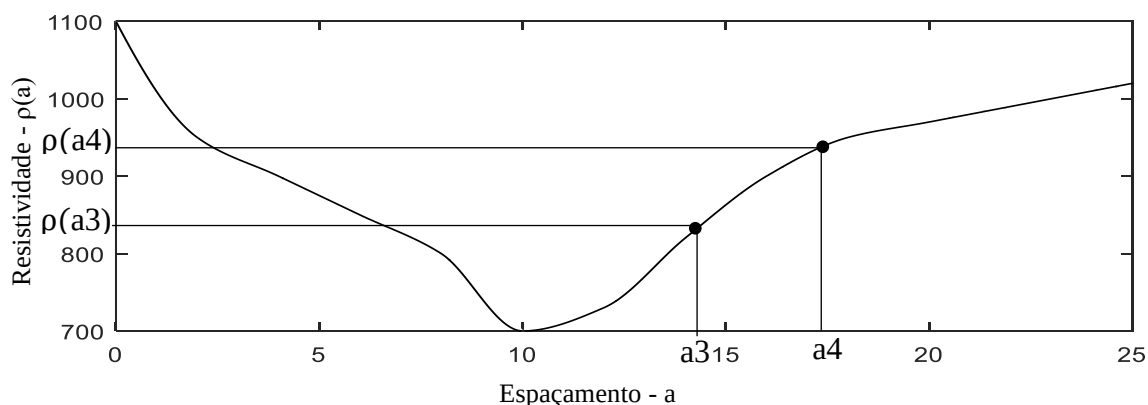
$$h2 = d1 + d2 = 2/3*at \quad (17)$$

Em posse de $d2$, para se obter o valor de resistividade media equivalente, utiliza-se a equação de Hummel:

$$\rho_2^1 = \frac{d1 + d2}{\left(\frac{d1}{\rho_1} + \frac{d2}{\rho_2}\right)} \quad (18)$$

No próximo passo, ilustrado na Figura 30, é escolhido arbitrariamente dois espaçamentos $a3$, $a4$ pertencentes ao segundo trecho e através da curva extraí-se $\rho(a3)$ e $\rho(a4)$.

Figura 30 - Pontos de espaçamentos $a3$ e $a4$ na curva de resistividade x espaçamento



Fonte: Autoria Própria

Pelo comportamento da curva determina-se o sinal de K para o segundo trecho, que no exemplo da Figura 26 é positivo, com isso tem-se que $k3 = \frac{\rho_2^1}{\rho(a3)}$ e $k4 = \frac{\rho_2^1}{\rho(a4)}$.

Para o exemplo da Figura 26 utiliza-se das curvas de k positivo ilustrado na Figura 28 para obter os valores específicos K e h/a correspondentes. Após, multiplica-se todos os valores de h/a encontrados pelos valores de espaçamentos. Plota-se as curvas de $k \times h$ no mesmo gráfico e observa-se o ponto de intersecção (extraí-se da intersecção os valores de $k_{2(intersecção)}$ e $a_{2(intersecção)}$) e registra seus valores. Assim tem-se a resistividade ρ_3 .

$$\rho_3 = \rho_2^1 * \frac{1+k_{2(intersecção)}}{1-k_{2(intersecção)}} \quad (19)$$

$$a_{2(intersecção)} = d2 = h2 \quad (20)$$

Obs.: Caso o solo possua mais camadas utiliza-se do mesmo passo a passo apresentado do método de Pirson para encontrar os valores de resistividade das demais camadas ($\rho_3^2, \rho_4, \rho_4^3, \rho_5 \dots$).

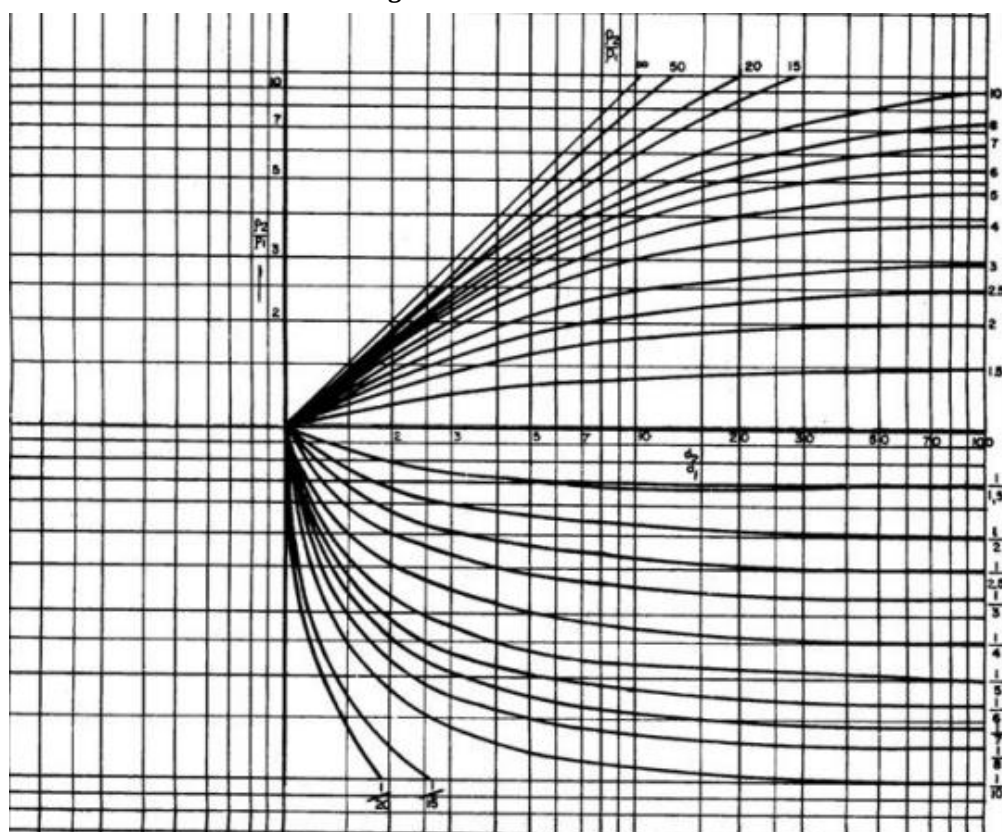
2.6.1.2 Métodos gráfico de Yokogawa

Além do método de duas camadas e do método de Pirson, entre os mais conhecidos tem-se o método gráfico de Yokogawa, é um método puramente gráfico que usa translados de curvas. Com este método é possível efetuar a estratificação do solo em várias camadas horizontais com razoável aceitação. A origem do método, baseia-se na logaritmização da expressão obtida do modelo do solo de duas camadas que é ilustrado na Equação 21.

$$\log \left[\frac{\rho(a)}{\rho_1} \right] = \log \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1+(2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4+(2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right\} \quad (21)$$

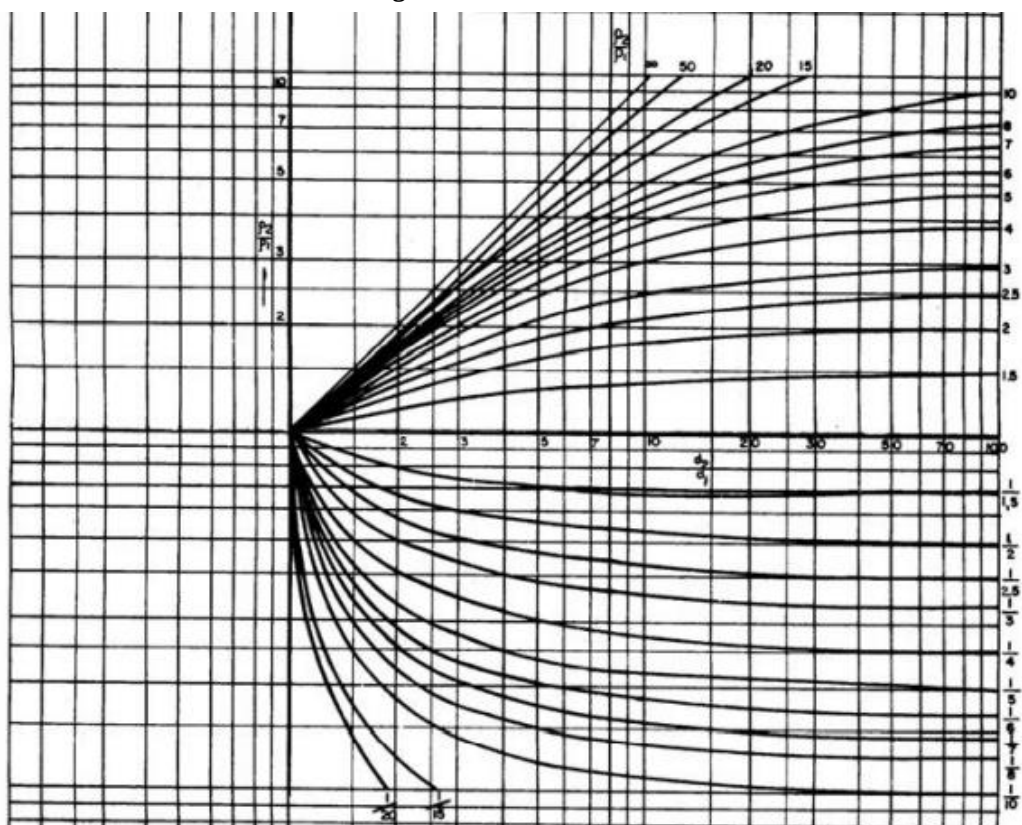
Desta forma, obtêm-se uma família de curvas teóricas de $\log \left[\frac{\rho(a)}{\rho_1} \right]$ em função de $\frac{h}{a}$ para uma série de valores de k dentro de toda sua faixa de variação. Fazendo o traçado da família das curvas teóricas, em um gráfico com escala logarítmica, log-log, tem-se as Curvas Padrão e Curvas Auxiliares que são disponibilizadas nas páginas 51 e 52 na Norma técnica da CELG NTC-60 de Março/2008 e ilustradas respectivamente, na Figura 31 e na Figura 32.

Figura 31 - Curvas Padrão



Fonte: CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. 2008

Figura 32 - Curvas Auxiliares

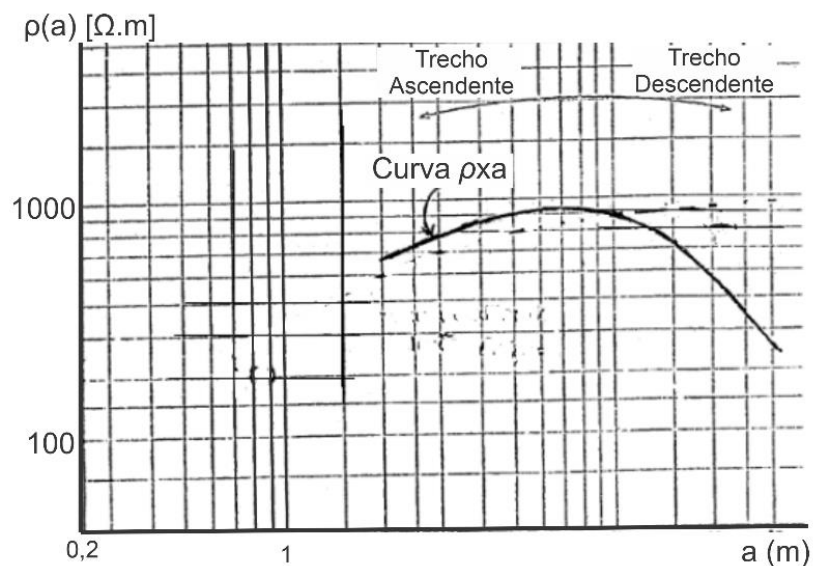


Fonte: CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. 2008

A estratificação de um solo pelo método gráfico de Yokogawa segue o passo a passo descrito a seguir:

- 1º Passo: Traçar em papel transparente a curva $\rho(a) \times a$ em escala logarítmica, assim como é ilustrado na Figura 33, a seguir:

Figura 33 – Curva $\rho(a) \times a$ em escala logarítmica

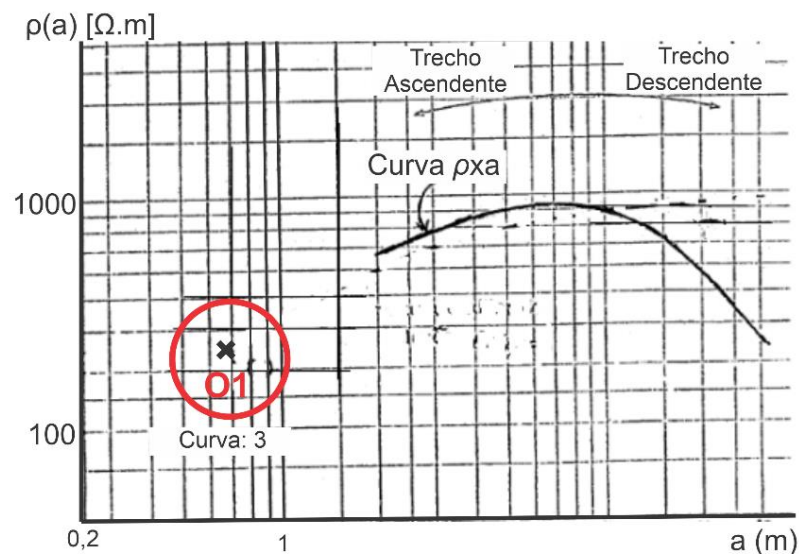


Fonte: Autoria Própria

- 2º Passo: Dividir a curva $p(a) \times a$ em trechos ascendentes e descendentes.
- 3º Passo: Desloca-se o primeiro trecho da curva $\rho(a) \times a$ sobre a Curva Padrão, até obter o melhor casamento possível das curvas, mantendo-se os eixos paralelos.
- 4º Passo: Demarca-se no gráfico da curva $p(a) \times a$, o ponto de origem ($\rho(a)/p_1 = 1$ e $h/a = 1$) da CURVA PADRÃO, e obtendo-se assim o pólo O1.

A seguir, é ilustrado a Figura 34 que foi construída a partir do 2º passo, o 3º passo e o 4º passo, onde é mostrado a divisão da curva em trechos ascendentes e descendentes e a demarcação do polo O1 no primeiro trecho da curva $\rho(a) \times a$ obtida através da curva padrão:

Figura 34 - curva $\rho(a) \times a$ – demarcação do polo O1



Fonte: Autoria Própria

Das Curvas Padrão da Figura 31, a curva que proporcionou o melhor casamento com o primeiro trecho da curva em análise, da Figura 34, foi a de relação $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 3$.

- 5º Passo: Lê-se o ponto O1, os valores de ρ_1 e h_1 .

Analisando o ponto O1 da curva, ilustrada na Figura 34, obtém-se os seguintes valores de ρ_1 e h_1 :

$$\rho_1 = 350 \, \Omega.m;$$

$$h_1 = 0,67 \, m;$$

- 6º Passo: Calcula-se ρ_2 pela relação pela relação ρ_2/ρ_1 obtida no terceiro passo.

Até este passo foram obtidos ρ_1 , h_1 e p_2 , para continuar o processo é necessário fazer a análise gráfica do outro trecho sucessor da curva $p(a) \times a$.

Através da relação $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 3$ obtida no 3º passo e do valor de ρ_1 obtido no 5º passo é calculado o valor de ρ_2 .

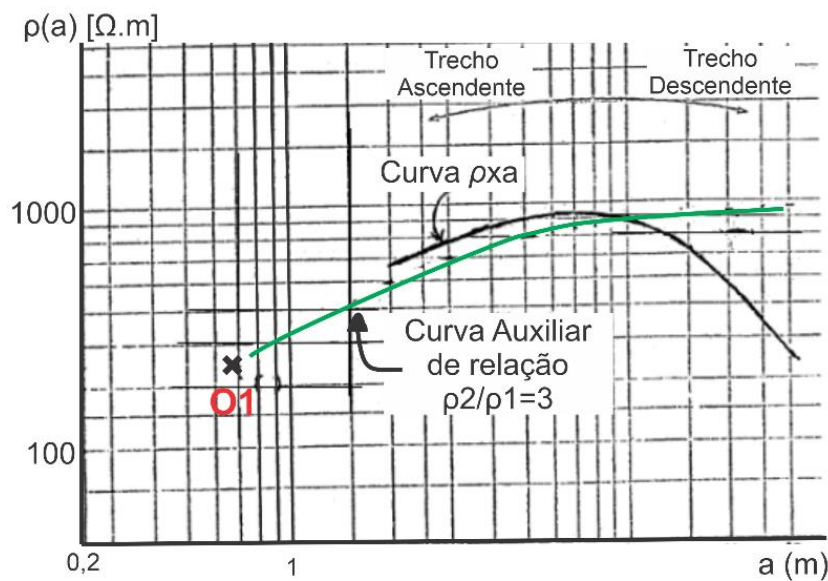
$$\rho_2 = 3 * \rho_1$$

$$\rho_2 = 3 * 350 = 1050 \, \Omega.m.$$

- 7º Passo: De posse da marcação do pólo O1, leva-se a curva $\rho(a) \times a$ as Curvas Auxiliares. Faz-se o pólo O1 coincidir com o ponto de origem das Curvas Auxiliares. Em seguida, traça-se de outra cor a Curva Auxiliar, obtida no terceiro passo, sobre a curva $\rho(a) \times a$.

A seguir, na Figura 35 é ilustrado uma curva na cor verde traçada a partir da Curva Auxiliar de relação $\rho_2/\rho_1 = 3$ ilustrada na Figura 32.

Figura 35 - curva $\rho(a) \times a$ e curva auxiliar

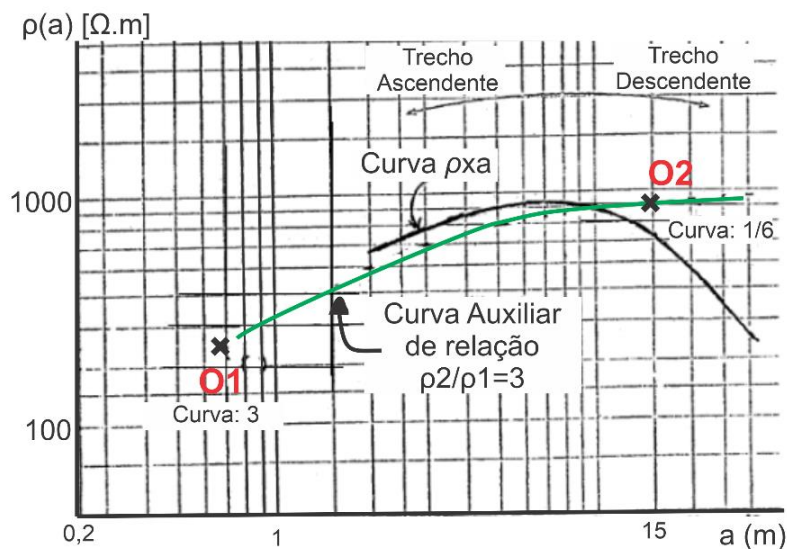


Fonte: Autoria Própria

- 8º Passo: Movimentando-se a curva $\rho(a) \times a$ sobre as Curvas Padrão, de forma que a Curva Auxiliar caminhe pelo ponto de origem da Curva Padrão até conseguir o melhor casamento do segundo trecho da curva $\rho(a) \times a$ com a Curva Padrão.
- 9º Passo: Feito o casamento das curvas, demarca-se o ponto O2 no gráfico $\rho(a) \times a$, coincidente com o ponto de origem da Curva Padrão.

A seguir, na Figura 36 é ilustrado o ponto O2, obtido através do casamento do segundo trecho da curva $\rho(a) \times a$ com a Curva Padrão, seguindo corretamente as instruções do 8º passo e do 9º passo.

Figura 36 – Curva $\rho(a) \times a$ com a demarcação do ponto O2



Fonte: Autoria Própria

Das Curvas Padrão da Figura 31, a curva que proporcionou o melhor casamento com o segundo trecho da curva em análise da Figura 36 foi a de relação $\frac{\rho_3}{\rho_2} = \frac{1}{6}$.

- 10º Passo: Lê-se no ponto do pólo O2 os valores de ρ_2^1 e h_2 .

Analisando o ponto O2 da curva ilustrada na Figura 36, obtém-se os seguintes valores de ρ_2^1 e h_2 :

$$\rho_2^1 = 900 \, \Omega.m$$

$$h_2 = 15 \, m$$

- 11º Passo: Calcula-se a resistividade da terceira camada ρ_3 pela relação fornecida no oitavo passo.

Através da relação $\frac{\rho_3}{\rho_2} = \frac{1}{6}$ obtida no 8º passo e do valor de $\rho_2^1 = 900 \, \Omega.m$ obtido no 10º passo é calculado o valor de ρ_3 .

$$\rho_3 = \rho_2^1 * \frac{1}{6};$$

$$\rho_3 = 900 * \frac{1}{6} = 150 \, \Omega.m$$

Obs.: Havendo mais trechos da curva $\rho(a) \times a$, deve-se repetir o processo a partir do sétimo passo.

2.7 Resistividade aparente

Um solo com várias camadas apresenta resistividades diferente para cada sistema de aterramento, visto que a passagem de corrente elétrica do sistema de aterramento para o solo depende da composição do solo com suas respectivas camadas, da geometria do sistema de aterramento e do tamanho do sistema de aterramento.

Um solo pode conter “n” camadas, o que significa que cada camada assumirá um valor de resistividade distinto. Dessa forma, sendo necessário encontrar a resistividade representante da interação do solo com o sistema de aterramento, conhecida como resistividade aparente.

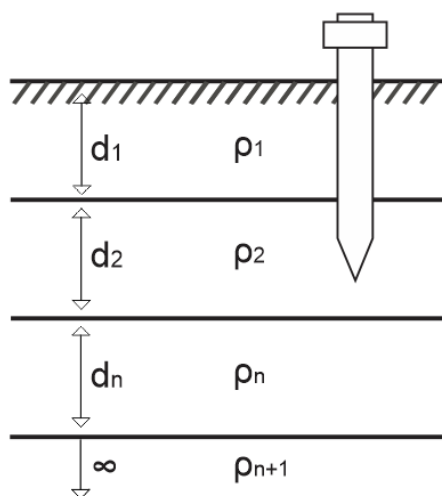
Para realização do cálculo da resistência de um sistema de aterramentos leva-se em consideração variáveis externas ao solo como o comprimento, diâmetro e a quantidade de hastes, o espaçamento entre as hastes, e também de variáveis internas, como a resistividade aparente do solo que é obtida através da estratificação.

A resistência de um sistema R_T , de modo geral, pode ser obtida pela expressão matemática apresentada na Equação 22, onde ρ_a é a resistividade aparente e a função $F(g)$ é dependente da geometria e configuração escolhida do sistema.

$$R_T = \rho_a * F(g) \quad (22);$$

A seguir na Figura 37 é ilustrada a representação das inúmeras camadas do solo pode possuir, com suas respectivas resistividades, de acordo com a estratificação do terreno, no qual a dispersão de corrente será variável de acordo com a resistividade.

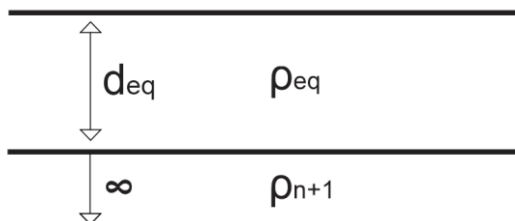
Figura 37 - Representação de camadas do solo, com diferentes resistividades



Fonte: Autoria Própria

Após a realização da estratificação, verifica-se o número de camadas obtidos, caso possuir mais de duas camadas, deve ser realizado a redução a um modelo equivalente de duas camadas. A seguir, na Figura 38 é ilustrado a representação de um solo reduzido a duas camadas, onde d_{eq} é a distância equivalente, ρ_{eq} é a resistividade equivalente e $n+1$ o número de camadas.

Figura 38 - Representação do solo de um sistema reduzido a duas camadas



Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, para encontrar a resistividade aparente é necessário determinar os valores de ρ_{eq} e de d_{eq} , a seguir na Equação 23 e na Equação 24 são ilustradas as expressões matemáticas para encontrar os valores dessas variáveis.

$$\rho_{eq} = \frac{d1 + d2 + d3}{\frac{d1}{\rho1} + \frac{d2}{\rho2} + \frac{d3}{\rho3}} \dots \frac{dn}{\rho n}; \quad (23)$$

$$d_{eq} = d1 + d2 + d3 \dots dn; \quad (24)$$

Após a determinação dos valores de ρ_{eq} e de d_{eq} é necessário encontrar o coeficiente de penetração - α e o coeficiente de divergência - β que dependem da configuração de aterramento escolhida (hastes alinhadas, circunferência, malha de aterramento, triângulo, quadrado, entre outras).

O coeficiente de penetração indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento do solo equivalente. A seguir é apresentado as formas de obter o coeficiente de penetração, sendo que a Equação 25 mostra a expressão matemática para duas camadas e a Equação 26 a expressão matemática para várias camadas (Kindermann, 1998).

$$\alpha = \frac{r}{d1}; \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}}; \quad (26)$$

Sendo que r é o raio, que pode ser calculado segundo a equação 27 e a equação 28, mostradas a seguir.

Para hastes alinhadas:

$$r = \frac{n-1}{2}s; \quad (27)$$

Onde n é o número de hastes e s o espaçamento entre elas;

Para uma área A igual àquela de um círculo de raio r tem-se:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}; \quad (28)$$

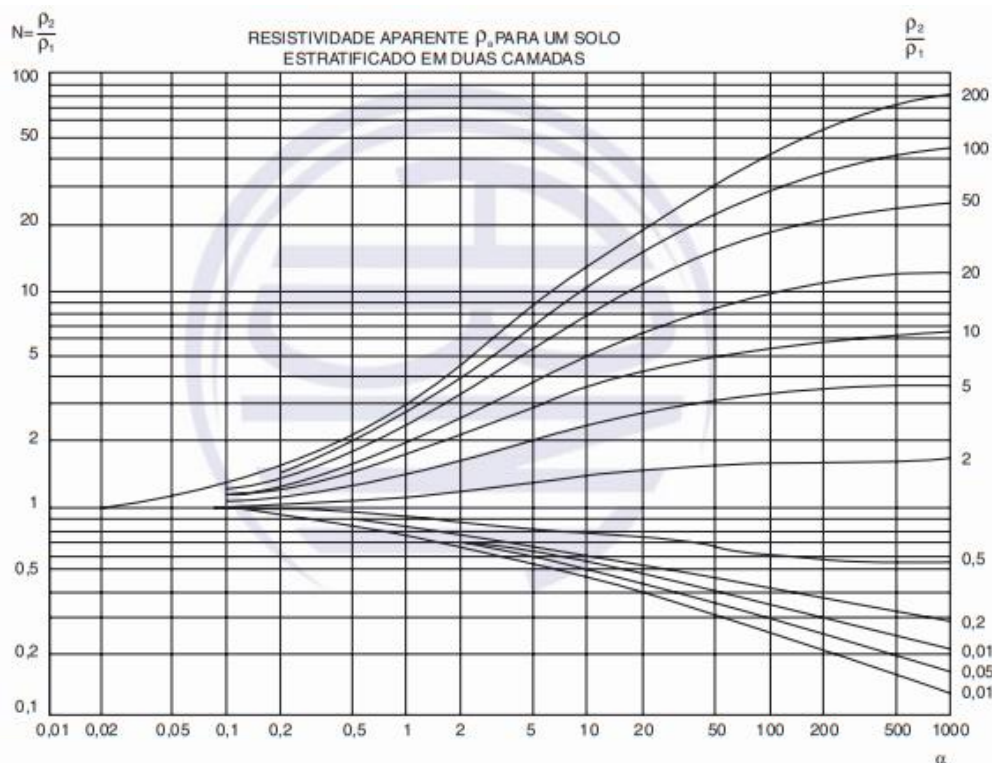
Pode-se definir o coeficiente de divergência como a relação entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira camada equivalente. A seguir é apresentado as formas de obtenção do coeficiente de divergência, sendo que a Equação 29 mostra a expressão matemática para duas camadas e a Equação 30 a expressão matemática para várias camadas.

$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1}; \quad (29)$$

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}}; \quad (30)$$

Após definido os valores de coeficientes de penetração e de coeficiente de divergência, para encontrar o valor da resistividade aparente é então utilizado as curvas de Endrenyi, ilustrada na Figura 39, assim é encontrado o valor de “N” e em seguida utiliza-se a Equação 31 para obter a resistividade aparente.

Figura 39 - Curvas de Endrenyi



Fonte: ABNT NBR 15751, 2013.

$$N = \frac{\rho_a}{\rho_{eq}} \quad (31) \quad \text{ou} \quad \rho_a = N * \rho_{eq};$$

2.8 Geometrias de sistemas de aterramentos

Os sistemas de aterramentos podem assumir diversas formas geométricas, entre elas tem-se as configurações de uma haste, estrela de 4 pontos, hastes alinhadas, circunferência, quadrado, triângulo e malha de aterramento.

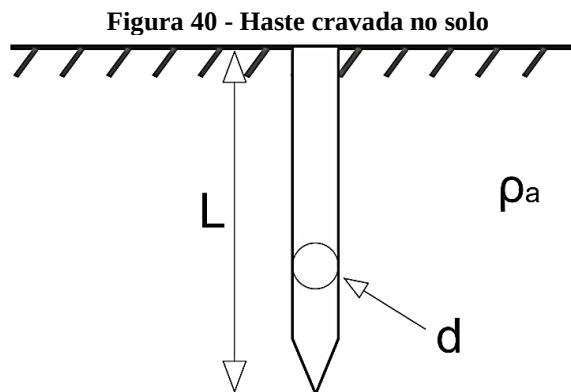
A resistência elétrica de uma haste cravada verticalmente em um solo homogêneo de acordo como ilustra a Figura 40, pode ser determinada pela Equação 32 (Kindermann, 1998).

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2 * \pi * L} * \ln\left(\frac{4 * L}{d}\right) \Omega \quad (32)$$

$\rho_a \rightarrow$ Resistividade aparente do solo [Ωm];

$L \rightarrow$ Comprimento da haste [m];

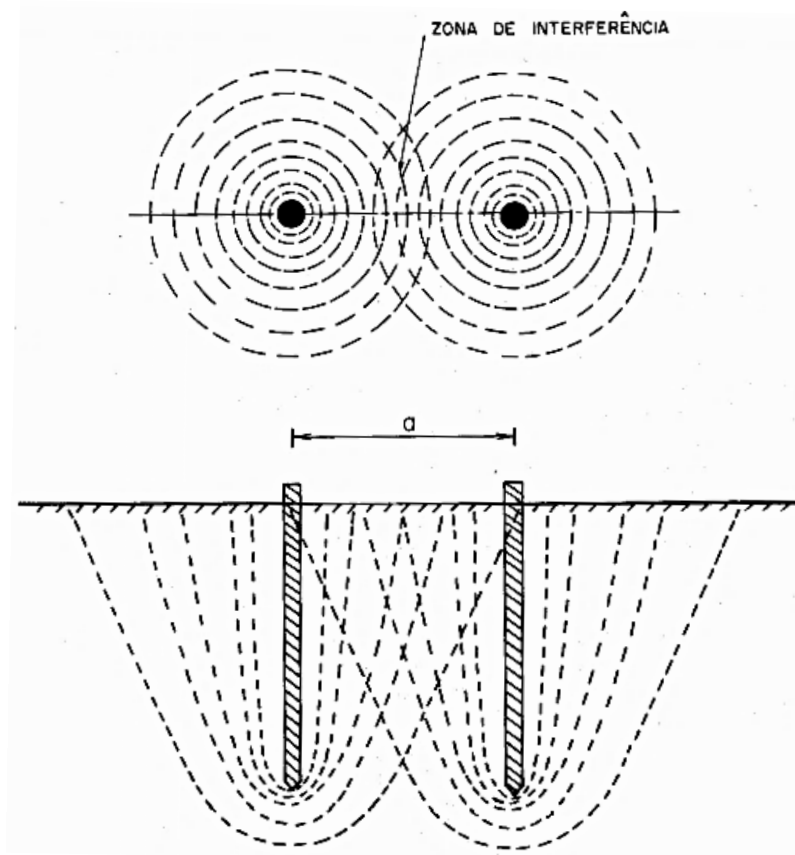
$d \rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à área da seção transversal da haste [m];



Fonte: Autoria Própria

A interligação de hastes em paralelo diminui sensivelmente o valor da resistência de aterramento. O cálculo da resistência de hastes paralelas interligadas não segue a lei simples de paralelismo de resistências elétricas. Isto é devido às interferências nas zonas de atuação das superfícies equipotenciais. No caso de duas hastes cravadas no solo homogêneo, distanciadas de "a", a Figura 41 ilustra as superfícies equipotenciais que cada haste teria se a outra não existisse, onde pode ser observado também a zona de interferência (Kindermann, 1998).

Figura 41 - Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes

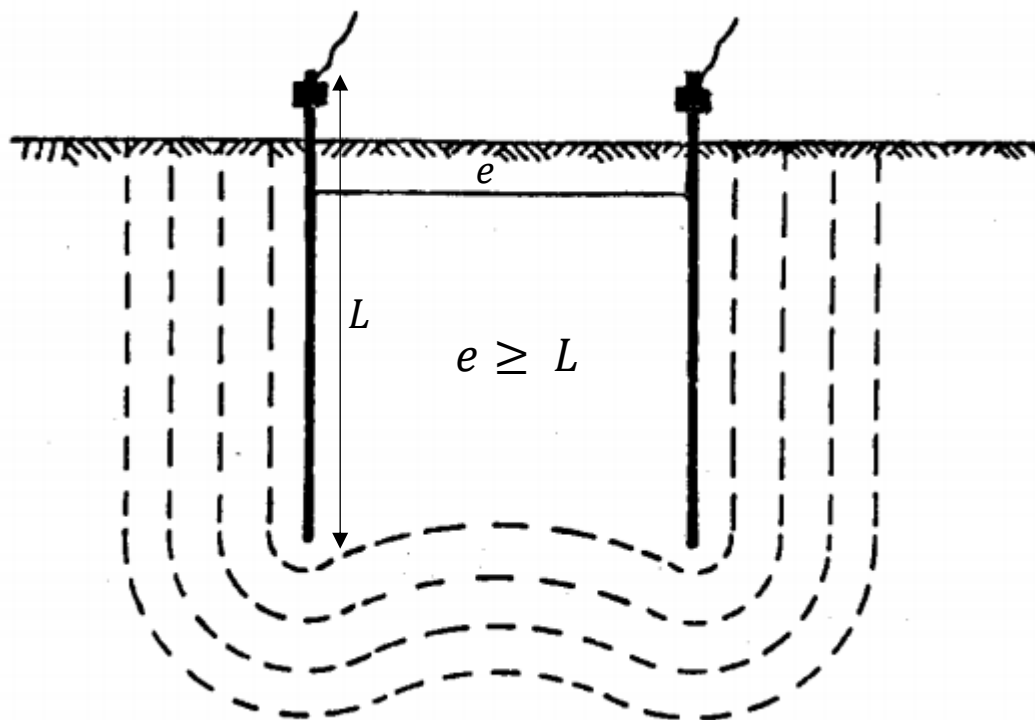


Fonte: Kindermann, 1998

Assim como dito anteriormente, a interligação de hastes em paralelo diminui de forma significativa o valor da resistência de aterramento, contudo se as hastes estiverem muito próximas haverá uma maior zona de conflito das linhas equipotenciais que consequentemente prejudicará o valor da resistência do sistema de aterramentos elétricos. Dessa forma quando se é utilizado mais de uma haste no sistema de aterramentos elétricos, para que haja dissipação total da corrente e do potencial é necessário que estejam separadas por uma distância mínima que é adotada como sendo o tamanho da haste (Kindermann, 1998).

A Figura 42 ilustra as linhas equipotenciais de um conjunto formado por duas hastes de aterramento elétrico, sendo que “ e ” é o espaçamento entre as haste e “ L ” o comprimento das hastes.

Figura 42 - Superfícies equipotenciais de duas hastes



Fonte: Kindermann, 1998

Para o cálculo de resistências equivalentes de hastas paralelas, deve-se levar em conta o acréscimo de resistência ocasionado pela interferência entre as hastes. Utiliza-se da Equação 33 para se calcular a resistência elétrica que cada haste tem inserida no conjunto.

$$R_h = R_{hh} + \sum_{(m=1 \quad m \neq h)}^n (R_{hm}) \quad (33)$$

Onde:

- R_h → Resistência apresentada pela haste “h” inserida no conjunto, considerando as interferências das outras hastes.
- R_{hh} → Resistência individual de cada haste sem a presença de outras hastes, dada pela Equação (32).
- n → Número de hastes paralelas.
- R_{hm} → Acréscimo de resistência na haste “h” devido a interferência mútua da haste “m”, dada pela Equação 34, a seguir.

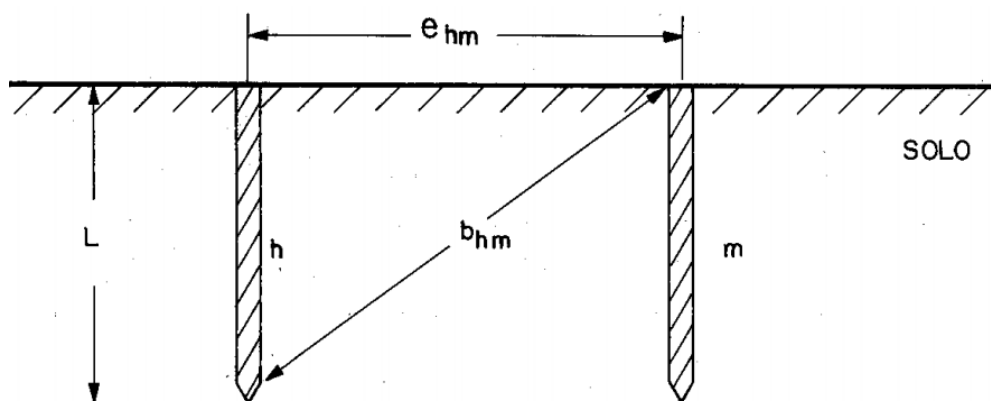
$$R_{hm} = \frac{p_a}{4\pi L} * \ln \left[\frac{(b_{hm}+L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm}-L)^2} \right] \quad (34)$$

- e_{hm} → Espaçamento entre a haste “h” e a haste “m” em metros.
- L → Comprimento da haste.

A seguir, na Figura 43 é ilustrado b_{hm} , e seu valor é obtido através da Equação 35.

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} \quad (35)$$

Figura 43 - Parâmetros das mútuas entre as hastes "h" e "m"



Fonte: Kindermann, 1998

Fazendo-se o cálculo para todas as hastes em conjunto, com auxílio da Equação 33, obtém-se os valores de resistência para cada haste.

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} \dots R_{1n}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} \dots R_{2n}$$

$$R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} \dots R_{nn}$$

Assim que obtido as resistências individuais para cada haste, considerando os acréscimos das interferências, é realizado o cálculo do equivalente das hastes interligadas, que será a resultante do paralelo entre elas.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (36)$$

O índice de aproveitamento ou índice de redução – K é definido como a relação da resistência equivalente (R_{eq}) do conjunto e a resistência individual de cada haste (R_{1haste}), sem a presença de outras hastes, assim como ilustra a Equação 37 (Kindermann, 1998).

$$K = \frac{R_{eq}}{R_{1haste}} \quad (37)$$

Isolando R_{eq} tem-se:

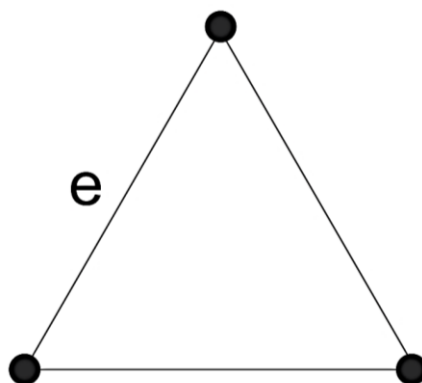
$$R_{eq} = K * R_{1haste} \quad (38)$$

A Equação 38 indica que a resistência equivalente do conjunto de hastes em paralelo R_{eq} está reduzida em K vezes o valor de um sistema com apenas uma haste. Para facilitar encontrar o valor de R_{eq} os valores de K são obtidos através de curvas, como será apresentado nas Figuras a seguir.

O dimensionamento de um sistema de aterramento com hastes em triângulo ilustrado na Figura 44, obedece a Equação 39, apresentada a seguir, sendo que o valor de K é obtido através da Figura 45, de acordo com a curva que atende ao diâmetro e tamanho das hastes é encontrado o valor de K em um ponto que corta a curva referente, na localização do eixo x que corresponde ao valor de espaçamento adotado, de uma haste a outra.

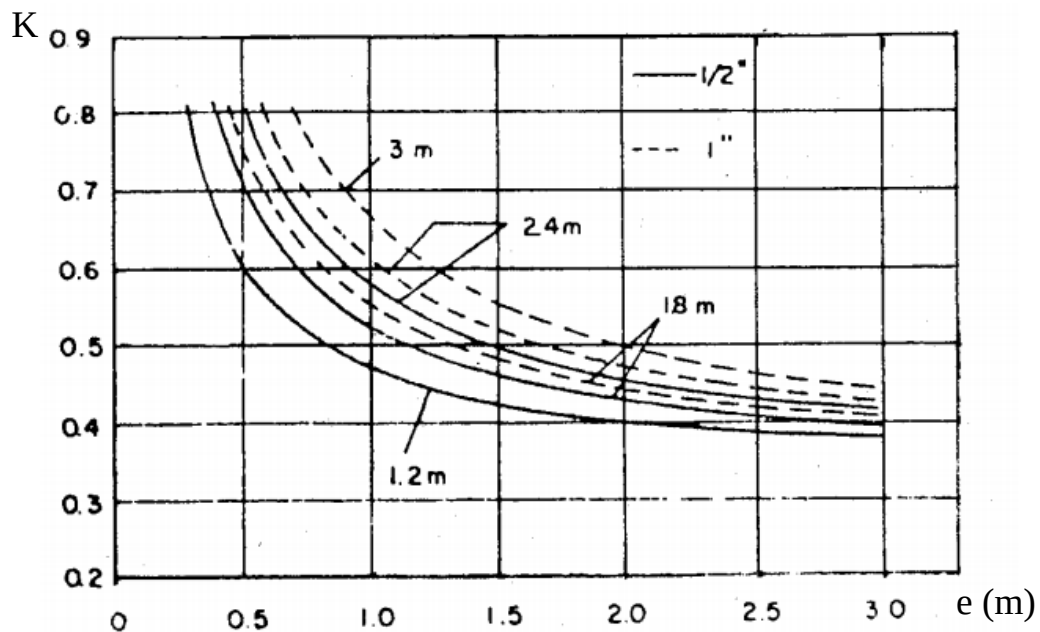
$$R_{eq\Delta} = K * R_{1haste} \quad (39)$$

Figura 44 - Triângulo equilátero



Fonte: Autoria Própria

Figura 45 - Curva dos K x Espaçamento para configuração em triângulo

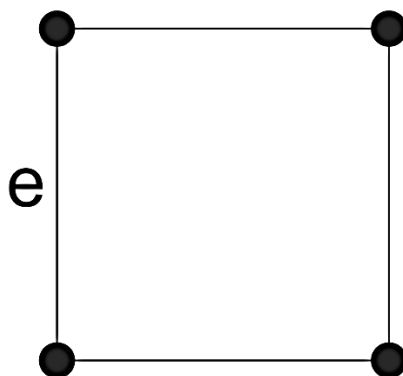


Fonte: Kindermann, 1998

O dimensionamento de um sistema de aterramento com hastes em quadrado de 4 hastes ilustrado na Figura 46, obedece a Equação 40, apresentada a seguir, sendo que o valor de K é obtido através da Figura 47, de acordo com a curva que atende ao diâmetro e tamanho das hastes é encontrado o valor de K em um ponto que corta a curva referente, na localização do eixo x que corresponde ao valor de espaçamento adotado, de uma haste a outra.

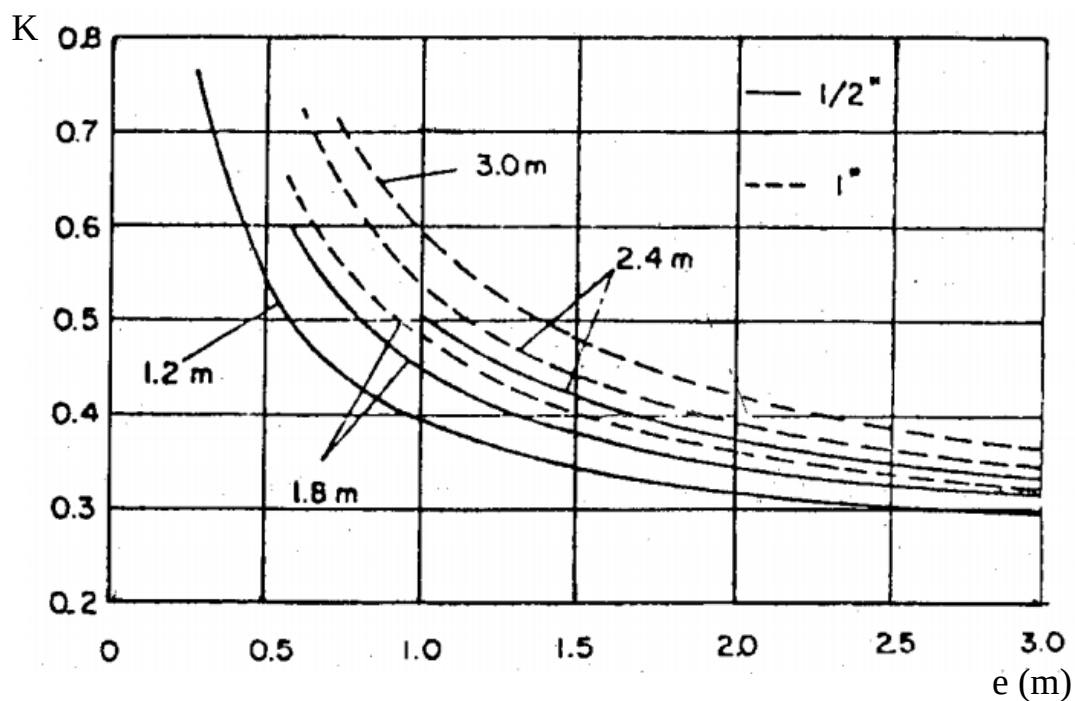
$$R_{eq\Box} = K * R_{1haste} \quad (40)$$

Figura 46 - Quadrado vazio



Fonte: Autoria Própria

Figura 47 - Curva dos K x Espaçamento para configuração em quadrado vazio

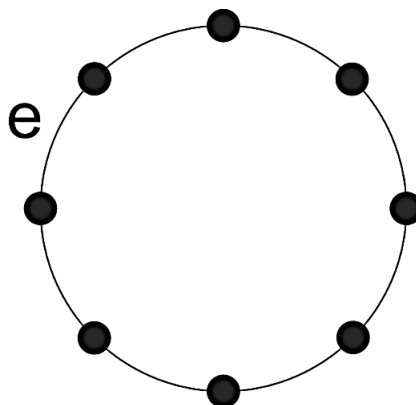


Fonte: Kindermann, 1998

O dimensionamento de um sistema de aterramento com hastes em circunferência com 9 metros de raio ilustrado na Figura 48, obedece a Equação 41, apresentada a seguir, sendo que o valor de K é obtido através da Figura 49, de acordo com a curva que atende ao diâmetro e tamanho das hastes é encontrado o valor de K em um ponto que corta a curva referente, na localização do eixo x que corresponde ao valor de espaçamento adotado, de uma haste a outra.

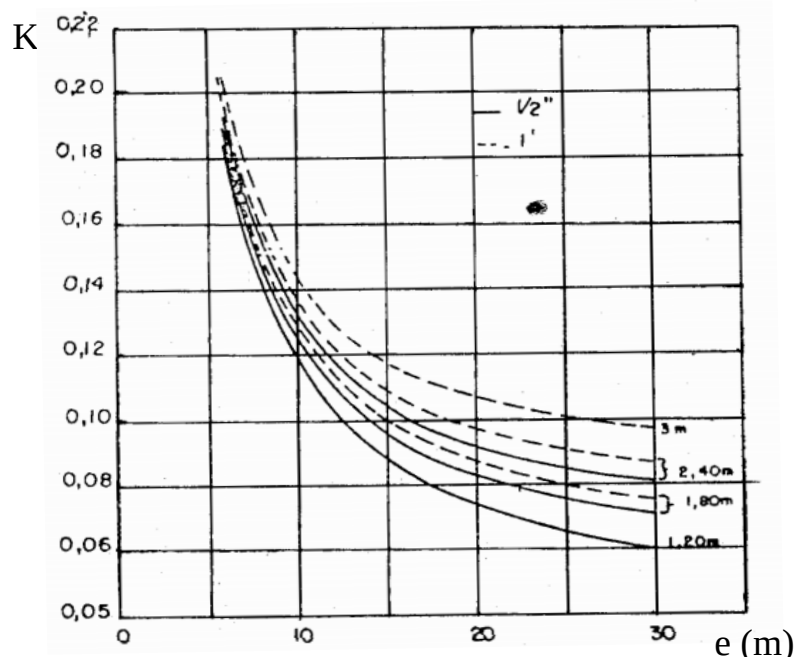
$$R_{eq0} = K * R_{1haste} \quad (41)$$

Figura 48 - Circunferência com 9 metros de raio



Fonte: Autoria Própria

Figura 49 - Curvas K x Espaçamento para circunferência: raio 9 metros



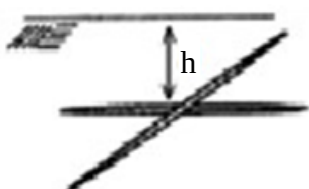
Fonte: Kindermann, 1998

Além desses métodos para se obter os valores de resistências das configurações apresentadas, Visacro (2002) disponibiliza um método melhorado, onde se utiliza de expressões matemáticas para se obter as resistências referentes as configurações típicas dos sistemas de aterramentos elétricos, dessa forma facilitando encontrar o valor de resistência de um sistema com a utilização de expressões matemáticas.

A seguir são ilustradas expressões para as configurações de sistemas de aterramentos elétricos, estrela de 4 pontos ilustrada na Figura 50, circunferência ilustrada na Figura 51, hastes alinhadas ilustrada na Figura 52, malha por reticulado ilustrada na Figura 53, triângulo

ilustrada na Figura 54 e quadrado ilustrada na Figura 55, destaca-se as expressões para circunferência, hastes alinhadas, triângulo e quadrado, pois, são utilizadas nesse trabalho para realizações de simulações no projeto de sistemas de aterramentos.

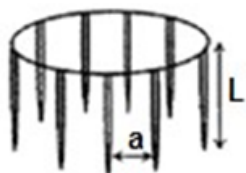
Figura 50 – Expressões para configurações em estrela de 4 pontos



$$R_T = \frac{\rho_a}{8\pi L} * \left(\text{Ln} \left(\frac{2L}{r} \right) + \text{Ln} \left(\frac{L}{h} \right) + 2,91 - 1,07 * \left(\frac{2h}{L} \right) \right) \quad (42)$$

Fonte: Visacro Filho

Figura 51 – Expressões para configurações em circunferência



$$R_T = \frac{1}{n} * \frac{\rho_a}{2\pi L} * \left(\text{Ln} \left(\frac{4L}{a} \right) - L + \frac{L}{d} * \text{Ln} \left(\frac{2n}{\pi} \right) \right) \quad (43)$$

Fonte: Visacro Filho

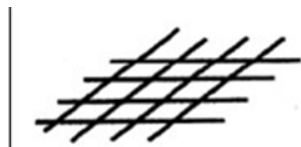
Figura 52 - Expressões para configurações em hastes alinhadas



$$R_T = \frac{1}{n} * \frac{\rho_a}{2\pi L} * \left(\text{Ln} \left(\frac{4L}{a} \right) - L \frac{L}{d} * \text{Ln} \left(\frac{1,781n}{2,718} \right) \right) \quad (44)$$

Fonte: Visacro Filho

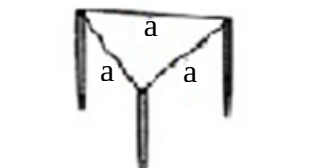
Figura 53- Expressões para configurações em malha por reticulado



$$R_T = 0,443 * \left(\frac{\rho_a}{\sqrt{A}} \right) + \frac{\rho}{L} \quad (45)$$

Fonte: Visacro Filho

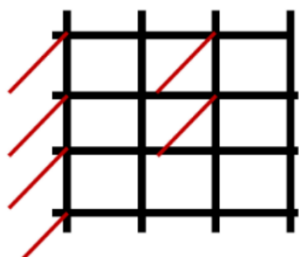
Figura 54 - Expressões para configurações em malha por reticulado



$$R_T = \frac{1}{3} * \left\{ \frac{\rho_a}{2\pi L} * \left[\text{Ln} \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right] + 2L * a \right\} \quad (46)$$

Fonte: Visacro Filho

Figura 55 - Expressão configuração em quadrado de sistemas de aterramentos



$$R_T = 0,13 * \frac{\rho_a}{\sqrt{A}} * \left(1 - \frac{2L}{3 * \sqrt{A}}\right) * \log_{10} \left(\frac{2400 * \sqrt{A}}{N}\right) \quad (47)$$

Fonte: J. M. Nahman, 1996.

Onde:

- ρ_a – Resistividade aparente
- L – Comprimento das hastes
- a – Espaçamento entre hastes
- h – Profundidade das hastes do solo a terra
- r – Raio do eletrodo
- n – Quantidade de hastes do sistema
- d – Diâmetro das hastes
- A – Área do sistema de aterramento
- N – Quantidade de reticulados idênticos

A resistência do aterramento elétrico é a razão entre o potencial do dispositivo de aterramento e a corrente que flui para a terra através do dispositivo de aterramento. A resistência do solo encontrada quando uma corrente flui para o solo é chamada de resistência à dispersão da corrente. O valor verdadeiro da resistência de aterramento consiste na soma das seguintes resistências: resistência do condutor de aterramento, resistência de contato entre o condutor de aterramento e o dispositivo de aterramento, resistência dos próprios condutores de aterramento, resistência de contato entre os condutores de aterramento e o solo e na resistência à dispersão de corrente do solo, mas como a resistência à dispersão de corrente é muito maior que os outros quatro tipos de resistência, a resistência do aterramento de um dispositivo de aterramento se aproxima da resistência à dispersão da corrente. A resistência de aterramento de um sistema calculada por métodos numéricos ou equações empíricas é a resistência à dispersão de corrente do solo, mas o valor realmente medido é geralmente maior que o resultado calculado, quando considerado as mesmas características do solo. Isso ocorre porque o contato real entre os condutores de aterramento e o solo não é um contato superficial completo, mas sim um contato pontual. Deve-se estar atendo aos resultados, pois em áreas rochosas, a resistência de contato pode assumir um valor bastante alto e incerto.

É importante destacar que o valor medido de resistência de um sistema de aterramento elétrico quando analisado não permanece inalterado, sendo assim uma simples análise não garante a integridade física do sistema de aterramento, pois esse valor lido é variável de acordo com as características do solo. Sendo assim é importante manter o solo sempre úmido, se possível, verificar a integridade das conexões do sistema e realizar novas medições periodicamente.

Exemplo 1: Deseja-se construir um sistema de aterramento em um terreno de um edifício, a estratificação do solo foi realizada utilizando o método de Pirson, deseja-se saber qual a configuração de aterramento obterá o melhor resultado para o terreno.

Resistividades aparentes obtidas através do método de Pirson e das curvas de Endrenyi para o solo do Exemplo 1:

- Estrela: $\rho_a = 1200 \Omega\text{m}$;
- Circunferência: $\rho_a = 1050 \Omega\text{m}$;
- Hastes Alinhadas: $\rho_a = 1100 \Omega\text{m}$;
- Malha Reticulado: $\rho_a = 1150 \Omega\text{m}$;
- Triângulo: $\rho_a = 1250 \Omega\text{m}$;
- Quadrado: $\rho_a = 1100 \Omega\text{m}$

As hastes são enterradas a uma profundidade - h de 0,5m, possuem diâmetro - d de 5/8", comprimento - L de 2,4m e são separadas por uma distância - a de 3 metros uma da outra. São utilizadas 3 hastes para a configuração em triângulo, 6 hastes para a configuração em circunferência e 4 hastes para as demais configurações de aterramentos elétricos. A área do sistema em malha reticulada e para o quadrado é de 9m².

Considerando as resistividades aparentes - $\rho_a(\Omega\text{m})$ e os demais dados apresentados anteriormente, qual configuração de aterramento apresentará o melhor resultado?

Tabela 5 - Respostas obtidas para o Exemplo 1

Resistências de topologias obtidas por cálculos (Ω)						
Diâmetro das hastes	Comprimento das hastes (m)					
	<i>Estrela 4 hastes</i>	<i>Circunferência 4 hastes</i>	<i>4 Hastes alinhadas</i>	<i>Malha Reticulado 4 hastes</i>	<i>Triângulo</i>	<i>Quadrado</i>
	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
5/8"	207,64	77,38	123,82	218,56	173,29	85,80

Fonte: Autoria Própria

Nota: Para resolução do Exemplo 1 utilizou-se a Equação 42 para configuração em estrela, Equação 43 para configuração em circunferência, Equação 44 para configuração em hastes alinhadas, Equação 45 para configuração em malha reticulado, Equação 46 para configuração em triângulo e Equação 47 para configuração em quadrado.

Como ilustrado na Tabela 5, para o Exemplo 1, a configuração de aterramentos elétricos que apresentou o melhor resultado foi a circunferência de 4 hastes, com valor de resistência de $77,38 \Omega$ e a que obteve o pior desempenho, foi a configuração em malha reticulado de 4 hastes com valor de resistência de $218,56 \Omega$.

3. TOPOLOGIAS CLÁSSICAS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS

Neste capítulo é apresentado a delimitação do terreno, as medições de campo de resistividade e a estratificação do solo utilizando o método de Pirson. Esses dados são importantes, pois são utilizados para realização das simulações computacionais.

Assim como apresentado no capítulo 2.6 a estratificação do solo pode ser realizada através de vários métodos. E para tal, faz-se necessário realizar medições do solo, para realização do trabalho foi escolhido o método de Wenner, esse método possibilita encontrar a resistividade das camadas do terreno para cada espaçamento entre as hastes.

3.1 Delimitação do terreno

A seguir na Figura 56 é ilustrada o local onde foi realizado a estratificação do solo (localizado no laboratório de aterramentos do Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara). O solo em análise possui uma área de 1.600m² (64 m x 25 m). Foram realizadas as ponderações dimensionais e pela análise preliminar a área em estudo possui espaço suficiente para construir as configurações geométricas na perspectiva de que não ocorra interferência entre as topologias de aterramentos elétricos.

Além de análises dimensionais, para evitar quaisquer problemas que comprometam o sistema de aterramento, deve-se realizar outros estudos no terreno, como possibilidade de inundações em longo prazo, solo com curva de resistividade de difícil análise, localização de sistemas de canalizações elétricas e hidráulicas no solo, entre outras implicações (Kindermann, 1998).

Figura 56 - Localização da área estratificada

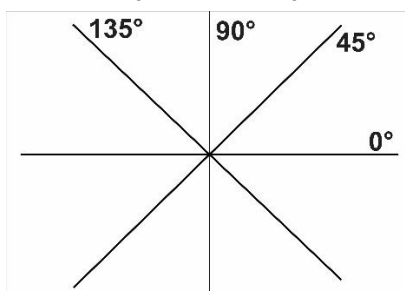


Fonte: SOUZA, W. P., 2018

3.2 Medições de campo

O primeiro passo é conhecer o comportamento resistivo do terreno, através da realização das medições de resistividade do solo. As cinco primeiras medições foram realizadas com espaçamento entre haste de dois metros, na sexta medição foi considerado um espaçamento de 4 metros entre as hastes, pois, desejava-se otimizar o tempo com objetivo de finalizar as medições no mesmo dia, assim podendo-se considerar as mesmas condições de umidade e temperatura do solo. As medições foram feitas em quatro direções, na horizontal (0°), na vertical (90°), na diagonal em 45° e na diagonal em 135° que podem ser identificadas através da Figura 57, ilustrada a seguir.

Figura 57 - Referência de direções das medições de aterramentos elétricos



Fonte: Autoria Própria

A seguir, na Tabela 6 é apresentado os dados coletados através da realização das medições do solo em quatro direções.

Tabela 6 - Resistividades obtidas através das medições do solo

Espaçamento entre hastes (m)	Medições de resistividade ($\Omega.m$)				Médias
	Horizontal (0°)	Diagonal (45°)	Vertical (90°)	Diagonal (135°)	
2	1143	1056	1116	915	1057,5
4	1089	1177	1055	853	1043,5
6	1300	1105	928	809	1035,5
8	514	1201	629	996	835
10	567	729	585	692	643,25
14	----	28,5	565	23,3	205,6

Fonte: Autoria Própria

Após a realização do processo nas quatro direções apresentadas na Tabela 6, segundo o método de Wenner, todos os valores que possuem desvios relativos superiores a 50% devem ser descartados (Kindermann, 1998). A seguir é apresentado a Tabela 7 que mostra os valores de desvios padrões em porcentagem para cada medida realizada.

Tabela 7 - Desvios relativos das medições de resistividade do sono

Espaçamento entre hastes (m)	Horizontal (0°)	Diagonal (45°)	Vertical (90°)	Diagonal (135°)
2	8,09	0,14	5,53	13,48
4	4,36	12,79	1,1	18,26
6	25,54	6,71	10,38	21,87
8	38,44	43,83	24,67	19,28
10	11,85	13,33	9,06	7,58
14	----	86,14	174,81	88,67

Fonte: Autoria Própria

Analisando a Tabela 7 percebe-se que apenas para os espaçamentos de 14 metros obteve-se desvios superiores a 50%, de modo que todos os valores medidos de resistividade para 14 metros foram descartados. Com a desconsideração desses valores, os novos valores de desvios relativos são ilustrados na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 - Desvios relativos corrigido das medições de resistividade do sono

Espaçamento entre hastes (m)	Desvio relativo em %			
	Horizontal (0°)	Diagonal (45°)	Vertical (90°)	Diagonal (135°)
2	8,09	0,14	5,53	13,48
4	4,36	12,79	1,1	18,26
6	25,54	6,71	10,38	21,87
8	38,44	43,83	24,67	19,28
10	11,85	13,33	9,06	7,58

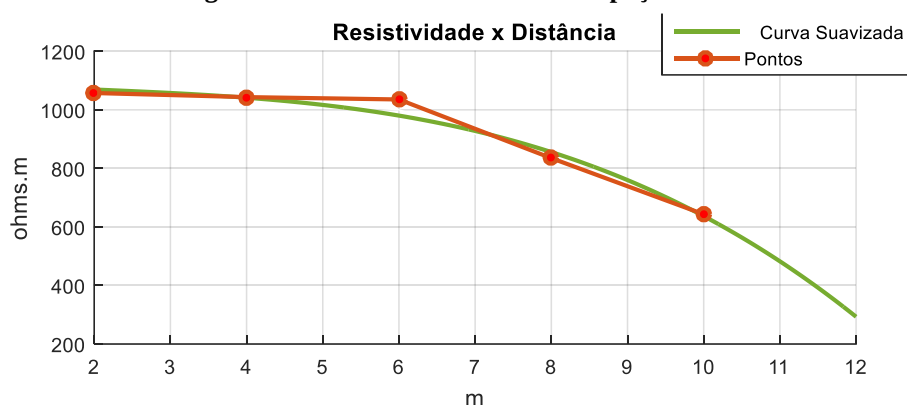
Fonte: Autoria Própria

Após o descarte das medidas com valores de desvio superiores a 50% é realizado uma média entre os valores remanescentes para obter as resistividades resultantes, sendo apresentados na Tabela 9. Através do resultado da tabela 9 são traçados dois gráficos apresentados a seguir na Figura 58, onde foi traçado o gráfico de pontos e o gráfico suavizado, ilustrando a característica resistiva do solo em estudo.

Tabela 9 - Resistividades médias x espaçamento

Distância(m)	Resistividade (Ωm)
2	1057,5
4	1043,5
6	1035,5
8	835
10	643,25

Fonte: Autoria Própria

Figura 58 - Perfil de resistividade x espaçamento

Fonte: Autoria Própria

Para a plotagem da curva suavizada fez-se necessário a utilização de ferramentas de plotagens disponíveis no software Scilab.

Observando a Tabela 9 e os gráficos apresentados na Figura 58 é possível perceber o comportamento e identificar a quantidade de camadas que o solo apresenta de acordo com a profundidade, o que auxilia na escolha do método mais adequado para realizar a estratificação do solo, tem-se como sendo os mais usuais o método de duas camadas, método Pirson e método de Yokogawa.

3.3 Estratificação do solo

A partir da obtenção das médias dos dados de resistividades medidos em campo e conforme a Tabela 9, apresentada anteriormente, o próximo passo é a realização da estratificação do solo, e tendo em vista que o comportamento da curva da Figura 58 é característico de solo de duas camadas (Kindermann, 1998) o método utilizado para realização da estratificação é o método de Pirson, que será descrito a seguir.

A resistividade elétrica para espaçamento “a” é dada pela equação 49, apresentada a seguir. É por meio dessa expressão que é possível formar as curvas de coeficiente de reflexão e realizar o método de estratificação do solo em duas camadas, essa equação é uma relação entre $\rho_{(a)}$ (Wenner) e parâmetros de solo de duas camadas e foi obtida através de modelagens matemáticas usando as teorias do eletromagnetismo (ABNT NBR 7117, 2012).

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(2n\left(\frac{h}{a}\right)\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(2n\left(\frac{h}{a}\right)\right)^2}} \right] \quad (48)$$

Onde tem-se que:

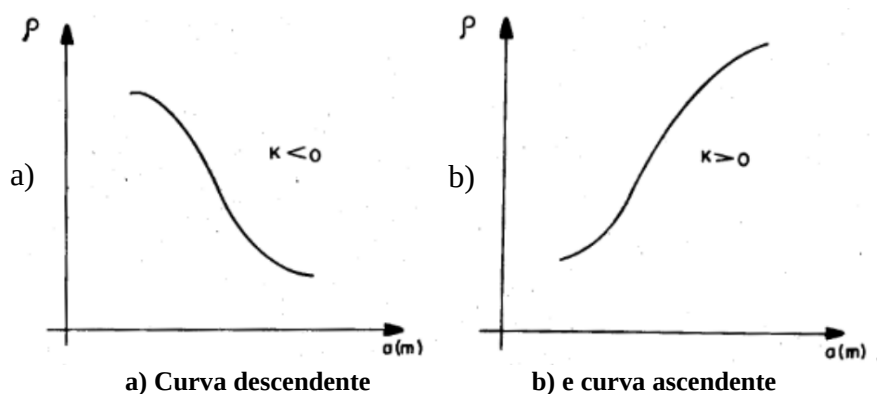
- k – Coeficiente de reflexão: $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$.

Sendo que: $-1 \leq k \leq 1$, podendo ser dividido em duas partes, que são: $-1 \leq k \leq 0$ e $0 \leq k \leq 1$ para realização da plotagem de gráficos;

- h – Profundidade da primeira camada;
- a – Distância entre as hastes pelo método de Wenner;

Com base na variação do coeficiente de reflexão “k”, pode-se traçar curvas $\rho(a)/\rho_1$ em função de h/a para valores de “k” variando de -1 a 1. A seguir na Figura 59 é ilustrado um exemplo de curva ascendentes, onde $k < 0$ e um exemplo de curva descendente para $k > 1$.

Figura 59 – Curvas típicas do solo de duas camadas:

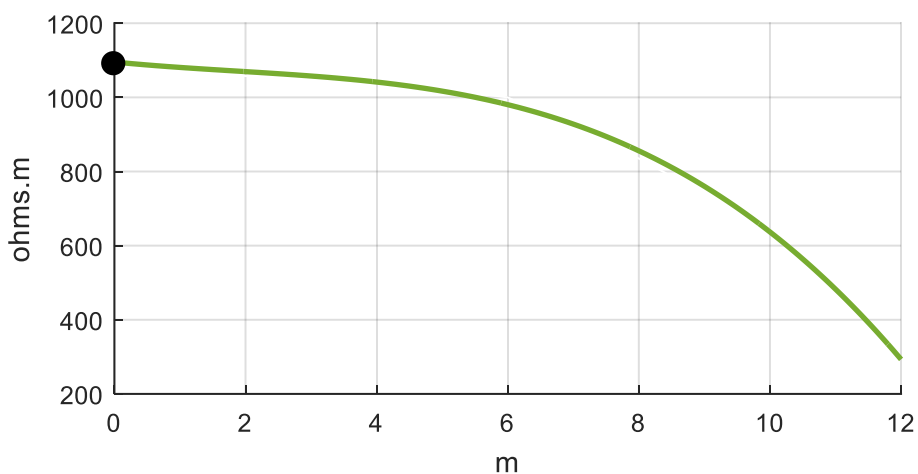


Fonte: Kindermann, 1998

3.3.1 Método de duas camadas por curva

O próximo passo é prolongar a curva até ocorrer a intercepção com o eixo vertical (em $x = 0$ m), com isso obtém-se o ponto de $\rho_1 = 1100 \Omega m$. A curva prolongada é apresentada na Figura 60, que foi obtida através da ferramenta de plotagem do software Scilab.

Figura 60 - Curva prolongada de resistividade x espaçamento



Fonte: Autoria Própria

Analisando a Figura 60 percebe-se que o comportamento é descendente, com isso tem-se que o valor de k é negativo, então a curva a ser analisada está compreendida entre: $-1 \leq k \leq 0$.

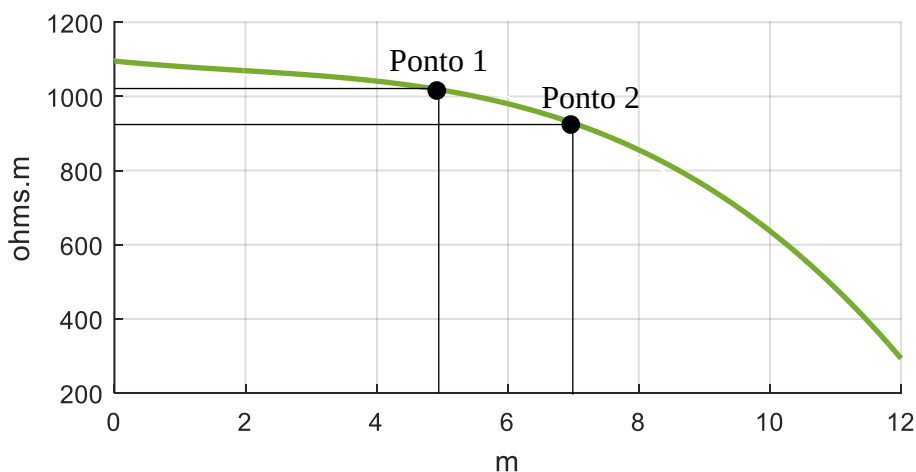
Através da curva ilustrada na Figura 60, são extraídos dois pontos quaisquer, que são apresentados a seguir na Tabela 10 e na Figura 60:

Tabela 10 - Ponto 1 e ponto 2 extraídos da curva de resistividade x espaçamento

	Ponto 1	Ponto 2
Espaçamento (m)	5	7
Resistividade ($\Omega.m$)	$\rho(a1) = 1017$	$\rho(a2) = 927,9$

Fonte: Autoria Própria

Figura 61 – Ilustração do ponto 1 e do ponto 2 na curva de resistividade x espaçamento



Fonte: Autoria Própria

Após a escolha dos pontos, obtém-se $\rho(a1)/\rho1$ e $\rho(a2)/\rho1$.

$$\rho(a1)/\rho1 = 1017/1100 = 0,9245$$

$$\rho(a2)/\rho1 = 927,9/1100 = 0,8435$$

Com os valores de $\rho(a1)/\rho1$ e $\rho(a2)/\rho1$ obtidos, entra-se nas curvas teóricas correspondentes e traça-se as linhas paralelas ao eixo da abscissa. Estas retas cortam as curvas distintas de k, assim como é ilustrado na Figura 62. Procede-se a leitura de todos os específicos k e h/a correspondente. Após, multiplica-se todos os valores de h/a encontrados pelos valores de a1 e a2. E gera-se a Tabela 11 com os valores correspondentes de k, h/a e h.

Figura 62 - Linhas paralelas, cortando as curvas de k

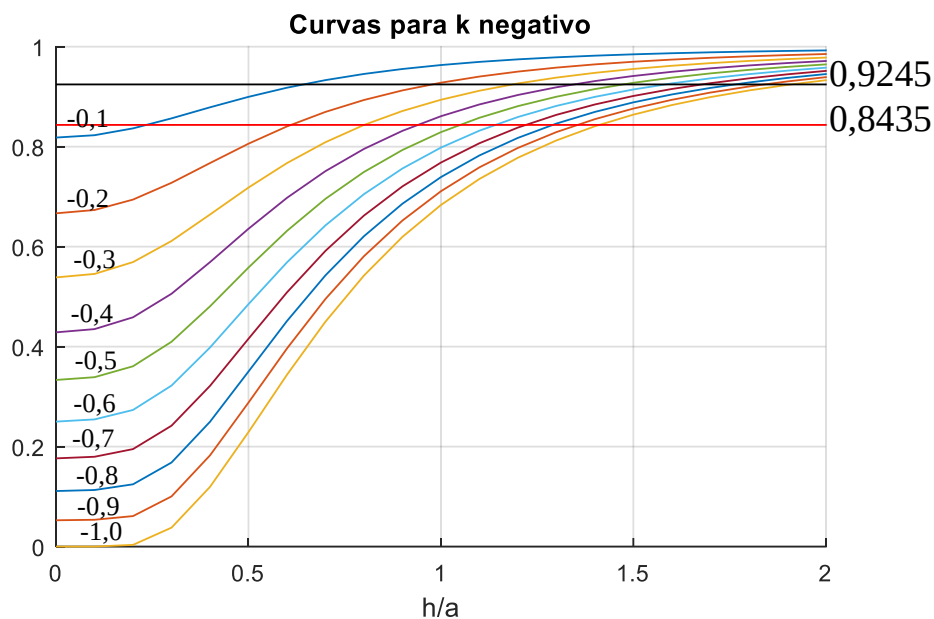


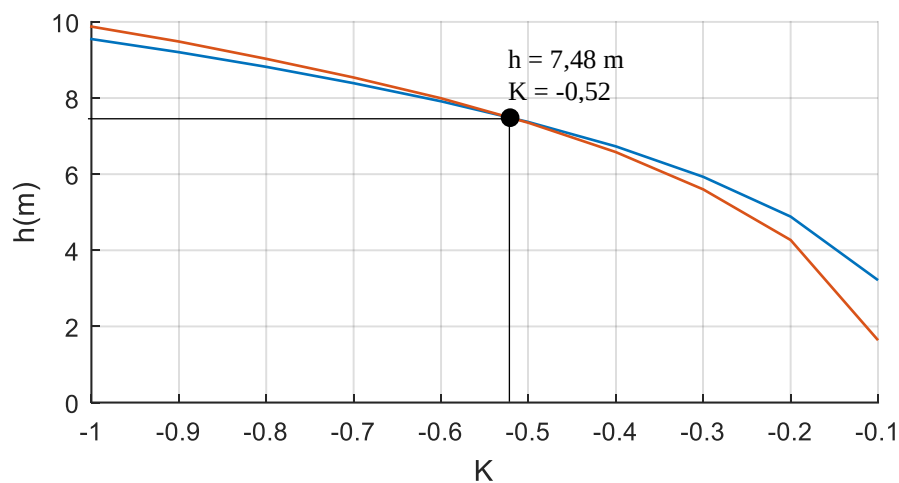
Tabela 11 - Valores auxiliares k, h/a e h

K	a1=5m; $\rho(a1) = 1017 \Omega m$ $\rho(a1)/\rho1=0,9245$		a2=7m; $\rho(a2) = 927,9 \Omega m$ $\rho(a2)/\rho1=8435$	
	h/a	h	h/a	h
-0,1	0,643	3,215	0,234	1,638
-0,2	0,977	4,885	0,610	4,270
-0,3	1,186	5,930	0,800	5,600
-0,4	1,346	6,730	0,940	6,580
-0,5	1,474	7,370	1,050	7,350
-0,6	1,583	7,915	1,142	7,994
-0,7	1,678	8,390	1,220	8,540
-0,8	1,764	8,820	1,290	9,030
-0,9	1,841	9,205	1,355	9,485
-1	1,910	9,550	1,411	9,877

Fonte: Autoria Própria

Plota-se as curvas de $k \times h$ para $a1 = 5 m$ e $a2 = 7 m$ no mesmo gráfico, assim como é ilustrado na Figura 63 e observa-se o ponto de intersecção para obter os valores de k e h , dessa forma obtém-se o valor de $\rho2$.

Figura 63 - Ponto de cruzamento das curvas auxiliares [h x K]



Fonte: Autoria Própria

Com o valor de k_1 e de h_1 obtidos através da Figura 63, é calculado o valor de ρ_2 , assim como é mostrado a seguir:

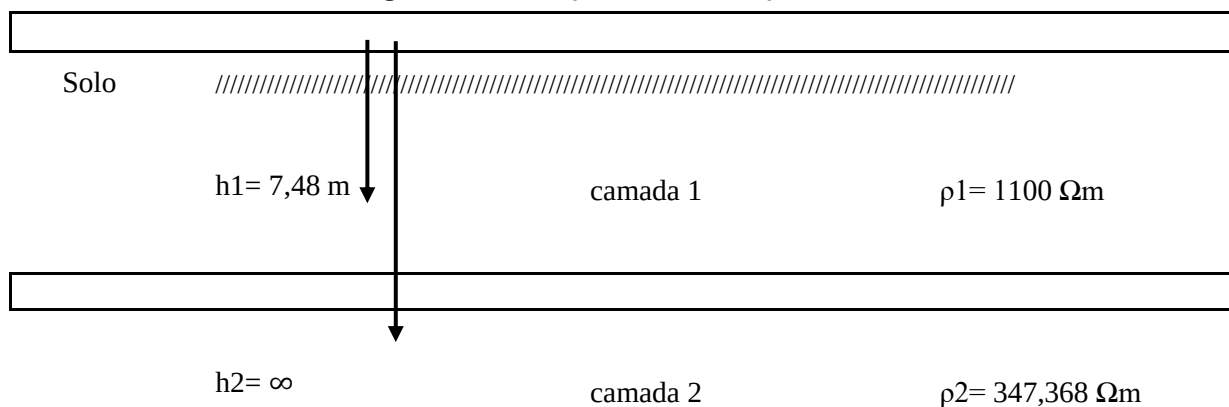
$$k_1 = -0,52; d_1 = h_1 = 7,48 \text{ m};$$

$$\rho_1 = 1100 \, \Omega \cdot \text{m};$$

$$\rho_2 = \rho_1 * \frac{1 + k}{1 - k} = 347,368 \, \Omega \cdot \text{m};$$

A seguir, na Figura 64 é ilustrado a estratificação do solo com suas camadas e suas respectivas resistividades.

Figura 64 - Ilustração da estratificação do solo



Fonte: Autoria Própria

Uma vez que o solo apresenta apenas duas camadas, não é necessário realizar a redução de camadas.

4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Uma vez estratificado o solo é possível realizar as simulações computacionais para obtenção dos valores de resistências das topologias clássicas inseridas no solo devidamente estratificado. Para facilitar a realização dos cálculos desenvolveu-se um programa utilizando ferramentas do software Scilab, para conhecimento, todas as equações matemáticas que compõem o código desenvolvido são apresentadas nesse tópico. Não foi possível inserir o 3º passo em rotinas computacionais (obtenção do valor de N através das curvas de Endrenyi), pois não se encontra disponível nas bibliografias de aterramentos pesquisadas o código para desenvolvimento das curvas de Endrenyi.

As simulações computacionais desenvolvidas possuem por propósito retornar o valor de resistência referente a cada sistema de aterramento estudado. A seguir, são apresentadas as etapas para realização dos cálculos de resistências de aterramentos para cada uma das topologias de sistemas de aterramentos em estudo:

- Determinação do coeficiente de penetração
- Determinação do coeficiente de divergência,
- Coeficiente N e resistividade aparente
- Cálculo da Resistência

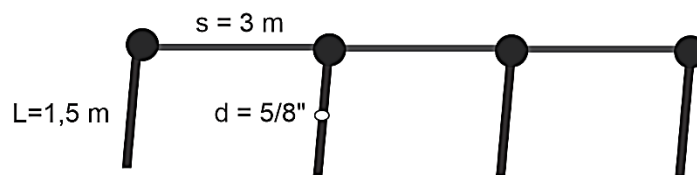
Para todos os sistemas de aterramentos elétricos, por comodidade foram utilizadas hastes de 1,5 m de comprimento e 5/8" de diâmetro, espaçadas entre si de 3 m, utilizou-se haste de tamanho menor com o objetivo de facilitar e agilizar a construção dos sistemas de aterramentos elétricos. Como esse trabalho possui cunho teórico experimental e é acadêmico, essa escolha não inviabiliza a validação dos modelos desenvolvidos.

Destaca-se que os resultados apresentados nesse capítulo consideram condições ideais de operação do aterramento. Contudo, alguns parâmetros como, por exemplo, a umidade, a temperatura, a salinização do solo entre outras modificações realizadas no solo influenciam, consideravelmente, no valor final da resistência do sistema de aterramento.

4.1 Hastes alinhadas

Na Figura 65 é ilustrado o sistema em estudo, composto por 4 hastes alinhadas, comprimento de cada haste de $L = 1,5 \text{ m}$, com $d = 5/8 \text{ ''}$ de diâmetro cada e espaçadas entre si por $s = 3 \text{ m}$.

Figura 65 - Configuração em hastes alinhadas



Fonte: Autoria Própria

1º Passo – Coeficiente de Penetração

O coeficiente de penetração (α) é igual ao raio r da circunferência circunscrita a configuração em hastes alinhadas dividido pela distância d_1 , $d_1 = h_1 = 7,48$ m, apresentada na Figura 64. Na Equação 50 é mostrada a equação para cálculo de coeficiente de penetração.

$$\alpha = \frac{r}{d_1} \quad (49)$$

Para encontrar o raio r para hastes alinhadas, utiliza-se a Equação 51, onde n é o número de hastes que são espaçadas pela distância s em metros.

$$r = \frac{(n-1)*s}{2} \quad (50)$$

Disposto de todos os dados necessários, a seguir são mostrados os resultados encontrados para o raio r e o coeficiente de penetração para hastes alinhadas.

$$r = \frac{(4 - 1) * 3}{2} = 4,5 \text{ m}; \quad \alpha = \frac{4,5}{7,48} = 0,601;$$

2º Passo – Coeficiente de Divergência

Para solos de duas camadas, o coeficiente de divergência (β) é igual a resistividade da segunda camada - ρ_2 dividido pela resistividade da primeira camada ρ_1 . Na Equação 52 é mostrada a expressão matemática para calcular o coeficiente de divergência.

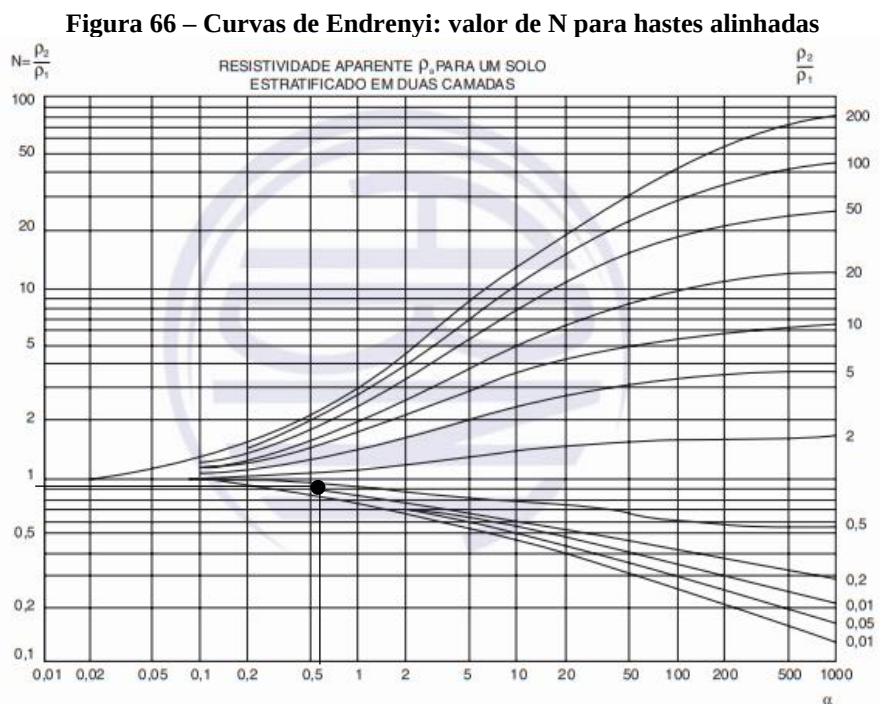
$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (51);$$

Aplicando a expressão matemática da Equação 52, obtém-se o valor do coeficiente de divergência - β , mostrado abaixo:

$$\beta = \frac{347,368}{1100}; \quad \beta = 0,315;$$

3º Passo – Determinação de N e ρ_a

A determinação de N se dá pelos valores obtidos do coeficiente de penetração e do coeficiente de divergência, com a utilização da curva de Endrenyi, a seguir no gráfico da Figura 66 é ilustrado o ponto onde foi identificado $N \approx 0,91$.



Fonte: ABNT NBR 15751, 2013.

A seguir, é mostrado o resultado do cálculo da resistividade aparente para hastes alinhadas.

$$\rho_a = N * \rho_{eq} = 0,91 * 1100 = 1001 \text{ Ohm.m};$$

4º Passo – Resistência de hastes alinhadas (R_{HA})

A seguir, é mostrada a Equação 53 (Visacro Filho, 2002), que é aplicada para realização do cálculo da resistência de hastes alinhadas.

$$R_{HA} = \frac{1 * \rho_a}{n * 2 * \pi * L} * \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{L}{s} * \ln(0,6553 * n) \right] \quad (52)$$

$L \rightarrow$ 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);

$\rho_a \rightarrow$ resistividade aparente em $\Omega \cdot m$;

Em sequência, através da aplicação dos dados na Equação 53, é obtido o valor da resistência em configuração de hastes alinhadas - R_{HA} .

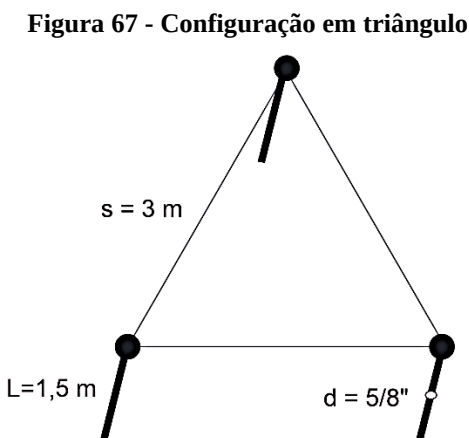
$$R_{HA} = \frac{1 * \rho_a}{4 * 2 * \pi * 1,5} * [\ln\left(\frac{(8 * 1,5)}{(0,625 * 2,54 * 10^{-2})}\right) - 1 + \frac{1,5}{3} * \ln\left(\frac{(1,781 * 4)}{e}\right)]$$

$$R_{HA} = 0,1620 \rho_a = 0,1620 * 1001;$$

$$R_{HA} = 160,92 \Omega;$$

4.2 Triângulo

Na Figura 67 é ilustrado o sistema em estudo, configuração em triângulo com 3 hastes, sendo uma em cada extremidade, comprimento das hastes de 1,5 m, com 5/8" de diâmetro e espaçadas entre si por 3 m.



Fonte: Autoria Própria

1º Passo – Coeficiente de Penetração

O coeficiente de penetração (α) é igual ao raio r da circunferência circunscrita a configuração em triângulo dividido pela distância d_1 , $d_1 = h_1 = 7,48$ m, apresentada na Figura 64. Na Equação 50 é mostrada a equação para cálculo de coeficiente de penetração.

Para determinação do raio r de uma área A , igual àquela de um círculo (aplicada para configuração em triângulo), tem-se que a Equação 54, apresentada a seguir:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}; \quad (53)$$

Para realização do cálculo da área de um triângulo equilátero, utiliza-se a Equação 55, mostrada abaixo:

$$A = s^2 \frac{\sqrt{3}}{4}; \quad (54)$$

Em seguida, são mostrados os resultados obtidos para área e raio do triângulo que são utilizados para determinação do coeficiente de penetração.

$$A = 3^2 * \frac{\sqrt{3}}{4}; \quad A = 3,89m^2; \quad r = \sqrt{\frac{3,89}{\pi}}; \quad r = 1,11m;$$

Disposto de todos os dados necessários, abaixo é mostrado o resultado encontrado de coeficiente de penetração para configuração em triângulo.

$$\alpha = \frac{1,11}{7,48}; \quad \alpha = 0,148;$$

2º Passo – Coeficiente de Divergência

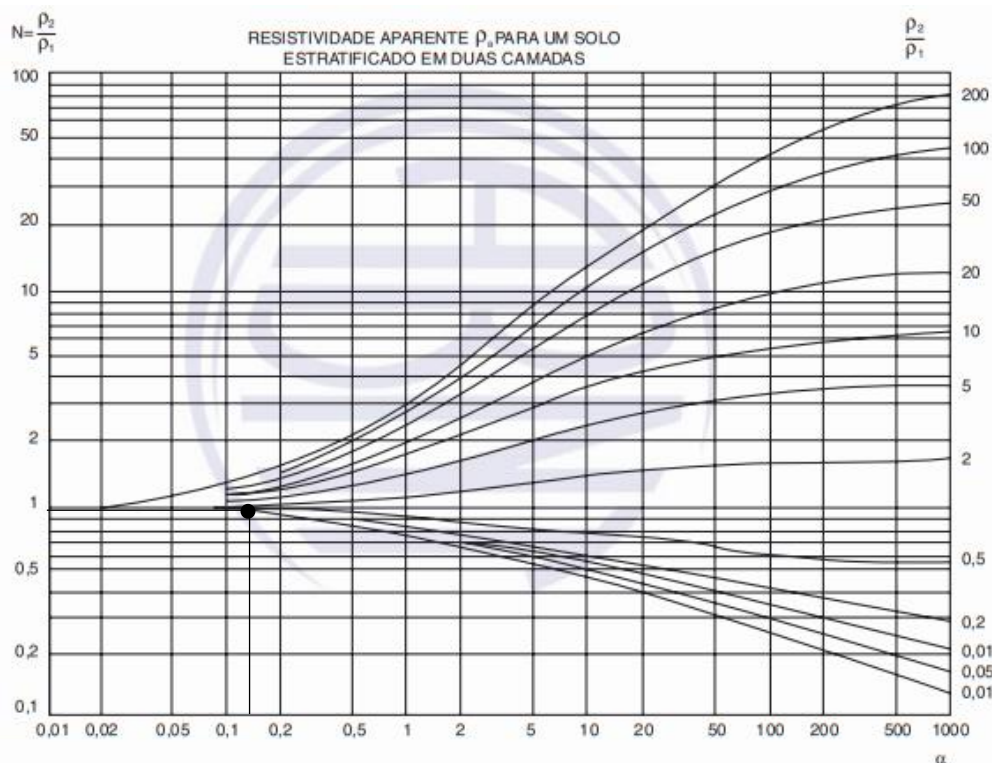
Aplicando a expressão matemática da Equação 52, obtém-se o valor do coeficiente de divergência (β), apresentado abaixo:

$$\beta = \frac{347,368}{1100}; \quad \beta = 0,315;$$

3º Passo – Determinação de N e ρ_a

A determinação de N se dá pelos valores obtidos do coeficiente de penetração e do coeficiente de divergência, a seguir no gráfico da Figura 68 é ilustrado o ponto onde foi identificado $N \approx 0,98$.

Figura 68 - Curvas de Endrenyi: valor de N para triângulo



Fonte: ABNT NBR 15751, 2013.

A seguir, é mostrado o resultado do cálculo da resistividade aparente para a configuração em triângulo.

$$\rho_a = N * \rho_{eq} = 0,98 * 1100; \quad \rho_a = 1078 \, \Omega.m;$$

4º Passo – Determinação da resistência da configuração em triângulo (R_T)

A seguir, é mostrada a Equação 56 (Visacro Filho, 2002), que é aplicada para realização do cálculo da resistência em configuração triangular;

$$R_{Tr} = \frac{1}{3} * \left\{ \frac{\rho_a}{2 * \pi * L} \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 \right] + 2 * L * a \right\} \quad (55)$$

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

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

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

$\rho_a \rightarrow$ resistividade aparente em $\Omega.m$;

Em sequência, através da aplicação de valores na Equação 56, é obtido o resultado da resistência em configuração de triângulo - R_{Tr} :

$$R_{Tr} = \frac{1}{3} * \left\{ \frac{\rho_a}{2 * \pi * 1,5} [\ln \left(\frac{8 * 1,5}{(0,625 * 2,54 \cdot 10^{-2})} \right) - 1] + 2 * 1,5 * 3 \right\}$$

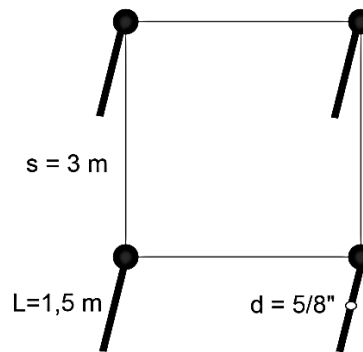
$$R_T = 0,199\rho_a + 3 = 0,199 * 1078 + 3;$$

$$R_T = 217,57 \Omega;$$

4.3 Quadrado

Na Figura 69 é ilustrado o sistema em estudo, topologia quadrado vazio composto por 4 hastes, sendo uma em cada extremidade, comprimento das hastes de 1,5 m, com 5/8 " de diâmetro e espaçadas entre si por 3 m.

Figura 69 - Configuração em quadrado



Fonte: Autoria Própria

1º Passo – Coeficiente de Penetração

O coeficiente de penetração (α) é igual ao raio r da circunferência circunscrita a configuração em quadrado dividido pela distância d_1 , $d_1 = h_1 = 7,48$ m, apresentada na Figura 64. Na Equação 50 é mostrada a equação para cálculo de coeficiente de penetração.

Para determinação do raio r de uma área A , igual àquela de um círculo (aplicada para configuração em quadrado), tem-se que a Equação 57, apresentada a seguir:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}; \quad (56)$$

Para realização do cálculo da área de um quadrado, utiliza-se a Equação 58, mostrada a seguir:

$$A = s^2; \quad (57)$$

Em seguida, são apresentados os resultados obtidos para área e raio do quadrado que são utilizados para determinação do coeficiente de penetração.

$$A = 3^2; A = 9m^2; r = \sqrt{\frac{9}{\pi}}; r = 1,69m;$$

Disposto de todos os dados necessários, abaixo é mostrado o resultado encontrado de coeficiente de penetração para configuração em quadrado.

$$\alpha = \frac{1,69}{7,48}; \alpha = 0,226;$$

2º Passo – Coeficiente de Divergência

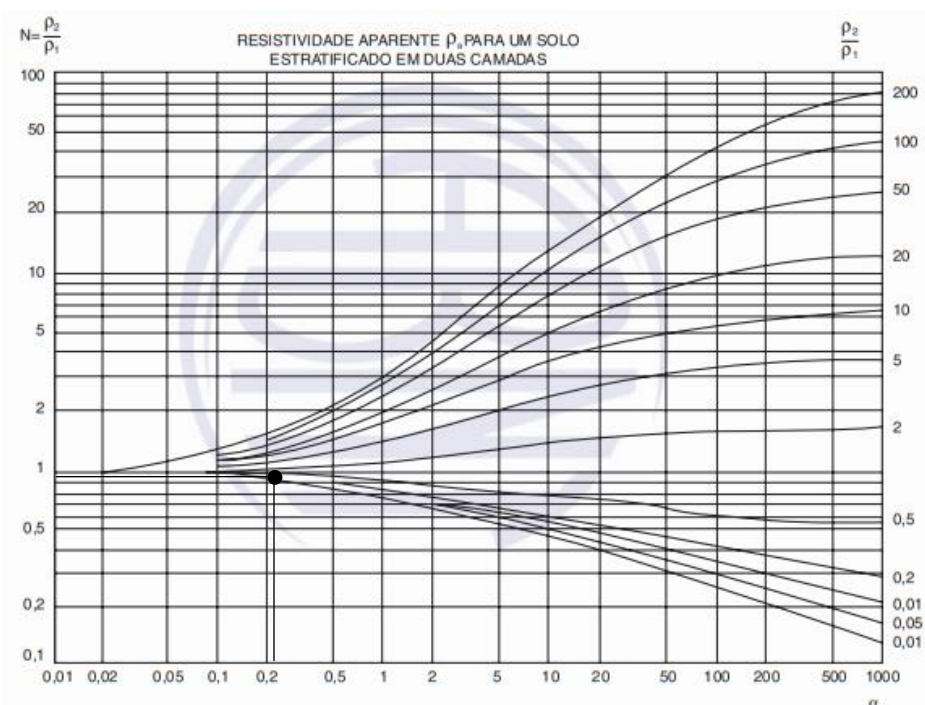
Aplicando a expressão matemática da equação 52, obtém-se o valor do coeficiente de divergência (β), mostrado abaixo:

$$\beta = \frac{347,368}{1100}; \beta = 0,315;$$

3º Passo – Determinação de N e ρ_a

A determinação de N se dá pelos valores obtidos do coeficiente de penetração e do coeficiente de divergência, a seguir no gráfico da Figura 70 é ilustrado o ponto onde foi identificado $N \approx 0,97$.

Figura 70 - Curvas de Endrenyi: valor de N para quadrado



Fonte: ABNT NBR 15751, 2013.

A seguir, é mostrado o resultado do cálculo da resistividade aparente para a configuração em quadrado.

$$\rho_a = N * \rho_{eq} = 0,97 * 1100; \quad \rho_a = \mathbf{1067 \, \Omega.m};$$

4º Passo – Resistência da topologia quadrado (R_Q)

A seguir, é mostrada a Equação 59 (J. M. Nahman, 1996), que é aplicada para realização do cálculo da resistência em configuração de quadrado;

$$R_Q = 0,13 * \left(\frac{\rho_a}{\sqrt{A}} \right) * \left(1 - \frac{2L_{1h}}{3\sqrt{A}} \right) \log_{10} \left(\frac{2400\sqrt{A}}{N} \right) \quad (58)$$

$L_{1h} \rightarrow$ comprimento das hastes em metros (m);

$A \rightarrow$ Área do quadrado em m²;

$N \rightarrow$ A quantidade de reticulados idênticos (para 4 hastes $N=1$);

$\rho_a \rightarrow$ resistividade aparente em $\Omega.m$;

Em sequência, através da aplicação de valores na Equação 59, é obtido o resultado da resistência em configuração de quadrado - R_Q :

$$R_Q = 0,13 * \left(\frac{\rho_a}{\sqrt{9}} \right) * \left(1 - \frac{2 * 1,5}{3\sqrt{9}} \right) \log_{10} \left(\frac{2400\sqrt{9}}{1} \right)$$

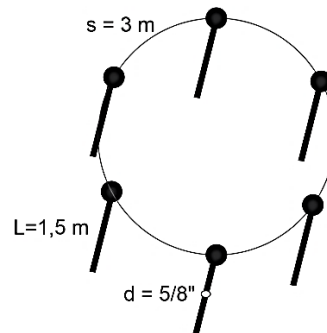
$$R_Q = \rho_a * 0,111 = 1067 * 0,111$$

$$\mathbf{R_Q = 118,90 \, \Omega;}$$

4.4 Circunferência

Na Figura 71 é ilustrado o sistema em estudo, configuração em circunferência, com 6 hastes igualmente espaçadas entre si por 3 metros, diâmetro das hastes 5/8" e comprimento de 1,5 metros.

Figura 71 - Configuração em circunferência



Fonte: Autoria Própria

1º Passo – Coeficiente de Penetração

O coeficiente de penetração (α) é igual ao raio r da configuração em circunferência dividido pela distância $d1$, $d1 = h1 = 7,48 \text{ m}$, apresentada na Figura 64. Na Equação 50 é mostrada a equação para cálculo de coeficiente de penetração.

Para determinação do raio r de uma área A , igual àquela de um círculo, tem-se que a Equação 60, apresentada a seguir:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}; \quad (59)$$

Sabe-se que o sistema em circunferência deve possuir 6 hastes igualmente espaçadas de 3 metros, sendo assim tem-se que:

$$r = 3 \text{ m};$$

Disposto de todos os dados necessários, abaixo é mostrado o resultado encontrado de coeficiente de penetração para configuração em circunferência.

$$\alpha = \frac{r}{d1} = \frac{3}{7,48}; \quad \alpha = 0,401;$$

2º Passo – Coeficiente de Divergência

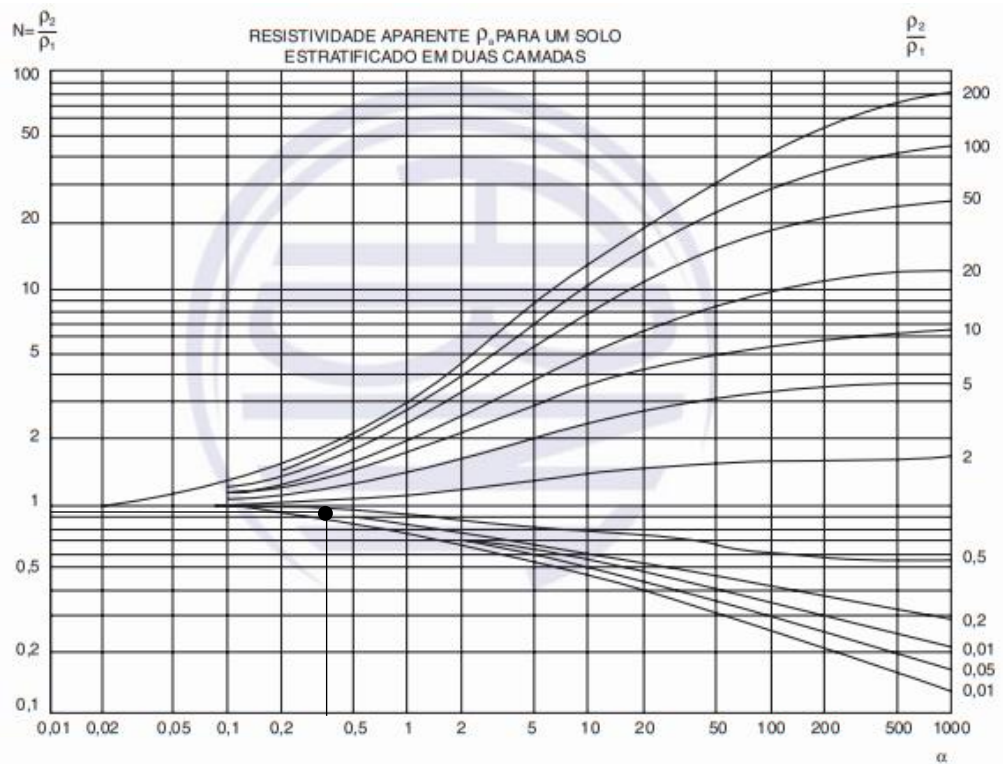
Aplicando a expressão matemática da Equação 52, obtém-se o valor do coeficiente de divergência (β), mostrado abaixo:

$$\beta = \frac{347,368}{1100}; \quad \beta = 0,315;$$

3º Passo – Determinação de N e ρ_a

A determinação de N se dá pelos valores obtidos do coeficiente de penetração e do coeficiente de divergência, a seguir no gráfico da Figura 72 é ilustrado o ponto onde foi identificado $N \approx 0,93$.

Figura 72 - Curvas de Endrenyi: valor de N para circunferência



Fonte: ABNT NBR 15751, 2013.

A seguir, é mostrado o resultado do cálculo da resistividade aparente para a configuração em circunferência.

$$\rho_a = N * \rho_{eq} = 0,93 * 1100; \quad \rho_a = 1023 \, \Omega.m;$$

4º Passo – Resistência da topologia em circunferência (R_C)

A seguir, é mostrada a Equação 61 (Visacro Filho, 2002), que é aplicada para realização do cálculo da resistência em configuração circunferência em estudo.

$$R_C = \frac{1}{n} \frac{\rho_a}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{L}{s} \ln\left(\frac{2n}{\pi}\right) \right] \quad (60)$$

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

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

$n \rightarrow$ número de hastes;

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

$\rho_a \rightarrow$ resistividade aparente em $\Omega \cdot m$;

Em sequência, através da aplicação de valores na Equação 61, é obtido o resultado da resistência em configuração de circunferência - R_C :

$$R_C = \frac{1}{6} * \frac{\rho_a}{2\pi * 1,5} [\ln \left(\frac{(8 * 1,5)}{(0,625 * 2.54 * 10^{-2})} \right) - 1 + \frac{1,5}{3} \ln \left(\frac{(2 * 6)}{\pi} \right)]$$

$$R_C = 0,111\rho_a = 0,111 * 1023; \quad R_C = 113,93 \Omega$$

4.5 Variação de espaçamento, comprimento e diâmetro das hastes

As características das hastes e do espaçamento entre elas influenciam diretamente sobre o valor final de resistência dos sistemas de aterramentos. Por isso, a seguir são mostrados nas Tabelas 12, 13 e 14 os resultados obtidos através das simulações computacionais para variações de comprimento, diâmetro e de espaçamento entre as hastes para as topologias em estudo (hastes alinhadas, triângulo, quadrado e circunferência), em busca de melhores soluções.

Tabela 12 – Resistências para espaçamento 3 de metros

Para espaçamento de 3 metros												
Diâmetro das hastes	Comprimento das hastes (m)											
	4 Hastes alinhadas			Triângulo			Quadrado Vazio			Circunferência 6 hastes		
	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0
1/2"	166,84	116,38	98,36	226,08	155,42	130,75	118,90	83,23	59,45	117,97	83,59	71,32
5/8"	160,92	112,68	95,40	217,57	150,11	126,50	118,90	83,23	59,45	113,93	81,07	69,30
3/4"	156,08	109,65	92,98	210,62	145,76	123,02	118,90	83,23	59,45	110,64	79,01	67,65

Fonte: Autoria Própria

Tabela 13 – Resistências para espaçamento 4 metros

Para espaçamento de 4 metros												
Diâmetro das hastes	Comprimento das hastes (m)											
	4 Hastes alinhadas			Triângulo			Quadrado Vazio			Circunferência 6 hastes		
	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0
1/2"	157,57	108,21	90,59	224,80	155,49	131,48	132,38	105,90	88,25	113,71	79,70	67,55
5/8"	151,77	104,59	87,70	216,38	150,22	127,27	132,38	105,90	88,25	109,71	77,20	65,56
3/4"	147,04	101,63	85,33	209,50	145,92	123,83	132,38	105,90	88,25	106,45	75,16	63,92

Fonte: Autoria Própria

Tabela 14 - Resistências espaçamento de 5 metros

Para espaçamento de 5 metros												
Diâmetro das hastes	Comprimento das hastes (m)											
	4 Hastes alinhadas			Triângulo			Quadrado Vazio			Circunferência 6 hastes		
	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0	1,5	2,4	3,0
1/2"	152,96	104,17	86,74	223,53	155,55	132,21	139,74	118,78	104,80	110,69	77,05	65,04
5/8"	147,24	100,59	83,88	215,19	150,34	128,04	139,74	118,78	104,80	106,74	74,58	63,06
3/4"	142,55	97,66	81,54	208,38	146,09	124,64	139,74	118,78	104,80	103,51	72,56	61,45

Fonte: Autoria Própria

Observando as Tabelas 12, 13 e 14 percebe-se que com o aumento do comprimento e do diâmetro ocorrem alterações significativas e positivas em relação a dissipação de corrente no solo (menores valores das resistências das topologias em estudo).

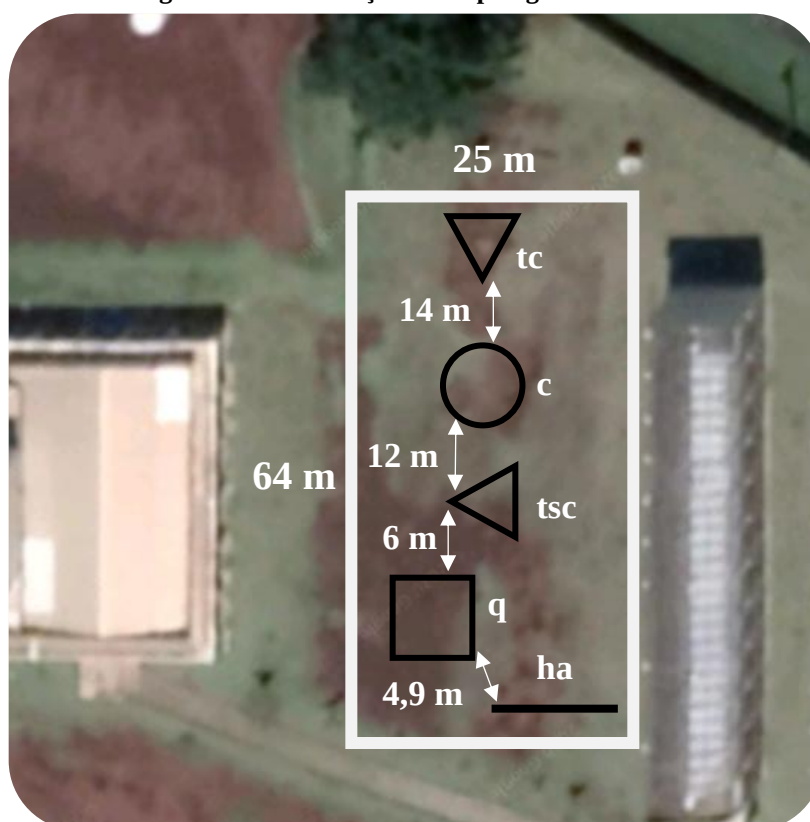
Quando é realizado a alteração do espaçamento entre as hastes, para as configurações em triângulo e em quadrado observa-se que o aumento do espaçamento influencia de forma negativa, fazendo com que os valores de resistências para esses sistemas aumentem, por outro lado, para as configurações em hastes alinhadas e em circunferência os valores de resistências diminuem com o aumento do espaçamento, mas uma diferença pequena se comparado a necessidade de aumentar a dimensão do sistema.

5. IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Segundo a norma de proteção (NBR 5419/2015) as configurações geométricas de um aterramento são definidas considerando como base as características do solo e seu objetivo de proteção (pessoas, equipamentos, entre outros). Esse projeto optou pelo desenvolvimento das topologias clássicas (hastes alinhadas, triângulo, quadrado e circunferência) de aterramento com intuito de realizar a comparação de desempenho entre as topologias e a análise teórico-experimental.

A Figura 73 ilustra a localização das configurações desenvolvidas no solo do laboratório de aterramentos, que são hastes alinhadas – ha, triângulo sem concreto – tsc, triângulo com concreto – tc, quadrado – q e circunferência – c. A configuração de triângulo e triângulo com concreto já existiam no terreno, pois, foram utilizadas para realização de um projeto anterior a este, nesse trabalho a configuração de triângulo com concreto não será explorada nas análises.

Figura 73 - Localização das topologias no terreno



Fonte: Google maps satellite – modificado, 2020

A seguir, são apresentadas as etapas para realização da parte experimental desse trabalho para cada uma das topologias de sistemas de aterramentos em estudo:

- Escavações das Trincheiras

- Solda de Cabos e Hastes
- Instalação dos Sistemas de Aterramentos nas Trincheiras

5.1 Escavações das trincheiras

Após a definição dos locais a serem executados os sistemas de aterramentos e a realização da estratificação, iniciou-se o processo da escavação das trincheiras, assim como é ilustrado na Figura 74, a seguir. Para realização dessa tarefa, fez-se necessário a utilização de ferramentas, como enxada, cavadeira articulada e picareta.

As escavações das trincheiras foram realizadas assim como é estabelecido pela NBR 5410/2004, onde menciona-se que as hastes para aterramento devem ser inseridas no solo a partir da profundidade mínima de 50 cm da superfície.

Figura 74 - Escavação das trincheiras



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 75, ilustrada abaixo é possível perceber as trincheiras desenvolvidas para realização de um sistema de aterramento na forma geométrica de um triângulo. Possui três escavações interligadas com espaçamento de três metros entre elas, com aproximadamente cinquenta centímetros de profundidade. E cada vértices do triângulo possui uma escavação de profundidade de dois metros para inserção de hastes de um metro e meio de comprimento, conectadas por cabos nu de 25,0 mm². Para a topologia em triângulo foi aproveitado a malha já construída pelo trabalho de conclusão de curso de SOUZA, 2018. Foi necessário realizar as medições de resistências da topologia de aterramentos elétricos em triângulo.

Figura 75 - Escavação em forma geométrica de triângulo



Fonte: SOUZA, W. P., 2018

A seguir, a Figura 76 ilustra a escavação da trincheira realizada para instalação do sistema de aterramento em forma geométrica de hastes alinhadas, a escavação possui um comprimento total de nove metros, sendo que nesse espaço foram inseridas quatro hastes, igualmente espaçadas por três metros. A trincheira possui profundidade de cinquenta centímetro para soterrar os cabos e quatro buracos de dois metros para inserção das hastes interligadas pelos cabos.

Figura 76 - Escavação em forma de hastes alinhadas



Fonte: Autoria Própria

Em sequência, na Figura 77 é ilustrado a escavação de trincheiras realizadas para instalação do sistema de aterramentos elétricos em forma geométrica de quadrado. Esse sistema possui quatro escavações interligadas, com comprimento de três metros cada e profundidade de

cinquenta centímetros para soterrar os cabos de ligação. Cada vértice do quadrado possui um buraco de dois metros para inserção das hastes de um metro e meio de comprimento.

Figura 77 - Escavação em forma geométrica de quadrado



Fonte: Autoria Própria

A baixo, na Figura 78 é ilustrado a escavação de trincheiras realizadas para instalação do sistema de aterramento em forma geométrica de circunferência, com comprimento de dezoito metros, o sistema é composto por seis buracos para inserção das hastes, sendo que são igualmente espaçados de três metros. A escavação possui cinquenta centímetros de profundidade para soterrar os cabos de ligação e cada buraco possui dois metros de comprimento.

Figura 78 - Escavação em forma geométrica de circunferência



Fonte: Autoria Própria

Como qualquer outro trabalho, é comum a ocorrência de eventos imprevistos que dificultam na realização de uma tarefa. Nesse caso, na execução das escavações enfrentou-se dois obstáculos, a existência de pedras grandes e de sistemas de canalizações hidráulicas e elétricas no terreno onde foi realizado as escavações.

Antes de iniciar um projeto de escavação é necessário se informar de possíveis sistemas soterrados no solo, como a existência de sistemas elétricos e hidráulicos. Dessa forma procurou-se a administração do Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara para obter os projetos de construção, mas não estavam disponíveis. Entretanto o projeto foi aprovado para ser executado. Com isso, no momento da realização da escavação do sistema de aterramento em forma geométrica de quadrado rompeu-se dois canos hidráulicos, sendo que um realiza a transferência da água da rua para a caixa de água e o outro da caixa de água para a instituição de ensino. Na Figura 79 é ilustrado a danificação ocorrida no sistema de canalização. Assim que foi percebido o ocorrido, o setor responsável foi notificado sobre esse evento e mediante a realização de ações tomadas pelo setor o problema foi solucionado. Após a resolução do problema, foi necessário mudar o local de desenvolvimento do sistema de aterramento de geometria em quadrado.

Figura 79 - Sistema de canalização danificado



Fonte: Autoria Própria

Na execução de todas as escavações dos sistemas de aterramento, foram encontradas pedras e rochas de argila, mas especificamente na escavação geometria de circunferência encontrou-se pedras de maiores dimensões, assim como é ilustrada na Figura 80. Assim, prolongando o tempo para realização das escavações para essa forma geométrica.

Figura 80 - Pedras encontradas nas escavações



Fonte: Autoria Própria

5.2 Solda de cabos e hastes

Usualmente são utilizados dois métodos para realização de conexões entre cabos e hastes de aterramento, através de conectores ou de solda exotérmica. A conexão com a solda exotérmica é mais complexa de se realizar, mas se for executada com os equipamentos corretos tem-se a vantagem no que se refere à manutenção, pois como é uma fusão química de metais pesados (maior resistência a esforços mecânicos e vibrações), e por não possui parafusos, a possibilidade de ocorrer oxidação e rompimento é menor, se comparado aos conectores.

Na execução dessa atividade foi necessário utilizar moldes para solda exotérmica (“Cadin”) disponível no laboratório da instituição de ensino. Como o diâmetro das hastes é superior ao dos moldes disponíveis, fez-se necessário uma adaptação em um de seus encaixes e para aumentar a área de contato utilizou-se uma furadeira e uma broca para concreto de mesmo diâmetro das hastes (5/8”). A seguir, na Figura 81 é ilustrado o molde utilizado para realização das soldas exotérmicas.

Figura 81 - Molde Cadin utilizado para realização de soldas



Fonte: Autoria Própria

Para realização dessa atividade, além do molde é necessário possuir três componentes essenciais para executar a solda, que são o disco de metal, o palito ignitor e o pó exotérmico, ilustrados a seguir na Figura 82.

Figura 82 - Pó exotérmico, disco metálico e palito ignitor



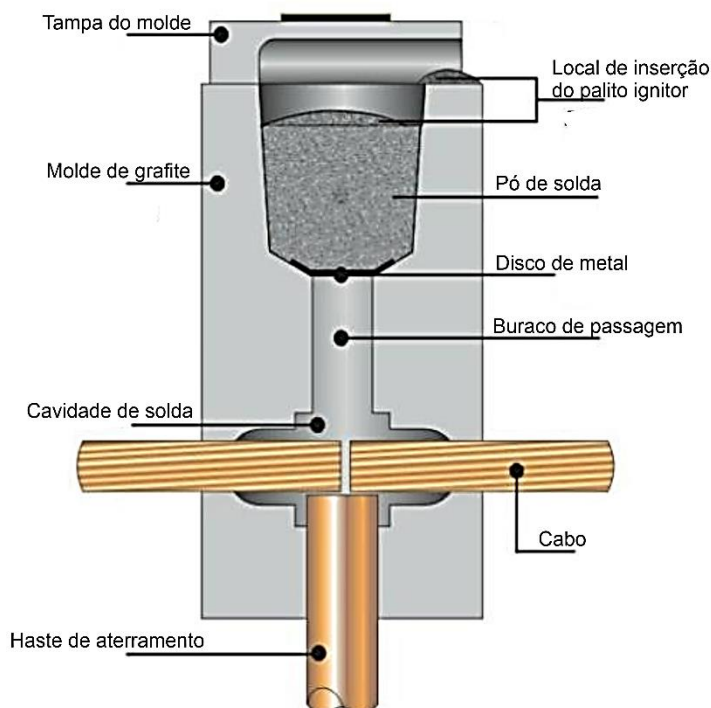
Fonte: Autoria Própria

Os procedimentos para a realização da solda exotérmica são descritos em cinco passos, apresentados a seguir:

- Passo 1: Foi colocado os condutores na parte inferior do molde ilustrado na Figura 83, sendo que para a primeira solda foi aquecido o molde por pelo menos 15 minutos. Este processo evita buracos na solda, elevando a eficácia da mesma.
- Passo 2: Foi fechado o molde e certificado de que as extremidades do cabo e da haste estavam centradas no ponto de soldagem.
- Passo 3: Foi colocado o disco no buraco da parte superior do molde (ilustrado na Figura 83), com a parte côncava para baixo, após, foi despejado o pó exotérmico com a quantidade correspondente a conexão desejada.
- Passo 4: Fechou-se a tampa da parte superior do molde, foi acendido o palito ignitor e inserido rapidamente dentro do “cadin”. Atentando-se de utilizar luvas protetoras para realização desse processo.

- Passo 5: Aguardou-se cerca de dez segundos para abrir a tampa do molde, pois o molde estava muito quente. Após, abriu-se o molde com auxílio de um alicate, foi retirado a conexão do molde e efetuou-se a limpeza do equipamento.

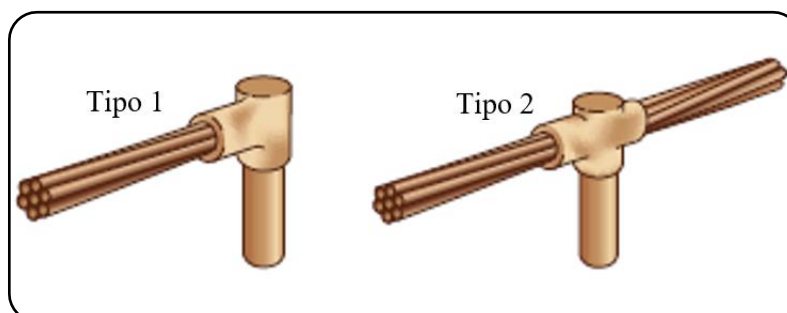
Figura 83 - Ilustração da parte superior e da parte inferior do molde



Fonte: Catalogo Exosolda – modificado (2020)

Para realização do sistema de aterramento em configuração hastes alinhadas foram realizadas dois tipos de conexões, que são ilustradas na Figura 84, mostrada abaixo. A conexão do tipo 1 foi utilizada apenas nas extremidades da configuração em hastes alinhadas. Nas demais conexões dos sistemas de aterramento foram realizadas apenas a conexão do tipo 2.

Figura 84 - Tipos de conexões realizadas com molde

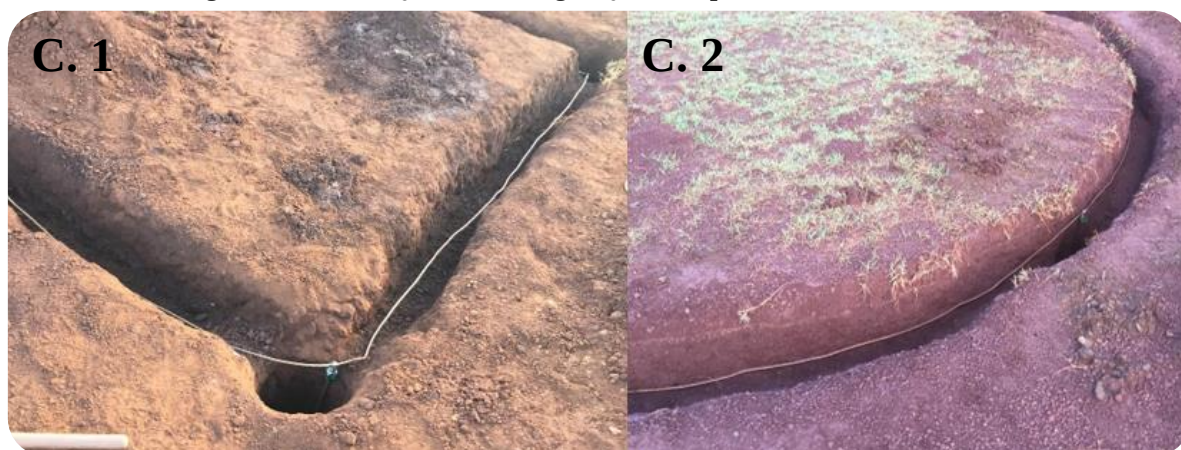


Fonte: Catalogo Exosolda – modificado (2020)

5.3 Instalação dos sistemas de aterramentos nas trincheiras

Nos sistemas de aterramentos desenvolvidos utilizou-se hastes de 1,5 metros, enterradas a uma profundidade de 2,0 metros na posição vertical. Os cabos usados para interligação das hastes são de cobre nu e possuem bitola de 25,0 mm², com comprimento de 3,0 metros interligando uma haste a outra e foram soterrados a uma profundidade de 50,0 centímetros da superfície. Ressalta-se que em um sistema de aterramento é ideal a utilização de hastes de 2,4 metros ou de 3,0 metros de comprimento, mas como esse trabalho tem por propósito a realização de estudos e análises (os sistemas não serão utilizados para proteção de equipamentos e seres humanos), as hastes de 1,5 metros de comprimento atendem ao requisito. Abaixo, na Figura 85 é ilustrado a realização da instalação dos sistemas de aterramentos em configurações geométricas de quadrado (C. 1) e de circunferência (C. 2).

Figura 85 – Escavações das configurações em quadrado e em circunferência



Fonte: Autoria Própria

6. MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTOS

O método escolhido para obtenção dos valores de resistência é o da queda de potencial, pois além de ser o mais usual, é simples e rápido na obtenção dos dados, fornecendo diretamente os valores de resistências.

6.1 Método da queda de potencial

Por meio do método da queda de potencial, faz necessário estabelecer uma tensão entre o sistema de aterramento (ponto E) e o eletrodo de potencial (ou sonda de tensão, ponto S), e o eletrodo auxiliar de corrente (ponto H). Com isso, surgirá uma corrente no sistema, que por sua vez, com a variação da haste de prova, será possível descobrir o valor da resistência do solo, que possui a mesma característica da queda de potencial medida (VISACRO, 2002).

A seguir na Figura 86 e na Figura 87 é ilustrada a forma com que é utilizado um terrômetro pelo método de queda de tensão, com seus devidos pontos de ligações.

Figura 86 - Medição da resistência de aterramento por queda de potencial

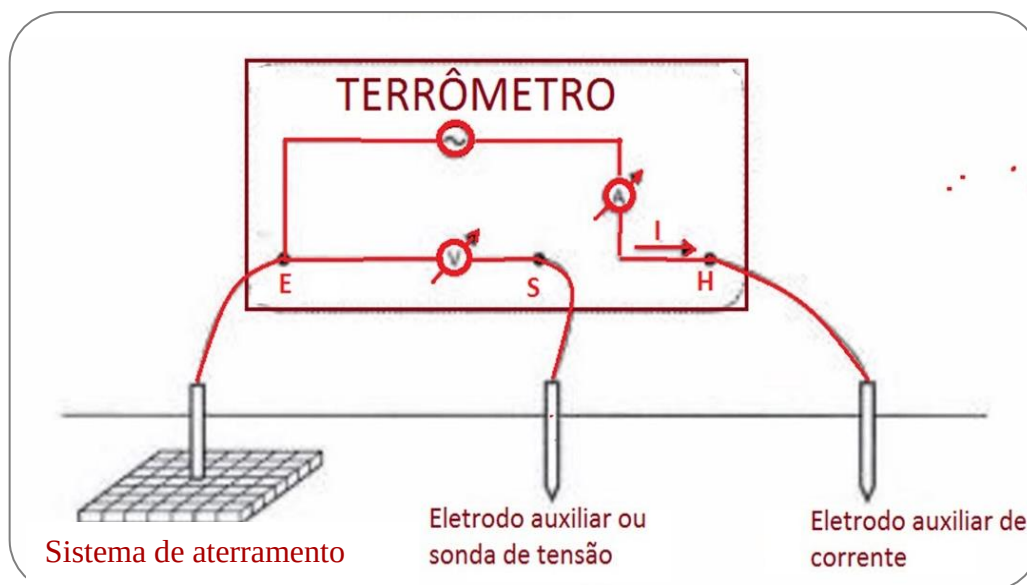
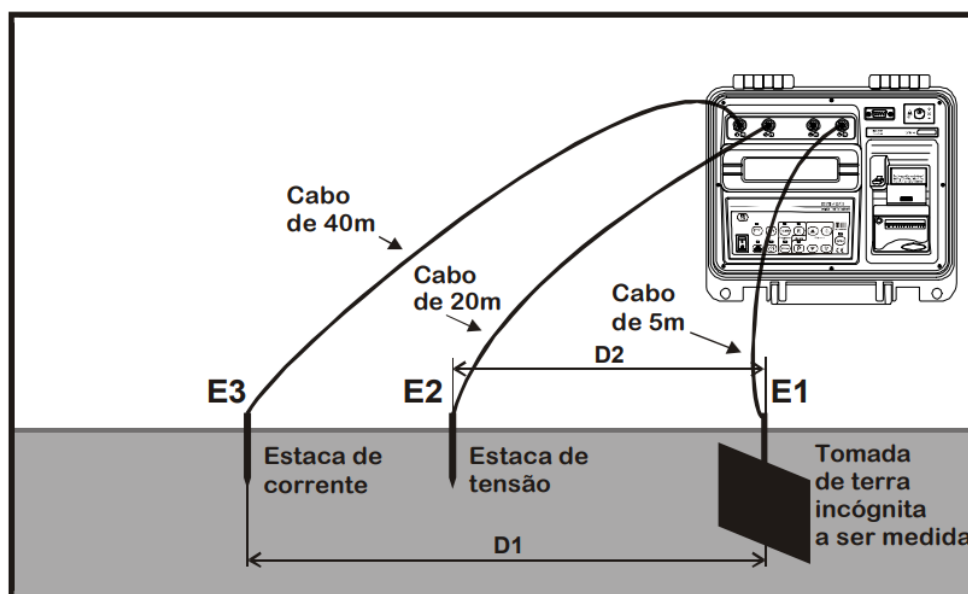


Figura 87 - Descrição do método de medição de resistência de aterramentos

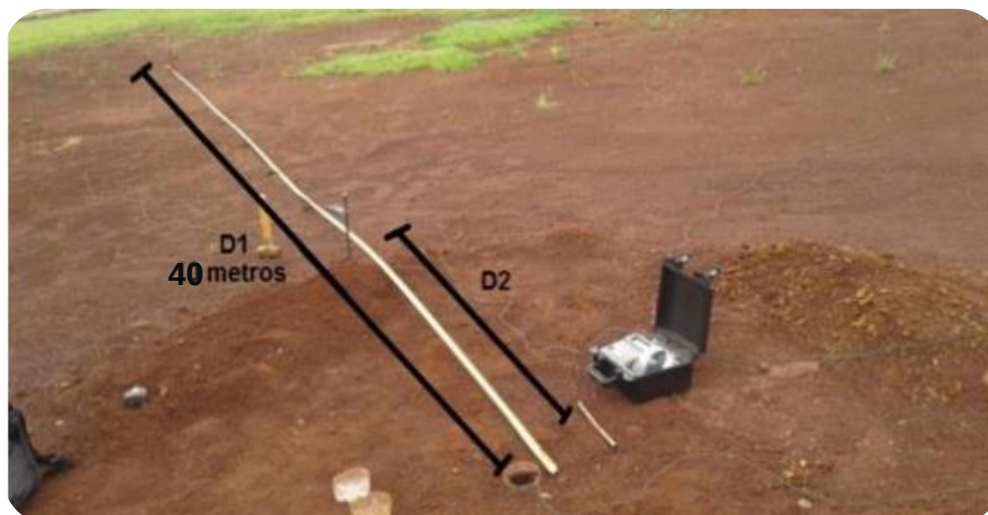


Fonte: Manual Terrômetro EM-4055

Para realização das medições oficiais, a estaca de corrente foi fixada na terra a uma distância ($D1$) de 40 metros de cada sistema de aterramento medido, e a estaca de tensão foi posta inicialmente a uma distância ($D2$) de 38 metros de distância do sistema de aterramento, após realizou-se novas medições, uma a cada variação de 2 metros, até o momento em que atingiu uma distância de 2 metros do sistema de aterramentos elétrico.

A seguir, na Figura 88 é ilustrada a realização das medições de resistência no terreno no qual foi executado os sistemas de aterramentos propostos nesse trabalho. Destacando que a estaca posicionada a uma distância $D1$ da tomada de terra permanece fixa e a estaca cravada a uma distância $D2$ varia de posição de 2 em 2 metros para cada medição de resistência.

Figura 88 - Medição de resistência de aterramentos elétricos



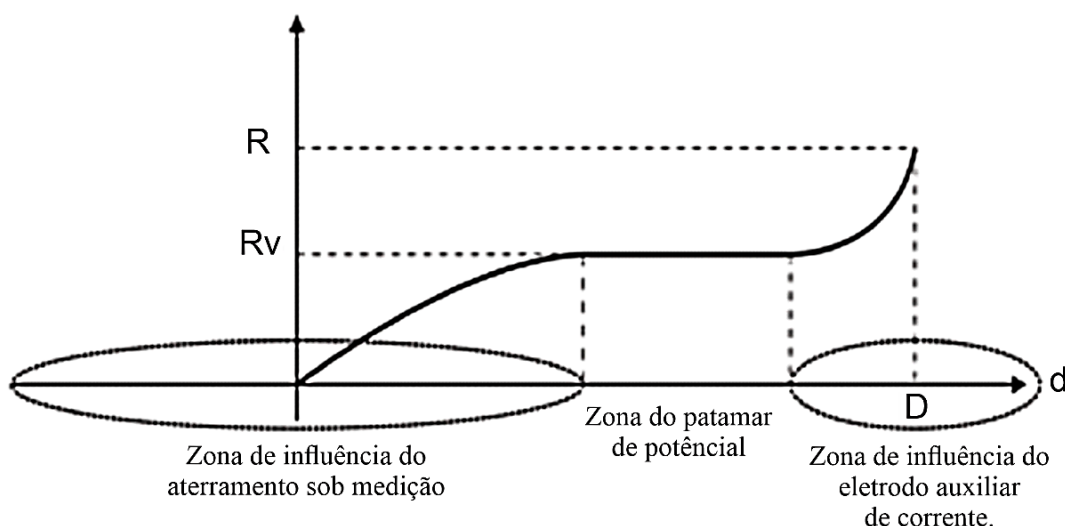
Fonte: Autoria Própria

Visacro destaca que é necessário tomar cuidado com a excessiva proximidade entre o eletrodo de corrente e a malha, para não ocorrer superposição de regiões de aterramento, o que faria com que os dados medidos fossem mascarados. Nesse trabalho, como no Tópico 6.2.2 foi determinado uma distância de 40 metros entre o sistema de aterramento e o eletrodo de corrente, a curva gerada apresentou o “patamar”.

No caso da curva gerada não apresentar o patamar, isto é possivelmente devido à excessiva proximidade entre o eletrodo de corrente e a malha, havendo superposição nas regiões de aterramento. Assim, recomenda-se um aumento no afastamento do eletrodo de corrente e a repetição do processo até que sejam obtidos resultados satisfatórios. (VISACRO. 2002 p.75).

Após a realização das medições, respeitando os limites de proximidade, é obtido uma curva semelhante a ilustrada na Figura 89, a partir da característica da curva é obtido o valor de resistência do sistema de aterramentos elétricos sob as condições do solo no momento da realização das medições. O ideal é realizar medições em diversas direções no solo, mas devido as limitações de dimensões do terreno, nem sempre é possível realizar medições em todas as direções.

Figura 89 - Curva característica teórica de resistência de aterramento



Fonte: MODENA, 2011

Sendo que:

- R: resistência obtida variando a distância da sonda desde a distância $d=D$ até $d=0$ (o eletrodo a medir)
- Rv: valor verdadeiro do aterramento

A figura 89 é ilustra as três zonas presentes no momento da realização das medições de resistências em função da distância, a primeira é a zona de influência do sistema de aterramento em medição, no meio tem-se a zona do patamar de potencial, e é nessa zona onde ocorre a estabilização do valor de resistência e consequentemente onde é obtido o valor verdadeiro do sistema de aterramentos elétricos e a última zona é a zona de influência do eletrodo auxiliar de corrente.

Destaca-se que nem sempre a estabilização na zona do patamar de potencial é perfeita, pode ocorrer uma pequena variação entre os valores medidos, mas ainda assim é possível extrair o valor da resistência realizando a média aritmética entre os valores que se encontram na zona de patamar.

6.2 Resultados experimentais

Após a realização das medições de resistências através do método apresentado no capítulo 6.1, os valores medidos foram utilizados para realização de plotagens de gráficos de curvas características de resistências. Para realização das medições de resistências no primeiro caso foi adotado uma distância de 20 metros do eletrodo auxiliar de corrente ao sistema de aterramento. Após verificar que as curvas apresentadas não apresentaram o patamar, no segundo caso adotou-se uma distância de 40 metros do eletrodo auxiliar de corrente ao sistema de aterramento o que melhorou bastante os resultados medidos.

6.2.1 Primeiro caso

No primeiro caso o eletrodo auxiliar de corrente foi fixado a uma distância de 20 metros e o eletrodo auxiliar de tensão foi iniciado a uma distância de 18 metros do sistema de aterramento e a cada redução de 2 metros de distância entre o eletrodo e o sistema de aterramento foi realizado uma nova medição, totalizando 9 medições de resistências.

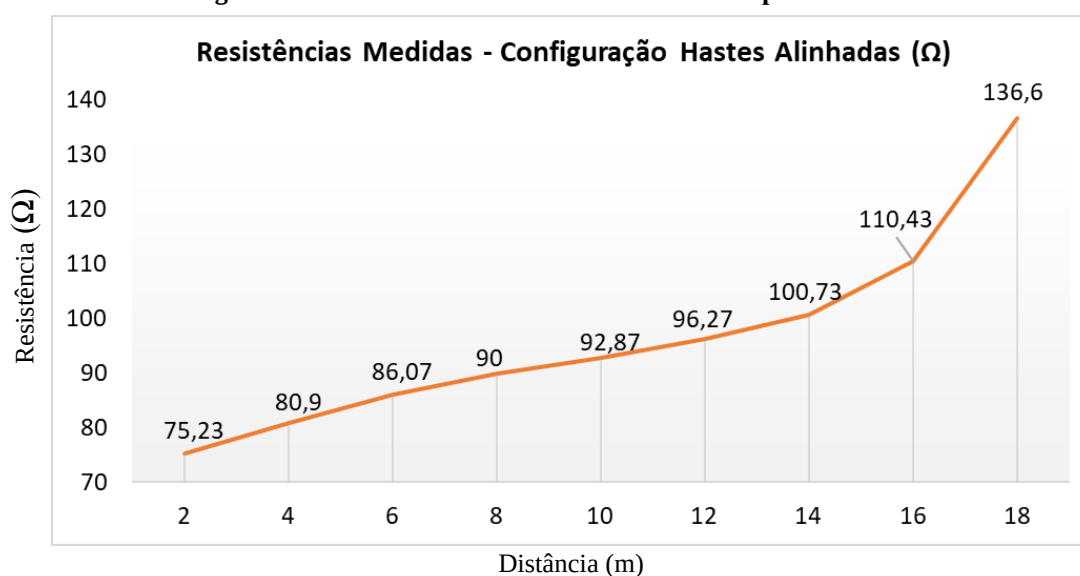
A seguir, na Tabela 15 é apresentado os valores obtidos para a medição de resistências na topologia em configuração de hastes alinhadas e na Figura 90 é ilustrado um gráfico com os valores da resistência medidas versus distância. Nesse caso não foi possível obter o valor de resistência do sistema de aterramentos elétricos, pois a zona de patamar de potencial não foi bem definida.

Tabela 15 - Resistências medidas configuração em hastes alinhadas para 1º caso

Hastes Alinhadas				
Distância (m)	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Medição 3 (Ω)	Média
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

Figura 90 - Resistências medidas hastes alinhadas para 1º caso



Fonte: Autoria Própria

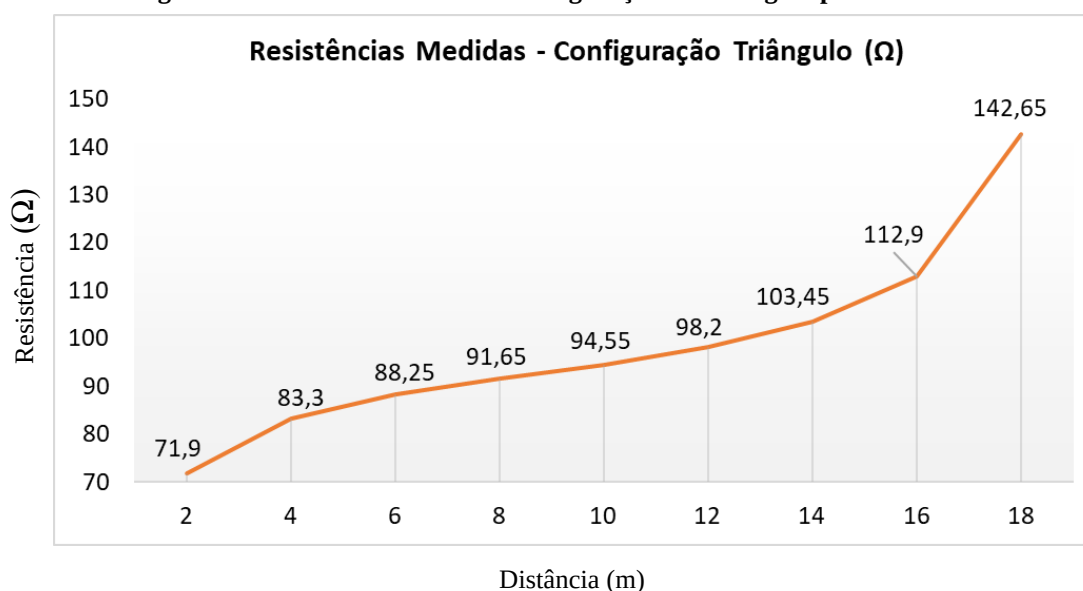
A seguir, na Tabela 16 é apresentado os valores obtidos para a medição de resistências na topologia em configuração de triângulo e na Figura 91 é ilustrado um gráfico com os valores da resistência medidas versus distância. Nesse caso também não foi possível obter o valor de resistência do sistema de aterramentos elétricos, pois a zona de patamar de potencial não foi bem definida.

Tabela 16 - Resistências medidas configuração em triângulo para 1º caso

Triângulo			
Distância (m)	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Média
18	148,8	136,5	142,65
16	116,2	109,6	112,9
14	104,4	102,5	103,45
12	98,1	98,3	98,2
10	94	95,1	94,55
8	90,8	92,5	91,65
6	87,7	88,8	88,25
4	82,5	84,1	83,3
2	70,8	73	71,9

Fonte: Própria Autoria

Figura 91 - Resistências medidas configuração em triângulo para 1º caso



Fonte: Autoria Própria

Como mostrado na Figura 90 do sistema em configuração de hastes alinhadas e na Figura 91 do sistema em configuração triângulo para o primeiro caso adotando uma distância fixa de 20 metros entre o eletroduto auxiliar de corrente e o sistema de aterramentos, não obteve-se estabilização do valor da resistência, inviabilizando definir a zona de patamar de potencial e consequentemente a obtenção dos valores das resistências reais dos sistemas de aterramentos elétricos, devido à excessiva proximidade entre o eletrodo de corrente e a malha de aterramento, o que ocasiona a superposição nas regiões de aterramento. Dessa forma fazendo-se necessário realizar novamente todas as medições de aterramento, adotando uma distância maior, de

exatamente 40 metros (tamanho máximo dos cabos do terrômetro utilizado), entre o eletroduto auxiliar de corrente e o sistema de aterramento, que é apresentado a seguir no tópico 6.2.

6.2.2 Segundo caso

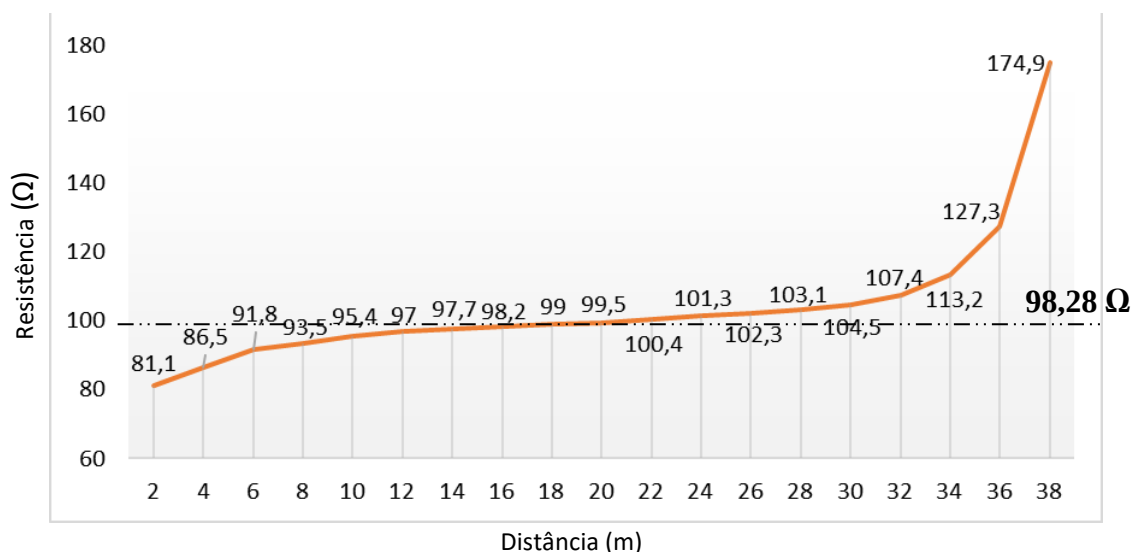
No segundo caso o eletroduto auxiliar de corrente foi fixado a uma distância de 40 metros e o eletroduto auxiliar de tensão foi iniciado a uma distância de 38 metros do sistema de aterramento e a cada redução de 2 metros de distância entre o eletroduto e o sistema de aterramento foi realizado uma nova medição, totalizando 19 medições de resistências. Para encontrar o valor da resistência experimental de cada sistema, em cada gráfico, foi traçado uma linha de tendência entre os valores centrais, com a linha de tendência definida foi adotado um critério de manter no máximo $2,5\Omega$ a diferença entre a primeira e a última medida selecionada para obtenção das resistências dos sistemas de aterramentos elétricos.

A seguir, na Tabela 17 é apresentado os valores obtidos para a medição de resistências na topologia em configuração de hastes alinhadas e na Figura 92 é ilustrado um gráfico com os valores de resistências medidas versus distância juntamente com a linha de tendência e o valor de resistência média do sistema. Para encontrar o valor de resistência do sistema, realizou-se a média de todos os valores que estão próximos a linha de tendência do gráfico, localizados entre as distâncias de 12 metros a 20 metros, assim obtendo-se uma resistência média do sistema de $R_{HA} = 98,28 \Omega$.

Tabela 17 - Resistências medidas para configuração em hastes alinhadas

Hastes Alinhadas			
Distância (m)	Medições em Ω	Distância (m)	Medições em Ω
8	174,9	18	99
36	127,3	16	98,2
34	113,2	14	97,7
32	107,4	12	97
30	104,5	10	95,4
28	103,1	8	93,5
26	102,3	6	91,8
24	101,3	4	86,5
22	100,4	2	81,1
20	99,5		

Fonte: Própria autoria

Figura 92 – Resistências medidas hastes alinhadas e linha de tendência

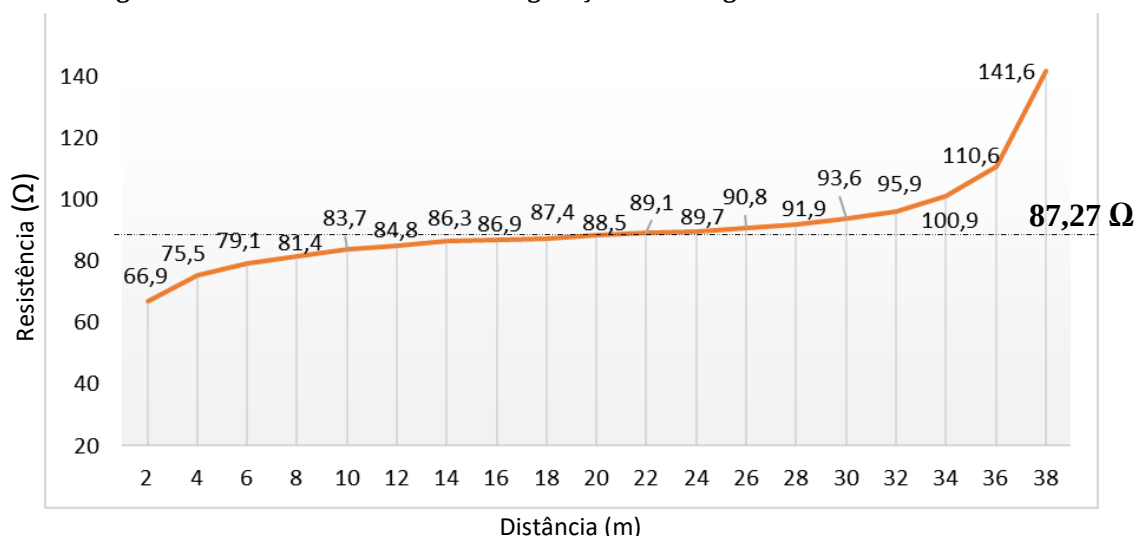
A seguir, na Tabela 18 é apresentado os valores obtidos para a medição de resistências na topologia em configuração de triângulo e na Figura 93 é ilustrado um gráfico com os valores de resistências medidas versus distância juntamente com a linha de tendência e o valor de resistência média do sistema. Para encontrar o valor de resistência do sistema, realizou-se a média de todos os valores que estão próximos a linha de tendência do gráfico, localizados entre as distâncias de 14 metros a 20 metros, assim obtendo-se uma resistência média do sistema de $R_T = 87,27 \Omega$.

Tabela 18 - Resistências medidas para configuração em triângulo

Triângulo			
Distância (m)	Medições em Ω	Distância (m)	Medições em Ω
38	141,6	18	87,4
36	110,6	16	86,9
34	100,9	14	86,3
32	95,9	12	84,8
30	93,6	10	83,7
28	91,9	8	81,4
26	90,8	6	79,1
24	89,7	4	75,5
22	89,1	2	66,9
20	88,5		

Fonte: Própria autoria

Figura 93 - Resistências medidas configuração em triângulo e linha de tendência



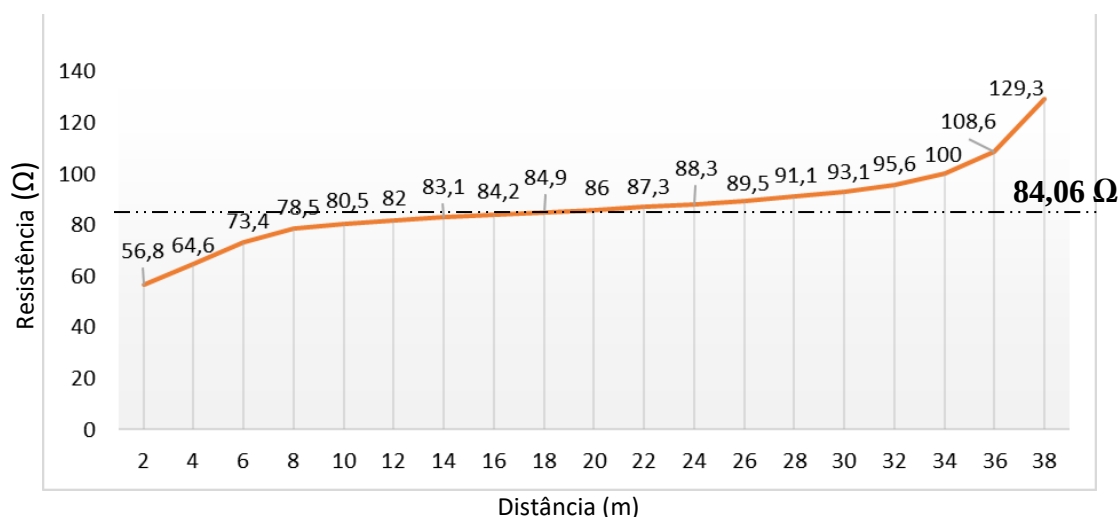
Fonte: Própria autoria

A seguir, na Tabela 19 é apresentado os valores obtidos para a medição de resistências na topologia em configuração de quadrado e na Figura 94 é ilustrado um gráfico com os valores das resistências medidas versus distância juntamente com a linha de tendência e o valor de resistência média do sistema. Para encontrar o valor de resistência do sistema, realizou-se a média de todos os valores que estão próximos a linha de tendência do gráfico, localizados entre as distâncias de 14 metros a 18 metros, assim obtendo-se uma resistência média do sistema de $R_{QV} = 84,06 \Omega$.

Tabela 19 - Resistências medidas para configuração em quadrado

Quadrado			
Distância (m)	Medições em Ω	Distância (m)	Medições em Ω
38	129,3	18	84,9
36	108,6	16	84,2
34	100	14	83,1
32	95,6	12	82
30	93,1	10	80,5
28	91,1	8	78,5
26	89,5	6	73,4
24	88,3	4	64,6
22	87,3	2	56,8
20	86		

Fonte: Própria autoria

Figura 94 - Resistências medidas configuração em quadrado e linha de tendência

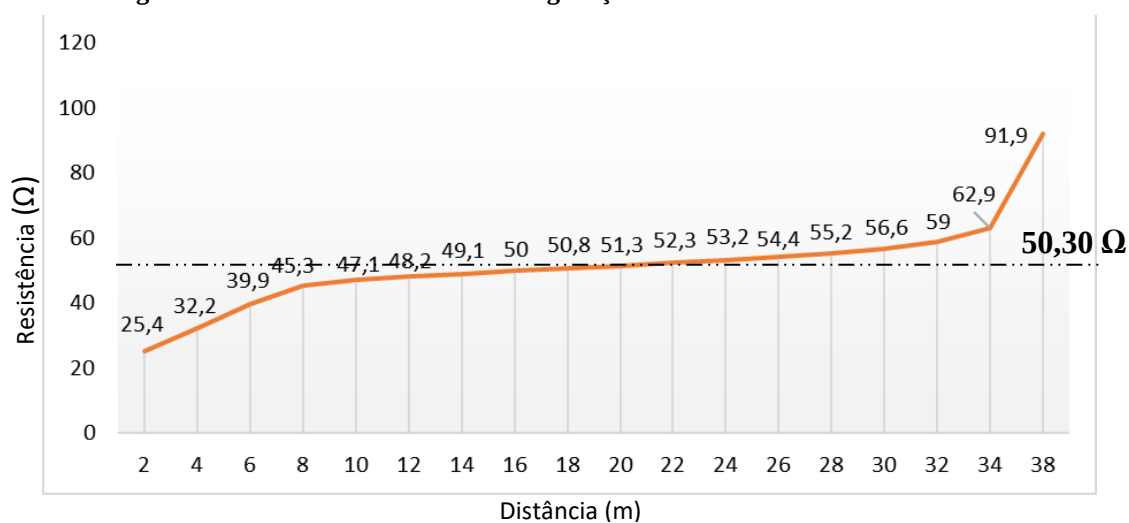
Fonte: Própria autoria

A seguir, na Tabela 20 é apresentado os valores obtidos para a medição de resistências na topologia em configuração de circunferência e na Figura 95 é ilustrado um gráfico dos valores de resistências medidas versus distância juntamente com a linha de tendência e o valor de resistência média do sistema. Para encontrar o valor de resistência do sistema, realizou-se a média de todos os valores que estão próximos a linha de tendência do gráfico, localizados entre as distâncias de 14 metros a 20 metros, assim obtendo-se uma resistência média do sistema de $R_C = 50,03 \Omega$. Para a configuração em circunferência não foi possível realizar a medição de resistência na distância de 36 metros, pois, o ponto de medição está localizado no meio do corredor que dá acesso ao refeitório do Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara.

Tabela 20 - Resistências medidas para configuração em circunferência

Circunferência			
Distância (m)	Medições em Ω	Distância (m)	Medições em Ω
38	91,9	18	50,8
36	...	16	50
34	62,9	14	49,1
32	59	12	48,2
30	56,6	10	47,1
28	55,2	8	45,3
26	54,4	6	39,9
24	53,2	4	32,2
22	52,3	2	25,4
20	51,3		

Fonte: Própria autoria

Figura 95 - Resistências medidas configuração em circunferência e linha de tendência

Fonte: Própria autoria

A Tabela 21, mostrada abaixo, lista todos os valores de resistências médios para os sistemas de aterramentos desenvolvidos, sendo apresentados em ordem decrescentes em relação ao valor de resistência.

Tabela 21 - Valores médios de resistências para cada sistema de aterramento

Topologias	Resistências Médias (Ω)
Hastes alinhadas	98,28
Triângulo	87,27
Quadrado vazio	84,06
Circunferência	50,30

Fonte: Própria autoria

No segundo caso como foi considerado uma distância maior, de 40 metros, entre o eletroduto auxiliar de corrente e o sistema de aterramento percebe-se que a zona de influência do sistema de aterramento em medição, a zona de patamar de potencial e a zona de influência do eletroduto auxiliar de corrente estão bem definidas se comparado ao primeiro caso, onde não foi possível identificar a zona de patamar, impossibilitando encontrar os valores verdadeiros das resistências experimentais dos sistemas de aterramentos elétricos.

7. RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA TEÓRICA EXPERIMENTAL

Após as medições de resistividade do solo, realização da estratificação, construção das topologias: hastes alinhadas, triângulo, quadrado e circunferência e realização das medições de resistência das configurações, foram obtidos os resultados de resistências teóricas e resistências experimentais para cada sistema, que são apresentados na Tabela 22, a seguir:

Tabela 22 - Resultados obtidos para as configurações de aterramentos

Resistências das topologias em estudo (Ω)				
Tipo:	4 Hastes alinhadas	Triângulo	Quadrado vazio	Circunferência de 6 hastes
Teórica	160,92	217,57	118,90	113,93
Experimental	98,28	87,27	84,06	50,30

Fonte: Autoria Própria

A seguir, na Tabela 23 é mostrado o comparativo percentual das resistências experimentais em relação as respectivas resistências teóricas dos sistemas de aterramentos elétricos:

Tabela 23 - Comparativo percentual para as configurações de aterramentos

Comparativo percentual entre as resistências experimentais em relação as resistências teóricas (%)			
4 Hastes alinhadas	Triângulo	Quadrado vazio	Circunferência de 6 hastes
61,07%	40,48%	70,69%	44,14%

Fonte: Autoria Própria

Analisando as Tabelas 22 e 23 é nítido que os valores obtidos de resistências experimentais são diferentes das resistências teóricas dos sistemas de aterramentos elétricos, entre as justificativas, destaca-se o fato de que as medições das resistências experimentais foram realizadas em fevereiro de 2020 que é considerado um mês úmido, sendo assim como maior concentração de chuvas, o que aumenta a condutividade do solo e consequentemente faz com que os valores medidos de resistências de aterramentos sejam menores, por outro lado a estratificação foi realizada em setembro de 2019 classificado como um mês seco, dessa forma o solo estava mais rígido e com menos umidade, o que resulta em valores maiores de resistividade do solo e consequentemente das resistências teóricas de aterramentos elétricos.

Além da análise anterior, tem-se também a influência do sistema de tubulação hidráulica presente no solo, que causa interferência no valor de resistência medida, podendo diminuir ou aumentar o valor, quando a tubulação estiver totalmente preenchida de água e/ou se possuir

pontos de vazamentos a condutividade será maior e consequentemente o valor da resistência medido é menor, por outro lado, se estiver vazio a condutividade será menor e por consequência a resistência será maior devido ao espaço vazio presente no solo. Foi encontrado tubulação de sistemas elétricos, que provoca interferências eletromagnéticas. E também a presença de formações rochosas, fendas e cupinzeiros no solo.

Além das análises gerais, é importante apresentar as análises particulares sobre cada um dos sistemas de aterramentos elétricos, pois cada um dos sistemas desenvolvidos possui sua particularidade na obtenção dos resultados teóricos e na parte construtiva para obtenção dos valores experimentais.

As expressões matemáticas utilizadas para cálculos das resistências dos sistemas em hastes alinhadas, triângulo, quadrado e circunferência são dependentes de variáveis, que tem por objetivo adaptar o sistema para obter um resultado o mais próximo possível do real, de acordo com as alterações das características físicas dos sistemas desenvolvidos. Para os sistemas em hastes alinhadas, triângulo e circunferência é considerado as variáveis: comprimento das hastes, número de hastes, diâmetro das hastes e resistividade aparente. Em contrapartida, o sistema de topologia em quadrado leva em consideração as variáveis: comprimento das hastes, número de hastes, área do sistema (espaçamento) e resistividade aparente. Dessa forma o equacionamento para obtenção da resistência do sistema em quadrado desconsidera o diâmetro das hastes, assim como pode ser comprovado através dos resultados apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14. O que é importante ser considerado, pois o diâmetro das hastes influência diretamente na condutividade das hastes e consequentemente na resistência do sistema. Outra variável que não é considerado nas equações apresentadas é a resistividade do material condutor utilizado para fabricação das hastes de aterramentos elétricos.

Devido à falta de experiência na construção de uma topologia de aterramentos, e pela configuração em hastes alinhadas ser a primeira a ser desenvolvida, seus seguimentos que ligam as hastes aos cabos não ficaram perfeitamente alinhados, devido a grama e raízes presentes na área, dificultando a realização das escavações, outro fator a ser destacado é que nesse sistema as soldas dos cabos com as hastes tiveram uma maior resistência de contato, o que influencia diretamente no resultado obtido da resistência experimental do sistema.

Em relação ao desenvolvimento experimental da configuração em quadrado destaca-se que próximo a configuração foram encontradas as tubulações hidráulicas e a tubulação elétrica,

que como mencionado anteriormente, influenciam diretamente na condutividade e consequentemente na resistência do sistema experimental.

O sistema de topologia em circunferência foi o último a ser desenvolvido, sendo assim, devido a experiência adquirida no desenvolvimento dos sistemas anteriores, obteve-se um excelente alinhamento entre as hastes. Esse foi o sistema de maior complexidade para escavações das trincheiras, pois foram encontradas várias pedras nas escavações, o que causa um aumento no valor de resistência do sistema de aterramento, pois a grande quantidade de pedras na área de construção influencia diretamente na condutividade do solo.

A circunferência obteve o melhor resultado experimental, o que era esperado devido ao resultado apresentado pelas simulações computacionais, destaca-se que assim como nas demais configurações de aterramentos elétricos o sistema foi construído com espaçamento de 3 metros, o dobro do tamanho das hastes, dessa forma diminuindo a probabilidade de ocorrência de saturação do solo e interferência por proximidade de hastes.

Considerando os resultados teóricos e os experimentais, observa-se que o quadrado obteve o segundo melhor resultado, o que o torna um sistema atrativo, pois se comparado a configuração em hastes alinhadas, o que muda é o acréscimo de apenas um cabo interligando as hastes das extremidades, o que resultaria em um aumento de preço, mas irrelevante, levando em consideração a melhora do resultado de resistência do sistema de aterramentos elétricos.

Se levado em consideração apenas os resultados experimentais (condições reais do solo em estudo), observa-se que o sistema de topologia em triângulo apresentou um valor muito próximos ao resultado da topologia em quadrado, com uma diferença de $3,21 \Omega$, o que não é relevante dependendo da aplicação, e que torna o sistema em triângulo mais vantajoso, pois é um sistema mais barato que utiliza apenas 3 hastes e uma menor quantidade em metros de cabos de ligação.

A tabela 22 apresenta um comparativo porcentual entre as resistências experimentais em relação as resistências teóricas, sendo que a topologia que apresentou a maior discrepância entre valores teórico e experimental foi a do triângulo, onde a resistência experimental representa apenas 40,48 % do valor da resistência teórica. E a resistência experimental que mais se assemelha a resistência teórica é a da topologia em quadrado com uma porcentagem de 70,69%.

Para realização de análises mais profundas, foram realizadas diversas simulações computacionais variando o comprimento das hastes, seus diâmetros e os espaçamentos entre as hastes para todas as configurações em estudo, que são apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14 do capítulo 4.5. Percebe-se que a configuração em quadrado obteve os melhores resultados, utilizando hastes de 3 metros de comprimento e espaçamento entre haste de 3 metros. Sabe-se que é necessário respeitar uma distância mínima entre as hastes, para que não ocorra interferência de uma haste sobre a outra, mas também é importante atentar-se a distância máxima, pois, assim como ilustrado nas Tabelas 13 e 14, para espaçamentos de 4 metros e de 5 metros os sistemas em topologia de triângulo e de topologia em quadrado apresentaram resultados de resistências teóricas superiores aos resultados da Tabela 12, com espaçamento de 3 metros.

Para o sistema de topologia em circunferência, analisando as Tabelas 12, 13 e 14, com a variação do espaçamento, a maior variação entre os valores de resistência foi de aproximadamente 7Ω , comparando os resultados de mesmo comprimento e diâmetro das hastes. Já o sistema de topologia em hastes alinhadas, apresentou uma melhoria considerável, mais de 10Ω , em seus valores de resistências, com o aumento do espaçamento.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a realização adequada de um projeto de sistema de aterramentos elétricos há a necessidade de seguir os procedimentos descritos e previstos nas normas regulamentadoras da ABNT, destacam-se ABNT NBR 5410/2004, ABNT NBR 5419/2015, ABNT NBR 15751/2013 e ABNT NBR 7117/2012 que regem a instalação, manutenção e medição dos sistemas de aterramentos elétricos.

Para a medição da resistividade do solo foi utilizado o método de Wenner, este método foi escolhido pois, é um dos mais utilizados para obtenção da resistividade do solo e é o método aplicado pelo terrômetro MEGABRAS EM-4055, que utilizamos para realização das medições.

Na realização da estratificação do solo, devido ao solo em estudo possuir apenas duas camadas, foi implementado o método de duas camadas usando curvas, por ser de fácil aplicação e apresentar resultados satisfatórios.

Com o objetivo de facilitar a realização dos cálculos das resistências teóricas foi desenvolvido um programa utilizando ferramentas do software Scilab. Com exceção do cálculo para obtenção do valor de N através das curvas de Endrenyi, pois não se encontra disponível nas bibliografias de aterramentos pesquisadas o código para desenvolvimento das curvas de Endrenyi.

Na medição dos valores das resistências experimentais foi utilizado o método de queda de potencial, pois além de ser um método eficaz, é o método aplicado pelo terrômetro MEGABRAS EM-4055 e está disponível o passo a passo para realização das medições no manual do terrômetro.

Com a realização da medição das resistências experimentais, considerando as topologias em estudo: hastes alinhadas, triângulo, quadrado e circunferência foi plotado as curvas características das resistências de aterramentos elétricos, onde verificou-se diferentes tipos de comportamentos das curvas de resistência em função da distância, sendo que para alguns sistemas a zona de patamar de potencial foi mais bem definida do que para outros. Para alguns casos pode ocorrer a superposição nas regiões de aterramento, devido a excessiva proximidade do eletrodo de corrente do sistema de aterramento, fazendo-se necessário aumentar o afastamento do eletrodo de corrente e refazer as medições, assim como foi feito nesse trabalho.

O valor de resistência de um sistema de aterramento é dependente de fatores como: comprimento, diâmetro e quantidade de hastes e espaçamento entre elas, e do tipo de configuração, pois cada sistema geométrico possui um comportamento. Além do comportamento específico de interação com o solo, que depende do tipo de solo, teor de água retida, temperatura, tipo e teor de sal dissolvido na água retida, mistura de diferentes solos na área e distribuição de partículas do solo. Do ponto de vista elétrico o sistema em configuração geométrica de circunferência apresentou os melhores resultados teórico e experimental.

A vivência prática da pesquisa em campo contribuiu para se obter conhecimento de diversas situações não previstas e encontrar caminhos para desenvolver soluções plausíveis. Assim como apresentado no capítulo 5.1, onde comprovou-se a necessidade de conhecer o terreno em estudo, o que inclui os projetos elétricos e hidráulicos.

8.1 Propostas para trabalhos futuros

Dentre as propostas para novos estudos em aterramentos elétricos pode-se citar:

- Realizar a implementação de outras formas geométricas de sistemas de aterramento no terreno estudado, como as topologias que utilizam apenas cabos sem hastes, como por exemplo asterisco e formato em L.
- Realizar a interligação das topologias de aterramentos elétricos existentes no terreno e analisar qual o comportamento do sistema de aterramento a partir dessa nova configuração.
- Analisar o comportamento dos sistemas de aterramentos mediante frequências elevadas.

REFERÊNCIAS

- AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: RN Nº 479 de 03 de Abril de 2012: Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Brasília – DF, 2012
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751**: Sistemas de aterramentos de subestações – requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: Medições de resistividade e determinação de estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1**: Proteção contra descargas atmosféricas: Parte 1: Princípios Gerais. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-2**: Proteção contra descargas atmosféricas: Parte 2: Gerenciamento de Risco. Rio de Janeiro, 2015
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-3**: Proteção contra descargas atmosféricas: Parte3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida . Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-4**: Proteção contra descargas atmosféricas: Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. NORMA TÉCNICA CELG NTC-60. 2008.
- CLAUSEN, W. et al. Nova técnica de aterramento para distribuição de energia. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Brasília: CEB, 2004.
- EXOSOLDA. Catalogo de Produtos Para SPDA. São Paulo. 2020.
- J. M. Nahman and V. B. Djordjevic, "Resistance to ground of combined grid-multiple rods electrodes," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1337-1342, July 1996, doi: 10.1109/61.517488.
- KINDERMANN, Geraldo, Aterramento Elétrico. 4 ed. Porto Alegre: Editora Sagra, 1998.
- MEGABRAS INDÚSTRIA ELETRÔNICA. Manual do Usuário do Terrômetro Digital Controlado por Microprocessador EM-4055. São Paulo.
- MODENA, Jobson. Revista o Setor Elétrico. Segurança em Trabalhos com Eletricidade. Ano 6 - Edição 65. São Paulo. Editora Atitude Editorial, 2011.

SOUZA, Williamar Prazeres. Análise comparativa da eficiência do aterramento elétrico entre modelo convencional e modelo concretado. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Goiás. Itumbiara - GO, 2018.

VISACRO FILHO, Silvério. Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

OSPINA, Germán Moreno, Fundamentos e ingeniería de las puestas a la tierra - Respuestas ante fallas eléctricas y rayos. Editorial Universidad de Antioquia, 2007.

Schwanke, Cibele. Ambiente: Tecnologias: Série Tekne. Porto Alegre. Bookman, 2013.

Siemens. Catálogo de Dispositivos de Proteção contra Surtos - DPS 5SD7. São Paulo. 2017

Siemens. Catálogo de Dispositivos DR 5SV, 5SM e 5SU. São Paulo. 2019

Tagg, George Frank. Earth Resistances. New York, Pitman Pub. Corp, 1964.

The Effects of Electric Shock on Man, by Dalziel, Charles Francis, Washington, D.C. : U.S. Atomic Energy Commission, Office of Health and Safety, 1956. Series: Safety and fire protection technical bulletin; no. 7.

ANEXO A

A seguir, é mostrado o programa utilizado para traçar as curvas teóricas correspondentes de k negativo, utilizado no capítulo 3.3.

```

ha = 0:0.1:2;
syms n
figure(1)
hold on
i=1;

for k = -0.1:-0.1:-0.9
    kgraf = 1 + 4*(symsum(((k.^n)./(sqrt(1 + ((2.*n.*ha).^2)))) - ((k.^n)./(sqrt(4 + ((2.*n.*ha).^2))))), n, 1, 200));
    curv1(i,:)=kgraf;
    i=i+1;

    plot(ha,kgraf)
end

k = -1;
kgraf = 1 + 4*(symsum(((k.^n)./(sqrt(1 + ((2.*n.*ha).^2)))) - ((k.^n)./(sqrt(4 + ((2.*n.*ha).^2))))), n, 1, 200));
kgraf(1)=0;
kgraf(2)=0;
curv1(i,:)=kgraf;

plot(ha,kgraf)
grid on;
title('Curvas para k negativo');
xlabel('p(a)/p1');
xlabel('h/a');

```

ANEXO B

A seguir, é mostrado o programa utilizado para obtenção das resistências dos sistemas de aterramentos apresentados no capítulo 4.

```

clc;
clear all;

% para espaçamento de 3 metros
n=4; % numero de hastes
n2=6;% numero de hastes circunferência
s=3;% espaçamento entre hastes
pa_ha=1100*0.91;% resistividade para hastes alinhadas *
pa_t=1100*0.98;% resistividade para triângulo *
pa_q=1100*0.97;% resistividade para quadrado
pa_c=1100*0.93;% resistividade para circunferência *
L1=[1.5 2.4 3.0];% comprimento das hastes
d=(3/4)*0.0254;%diâmetro das hastes (1/2", 5/8" e 3/4")

% % para espaçamento de 4 metros
% n=4; % numero de hastes
% n2=6;% numero de hastes circunferência
% s=4;% espaçamento entre hastes
% pa_ha=1100*0.89;% resistividade para hastes alinhadas *
% pa_t=1100*0.97;% resistividade para triângulo *
% pa_q=1100*0.96;% resistividade para quadrado
% pa_c=1100*0.92;% resistividade para circunferência *
% L1=[1.5 2.4 3.0];% comprimento das hastes
% d=(5/8)*0.0254;%diâmetro das hastes (1/2", 5/8" e 3/4")

% % para espaçamento de 5 metros
% n=4; % numero de hastes
% n2=6;% numero de hastes circunferência
% s=5;% espaçamento entre hastes
% pa_ha=1100*0.88;% resistividade para hastes alinhadas *
% pa_t=1100*0.96;% resistividade para triângulo *
% pa_q=1100*0.95;% resistividade para quadrado
% pa_c=1100*0.91;% resistividade para circunferência *
% L1=[1.5 2.4 3.0];% comprimento das hastes
% d=(3/4)*0.0254;%diâmetro das hastes (1/2", 5/8" e 3/4")

%Encontra o valor de resistência para o sistema de hastes
alinhadas
Rha=(pa_ha./(n.*2.*pi.*L1)) .* ( log((8.*L1)./d) -1 +
(L1./s).*( log((1.781.*n)./(s))) )

%Encontra o valor de resistência para o sistema em triângulo
Rt=(1/3).*( (pa_t./(2.*pi.*L1)).*( (log(8.*L1./d)) -1) +
2.*L1.*s)

```

```
%Encontra o valor de resistência para o sistema em quadrado  
Rq=0.13*(pa_q./sqrt(9)).*(1 -  
(2.*L1)/(3*sqrt(9))).*(log10(2400*sqrt(9)))
```

```
%Encontra o valor de resistência para o sistema em  
circunferência  
Rc=(1./n2).*(pa_c./(2.*pi.*L1)).*(log((8.*L1)./d) -1 +  
(L1./s)*(log((2.*n2)./pi)))
```