

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RODRIGO KALID MANSUR

**ESTUDO TEÓRICO SOBRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE
RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE DE ATERRAMENTO**

São Carlos
2014

RODRIGO KALID MANSUR

**ESTUDO TEÓRICO SOBRE OS
MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE
RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE
DE ATERRAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de
São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e
Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ruy
Alberto Corrêa Altafim

São Carlos
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M286e Mansur, Rodrigo Kalid
Estudo teórico sobre os métodos de medição de
resistência e resistividade de aterramento / Rodrigo
Kalid Mansur; orientador Ruy Alberto Corrêa Altafim.
São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2014.

1. Aterramento. 2. Resistividade do solo. 3.
Medições. 4. Segurança. 5. Aterramento de subestação.
6. Influências na resistividade do solo. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Rodrigo Kalid Mansur

Título: "Estudo teórico sobre os métodos de medição de resistência e resistividade de aterramento"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25/11/2014

com NOTA 8,5 (oito, cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - (SEL/EESC/USP)

Mestre Yuri Andrey Olivato Assagra - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

“É bom ter um fim para uma
jornada, mas é a jornada que
importa, no fim.”

Ernest Hemingway

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a toda minha família e amigos que sempre estiveram presentes me incentivando a estudar e alcançar meus objetivos.

Agradeço a minha mãe Milene Kalid Mansur e meu pai Reynaldo Mansur de Carvalho pela dedicação em me criar e educar, sem deixar que passasse nenhuma necessidade.

Meus agradecimentos também aos meus Avôs Miguel Kalid, Demócrito Mansur e Maria do Carmo que fizeram de tudo para ajudar meu pai e minha mãe a me dar uma educação excelente.

Agradeço em especial à minha avó Marina de Araújo Kalid que teve grande participação na minha educação desde pequeno e sempre teve muito prazer em me ensinar.

Meus agradecimentos também aos meus amigos de faculdade e república Matheus Secchi Ortiz, Renan Pinheiro Araújo, Lucas Felix e Renato Beltrame. Que me ajudaram muito nas matérias e respeitaram meus longos dias de estudo.

Agradeço imensamente a Olivia Bonfim Melo e Eduardo H. H. Pereira, que junto comigo enfrentaram os dias mais difíceis de estudos na universidade. Sei que sem vocês tudo isso não seria possível.

Também merece um agradecimento especial a Suelen Almeida. Uma grande amiga e psicóloga. Que sempre esteve ao meu lado nos bons e maus momentos me motivando a sempre dar “um passo a frente”.

Meus agradecimentos especiais a Renata Zenaro de Sá, que me ajudou ao longo deste Trabalho de Conclusão de Curso e revisou comigo cada parágrafo.

Agradeço também ao Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim, que me orientou e aconselhou na elaboração deste Trabalho.

Resumo

Os sistemas de aterramento são parte fundamental do sistema elétrico de potência, bem como de qualquer outro sistema elétrico e devem ser projetados de forma a garantir a segurança de pessoas e equipamentos. No projeto de sistema de aterramento dois dos principais quesitos são a medição da resistividade do solo no qual será inserido e a medição de sua resistência elétrica posterior a sua execução. Esta última deve ser avaliada periodicamente ao longo da vida útil desse sistema. Este trabalho visa expor os principais métodos para medições desses sistemas, de forma didática, explicando desde os métodos simples para solos de camada única até métodos mais complexos para medir resistividade de solos estratificados e resistência em subestações energizadas. O trabalho inclui também um estudo das influências ambientais e antrópicas nessas medidas de resistência e resistividade do solo, destacando as mais significantes e as contramedidas necessárias para minimizá-las. Também serão apresentados outros conceitos avaliados em grandes sistemas de aterramento, como tensão de passo e toque.

Palavras-chave: Aterramento, Resistividade do Solo, Medições, Segurança, Aterramento de Subestação, Influências na Resistividade do Solo.

Abstract

Grounding systems are a fundamental part of the electric power system as well as any other electrical system and should be designed to ensure the safety of people and equipment. In the design of the grounding system, the two main questions are measuring the resistivity of the soil in which it will be inserted and measuring their electrical resistance after its execution. The resistance should be evaluated periodically over the useful life of the system. This work aims to present the main methods for measurements of these systems, didactically explaining from simple methods for single-layer soils to more complex methods for measuring resistivity of multi-layer soils and resistance in energized substations. The work also includes a study of environmental and anthropogenic influences on these measures of resistance and soil resistivity, highlighting the most significant and necessary countermeasures to minimize them. Other concepts evaluated in large grounding systems as step voltage and touch voltage will also be presented.

Keywords: Grounding, Soil Resistivity, Measurements, Safety, Substation Grounding, Influencies on Soil Resistivity.

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 3-1 Comportamento da corrente no Método Wenner [15] | 10 |
| Figura 3-2 Dispersão da corrente no solo [15] | 12 |
| Figura 3-3 Fluxograma para obtenção da curva $\rho \times a$ | 13 |
| Figura 3-4 Arranjo do Eletrodo Central [18] | 14 |
| Figura 3-5 Arranjo de Palmer [18] | 15 |
| Figura 4-1 Fluxo de dispersão para solo com duas camadas [17] | 17 |
| Figura 4-2 Solo Real (a) e Solo Estratificado (b) [18] | 18 |
| Figura 4-3 Solo com duas camadas [20] | 19 |
| Figura 4-4 Distribuição dos eletrodos de corrente e de potencial [15] | 21 |
| Figura 4-5 Curva teórica para $K > 0$ e $0 < h/a < 2$ [21] | 23 |
| Figura 4-6 Curva teórica para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ [21] | 23 |
| Figura 4-7 Gráfico $\rho(a) \times a$ | 24 |
| Figura 4-8 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\rho_0/\rho_1 = 0,584$ | 25 |
| Figura 4-9 Curva $h \times K$ | 26 |
| Figura 4-10 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\rho_1/\rho_0 = 0,416$ | 27 |
| Figura 4-11 Curva $h \times K$ | 28 |
| Figura 4-12 Ponto de encontro entre as curvas para a_0 e a_1 | 28 |
| Figura 4-13 Curva $\rho \times a$ Método de Pirson | 30 |
| Figura 4-14 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\rho_1/\rho_0 = 0,714$ | 31 |
| Figura 4-15 Curva $h \times K$ | 32 |
| Figura 4-16 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\rho_1/\rho_0 = 0,543$ | 33 |
| Figura 4-17 Curva $h \times K$ | 34 |
| Figura 4-18 Ponto de encontro entre as curvas para a_0 e a_1 | 34 |
| Figura 4-19 Solo de três camadas estratificado | 35 |
| Figura 4-20 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\rho_0/\rho_1 = 0,613$ | 37 |
| Figura 4-21 Curva $h \times K$ | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-22 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\rho a_1 \rho_1 = 0,278$ | 39 |
| Figura 4-23 Curva $h \times K$ | 40 |
| Figura 4-24 Ponto de encontro entre as curvas para a_0 e a_1 | 40 |
| Figura 4-25 Captura de Imagem do Osciloscópio no Método Transitório [25] | 44 |
| Figura 4-26 Fluxograma do Método Transitório | 45 |
| Figura 4-27 Arranjo para simulação da falta [25]..... | 47 |
| Figura 4-28 Layout da malha da subestação [25] | 48 |
| Figura 5-1 Gráfico resistividade x umidade | 54 |
| Figura 5-2 Gráfico resistividade x temperatura [17]..... | 55 |
| Figura 5-3 Gráfico resistividade x salinidade [18]..... | 56 |
| Figura 5-4 Malha Tradicional [29] | 59 |
| Figura 5-5 Malha com Tratamento Químico [29]..... | 60 |
| Figura 5-6 Malha com Hastes Concretadas [29] | 60 |
| Figura 5-7 Resistencia para período chuvoso [29]..... | 62 |
| Figura 5-8 Resistencia para período seco [29]..... | 62 |
| Figura 8-1 Tensão de toque [33]..... | 78 |
| Figura 8-2 Circuito equivalente da tensão de toque [33] | 78 |
| Figura 8-3 Tensão de passo [33] | 79 |
| Figura 8-4 Circuito equivalente da tensão de passo [33]..... | 80 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 Resistividade medida para cada espaçamento | 24 |
| Tabela 2 Valores de h/a para cada K..... | 26 |
| Tabela 3 Valores de h/a para cada K..... | 27 |
| Tabela 4 Resistividade medida para cada espaçamento | 30 |
| Tabela 5 Valores de h/a para cada K..... | 31 |
| Tabela 6 Valores de h/a para cada K..... | 33 |
| Tabela 7 Valores de h/a para cada K..... | 38 |
| Tabela 8 Valores de h/a para cada K..... | 39 |
| Tabela 9 Medidas de referência [25]..... | 49 |
| Tabela 10 Comparação entre cada método, Perfil A [25]..... | 49 |
| Tabela 11 Comparação entre cada método, Perfil B [25]..... | 50 |
| Tabela 12 Solos mais presentes no estado e suas características [26] | 52 |
| Tabela 13 Resistividade característica para cada tipo de solo [18] | 53 |
| Tabela 14 Resistividade em função da umidade [17] | 54 |
| Tabela 15 Resistividade em função da temperatura [17] | 55 |
| Tabela 16 Resistência de aterramento para os três tipos de malhas no período chuvoso [29] | 61 |
| Tabela 17 Resistência de aterramento para os três tipos de malhas no período seco [29]..... | 61 |
| Tabela 18 Efeitos do choque no corpo humano para corrente alternada [34] | 81 |

Sumário

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | Objetivos | 2 |
| 1.2 | Motivação do trabalho | 3 |
| 2 | História dos métodos de medida da resistência de aterramento | 5 |
| 3 | Métodos consagrados de medição de aterramento e seus arranjos | 9 |
| 3.1 | Método de Queda de Potencial..... | 9 |
| 3.1.1 | Arranjo Wenner | 9 |
| 3.1.2 | Arranjo do Eletrodo Central | 14 |
| 3.1.3 | Arranjo de Palmer-Schlumberger..... | 15 |
| 4 | Métodos modernos para medições de resistência e resistividade de aterramento | 17 |
| 4.1 | Método de estratificação de duas camadas utilizando curvas..... | 19 |
| 4.2 | Estratificação do solo com várias camadas | 29 |
| 4.2.1 | Método de Pirson | 29 |
| 4.3 | Métodos de medição de resistência de aterramento em solos energizados..... | 41 |
| 4.3.1 | Método Convencional de 60Hz..... | 42 |
| 4.3.2 | Método Transitório..... | 43 |
| 4.3.3 | Método de 70 Hz | 46 |
| 4.3.4 | Estudo da eficiência dos três métodos..... | 46 |
| 5 | Fatores que influenciam a resistividade do solo..... | 51 |
| 5.1 | Influências Ambientais..... | 51 |
| 5.1.1 | Tipos de solo | 51 |
| 5.1.2 | Teor de Umidade:..... | 53 |
| 5.1.3 | Temperatura..... | 54 |
| 5.1.4 | Salinidade..... | 56 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.2 | Influências Antrópicas..... | 57 |
| 5.2.1 | Tratamento químico do solo | 57 |
| 5.2.2 | Hastes concretadas | 58 |
| 5.2.3 | Comparação entre malha tradicional, malha com tratamento químico e malha com hastes concretadas | 59 |
| 5.2.4 | Estruturas metálicas enterradas no solo | 63 |
| 6 | Conclusão..... | 67 |
| 6.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 69 |
| 7 | Bibliografia..... | 71 |
| | Apêndice A – Segurança (tensão de toque e passo) | 77 |
| A.1 | Tensão de toque | 77 |
| A.2 | Tensão de passo | 79 |
| A.3 | Efeitos no corpo humano | 81 |

1 Introdução

É fácil perceber que o crescimento econômico de um país está intimamente relacionado com sua crescente demanda por energia elétrica. E a qualidade e confiabilidade do sistema têm de estar em níveis cada vez mais rigorosos para garantir o desenvolvimento econômico e social.

Interrupções não programadas podem levar a grandes perdas econômicas nos centros urbanos. Uma das maiores causas de tais interrupções são as descargas atmosféricas, que muitas vezes causam sobretensões com amplitude suficiente para romper o isolamento da linha de transmissão. Descargas atmosféricas são consideradas o evento eletromagnético de maior relevância associado a tais desligamentos não programados no Brasil. Segundo Naccarato [1], “O Brasil é o país onde ocorre a maior incidência de raios no mundo, seriam nada menos do que 70 milhões por ano. As descargas atmosféricas além de causarem extensos danos materiais, podem provocar a morte de pessoas; no Brasil são registradas aproximadamente 100 mortes por ano”. Contudo, infelizmente, no Brasil ainda existe muita negligência com os sistemas de proteção associados. É possível perceber que são raras as casas que possuem fio terra nas tomadas. Alguns aparelhos, até anos atrás, eram fabricados sem o pino central (terra) na tomada. Em países desenvolvidos, como a Inglaterra, existem mecanismos que impedem que seja colocado um aparelho na tomada sem que este possua um pino central. Assim, medidas para conhecer a problemática, para conscientizar e educar a população são urgentes e imprescindíveis para mudar essa cultura de descaso com a vida.

O Brasil, por ter dimensões continentais, possui extensas regiões com solos que apresentam altas resistividades e que dificultam a realização de sistemas de aterramento com baixos valores de resistência elétrica. Valores esses necessários para garantir um sistema de proteção adequado às sobretensões, principalmente as oriundas de descargas atmosféricas.

Com o objetivo de tornar o estudo sobre o assunto mais acessível e melhor compreendido no âmbito da graduação universitária, o trabalho propõe, portanto, divulgar de forma didática os métodos de medida e as influências ambientais e antrópicas na medição da resistividade do solo. Além de mostrar tais influências,

são propostas contramedidas necessárias a fim de minimizá-las e garantir a segurança. A ocorrência de falhas ou medidas imprecisas pode acarretar em um aterramento pouco eficiente, o que pode comprometer a integridade dos aparelhos elétricos conectados ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) e colocar em risco a vida das pessoas.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é elaborar um material didático para ser utilizado pelos alunos de graduação, de forma a suprir uma lacuna de conhecimento sobre o tema “medições de resistência e resistividade de aterramento”. Para tanto, tem-se como objetivos específicos:

- Elaborar um estudo teórico sobre os métodos consagrados de medição de aterramento, incluindo medição de resistência e resistividade;
- Elaborar um estudo teórico sobre os métodos modernos de medição de aterramento, incluindo medição de resistência e resistividade;
- Explicar os métodos computacionais que estão sendo desenvolvidos para facilitar a medição e assegurar uma maior precisão no processo;
- Expor as influências ambientais e antrópicas no solo e suas consequências na medição de aterramento;
- Expor os principais tipos de acidentes provenientes de uma descarga elétrica num sistema aterrado;

1.2 Motivação do trabalho

Ao longo de seis anos cursando engenharia elétrica na Universidade de São Paulo (USP), na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), e também na Universidad del País Vasco (UPV), na Espanha, bem como em conversas com colegas que cursam engenharia elétrica em outras universidades do país, foi possível notar ausência no enfoque do tema sistemas de aterramento, em especial os métodos de medidas associados e os fatores que os influenciam.

Na UPV, a abordagem do tema é muito mais enfática ocorrendo na forma de apostilas e aulas práticas. Surge assim a principal motivação deste trabalho, que é a de suprir essa lacuna de conhecimento, para aprimorar a qualidade do SEP e a segurança das pessoas.

2 História dos métodos de medida da resistência de aterramento

Neste capítulo faz-se um breve histórico dos métodos para cálculo da resistência de aterramento. Nele são abordados métodos analíticos, empíricos e numéricos, a partir das teorias de campos eletromagnéticos, circuitos e linhas de transmissão. Vale notar a dificuldade de se obter, ao longo do tempo, resultados satisfatórios devido às limitações computacionais para desenvolver modelos matemáticos complexos.

Ao passo que novas metodologias iam surgindo, novos problemas nas medidas eram percebidos. Portanto, ao longo de quase 100 anos este tema vem sendo pesquisado e novos métodos vêm sendo elaborados para garantir precisão nas medidas.

Um dos primeiros a realizar um estudo teórico-experimental foi Bewley [2], por volta de 1934. Seu experimento consistiu em aplicar um degrau unitário de tensão no ponto de entrada de aterramento para analisar seu comportamento transitório e poder deduzir uma expressão para o cálculo da impedância de um cabo contrapeso. Para realizar o experimento ele teve que considerar os eletrodos como uma linha de transmissão com perdas e parâmetros constantes ao longo de sua extensão. Por conta disso o método não era tão preciso.

Bellaschi e Armington [3] em 1943 conseguiram relacionar a ionização do solo com a resistência de aterramento para sobretensões em hastes de aterramento provenientes de correntes impulsivas. Tais estudos são utilizados como base para diversos modelos, pois eles conseguem analiticamente descrever a impedância de um eletrodo devido ao efeito de ionização do solo em volta do mesmo.

Continuando o trabalho de Bellaschi e Armington [3], em 1948 Petropoulos [4] estudou o comportamento de eletrodos em forma de esfera. A partir dos valores obtidos experimentalmente, conseguiu elaborar equações para impedância impulsiva para eletrodos esféricos e concluiu que há uma redução nos valores da impedância quando são formadas descargas na região próxima à superfície dos eletrodos.

Em 1968 Sunde [5] fez um dos estudos mais completos sobre resistência de aterramento em regime permanente utilizando as equações de Maxwell e sua relação com diversas características do solo e do eletrodo, tais como resistividade e permissividade elétrica do solo, efeito de ionização do solo, diâmetro, comprimento e profundidade do condutor, além da influência da separação entre os eletrodos.

No início dos anos 80, Gupta e Thapar [6] foram um dos pioneiros no estudo de sistemas de aterramento mais complexos (como malhas de aterramento extensas, por exemplo). Provaram que para essas malhas o efeito da ionização do solo é desprezível. Eles deram início a uma série de modelagens empíricas que não precisavam de processamento computacional avançado. Eles introduziram certos termos como:

- *Impedância de impulso*, que consiste na razão entre o pico de tensão e a corrente gerada pela descarga atmosférica;
- *Coeficiente impulsivo*, que consiste na razão entre a impedância impulsiva e a impedância para baixas frequências;
- *Área efetiva*, definida pela área da malha que realmente está dispersando a corrente da descarga atmosférica para o solo.

Seguindo os experimentos empíricos de Gupta e Thapar [6], outra análise muito importante foi a de Kosztaluk [7], que em 1981, com o uso de circuitos com indutores e resistências, tentou simular o comportamento característico dos eletrodos quando submetidos às correntes provenientes de descargas atmosféricas. Obtendo resultados satisfatórios para os circuitos equivalentes.

Em 1984, voltaram a serem realizados modelos analíticos que conseguiram descrever o comportamento não linear da resposta de uma malha de aterramento às descargas impulsivas. Este modelo foi elaborado por Velasquez e Mukhedkar [8]. Eles tentaram descrever tal comportamento linearizando “por partes” o eletrodo, para assim poder obter analiticamente o comportamento não linear do mesmo quando submetido às correntes impulsivas. Este modelo no domínio do tempo foi sem dúvida de grande importância, pois conseguiu de forma bastante precisa incorporar os efeitos da ionização do solo em aterramentos.

Os estudos de Velasquez e Mukhedkar [8] foram posteriormente reafirmados em 1985 com experimentos realizados por Loboda e Pochanke [9]. Estes tentaram reproduzir em laboratório o comportamento de descargas

atmosféricas no solo. Nos experimentos realizados foi possível constatar a diferença na densidade de corrente em volta dos eletrodos de aterramento e assim puderam chegar à conclusão que existe uma zona de descarga ao redor dos eletrodos e que a queda de tensão nesta zona é menor que no restante do solo.

Em meados dos anos 80, com a evolução do processamento computacional, foram retomados os modelos analíticos utilizando métodos numéricos mais avançados considerando as teorias das linhas de transmissão, campos eletromagnéticos e circuitos. Nos modelos que utilizavam a teoria das linhas de transmissão, foram feitas análises tentando representar o comportamento não linear das descargas elétricas, segmentando os eletrodos em partes e tratando cada parte como um circuito elétrico em modelo π ou T. Nestes modelos, os parâmetros em série são $R + j\omega L$ e os parâmetros paralelo são $G + j\omega C$. Com o uso dessas simplificações de circuito, podem-se resolver as equações da teoria das linhas de transmissão. Os modelos que empregam esta teoria se diferenciam na resolução dessas equações. Serão abordados abaixo algum desses modelos.

Em 1987 foi publicado outro trabalho de Moliopoulos e Papalexopoulos [10]. Neste novo trabalho eles usaram a teoria das linhas de transmissão e o cálculo dos parâmetros primários foram realizados utilizando-se as equações de Maxwell. Apesar das simulações terem sido realizadas com diversos tipos de solo (variando a resistividade elétrica) e para diferentes tamanhos de condutores, foram consideradas frequências somente até 420 Hz, o que limitava bastante a aplicabilidade dos resultados para efeitos reais de descargas atmosféricas.

Em 1989 foi publicado outro trabalho de Mukhedkar [11], no qual a partir da teoria dos circuitos e da segmentação de eletrodos em partes fictícias para linearizar o comportamento do mesmo frente a fenômenos transitórios, foi possível criar um modelo para diversos eletrodos em uma malha extensa de aterramento e verificar que os valores obtidos empiricamente estavam em concordância com os obtidos analiticamente. Porém, vale a pena ressaltar que foram feitas considerações a fim de simplificar o circuito equivalente, nas quais os parâmetros de resistência e capacitância não foram considerados.

Atualmente os modelos que apresentam maior precisão são os que fazem uso das equações de Maxwell na teoria dos campos eletromagnéticos sem muitas simplificações. Um dos primeiros trabalhos com maior rigor na aplicação de tais

equações foi o de Grcev e Dawalibi [12] em 1990. Eles utilizaram sistemas lineares no domínio da frequência para resolver o problema do transitório e aplicar as equações de Maxwell. Para tanto, cada frequência foi associada a uma função de transferência e, para se obter o comportamento do transitório no domínio do tempo, bastava aplicar a transformada inversa de Fourier.

Um dos modelos mais precisos da época, aplicando a teoria das linhas de transmissão foi o de Liu [13] em 2001. Nele são calculadas as capacitâncias, condutâncias e indutâncias mútuas e os demais parâmetros como R, L, C e G podem ser obtidos através do uso de softwares. Quando os parâmetros são definidos e calculados, cada eletrodo é dividido em segmentos e então simulado com o uso de software. Os resultados obtidos nesse modelo também foram comparados aos do modelo de Grcev e Dwalibi [12] e apresentaram valores bastante semelhantes, comprovando assim a rigurosidade dos resultados usando a teoria das linhas de transmissão.

É possível perceber a evolução ao longo dos anos nas medidas da impedância de aterramento, passando desde experimentos com condutores únicos até experimentos mais complexos, com malhas extensas e considerando influências nas medidas. O desenvolvimento tecnológico também proporcionou gerar modelos mais complexos, considerando respostas não lineares e a distribuição da densidade de corrente no solo, bem como análises de respostas transitórias com uso de softwares de simulação.

Durante os próximos capítulos serão abordados desde métodos simples para solos uniformes, até métodos mais complexos, que consideram solos com múltiplas camadas. Alguns métodos que usam ferramentas computacionais para garantir maior precisão também serão explicados. Além disso, serão expostas algumas influências nessas medidas.

3 Métodos consagrados de medição de aterramento e seus arranjos

3.1 Método de Queda de Potencial

O método mais usado para calcular a resistividade do solo a partir da resistência medida pelo telurômetro é o Método de Queda de Potencial, com o arranjo de Wenner, Palmer-Schlumberger ou de eletrodo central. Comumente, esses arranjos são referidos como sendo Métodos diferentes, porém o princípio deles é o mesmo, o de queda de potencial. Neles pode-se elaborar a curva da resistividade do solo em função do espaçamento ($\rho_x a$) que será usada para outros métodos que levam em consideração a estratificação do solo, como o Método de Duas Camadas e o Método de Pirson [14].

É importante lembrar que todos os arranjos podem ser usados tanto para obter a resistividade do solo quanto a resistência de aterramento. Portanto, em alguns capítulos usar-se-á o método para obter a curva $\rho_x a$ e em outros capítulos para obter a resistência.

3.1.1 Arranjo Wenner

Tal método serve para medir a resistividade do solo e consiste em posicionar quatro eletrodos no solo em linha reta, a uma mesma distância um do outro. A distância entre os eletrodos deve ser ao menos três vezes maior que a profundidade na que os mesmos estão enterrados [14].

Assim, se a profundidade do eletrodo for de 30 cm, a distância entre eles deverá ser de, no mínimo, 90 cm. O equipamento de medição (Telurômetro) gera, então, uma corrente que fluirá pelos eletrodos das extremidades (eletrodos de corrente), e a queda de tensão será medida pelos eletrodos internos (eletrodos de tensão). Será demonstrado ao decorrer deste subitem, o modelo matemático envolvido no cálculo da resistividade usando este arranjo.

A Figura 3-1 representa a utilização do Telurômetro para medir a resistência do solo. Nele injeta-se uma corrente I no ponto 1 que retorna pelo ponto 4 (eletrodos de corrente) e os potenciais são medidos em 2 e 3 (eletrodos de potencial).

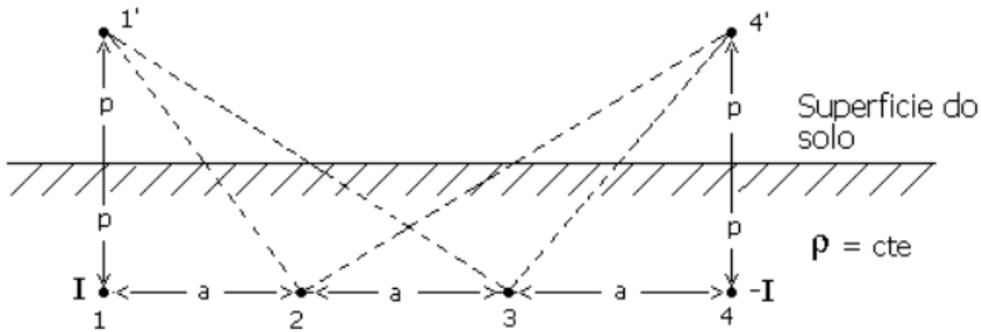


Figura 3-1 Comportamento da corrente no Método Wenner [15]

A partir do método das imagens da teoria do eletromagnetismo, pode-se chegar às equações (1) e (2) [16] [17].

$$V_{p2} = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (1)$$

$$V_{p3} = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (2)$$

Como a diferença de potencial é $V_{p2} - V_{p3}$, pode-se desenvolver a equação para:

$$R = \frac{V_{p2} - V_{p3}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} * \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (3)$$

Onde:

- R = Resistencia para uma profundidade;
- ρ = Resistividade do solo;
- a = Espaçamento entre os eletrodos;
- p = Profundidade dos eletrodos no solo;
- V_{p2} e V_{p3} = potencial medido pelo equipamento nos pontos 2 e 3 respectivamente.

Após obter o valor da resistência em Ohms, pela equação (3), pode-se calcular a resistividade para uma profundidade "a" da seguinte forma:

$$\rho(a) = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega \cdot m] \quad (4)$$

Onde:

- $\rho(a)$ = Resistividade do solo em função da distância dos eletrodos

Ao considerar $a \gg p$ a fórmula pode ser simplificada para:

$$\rho(a) = 2\pi a R \quad (5)$$

Este método considera que mais da metade da corrente que flui entre os eletrodos de corrente numa profundidade igual ao espaçamento entre os eletrodos

(a). O que ocorre de fato é que abaixo desta profundidade a dispersão da corrente é muito grande, podendo ser desconsiderada nos cálculos.

A Figura 3-2 ilustra o comportamento e dispersão da corrente no solo.

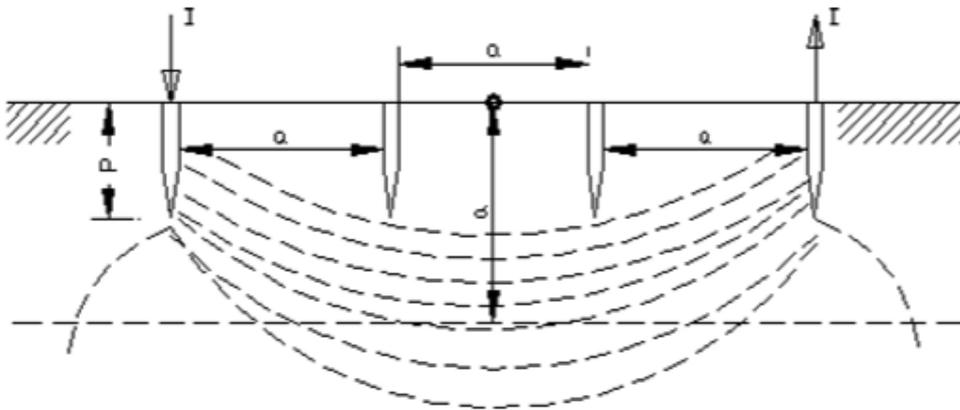


Figura 3-2 Dispersão da corrente no solo [15]

Para assegurar uma medição precisa, devem ser realizadas diversas medidas em volta da área onde será feito o aterramento do sistema, variando o espaçamento entre os eletrodos cravados no solo e a direção dos mesmos.

Este espaçamento costuma ser de 1:2:4:6:8:16:32 metros. Após a primeira medida deve-se variar a direção em 60° e realizá-la novamente, ate cobrir toda a área da malha de aterramento. [16], [17].

Os valores da resistividade calculados devem então passar por um filtro de dados para avaliar quais deverão ser considerados e quais deverão ser desprezados, antes da curva $\rho \times a$ ser traçada. O fluxograma (Figura 3-3) mostra o funcionamento desta filtragem de dados:

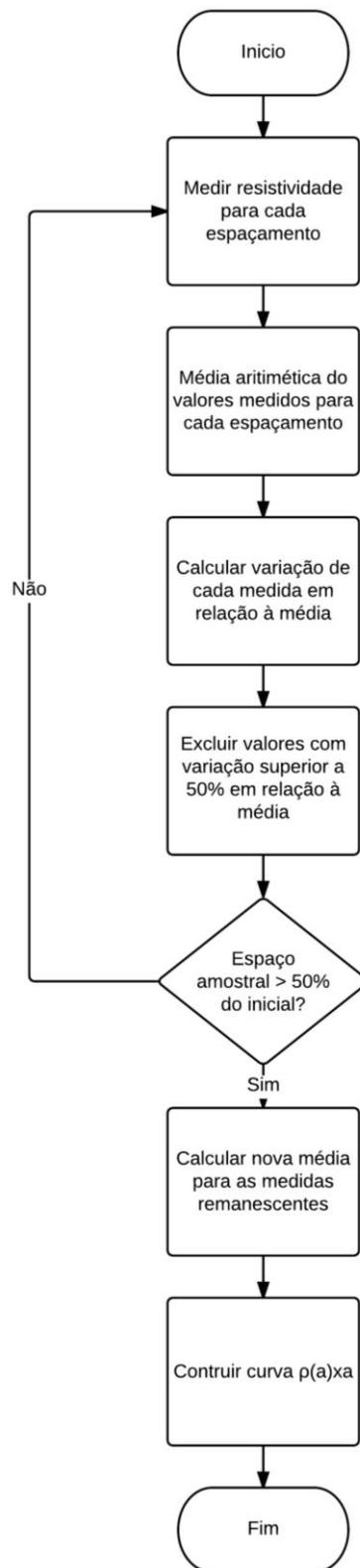


Figura 3-3 Fluxograma para obtenção da curva $p \times a$

3.1.2 Arranjo do Eletrodo Central

Assim como no Método Wenner, são utilizados 4 eletrodos, dois de corrente e dois de potencial. A corrente é injetada pelos eletrodos de corrente (mais externos) e a diferença de potencial é medida entre os eletrodos de tensão (mais internos). Este arranjo é recomendado para locais onde a resistividade é muito elevada [18].

Nele, o eletrodo C_2 é fixado no centro da área de estudo e os outros eletrodos variam de posição em relação a ele, sendo que $d_3 \gg d_1$ e d_2 . A Figura 3-4 ilustra o arranjo.

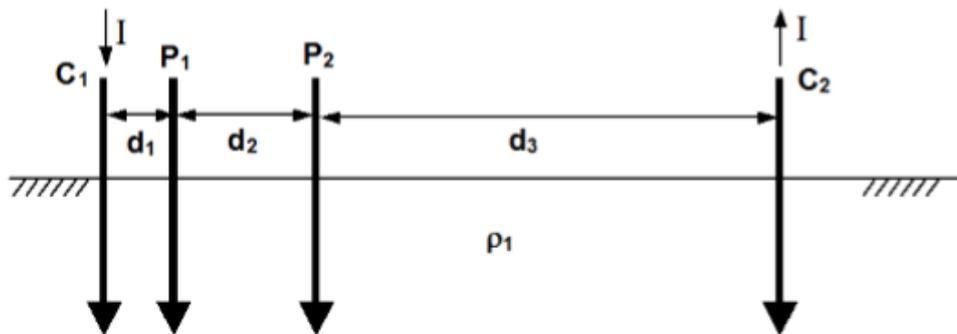


Figura 3-4 Arranjo do Eletrodo Central [18]

A resistividade então para uma profundidade H (média entre as distâncias d_1 , d_2 e d_3) pode ser calculada pela equação (6):

$$\rho = \frac{2\pi d_1(d_1 + d_2) V_{p1} - V_{p2}}{d_2 I} \quad (6)$$

Onde:

- ρ = resistividade do solo;
- V_{p1} e V_{p2} = potencial medido pelo equipamento;
- I = Corrente;
- d_1 = distância entre os eletrodos C_1 e P_1 ;
- d_2 = distância entre os eletrodos P_1 e P_2 ;
- d_3 = distância entre os eletrodos C_2 e P_2 .

3.1.3 Arranjo de Palmer-Schlumberger

Este arranjo é indicado para terrenos com resistividade superior a $3000 \Omega.m$ e para espaçamentos muito grandes [18]. Para isso, são necessários telurômetros com alta potência e bastantes sensíveis. Nele são usados quatro eletrodos, sendo que os de corrente devem estar bem próximos aos eletrodos de tensão correspondentes para garantir uma medida precisa, pois caso estejam distantes um do outro, a medida poderá sofrer maior interferência de fatores ambientais e antrópicos. Estas influências serão abordadas futuramente no capítulo 5. A Figura 3-5 ilustra o arranjo de Palmer.

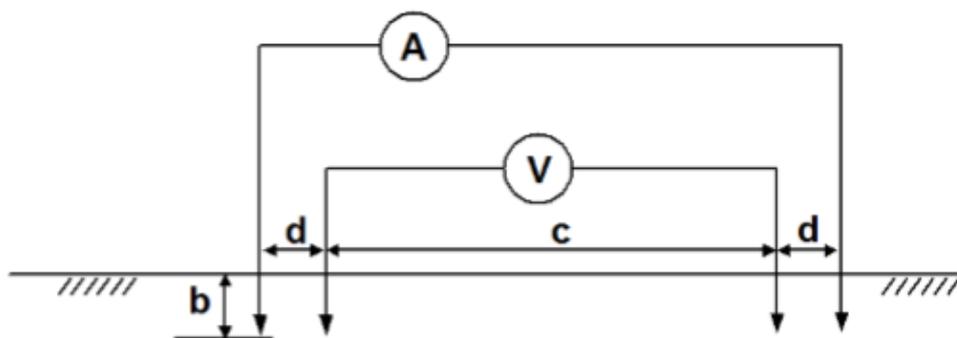


Figura 3-5 Arranjo de Palmer [18]

Para $b \ll d$ e c calcula-se a resistividade pela equação:

$$\rho = \frac{\pi d(c + d)}{c} \frac{V_{p1} - V_{p2}}{I} \quad (7)$$

Onde:

- ρ = resistividade do solo;
- V_{p1} e V_{p2} = potencial medido pelo equipamento;
- I = Corrente;
- b = Profundidade dos eletrodos;
- c = Espaçamento entre os eletrodos de tensão;
- d = Espaçamento entre o eletrodo de corrente e seu respectivo eletrodo de tensão.

4 Métodos modernos para medições de resistência e resistividade de aterramento

Com a existência de vários tipos de solo é fácil imaginar que exista, para uma mesma área, mais de um tipo de solo, variando de acordo com a profundidade. O processo de divisão do solo heterogêneo em camadas chama-se estratificação [17].

Cada camada de solo possui uma resistividade diferente, isso faz com que haja diferentes fluxos de dispersão das correntes. A Figura 4-1 esboça o comportamento desses fluxos para um solo de duas camadas.

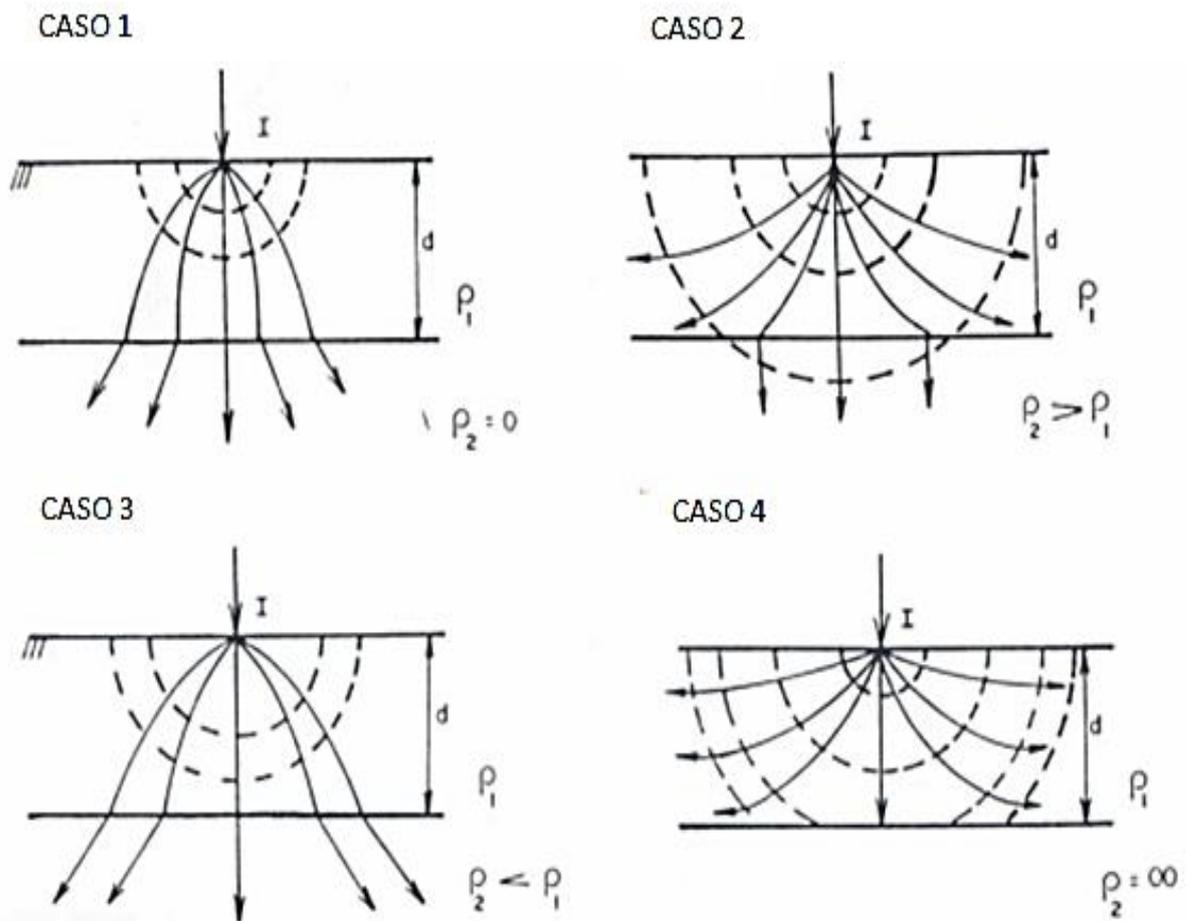


Figura 4-1 Fluxo de dispersão para solo com duas camadas [17]

Portanto, é possível chegar às seguintes conclusões para a dispersão da corrente em um solo de duas camadas:

1. Para o **CASO 1**, se $\rho_2 = 0$, então a corrente flui mais facilmente para a segunda camada, pois esta possui uma resistência menor para o fluxo de corrente.
2. Para o **CASO 2**, se $\rho_2 > \rho_1$, então a corrente tende a se concentrar na primeira camada, uma vez que a resistência para passagem do fluxo da mesma é maior na segunda.
3. Para o **CASO 3**, se $\rho_2 < \rho_1$, então a corrente tende a fluir mais facilmente para segunda camada, pois esta, assim como no **CASO 1**, “atrai” mais a corrente que a primeira camada.
4. Para o **CASO 4**, se $\rho_2 = \infty$, então o fluxo de corrente se concentrará completamente na primeira camada, pois a resistência da segunda tende ao infinito.

Para efeito de cálculo, considera-se que as camadas podem ser divididas em profundidades específicas. Sabe-se que o solo real não é assim, pois apresenta para uma mesma camada profundidades diferente ao longo da área em estudo. A Figura 4-2 mostra a diferença entre um solo real e um solo estratificado, que será considerado para os métodos descritos nos próximos itens deste capítulo.

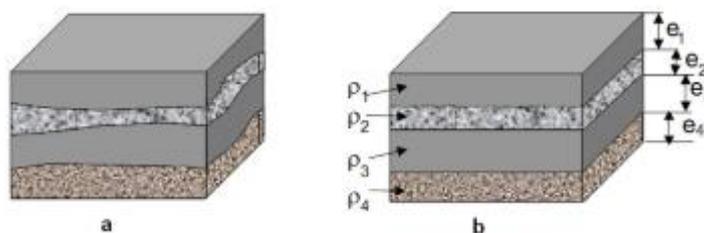


Figura 4-2 Solo Real (a) e Solo Estratificado (b) [18]

Onde:

- ρ_x é a resistividade de cada camada;
- e_x é a espessura de cada camada.

Para levar em consideração estas resistividades sem que seja necessário lançar mão de prospecções geológicas, que inviabilizariam financeiramente o projeto do sistema de aterramento foram desenvolvidos métodos que determinam a distribuição vertical dessa resistividade. Estes métodos serão abordados a seguir.

4.1 Método de estratificação de duas camadas utilizando curvas

Este primeiro método serve para calcular as diversas resistividades para cada camada estratificada do solo. Ele utiliza a curva $\rho_x a$ obtida no método Wenner, pois este é o mais confiável e o que sofre menores influências nas medidas [19]. Através de um modelo matemático, consegue obter os valores das resistividades da primeira e da segunda camada, bem como as suas respectivas profundidades. A seguir é explicado o processo matemático e o procedimento detalhado envolvido neste método.

Pelo método das imagens da teoria do eletromagnetismo, uma corrente I proveniente, por exemplo, de uma descarga elétrica atmosférica, ao atingir o solo gera potenciais na primeira camada do mesmo que devem satisfazer a equação de Laplace (8) [20]. A Figura 4-3 representa o solo de duas camadas considerado para dedução da equação (9).

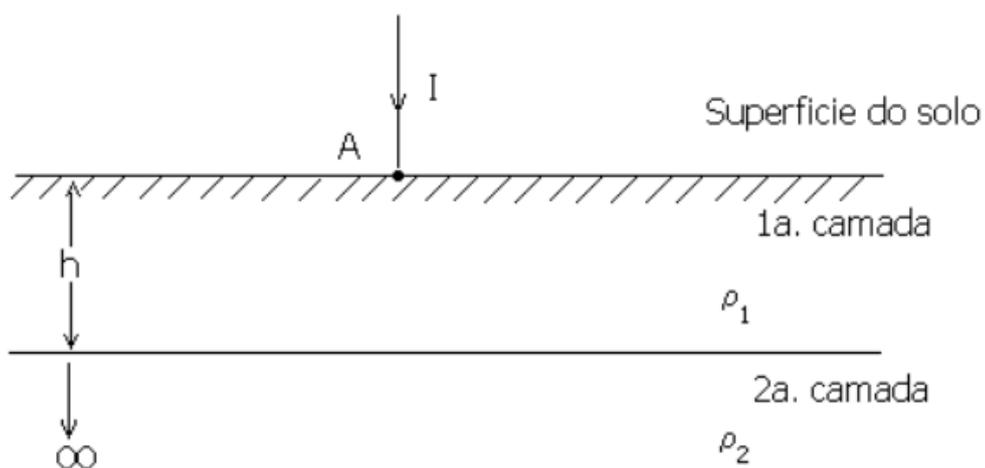


Figura 4-3 Solo com duas camadas [20]

$$\nabla^2 V = 0 \quad (8)$$

Sendo V o potencial do solo na primeira camada. Tomando como referência o potencial de qualquer ponto distante de “ r ” do ponto de incidência da corrente “ A ”, pode-se então desenvolver a equação (8) e chegar em:

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right) \quad (9)$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (10)$$

Onde:

- V_p = potencial de um ponto “ p ” em relação ao infinito;
- I = Corrente;
- ρ_1 = Resistividade da primeira camada;
- ρ_2 = Resistividade da segunda camada;
- K = Coeficiente de Reflexão (nota-se que $-1 < K < 1$);
- h = Profundidade da primeira camada;
- r = distância do ponto “ p ” ao ponto de incidência da corrente.

A partir da Figura 4-4 e das equações (9) e (3) pode-se, de forma análoga a esta, chegar à seguinte expressão para o potencial elétrico considerando duas camadas.

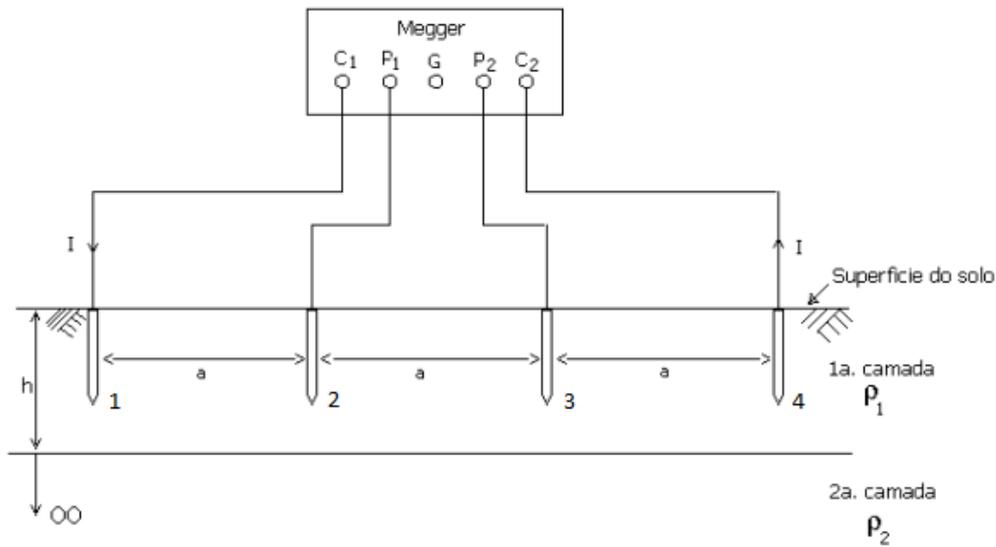


Figura 4-4 Distribuição dos eletrodos de corrente e de potencial [15]

$$V_{p2} = \frac{I\rho_1}{2\pi} + \left(\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right) - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right) \quad (11)$$

$$V_{p3} = \frac{I\rho_1}{2\pi} + \left(\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right) - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right) \quad (12)$$

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I\rho_1}{2a} \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right) \right] \quad (13)$$

Sabe-se que $R = \frac{V_{23}}{I}$ logo:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi a} \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right) \right] \quad (14)$$

Pela equação (5) tem-se que:

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (15)$$

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (16)$$

Como constatado anteriormente, o valor do coeficiente de reflexão (K) varia entre -1 e 1. Então, é possível, a partir da equação (16), traçar uma família de curvas $\frac{\rho(a)}{\rho_1}$ em função da relação $\frac{h}{a}$ para valores de K positivos e negativos.

Existem na literatura dois gráficos que descrevem o comportamento das curvas teóricas para valores de $\frac{h}{a}$ variando de 0 até 2. O primeiro gráfico (Figura 4-5) mostra as curvas para $K > 0$ e o segundo (Figura 4-6) para $K < 0$ [21].

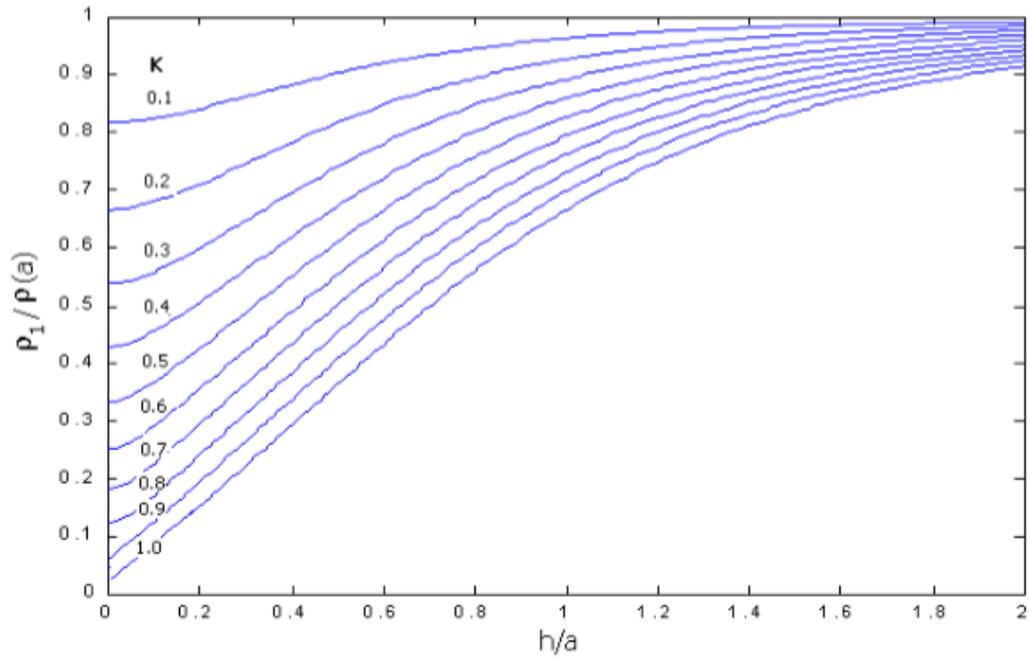


Figura 4-5 Curva teórica para $K > 0$ e $0 < h/a < 2$ [21]

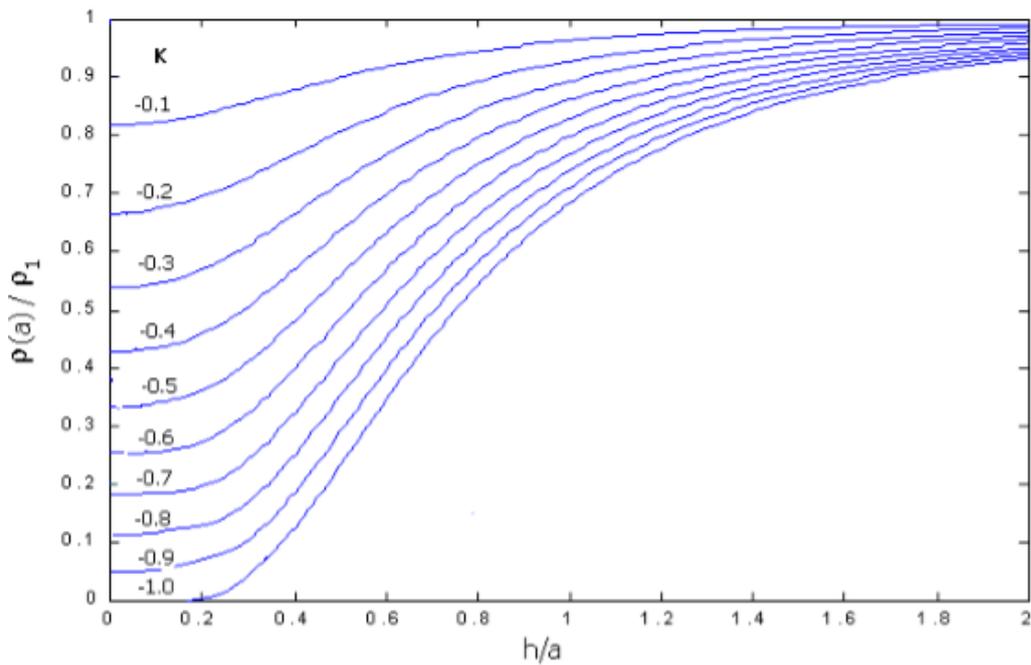


Figura 4-6 Curva teórica para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ [21]

Uma vez explicada toda matemática por traz das duas famílias de curvas, segue o passo a passo de como proceder com as medidas. Os valores mostrados na Tabela 1 são arbitrários e serão usados para demonstração do método.

1. Traçar a curva $\rho(a) \times a$ obtida no método Wenner e notar se a mesma se comporta de forma crescente ou decrescente. Por exemplo, os pontos da Tabela 1 mostram que a curva tem um comportamento decrescente.

Tabela 1 Resistividade medida para cada espaçamento

| Espaçamento (m) | Resistividade (Ωm) |
|-----------------|------------------------------|
| 1 | 670 |
| 2 | 596 |
| 4 | 403 |
| 6 | 287 |
| 8 | 226 |
| 16 | 179 |
| 32 | 176 |

2. Na curva, deve-se obter o valor de $\rho_1 = \rho(0)$ que indica onde a curva corta o eixo das ordenadas. Vale lembrar aqui que este valor é estimado. Na prática, seria impossível o espaçamento entre um eletrodo e outro ser igual a 0. No caso da Figura 4-7 o valor de $\rho_1 \sim 690 \Omega \cdot m$.

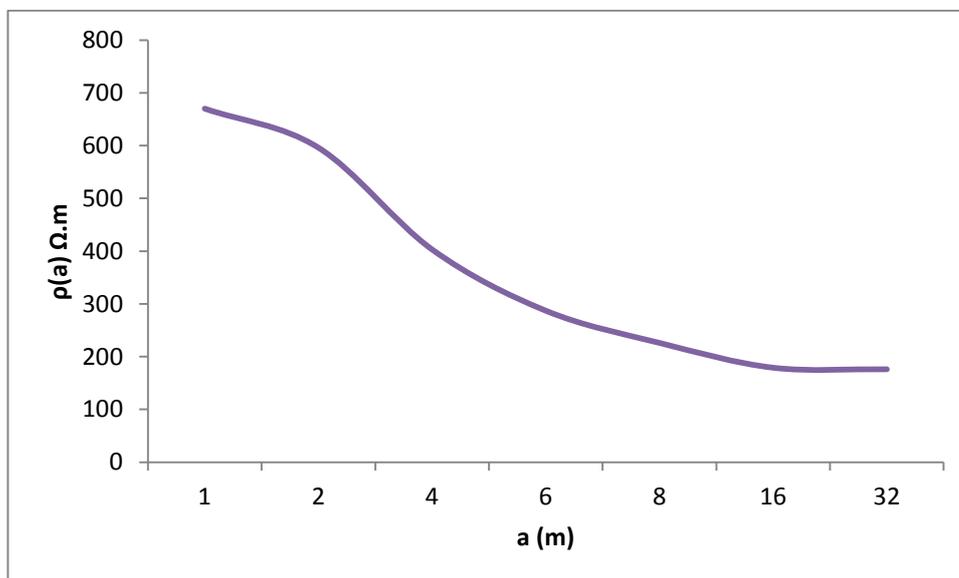


Figura 4-7 Gráfico $\rho(a) \times a$

3. Depois de obtido o valor de ρ_1 na curva, escolhe-se um valor a_0 e encontra-se na mesma curva o seu correspondente $\rho(a_0)$. Para demonstrar, considera-se o valor $a_0 = 4m$, logo $\rho(a_0) \sim 403 \Omega.m$.
4. Agora com a relação $\frac{\rho(a_0)}{\rho_1} = 0,584$ definida, utilizam-se as famílias de curvas para $K > 0$ ou $K < 0$ para calcular os valores de K correspondentes. Vale ressaltar aqui que, para a curva $\rho(a) \times a$ decrescente, $K < 0$ e, para a curva $\rho \times a$ crescente, $K > 0$. Isto pode ser percebido na equação (16) desta seção. Para este estudo de caso, tem-se uma curva decrescente, com $\frac{\rho(a_0)}{\rho_1} = 0,584$ e $a_0 = 4m$. É possível então traçar as seguintes retas (Figura 4-8).

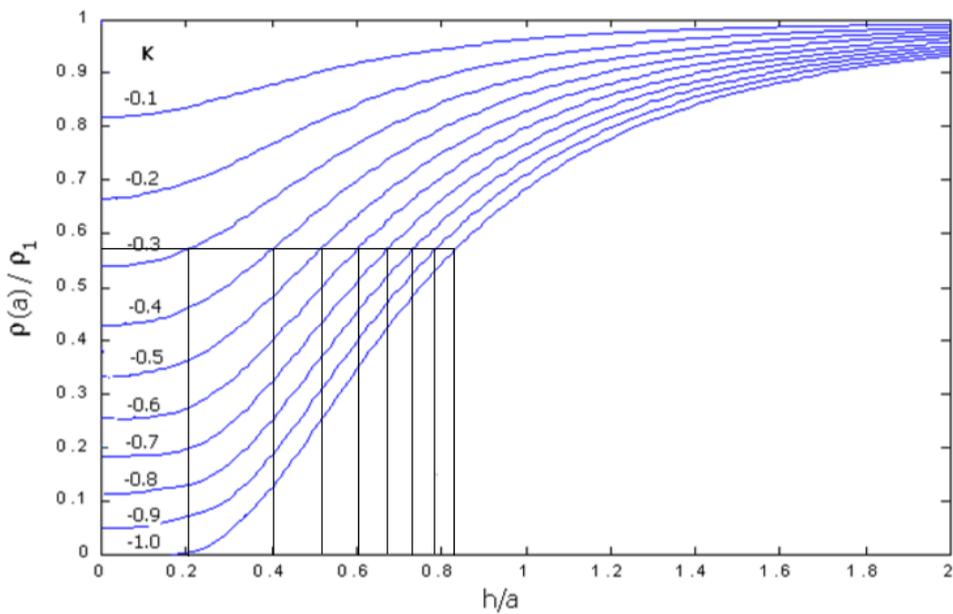


Figura 4-8 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\frac{\rho(a_0)}{\rho_1} = 0,584$

5. Com as retas traçadas, obtêm-se os valores de $\frac{h}{a}$ para cada K e multiplica-se pelo valor de $a_0 = 4m$ para obter h . Veja a Tabela 2.

Tabela 2 Valores de h/a para cada K

| K | h/a | h (m) |
|------|-------|---------|
| -0,3 | 0,208 | 0,832 |
| -0,4 | 0,401 | 1,604 |
| -0,5 | 0,509 | 2,036 |
| -0,6 | 0,602 | 2,408 |
| -0,7 | 0,654 | 2,616 |
| -0,8 | 0,743 | 2,972 |
| -0,9 | 0,786 | 3,144 |
| -1 | 0,814 | 3,256 |

6. Então constrói-se o gráfico $h \times K$ (Figura 4-9).

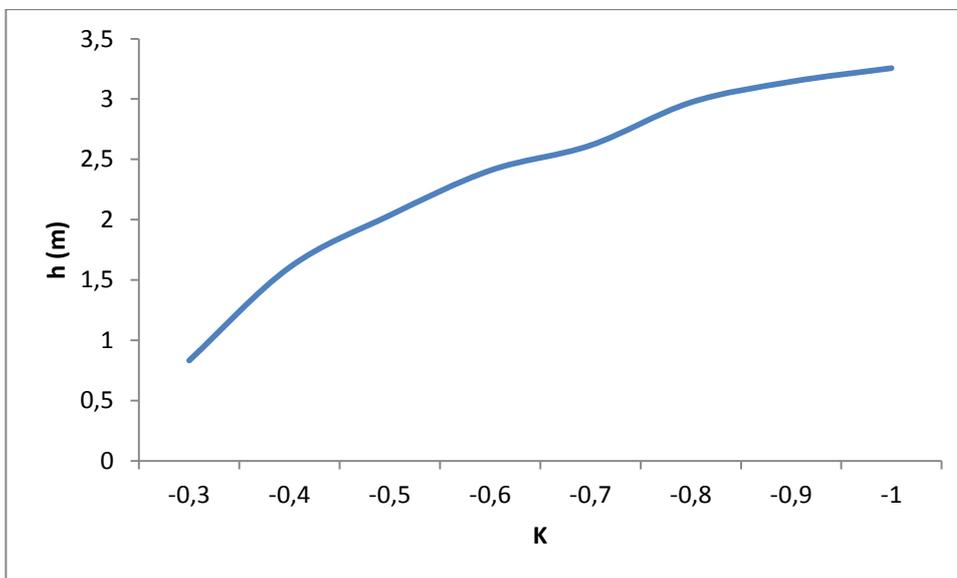


Figura 4-9 Curva $h \times K$

7. O processo então é repetido para um valor $a_1 \neq a_0$. No caso, ilustra-se com $a_1 = 6m$, logo $\rho(a_1) \sim 287 \Omega.m \Rightarrow \frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,416$ para então traçar as retas para este caso (Figura 4-10), como no item 4.

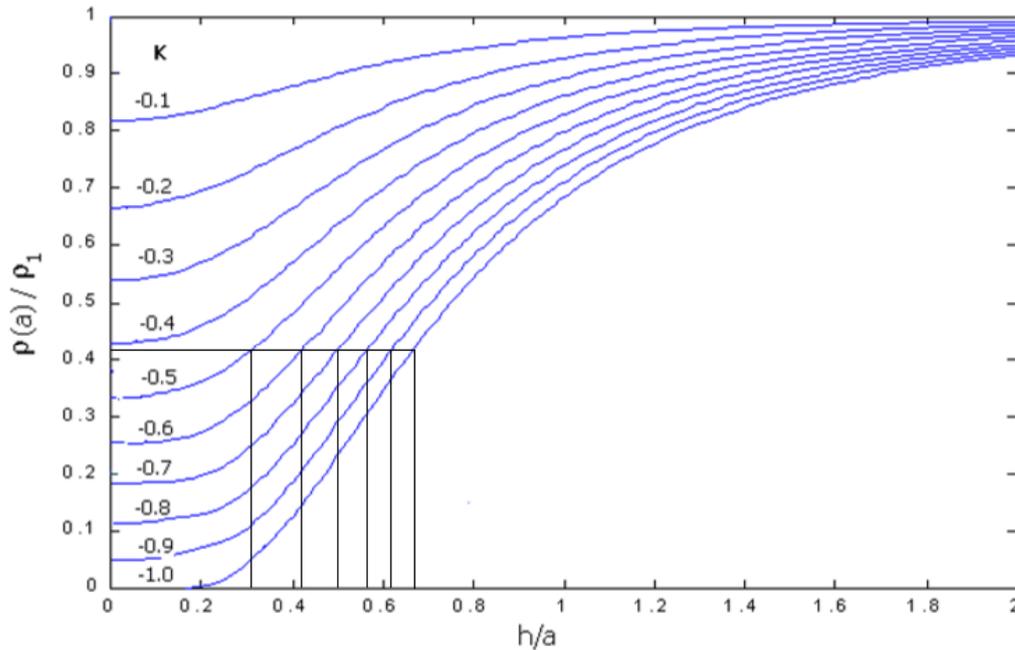


Figura 4-10 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,416$

8. Com as retas traçadas, obtêm-se os valores de $\frac{h}{a}$ para cada K e multiplica-se pelo valor de $a_1 = 8m$ para obter h , como no item 5. A Tabela 3 mostra os valores para o coeficiente de reflexão K , h/a e h .

Tabela 3 Valores de h/a para cada K

| K | h/a | h (m) |
|------|-------|-------|
| -0,5 | 0,306 | 1,836 |
| -0,6 | 0,404 | 2,424 |
| -0,7 | 0,493 | 2,958 |
| -0,8 | 0,574 | 3,444 |
| -0,9 | 0,608 | 3,648 |
| -1 | 0,679 | 4,074 |

9. Então constrói-se o gráfico de $h \times K$ (Figura 4-11).

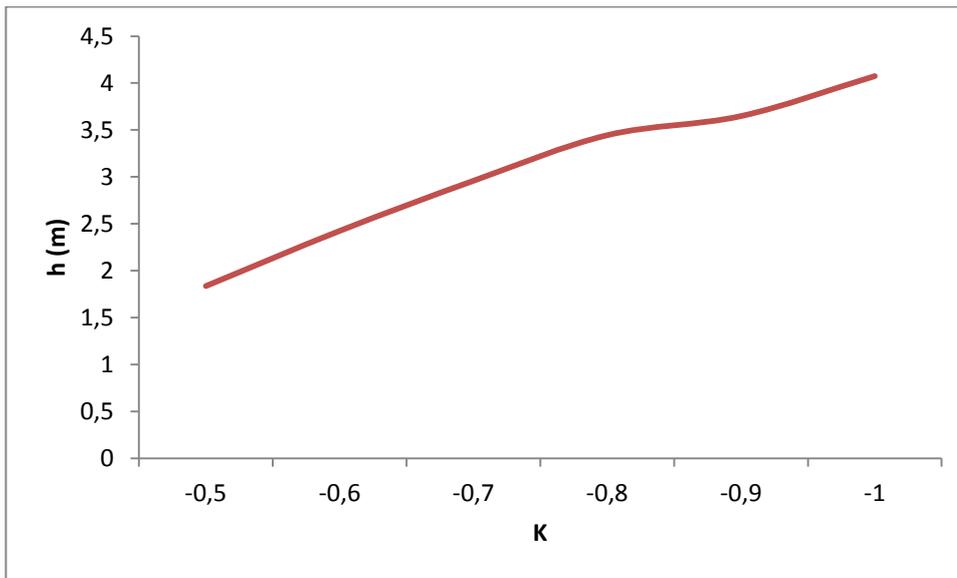


Figura 4-11 Curva $h \times K$

10. O ponto onde as duas curvas (para a_1 e a_0) se interceptam (Figura 4-12) representará os valores reais de K e h .

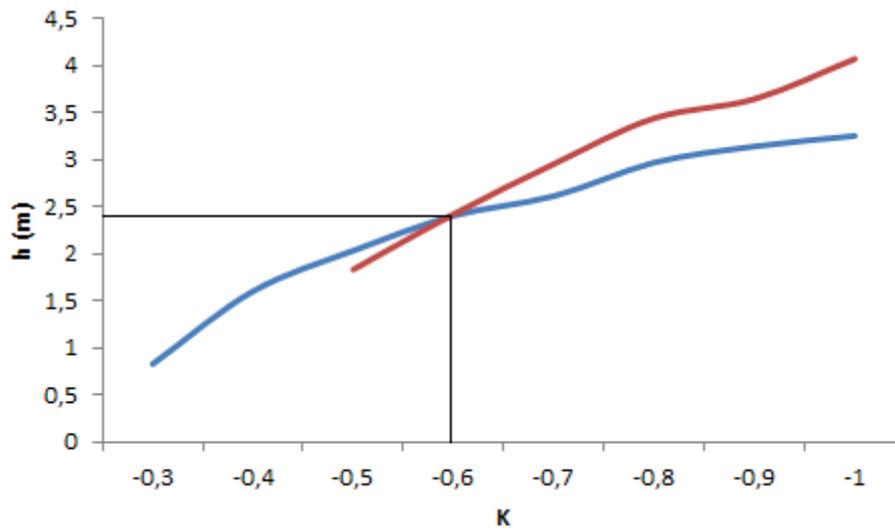


Figura 4-12 Ponto de encontro entre as curvas para a_0 e a_1

Com os valores de $K = -0,6, \rho_1 \sim 690 \Omega.m$ e $h = 2,9 m$, é possível encontrar ρ_2 usando a equação (10) já demonstrada anteriormente:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

$$\rho_2 = 172,5 \Omega.m$$

Portanto, sabem-se as duas resistividades e a profundidade que separa a primeira camada do solo da segunda.

4.2 Estratificação do solo com várias camadas

Similar ao método de estratificação de duas camadas utilizando curvas, a estratificação para várias camadas utiliza a curva $\rho(a) \times a$ obtida no método Wenner e o valor real de K para calcular as resistividades das diversas camadas do solo. Neste tópico será abordado um dos principais métodos por trás desse tipo de estratificação, o Método de Pirson.

Para um solo com mais de duas camadas, a curva de resistividade em função do espaçamento entre eletrodos possui trechos crescentes e decrescentes. Portanto, o método que calcula a estratificação para mais de duas camadas nada mais é do que a subdivisão dessa curva em curvas equivalentes para que possam ser modeladas através do método de duas camadas mostrado na seção 4.1 e assim obtidas as resistividades de cada trecho [22].

4.2.1 Método de Pirson

Como citado anteriormente, este método consiste na divisão da curva em duas, uma crescente e outra decrescente. No primeiro trecho obtêm-se os valores das resistividades da primeira e da segunda camada e a espessura da primeira camada. Depois, determina-se a resistividade equivalente vista pela terceira camada e sua profundidade em relação à segunda. Abaixo segue o passo a passo deste método, para melhor compreensão. Novamente a Tabela 4 possui valores arbitrários, utilizados apenas para demonstração deste passo a passo.

1. Traça-se o gráfico de $\rho(a) \times a$ (Figura 4-13) a partir da Tabela 4 obtida pelo método Wenner:

Tabela 4 Resistividade medida para cada espaçamento

| Espaçamento (m) | Resistividade ($\Omega.m$) |
|-----------------|------------------------------|
| 1 | 11900 |
| 2 | 15650 |
| 4 | 17234 |
| 8 | 10985 |
| 16 | 4986 |
| 32 | 3779 |

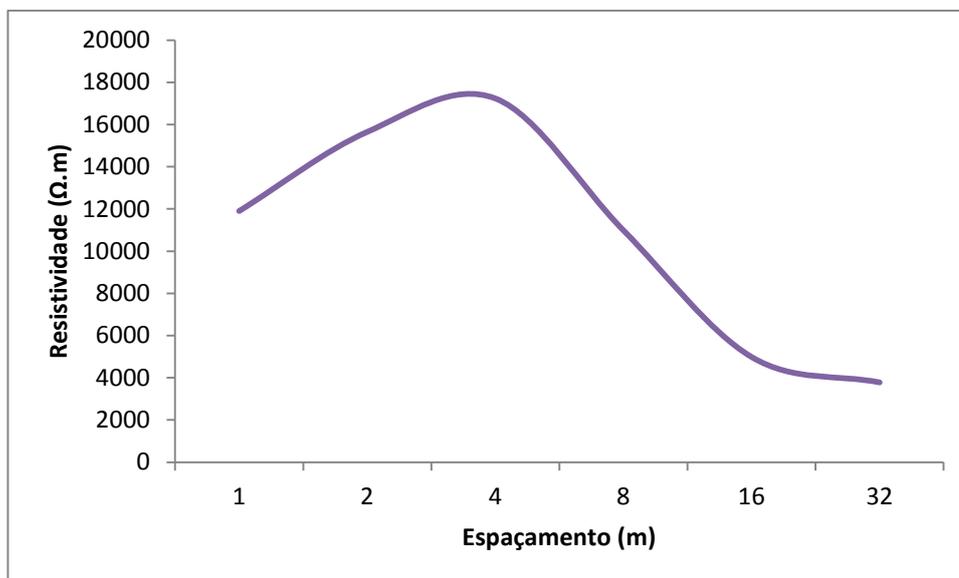


Figura 4-13 Curva $\rho \times a$ Método de Pirson

Como a curva possui um trecho crescente e outro decrescente, divide-se a curva em duas, começando pelo trecho crescente. É importante lembrar que neste caso deve-se usar a curva teórica para $K > 0$. O que segue é o passo a passo para o cálculo da resistividade de cada camada estratificada do solo.

2. Para o primeiro trecho repete-se o que foi feito no método de duas camadas, obtendo os valores de K , ρ_1 e ρ_2 . Abaixo os valores e gráficos como descritos no método de duas camadas (somente gráficos, tabelas e resultados finais).

$$\rho_1 \sim 8500 \Omega.m$$

$$a_0 = 1m \Rightarrow \frac{\rho_1}{\rho(a_0)} = 0,714$$

$$a_1 = 2m \Rightarrow \frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = 0,543$$

A Figura 4-14 mostra a reta $\frac{\rho_1}{\rho(a_0)} = 0,714$, onde é possível determinar o valor de cada h/a para os coeficientes de reflexão K . Multiplicando o valor de h/a pelo a_0 escolhido pode-se então estimar a profundidade da segunda camada. Os valores são mostrados na Tabela 5 e plotados na Figura 4-15.

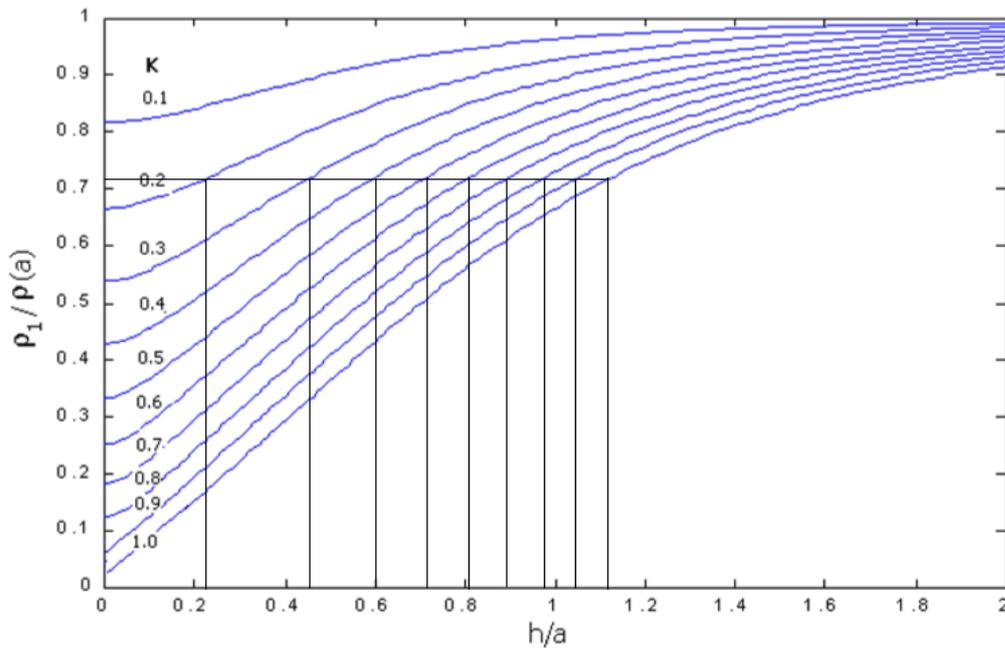


Figura 4-14 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\frac{\rho_1}{\rho(a_0)} = 0,714$

Tabela 5 Valores de h/a para cada K

| K | h/a | h (m) |
|-----|-------|-------|
| 0,2 | 0,216 | 0,216 |
| 0,3 | 0,434 | 0,434 |
| 0,4 | 0,6 | 0,6 |
| 0,5 | 0,711 | 0,711 |
| 0,6 | 0,803 | 0,803 |

| | | |
|-----|-------|-------|
| 0,7 | 0,886 | 0,886 |
| 0,8 | 0,981 | 0,981 |
| 0,9 | 1,027 | 1,027 |
| 1 | 1,108 | 1,108 |

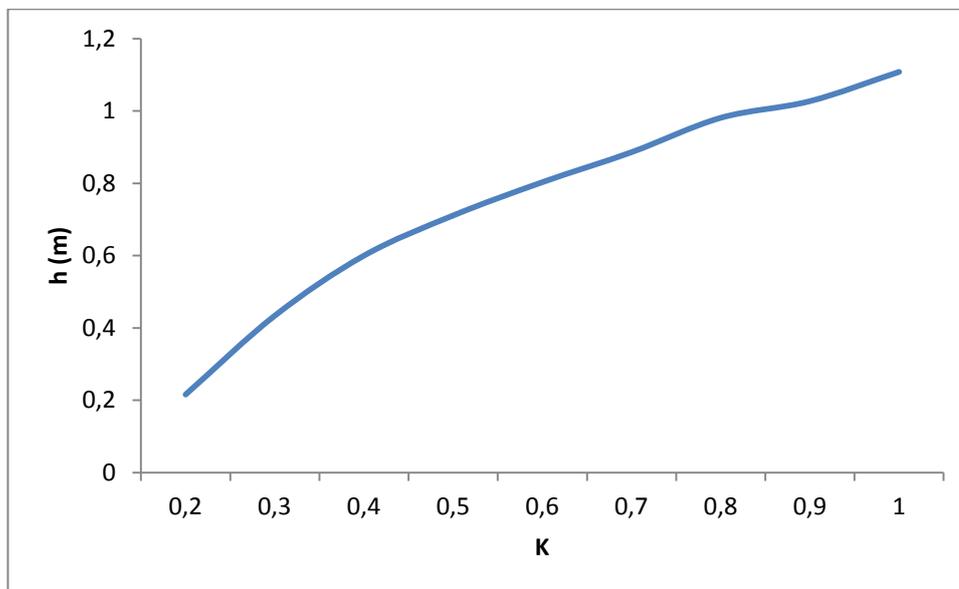


Figura 4-15 Curva h x K

A Figura 4-16 mostra a reta $\frac{\rho_1}{\rho(a_0)} = 0,543$, onde é possível determinar o valor de cada h/a para os coeficientes de reflexão K. Multiplicando o valor de h/a pelo a_1 escolhido pode-se então estimar a profundidade da segunda camada. Os valores são mostrados na Tabela 6 e plotados na Figura 4-17.

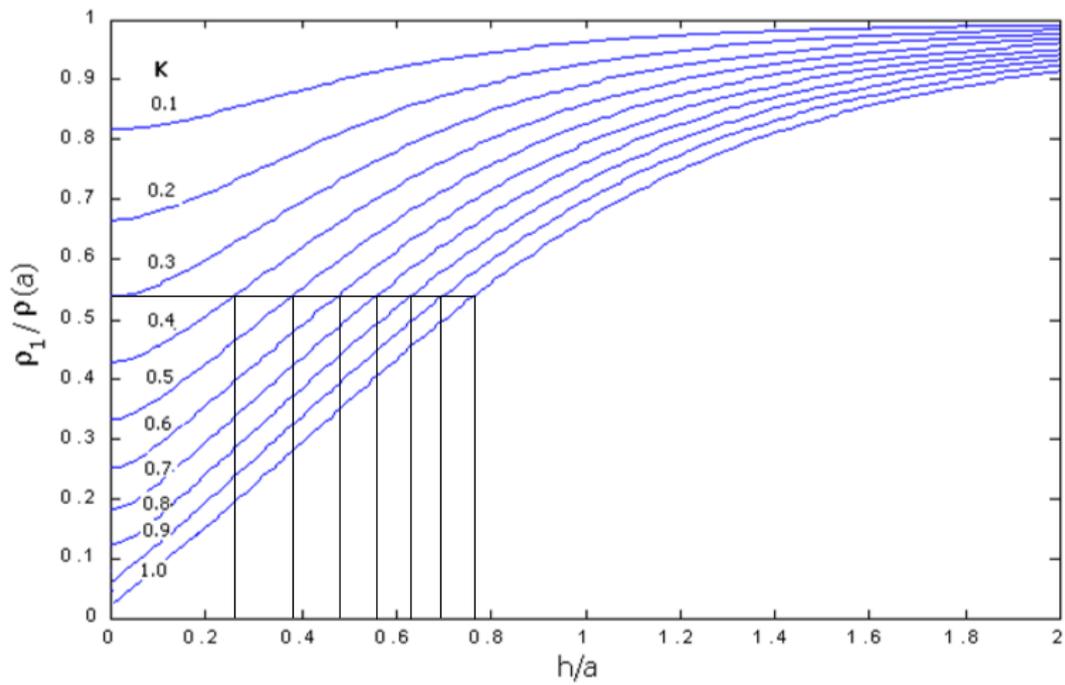


Figura 4-16 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = 0,543$

Tabela 6 Valores de h/a para cada K

| K | h/a | h (m) |
|----------|------------|--------------|
| 0,4 | 0,234 | 0,468 |
| 0,5 | 0,387 | 0,774 |
| 0,6 | 0,486 | 0,972 |
| 0,7 | 0,548 | 1,096 |
| 0,8 | 0,629 | 1,258 |
| 0,9 | 0,697 | 1,394 |
| 1 | 0,762 | 1,524 |

Logo, a curva para a_1 pode ser plotada:

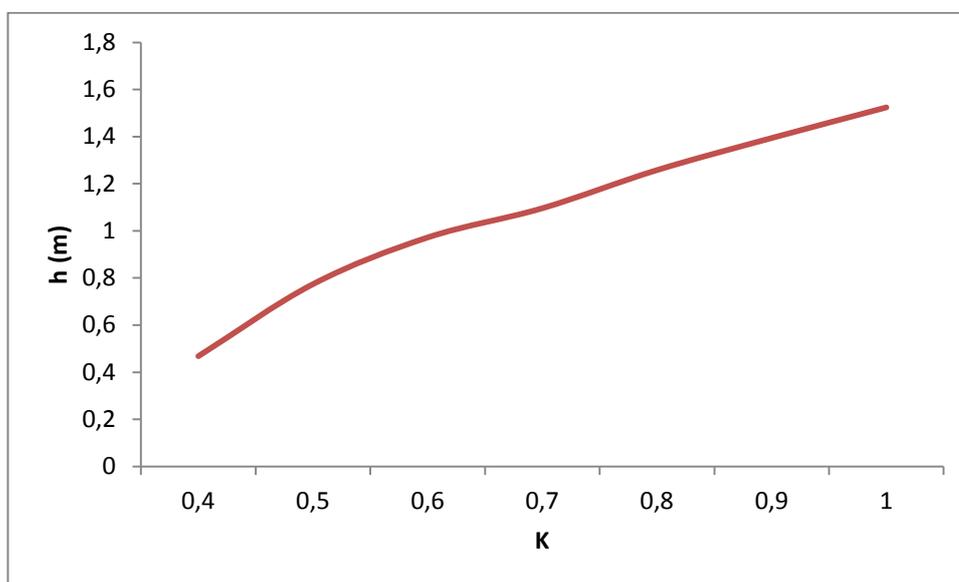


Figura 4-17 Curva h x K

O gráfico da Figura 4-18 mostra o ponto de intercessão entre as curvas para a_0 e a_1 :

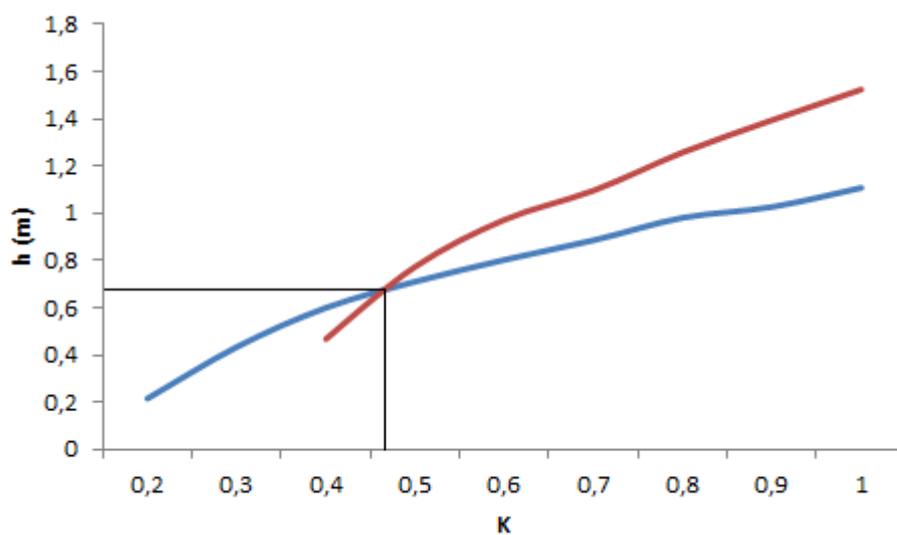


Figura 4-18 Ponto de encontro entre as curvas para a_0 e a_1

Portanto, os valores reais de K e h_1 são respectivamente 0,465 e 0,679 m. Pela equação (10):

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

$$\rho_2 = 23.275 \Omega \cdot m$$

3. Agora, utilizando o segundo trecho da curva (trecho decrescente), deve-se determinar o ponto de transição desta curva, ou seja, o ponto onde a curva muda sua concavidade. Neste ponto verifica-se a seguinte característica:

- $\frac{d\rho}{da}$ é máximo
- $\frac{d^2\rho}{da^2} = 0$

Um valor aproximado do ponto de transição é $a_2 = 8m$

4. Após determinar o ponto de transição, deve-se agora estimar a profundidade da terceira camada (\hat{h}_2). Para isso, utiliza-se o método de Lancaster-Jones, que relaciona a profundidade da primeira camada (h_1) com o espaçamento para o ponto de transição (a_2) e com a espessura estimada da segunda camada (\hat{d}_2). A Figura 4-19 mostra um solo de três camadas estratificado.

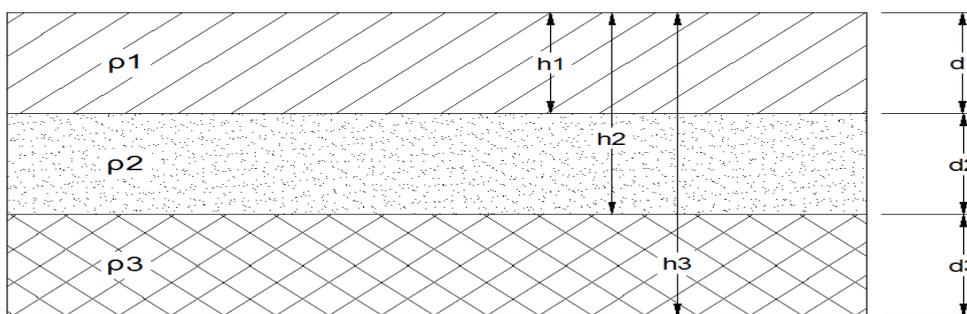


Figura 4-19 Solo de três camadas estratificado

$$\hat{h}_2 = d_1 + \hat{d}_2 = h_1 + \hat{d}_2 \quad (17)$$

Desenvolvendo a equação:

$$h_1 + \hat{d}_2 = \frac{2}{3}a_2$$

$$0,679 + \hat{d}_2 = \frac{2}{3}8$$

$$\hat{d}_2 = 4,654 \text{ m}$$

$$\hat{h}_2 = 0,679 + 4,654 = 5,333 \text{ m}$$

5. Com a profundidade da terceira camada identificada, deve-se agora calcular a resistividade associada à mesma. Para isso, utiliza-se outro método de aproximação conhecido como fórmula de Hummel que consiste na média harmônica ponderada da primeira com a segunda camada para obter a resistência equivalente vista pela terceira camada ($\hat{\rho}_2^1$).

$$\hat{\rho}_2^1 = \frac{d_1 + \hat{d}_2}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{\hat{d}_2}{\rho_2}} \quad (18)$$

Desenvolvendo a equação:

$$\hat{\rho}_2^1 = \frac{0,679 + 4,333}{\frac{0,679}{8500} + \frac{4,654}{23275}} = 17.910 \Omega.m$$

6. Uma vez obtido $\hat{\rho}_2^1$ pela fórmula de Hummel, deve-se tratar esta resistividade como o " ρ_1 " do método de duas camadas e refazer o processo para um novo $a_0 = a_2$ e um $a_1 \neq a_0$. Os valores obtidos serão, então, a resistividade da terceira camada e sua profundidade (ρ_3 e h_2). O passo a passo para melhor esclarecimento.

Tomando:

- $\rho_1 = \hat{\rho}_2^1 = 17.910 \Omega.m$
- $a_0 = a_2 = 8 \text{ m}$
- $a_1 = 16 \text{ m}$

É possível obter a partir da figura 4-14:

- $\frac{\rho(a_0)}{\rho_1} = 0,613$
- $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,278$

A Figura 4-20 mostra a reta $\frac{\rho(a_0)}{\rho_1} = 0,613$, onde é possível determinar o valor de cada h/a para os coeficientes de reflexão K . Multiplicando o valor de h/a pelo novo valor de a_0 (ponto de inflexão) pode-se então estimar a profundidade da segunda camada. Os valores são mostrados na Tabela 7 e plotados na Figura 4-21.

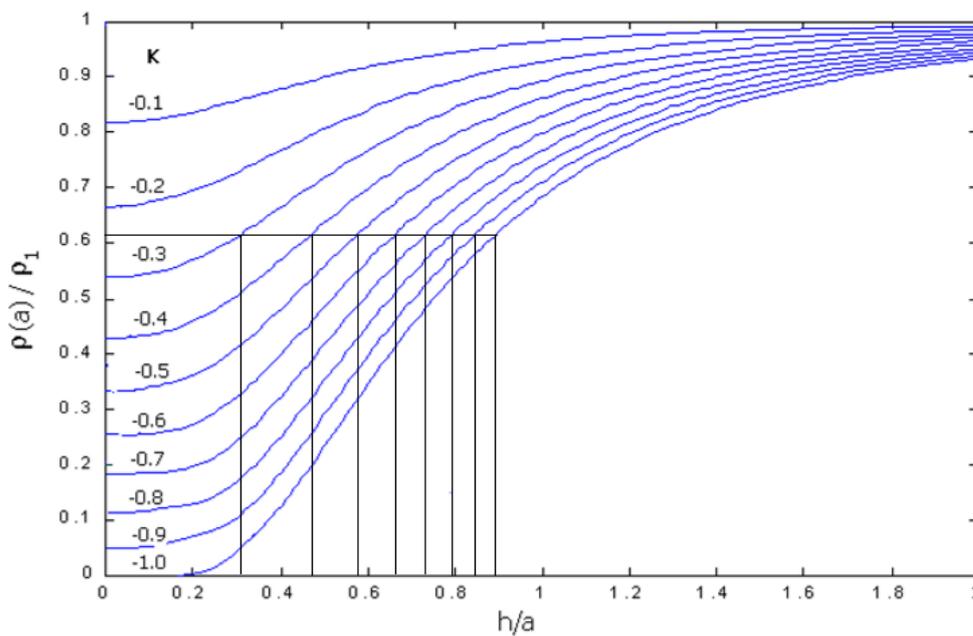


Figura 4-20 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\frac{\rho(a_0)}{\rho_1} = 0,613$

Tabela 7 Valores de h/a para cada K

| K | h/a | h (m) |
|------|-------|-------|
| -0,3 | 0,307 | 2,456 |
| -0,4 | 0,468 | 3,744 |
| -0,5 | 0,584 | 4,672 |
| -0,6 | 0,652 | 5,216 |
| -0,7 | 0,726 | 5,808 |
| -0,8 | 0,795 | 6,36 |
| -0,9 | 0,843 | 6,744 |
| -1 | 0,877 | 7,016 |

Logo, a curva para o novo valor de a_0 pode ser plotada:

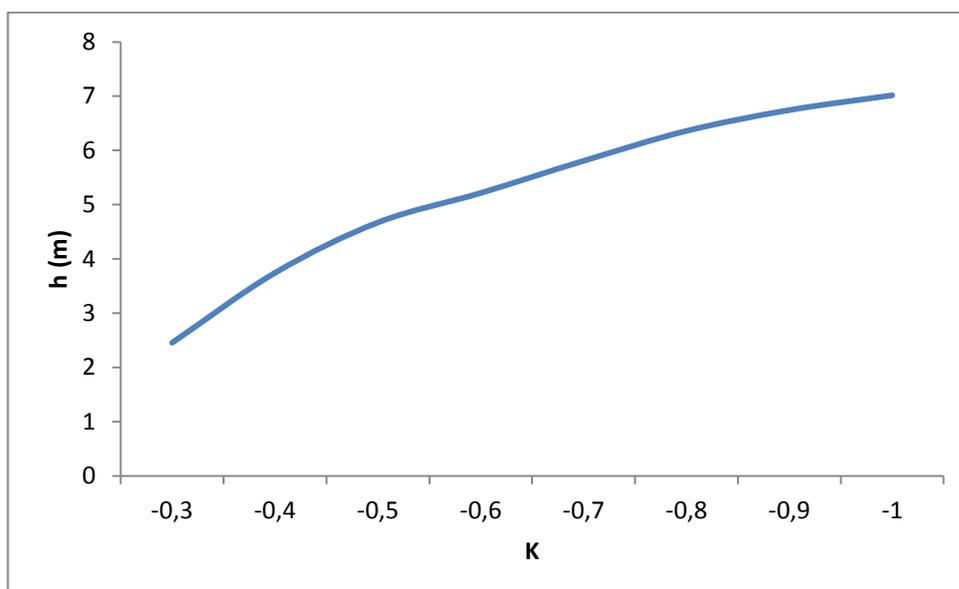


Figura 4-21 Curva h x K

A Figura 4-22 mostra a reta $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,278$, onde é possível determinar o valor de cada h/a para os coeficientes de reflexão K. Multiplicando o valor de h/a pelo novo valor de a_1 (contido na parte decrescente) pode-se então estimar a profundidade da segunda camada. Os valores são mostrados na Tabela 8 e plotados na Figura 4-23.

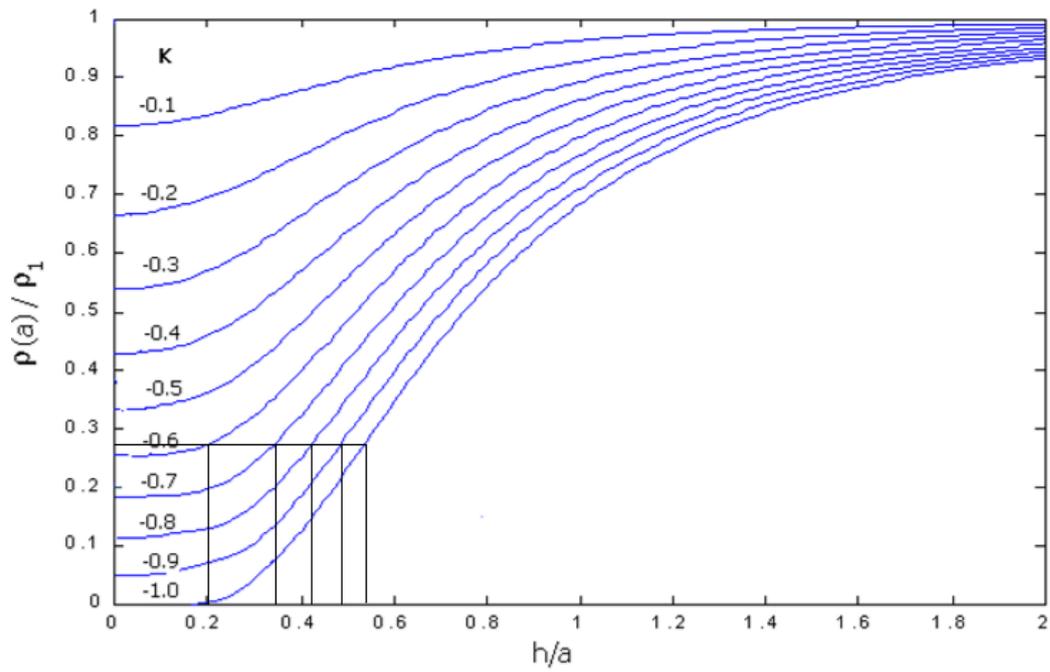


Figura 4-22 Curva para $K < 0$ e $0 < h/a < 2$ com $\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 0,278$

Tabela 8 Valores de h/a para cada K

| K | h/a | h (m) |
|------|-------|---------|
| -0,6 | 0,201 | 3,216 |
| -0,7 | 0,367 | 5,872 |
| -0,8 | 0,417 | 6,672 |
| -0,9 | 0,484 | 7,744 |
| -1 | 0,521 | 8,336 |

Logo, a curva para o novo valor de a_1 pode ser plotada:

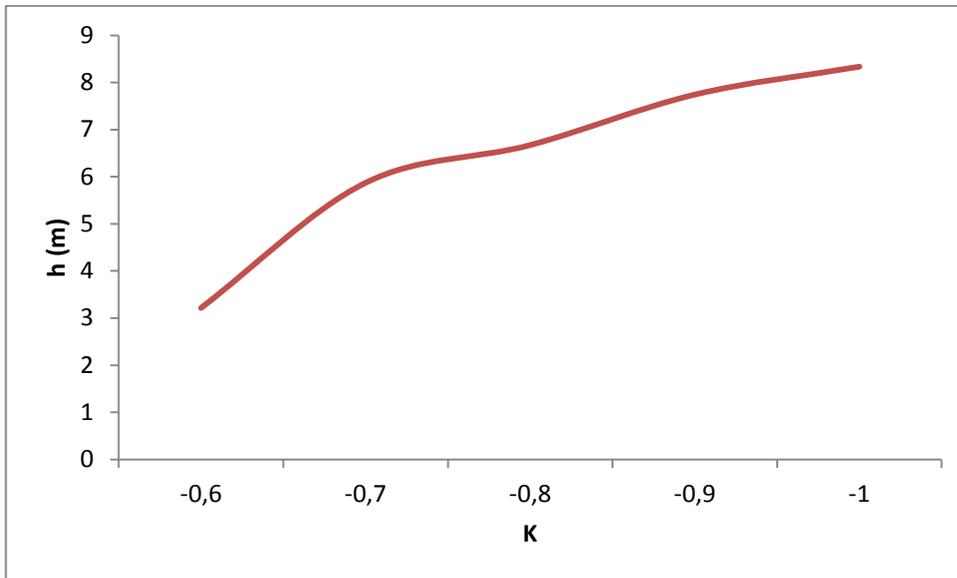


Figura 4-23 Curva h x K

O gráfico da Figura 4-24 mostra o ponto de intercessão entre as curvas para os novos valores de a_0 e a_1 :

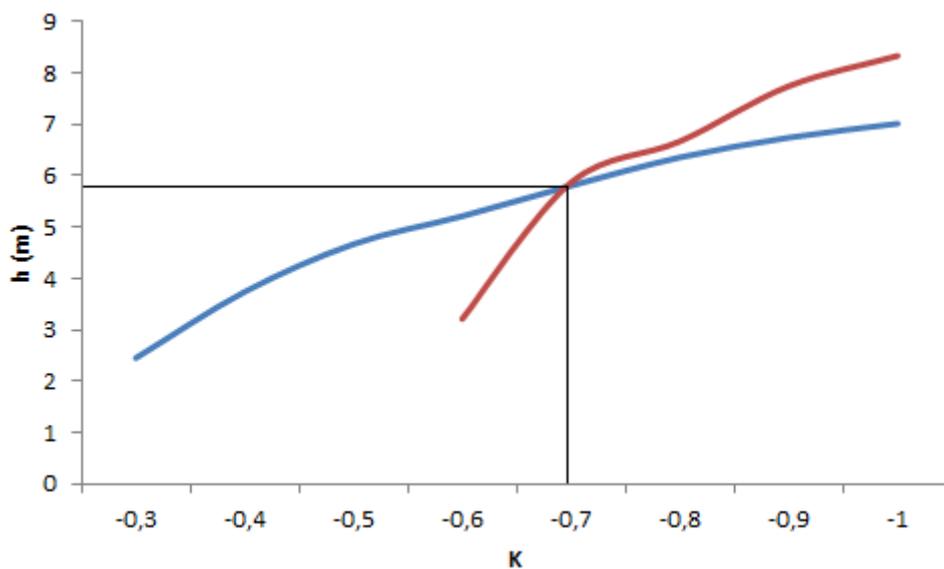


Figura 4-24 Ponto de encontro entre as curvas para a_0 e a_1

Obtêm-se, portanto, a partir do método de duas camadas, novos valores de K e h que são respectivamente -0,694 e 5,73 m.

7. Para calcular o valor da resistividade da terceira camada basta aplicar novamente a equação (10):

$$K = \frac{\rho_3 - \hat{\rho}_2^1}{\rho_3 + \hat{\rho}_2^1}$$

$$\rho_3 = 3.235 \Omega.m$$

Enfim, os resultados obtidos para as espessuras e resistividades de cada camada são:

- $\rho_1 = 8500 \Omega.m$
- $\rho_2 = 23.275 \Omega.m$
- $\rho_3 = 3.235 \Omega.m$
- $h_1 = 0,679m$
- $h_2 = 5,73m$

Caso o solo precise ser estratificado em mais uma camada para obtenção da resistividade e profundidade da quarta camada. Basta encontrar o novo ponto de inflexão (passo 3). Então estimar a espessura da quarta camada pela fórmula de Lancaster-Jones (passo 4) e por fim calcular a resistividade equivalente vista pela quarta camada pela equação de Hummel (passo 5). Feito isto, basta repetir todo o processo para os novos valores de espaçamento e resistividade equivalente do solo calculado.

4.3 Métodos de medição de resistência de aterramento em solos energizados

Até agora foram apresentados métodos para medir a resistividade e o passo a passo de como devem ser realizados. Não obstante, é necessário após o projeto do sistema de aterramento, medir periodicamente a resistência de aterramento para garantir que o sistema permaneça seguro.

O grande problema por trás dessas medidas realizadas em solos energizados (como é o caso de subestações) advém dos ruídos provenientes das

variações de cargas que as mesmas podem causar nos equipamentos de medição. Portanto, é necessário medir a resistência com as mesmas desenergizada para garantir a precisão e, conseqüentemente, a segurança das pessoas e equipamentos envolvidos. Porém existem diversas subestações que não podem ser desenergizadas, então, para contornar os problemas com ruídos, desenvolveu-se o método de 70Hz que utiliza uma fonte de 70Hz (única presente no sistema) para gerar a corrente nos eletrodos do aparelho (simulando uma falta) para obter o valor da elevação de tensão no solo [23].

Nesta seção serão abordados três métodos e a forma como devem ser aplicados para minimizar os ruídos gerados pela subestação energizada:

1. Método Convencional (60Hz)
2. Método Transitório (60Hz)
3. Método de 70Hz

Para aumentar a precisão das medidas em todos os métodos, as mesmas devem ser realizadas de forma que a distancia entre os eletrodos de corrente e a extremidade da malha de aterramento seja no mínimo três vezes superior a maior dimensão do sistema de aterramento. [24]

4.3.1 Método Convencional de 60Hz

Este método consiste em injetar uma corrente alta, na ordem de dezenas de Ampéres para melhorar a relação sinal/ruído, que circulará entre os eletrodos de aterramento da subestação e o eletrodo de retorno da corrente. A tensão será então medida através de um osciloscópio digital convencional e calculado o valor RMS da elevação de tensão no solo.

Este procedimento deve ser executado para corrente direta e inversamente polarizada. Para garantir ainda maior precisão, pode-se calcular quanto o ruído representa na medida. Para isso, é injetada uma corrente muito menor (alguns Ampéres) e é feita novamente a medida do potencial nos eletrodos.

Feitas as medidas, pode-se calcular a elevação de potencial no solo da subestação pela equação (19):

$$V = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2}{2} - V_A^2} \quad (19)$$

Onde:

- V = elevação de potencial no solo da subestação;
- V_1 = potencial para corrente diretamente polarizada;
- V_2 = potencial para corrente inversamente polarizada;
- V_A = potencial do ruído.

4.3.2 Método Transitório

Assim como no Método convencional, neste método também será injetada uma corrente na ordem de dezenas de Amperes para elevar a relação sinal/ruído e determinar a elevação de potencial no solo com maior precisão. A medida será realizada em um osciloscópio digital convencional, configurado para *single shot* para capturar o sinal antes da aplicação da falta (ruído) e após a aplicação da corrente de falta. A Figura 4-25 ilustra o sinal antes e depois da simulação da falta.

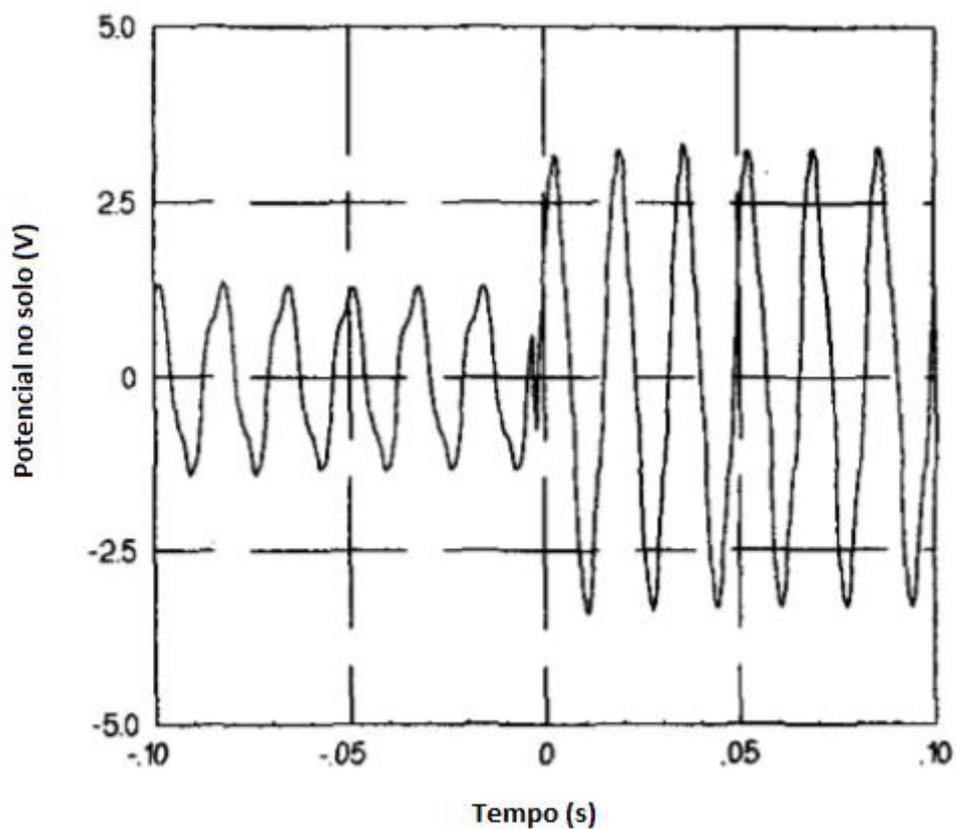


Figura 4-25 Captura de Imagem do Osciloscópio no Método Transitório [25]

Depois de capturada, a imagem é armazenada em um microcomputador onde um algoritmo irá subtrair os dois sinais para poder determinar a elevação de potencial no solo sem o efeito do ruído. Uma vantagem deste método em relação aos demais é que por se tratar de uma captura de imagem do sinal, a corrente é injetada em um curto espaço de tempo, o que garante maior segurança aos operadores do equipamento de medida [25].

O fluxograma da Figura 4-26 mostra como o algoritmo funciona:



Figura 4-26 Fluxograma do Método Transitório

4.3.3 Método de 70 Hz

Este método difere dos demais com relação à corrente aplicada para medir a elevação do potencial no solo. O processo de medida é o mesmo, porém, como a única fonte de 70 Hz no sistema é a própria fonte que simula a falta, não há interferência dos ruídos provenientes da variação da carga na subestação. Conseqüentemente, a corrente injetada neste método poderá ser bem inferior às demais [23].

Duas vantagens deste método em relação aos anteriores são:

- Correntes mais baixas, interferindo menos no sistema elétrico;
- Valores podem ser medidos diretamente do equipamento, sem necessidade de um pós-processamento de dados. Como o caso do algoritmo no Método Transitório e a equação (19) no Método Convencional de 60 Hz.

O problema envolvendo a aplicação deste método é que ao contrario dos anteriores, não pode ser utilizado um osciloscópio digital convencional. Deve-se utilizar um mais robusto, com uma transformada de Fourier embutida para separar o sinal de 70 Hz do sinal de 60 Hz e seus harmônicos (ruído) em tempo real.

4.3.4 Estudo da eficiência dos três métodos

Um experimento conduzido por [25] comprova a eficiência de cada um dos três métodos. Nele é simulada uma falta injetando-se uma corrente entre o solo da subestação e o eletrodo de retorno localizado a 1 km da subestação. A Figura 4-27 mostra como foi feito o arranjo para realização das medidas. Nota-se que há quatro eletrodos de retorno que servem para variar a impedância total do sistema para mudar a relação Sinal/Ruído na medida.

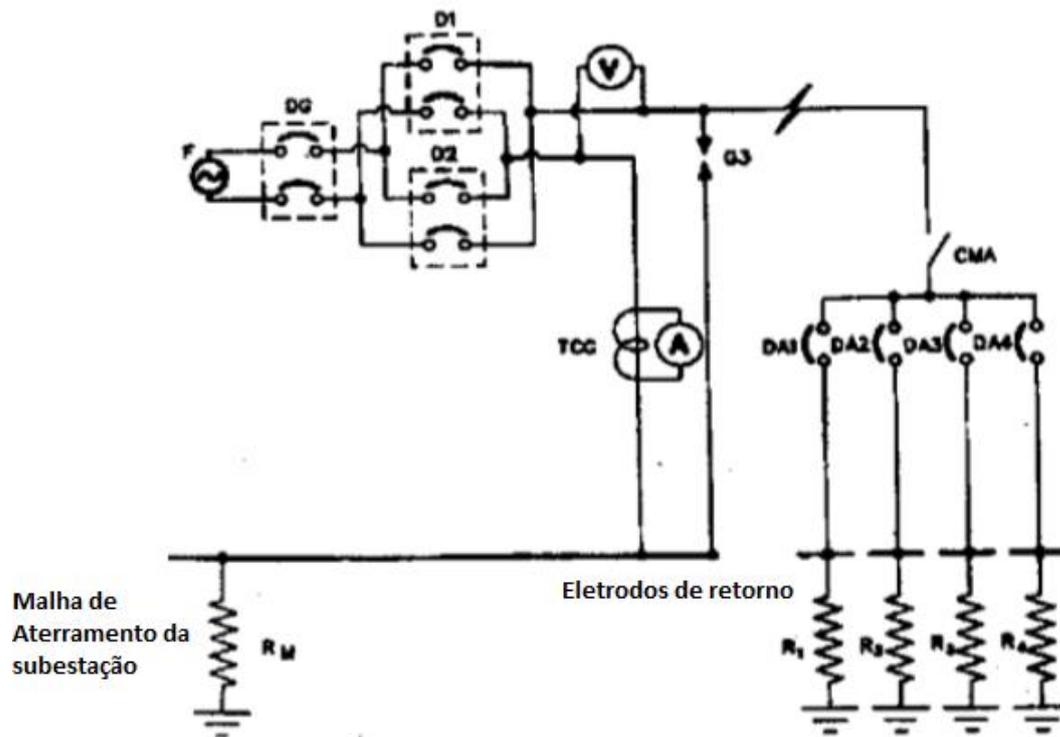


Figura 4-27 Arranjo para simulação da falta [25]

As medidas foram tomadas em duas direções no terreno (vertical – Perfil A e horizontal – Perfil B) a Figura 4-28 mostra as medidas realizadas para cada perfil.

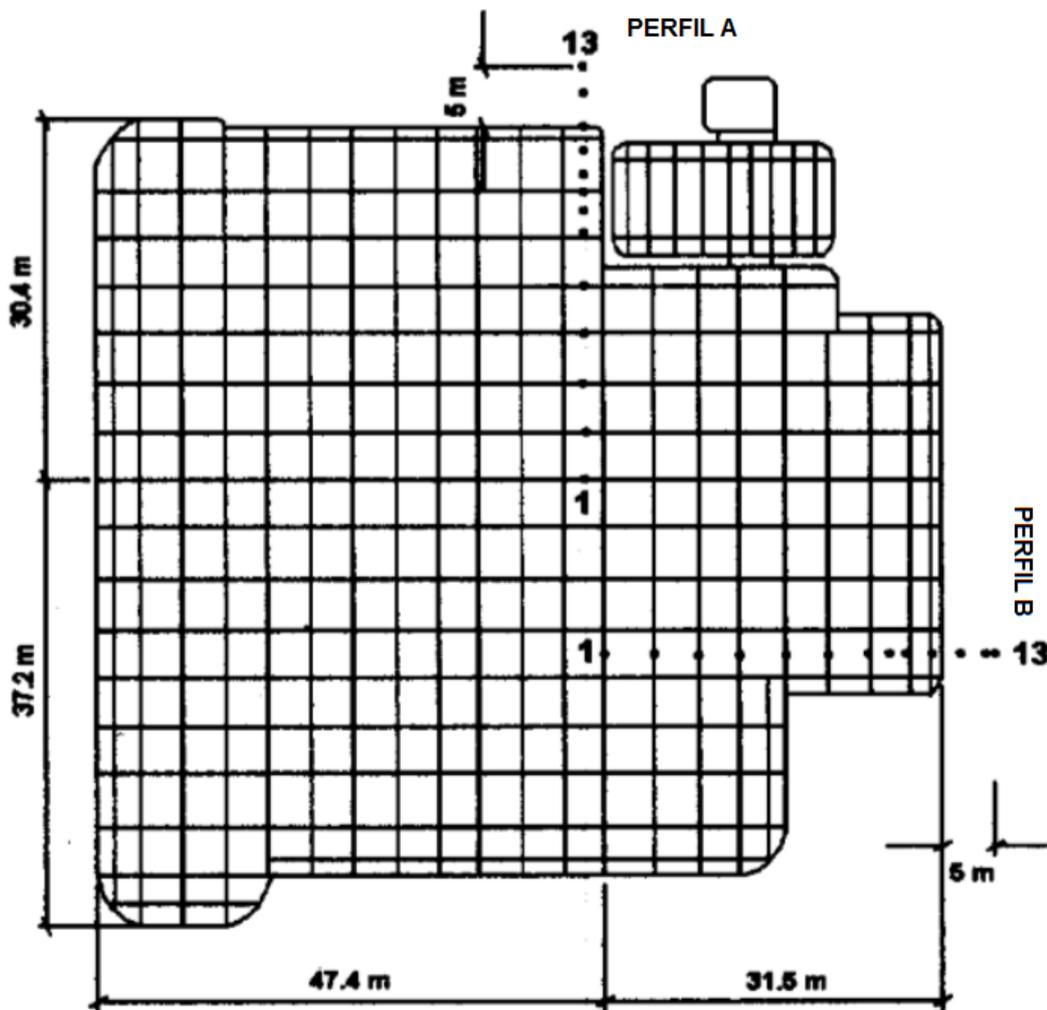


Figura 4-28 Layout da malha da subestação [25]

Para verificação da precisão destes métodos foram tomadas como referências as medidas dos potenciais no solo e o aumento de tensão proveniente da simulação da falta na subestação desenergizada. Foi então obtida a Tabela 9.

Tabela 9 Medidas de referência [25]

| Referência | | | | |
|------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Medida Nº | Corrente Injetada (Arms) | Aumento de potencial no solo (Vrms) | Potencial do solo Perfil A (Vrms) | Potencial do solo Perfil B (Vrms) |
| 1 | 32,60 | 172,00 | 1,78 | 4,89 |
| 2 | 32,50 | 170,80 | 1,92 | 3,32 |
| 3 | 32,10 | 171,20 | 3,74 | 1,48 |
| 4 | 32,10 | 172,20 | 3,09 | 1,86 |
| 5 | 32,10 | 171,60 | 2,99 | 8,50 |
| 6 | 32,90 | 173,80 | 2,36 | 9,88 |
| 7 | 32,80 | 172,60 | 3,91 | 9,55 |
| 8 | 33,20 | 175,00 | 4,00 | 9,60 |
| 9 | 33,10 | 175,00 | 6,20 | 2,50 |
| 10 | 32,40 | 172,20 | 5,00 | 11,70 |
| 11 | 32,00 | 171,00 | 5,80 | 35,80 |
| 12 | 32,00 | 170,20 | 39,10 | 48,20 |
| 13 | 32,10 | 171,60 | 58,80 | 52,50 |

Então foi calculado, para ambos os perfis, a razão $\frac{\text{Potencial do solo}}{\text{Aumento de potencial no solo}}$ nas condições de referência, nos métodos da queda de potencial, de transição e de 70 Hz. Os resultados obtidos são expostos nas Tabela 10 e Tabela 11 em % referente à esta razão

Tabela 10 Comparação entre cada método, Perfil A [25]

| Perfil A | | | | |
|-----------|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| Medida Nº | Referência | Método Convencional | Método Transitório | Método de 70 Hz |
| 1 | 1,03% | 0,99% | 0,99% | 1,00% |
| 2 | 1,12% | 1,14% | 1,10% | 1,11% |
| 3 | 2,18% | 2,18% | 2,16% | 2,19% |
| 4 | 1,79% | 1,80% | 1,77% | 1,79% |
| 5 | 1,74% | 1,78% | 1,73% | 1,76% |
| 6 | 1,36% | 1,41% | 1,38% | 1,39% |
| 7 | 2,27% | 2,33% | 2,27% | 2,30% |
| 8 | 2,29% | 2,36% | 2,30% | 2,34% |
| 9 | 3,54% | 3,70% | 3,55% | 3,55% |
| 10 | 2,90% | 2,99% | 2,95% | 2,98% |
| 11 | 3,39% | 3,59% | 3,49% | 3,48% |
| 12 | 22,97% | 22,98% | 22,77% | 23,03% |
| 13 | 34,27% | 34,10% | 33,86% | 34,05% |

Tabela 11 Comparação entre cada método, Perfil B [25]

| Perfil B | | | | |
|-----------|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| Medida Nº | Referência | Método Convencional | Método Transitório | Método de 70 Hz |
| 1 | 2,84% | 2,81% | 2,79% | 2,81% |
| 2 | 1,94% | 1,95% | 1,92% | 1,94% |
| 3 | 0,86% | 0,84% | 0,85% | 0,85% |
| 4 | 1,08% | 1,06% | 1,07% | 1,08% |
| 5 | 4,95% | 4,93% | 4,93% | 4,93% |
| 6 | 5,68% | 5,63% | 5,65% | 5,68% |
| 7 | 5,53% | 5,56% | 5,53% | 5,55% |
| 8 | 5,49% | 5,49% | 5,42% | 5,47% |
| 9 | 1,43% | 1,41% | 1,43% | 1,44% |
| 10 | 6,79% | 6,74% | 6,79% | 6,87% |
| 11 | 20,94% | 21,40% | 20,98% | 21,08% |
| 12 | 28,32% | 28,17% | 28,20% | 28,29% |
| 13 | 30,59% | 30,46% | 30,42% | 30,43% |

Como a variação nos três métodos em relação aos valores de referência é bem pequena pode-se concluir que esses métodos apresentam boa precisão para medir resistência de aterramento em subestações energizadas. Vale a pena ressaltar novamente que, apesar do Método de 70 Hz necessitar de equipamentos mais sofisticados, ele minimiza o efeito dos ruídos. Portanto, em casos de subestações energizadas com uma variação de carga muito grande em um curto espaço de tempo ele se torna mais adequado que os outros dois métodos de 60 Hz, pois tais métodos funcionam bem para ruídos constantes durante as medições. Dentre os métodos de 60 Hz expostos acima, o Método Convencional de 60 Hz é o mais sensível a ruídos [25].

5 Fatores que influenciam a resistividade do solo

Para realizar uma boa medição da resistividade do solo, deve-se ter conhecimento dos fatores que influenciam seu valor para que tais medidas sejam realizadas em períodos mais críticos. Pois se a resistência de aterramento estiver adequada em tais períodos, nos períodos mais favoráveis ela possuirá valores menores, dentro do adequado para garantir a segurança das pessoas e equipamentos no sistema. Dentre estes fatores podemos destacar:

- Influências ambientais:
 - Tipo de solo
 - Teor de umidade
 - Temperatura
 - Salinidade
- Influências antrópicas:
 - Tratamento químico do solo
 - Hastes concretadas
 - Estruturas metálicas enterradas no solo

5.1 Influências Ambientais

5.1.1 Tipos de solo

Segundo [26], existem vários tipos de solos e os mesmos apresentam diferentes características. Cada solo é caracterizado principalmente de acordo com sua rocha-mãe, idade, situação topográfica e condições meteorológicas.

O estado de São Paulo apresenta uma variedade muito grande de tipos de solos com diferentes resistividades. A Tabela 12 mostra o nome popular de alguns tipos de solo encontrados no Estado, bem como a respectiva rocha-mãe, formação geológica e idade da rocha-mãe.

Tabela 12 Solos mais presentes no estado e suas características [26]

| Nome Popular | Rocha-Mãe | Formação Geologica | Idade da Rocha-Mãe |
|-----------------------------|---|--|--------------------|
| Salmourão | Gneiss, granitos, pegmatitos, migmatitos e etc. | Arqueano (Há granitos cambreanos ou silurianos) | |
| Massapé | Idem, Rochas menos acidas (biotíticas, anfibolíticas etc.) | | |
| Salmourão | Xistos, quartzíticos | Xistos cristalinos arqueanos e algonquianos (série de São Roque) | |
| Massapé | Xistos, micáceos, filitos | | |
| Terra clara Arenosa | Arenitos de granulação desigual, contendo folhinhas de mica | Arenitos de Furnas | Devoniano |
| Terra Argilosa | Argilitos, folhelhos, varvitos e tilitos argilosos (fácies principalmente o glacial) | Séries Itararé e Tubarão | Permocarbonifero |
| Terra Arenosa-Catanduva | Arenitos e conglomerados, varvitos e tilitos arenosos (fácies principalmente inter e poste-glacial) | | |
| Terra Silicosa | Arenitos, sílex e rochas silicificadas | Série passa-dois(Corumbataí-Iratí) | Permotriássico |
| Terra Argilosa | Folhelhos; pequena contribuição de calcáreos; Rochas pouco silicificadas | | |
| Terra Calcárea | Calcáreos; pequena contribuição de folhelhos; Silificação incipiente | | |
| Terra Arenosa | Arenitos Botucatu e pirambóia | Série de São Bento (Arenitos Pirambóia e Botucatu; Trap) | Triássico |
| Terra Roxa-de-campo | Arenito Botucatu; Pequena contribuição de Diabásios ou basaltitos; meláfiro decalcificados | | |
| Terra Roxa-Misturada | Diabásios e basaltitos com pequena contribuição de arenito Botucatu; Meláfiro | | |
| Terra Roxa-Legítima | Diabásio, meláfiro calcíferos e basaltitos | | |
| Terra Vermelha Arenosa | Arenitos contendo argilas pouco calcáreas (Bauru inferior) | Arenitos de Baurú | Cretáceo |
| Terra Arenosa | Arenitos contendo argilas calcáreas; arenitos cineríticos (Bauru superior) | | |
| Terra Argilosa | Argilitos arenosos variegados; folhelhos | Taubaté | Terciário |
| Terra Arenosa | Arenitos argilosos | Litoral | |
| Terra clara Arenosa | Areas de antigas praias; contribuição de loess e limo fluvial | | |
| Varzeas de subsolo inundado | Limo fluvial; poeirras recentes; pequena contribuição de Loess | | |
| Varzeas drenadas | Detritos de solos e de rochas | | |
| Terra preta | | | |
| Barro Claro | Areas depositadas nas margens de rios e nas orlas de baixadas; fraca contribuição de loess | | |
| Aluviões drenadas | | | |

A grande variedade de solos existentes faz com que os valores de resistividade para os solos também seja bastante diversificada. Como citado anteriormente, além do tipo de solo, a resistividade varia de acordo com outros fatores, tais como umidade, idade de formação geológica, temperatura, salinidade e profundidade das camadas, além de fatores externos como, por exemplo, o nível de compactação e contaminação desse solo. A Tabela 13 faz a relação entre os tipos de solo e suas resistividades características.

Tabela 13 Resistividade característica para cada tipo de solo [18]

| Tipos de solo | Faixa de resistividades ($\Omega \cdot m$) |
|---|--|
| Água do mar | menor do que 10 |
| Alagadiço, limo, humus, 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 ^a | Molhado: 20 – 100 Úmido: 300 – 1 000 Seco: 3 k $\Omega \cdot m$ – 2 M $\Omega \cdot m$ |
| ^a A categoria molhado é típica de aplicação em ambientes externos. Valores inferiores a 50 $\Omega \cdot m$ são considerados altamente | |

5.1.2 Teor de Umidade:

Analisando o gráfico da Figura 5-1 é possível notar que a resistividade é inversamente proporcional à umidade do solo. Ou seja, quanto mais úmido o solo, menor será sua resistividade, pois a água faz com que os sais presentes no solo se dissolvam formando um meio eletrolítico favorável à passagem de corrente. A Tabela 14 e a Figura 5-1 mostra o comportamento de um solo arenoso de acordo com a umidade presente no mesmo.

Tabela 14 Resistividade em função da umidade [17]

| Umidade (% por peso) | Resistividade $\Omega.m$ (solo arenoso) |
|----------------------|---|
| 0,0 | $\rightarrow \infty$ |
| 2,5 | 1500 |
| 5,0 | 430 |
| 10,0 | 185 |
| 15,0 | 105 |
| 20,0 | 63 |
| 30,0 | 42 |

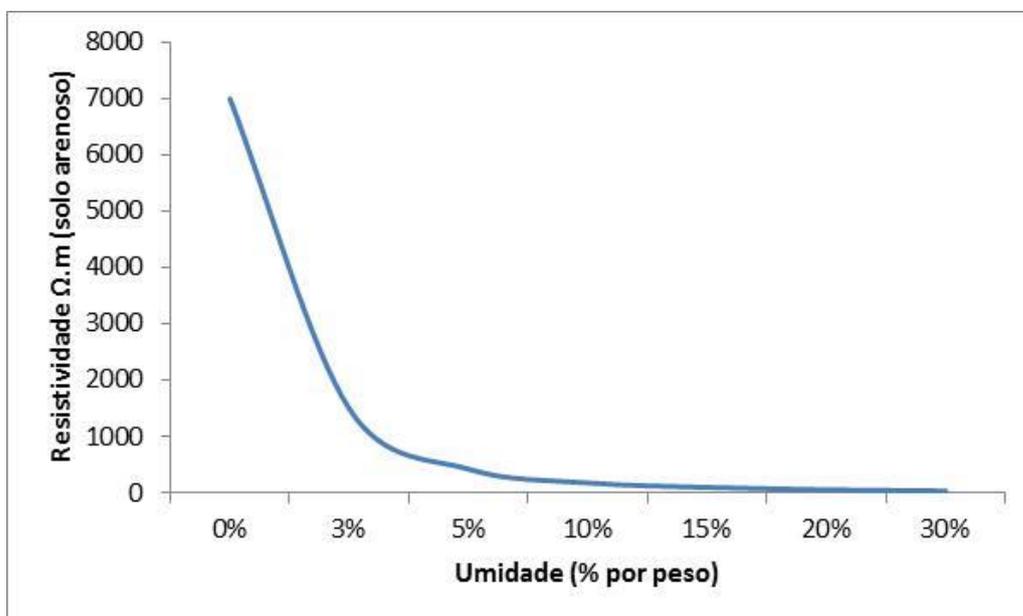


Figura 5-1 Gráfico resistividade x umidade

5.1.3 Temperatura

Analisando o gráfico da Figura 5-2, é possível perceber que a temperatura do solo, por sua vez, pode ser inversamente proporcional ou diretamente proporcional à sua resistividade. Quando a temperatura está abaixo de zero, a água presente no solo muda seu estado e suas ligações, dificultando a passagem de corrente elétrica. Já para temperaturas elevadas (acima de $100^{\circ}C$) a água presente no solo entra no estado de vaporização, deixando o mesmo mais seco e

dificultando a passagem de corrente elétrica e aumentando, portanto, o valor da resistividade.

Como ilustração desse comportamento, são apresentados o gráfico (Figura 5-2) e a Tabela 15, que mostram o comportamento da resistividade com a variação da temperatura para o solo arenoso.

Tabela 15 Resistividade em função da temperatura [17]

| Temperatura (°C) | Resistividade (solo arenoso) |
|--------------------|------------------------------|
| 20,0 | 72 |
| 10,0 | 99 |
| 0 (estado liquido) | 138 |
| 0 (estado solido) | 300 |
| -5,0 | 790 |
| -15,0 | 3300 |

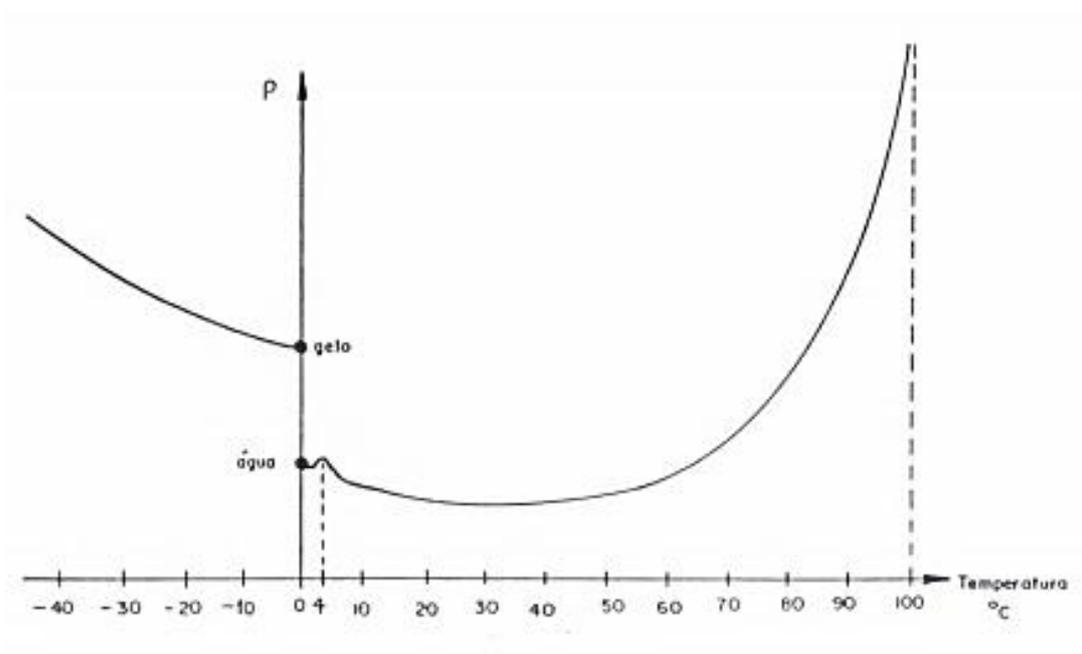


Figura 5-2 Gráfico resistividade x temperatura [17]

5.1.4 Salinidade

Outro fator ambiental que influencia na resistividade do solo é a salinidade. Assim como a umidade, a salinidade possui uma relação inversamente proporcional à resistividade. Isso se deve ao fato de que os sais presentes no solo ionizam o mesmo, aumentando a condutividade de corrente elétrica e diminuindo, portanto, a resistividade [27].

A Figura 5-3 mostra a influência da presença de sais no solo e na sua resistividade.

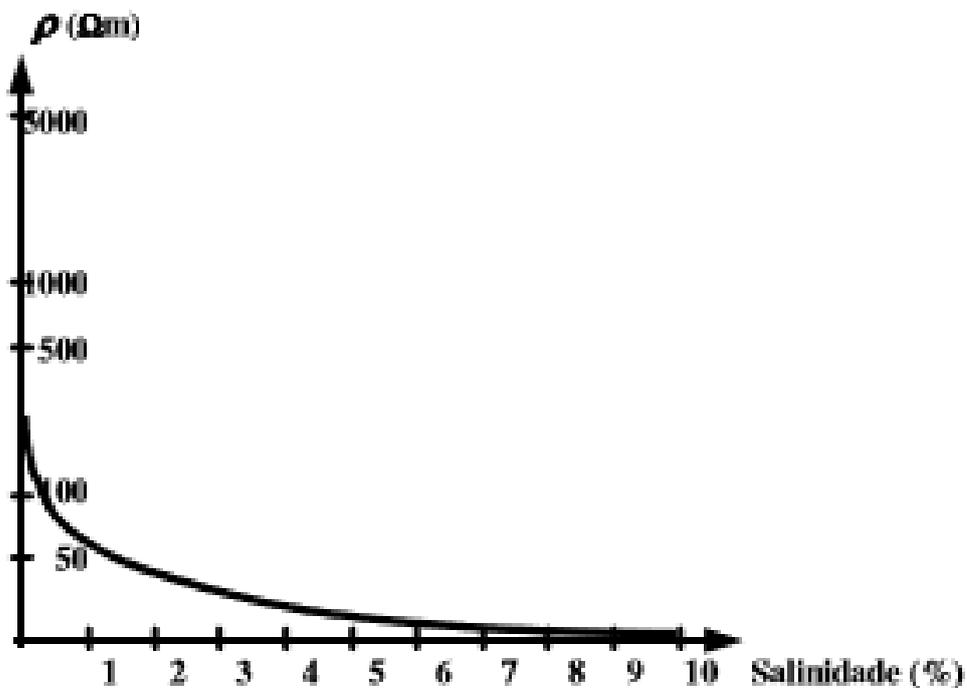


Figura 5-3 Gráfico resistividade x salinidade [18]

5.2 Influências Antrópicas

5.2.1 Tratamento químico do solo

O tratamento químico do solo é utilizado para diminuir a resistência de aterramento. Somente deve ser realizado quando não se atinge a resistência necessária para garantir a segurança de pessoas e equipamentos e a mudança de local da malha de aterramento é inviável economicamente ou fisicamente.

Os produtos utilizados no tratamento devem atender a algumas especificações, tais como:

- Não agredir a natureza;
- Ser quimicamente estável;
- Não ser tóxico;
- Possuir baixa resistividade elétrica;
- Não ser corrosivo;
- Ter a capacidade de reter umidade.

Os produtos mais usados são o EARTHTRON e o GEL. O primeiro é um produto líquido de lignosulfato (principal componente da polpa da madeira) mais um agente geleificador e sais inorgânicos. Tem como principais características não ser solúvel em água, não ser corrosivo, ser quimicamente estável, reter umidade, ter longo período de atuação no solo e ser de fácil aplicação. Já o segundo é uma mistura de diversos sais que, em presença de água, formam o agente ativo do tratamento. Este é um produto quimicamente estável, não é solúvel em água, é higroscópico, é não corrosivo, possui longo período de atuação no solo e não é atacado pelos ácidos contidos no solo [15].

A relação entre o valor antigo da resistência de aterramento e o novo após o tratamento é chamado de coeficiente de redução. É importante lembrar que este tratamento tem uma vida útil de dois a cinco anos e sofre influências climáticas também (tais como as citadas na seção 5.1).

Portanto, é necessário estar sempre monitorando a resistência de aterramento e tratar novamente o mesmo sempre que a vida útil do produto expirar. Em épocas secas também se faz necessário molhar o solo, já que a função do tratamento do solo é reter a umidade e reduzir a resistência.

5.2.2 Hastes concretadas

Como o concreto retém umidade, a estratégia de concretar as hastes de aterramento pode ser usada para diminuir a resistência de aterramento. As hastes podem ser concretadas com a mesma mistura de concreto utilizada para confecção de postes de redes de distribuição de energia elétrica. Em alguns casos, utilizam-se estruturas de postes de distribuição e transmissão para integrar o sistema de aterramento. Deve-se, porém, preparar tais estruturas para esta função, reforçando as amarrações entre as ferragens e disponibilizando um terminal externo para que o acesso às ferragens internas da estrutura seja possível [28].

Este método de aterramento com hastes concretadas serve, portanto, como alternativa para diminuir a resistência de aterramento em solos de alta resistividade. Ao contrário do tratamento químico, as hastes concretadas não possuem uma vida útil definida e podem manter o coeficiente de redução em níveis baixos por longos períodos. Na seção seguinte é demonstrado um estudo comparativo entre estes métodos.

5.2.3 Comparação entre malha tradicional, malha com tratamento químico e malha com hastes concretadas

Um estudo realizado por Souza, Moura e Cintra [29] traz resultados comparativos das medidas da resistência de aterramento em malhas tradicionais com tratamento químico e com hastes concretadas. Os experimentos foram realizados utilizando um telurômetro digital de quatro pontas e os valores foram obtidos em dois períodos (seco e úmido). Em ambos os períodos foram utilizadas as mesmas malhas de aterramento sem nenhuma alteração. As Figura 5-4, Figura 5-5 e Figura 5-6 mostram as malhas utilizadas no experimento.



Figura 5-4 Malha Tradicional [29]



Figura 5-5 Malha com Tratamento Químico [29]



Figura 5-6 Malha com Hastes Concretadas [29]

As Tabela 16 e Tabela 17 mostram os resultados obtidos para cada tipo de malha em cada período.

Tabela 16 Resistência de aterramento para os três tipos de malhas no período chuvoso [29]

| Medições | R (Ω) (Aterramento Tradicional) | R (Ω) (Haste Concretada) | R (Ω) (Tratamento Químico do Solo) |
|-----------------|--|---|---|
| 02/10/2006 | 465 | 304 | 511 |
| 09/10/2006 | 461 | 289 | 588 |
| 20/10/2006 | 417 | 272 | 512 |
| 26/10/2006 | 382 | 252 | 438 |
| 03/11/2006 | 410 | 252 | 507 |
| 10/11/2006 | 361 | 243 | 411 |
| 16/11/2006 | 378 | 248 | 416 |
| 22/11/2006 | 385 | 261 | 417 |
| 08/12/2006 | 371 | 256 | 437 |
| 17/12/2006 | 380 | 251 | 412 |

Tabela 17 Resistência de aterramento para os três tipos de malhas no período seco [29]

| Medições | R (Ω) (Aterramento Tradicional) | R (Ω) (Haste Concretada) | R (Ω) (Tratamento Químico do Solo) |
|-----------------|--|---|---|
| 03/08/2007 | 988 | 338 | 452 |
| 10/08/2007 | 1000 | 390 | 467 |
| 18/08/2007 | 1130 | 343 | 446 |
| 29/08/2007 | 757 | 360 | 500 |
| 05/09/2007 | 750 | 343 | 480 |

Os gráficos das Figura 5-7 e Figura 5-8 para cada período são apresentados abaixo:

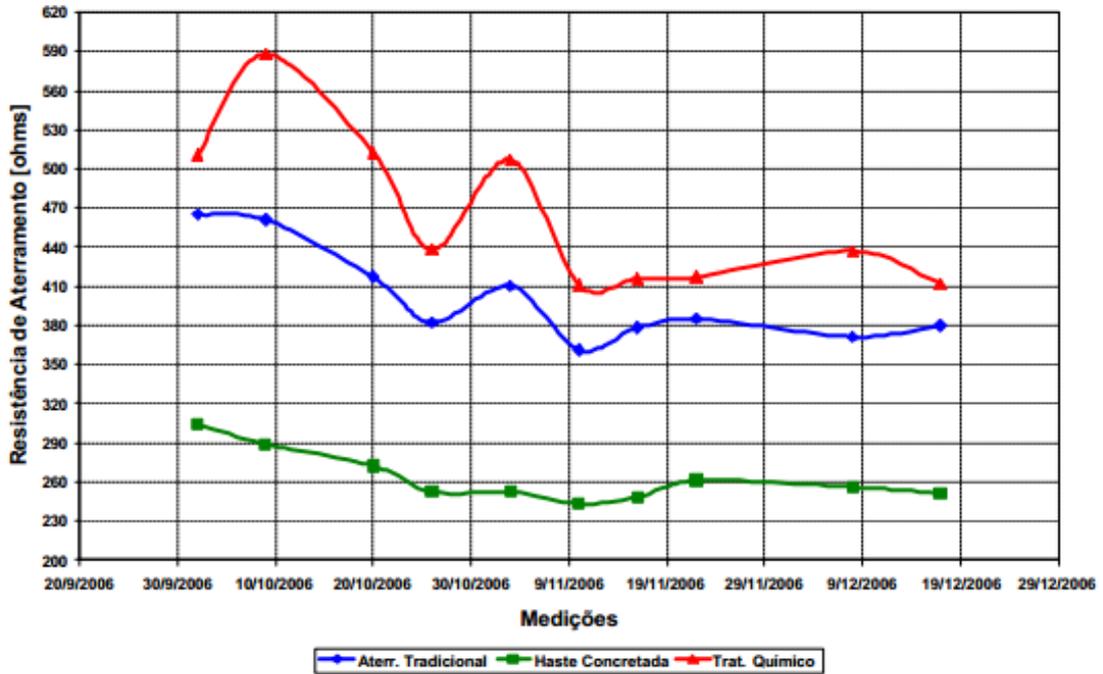


Figura 5-7 Resistencia para período chuvoso [29]

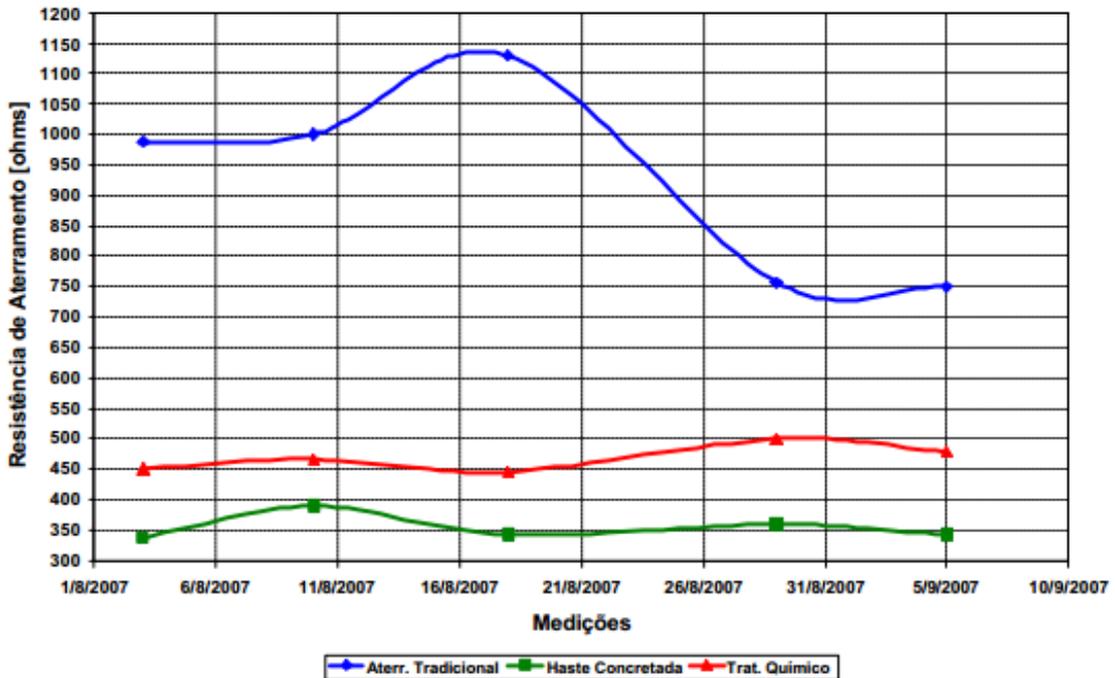


Figura 5-8 Resistencia para período seco [29]

Para ambos os períodos, o melhor resultado é o das hastes concretadas. Isto se deve ao fato de que o concreto absorve a umidade do solo e possibilita um aumento significativo da área de contato das hastes e o solo, reduzindo assim a chamada resistência de contato. Já a malha com tratamento do solo foi a que apresentou o pior resultado e maiores oscilações para o período úmido, devido ao caráter construtivo da malha (má compactação do solo) e o segundo melhor resultado para o período seco, pois manteve um nível de umidade nas proximidades da malha, reduzindo a resistência e aumentando a estabilidade dos valores. A malha de aterramento tradicional apresentou o segundo melhor resultado para o período úmido e o pior resultado para o período seco. Em ambos os períodos, os valores oscilaram muito. Isto já era esperado, uma vez que, para malhas tradicionais, os efeitos climáticos são muito influentes na resistência de aterramento [29].

Portanto, o estudo anterior conclui que a melhor malha para aterramento (dentre as três apresentadas) em regiões onde a resistência não é baixa suficiente para garantir a segurança de equipamento e das pessoas é a malha com hastes concretadas.

5.2.4 Estruturas metálicas enterradas no solo

A resistividade do solo sofre influência de objetos metálicos enterrados na vizinhança. O ideal seria que as medidas da resistividade fossem realizadas em áreas onde não houvesse a presença de estruturas metálicas. Essas estruturas diminuem o valor medido da resistividade, uma vez que a condutividade do material é maior que a do solo, provocando assim, falhas no projeto de aterramento [30].

No primeiro momento, é fácil pensar que basta afastar o equipamento de medição para que a influência diminua. O problema é que, em determinadas circunstâncias, não há nenhuma área sem objetos metálicos em volta ou, distanciando demais o equipamento, as medidas podem não indicar mais a resistividade do local de interesse. Deve-se então atentar para tais problemas e considerar as melhores medidas dentro de um erro tolerável que garanta a segurança.

Existem algumas formas de contornar esse problema e minimizar os erros. A influência das estruturas metálicas varia de acordo com:

- Localização da medida em relação ao objeto metálico;
- Método de medida utilizado;
- Camada do solo onde está localizado o objeto metálico.

5.2.4.1 Localização da medida em relação ao objeto metálico

Como citado anteriormente, o local para realização das medidas deve contemplar dois critérios:

1. Minimizar a influência das estruturas metálicas na medida da resistividade;
2. Garantir que a medida reflita a resistividade real do solo nas vizinhanças dos objetos metálicos.

O grande problema neste ponto é que quanto maior a distância entre o objeto metálico e o eletrodo, menor a influência do mesmo nas medidas. Em contrapartida, a medida refletirá menos a resistividade real nas vizinhanças deste objeto.

Para minimizar a influência e garantir precisão, é necessário que para medidas distantes dos objetos metálicos, os eletrodos estejam bem espaçados para que a medida reflita a resistividade das vizinhanças dos objetos. Já para medidas próximas aos objetos metálicos, deve-se manter um espaçamento pequeno entre os eletrodos para assegurar menor influência desses objetos [30].

5.2.4.2 Método de medida utilizado

Dentre os métodos citados ao longo do trabalho, nota-se que o método Wenner é o único que possui eletrodos equidistantes. Isto minimiza a influência dos objetos metálicos nas medidas se comparado com o método do eletrodo central e o de Schlumberger-Palmer. Como no método do eletrodo central (figura 3-4), $d_3 \gg d_1$ e d_2 , a influência nas medidas tende a ser muito maior conforme o

espaçamento aumenta. Já para o método de Schlumberger-Palmer (figura 3-5), conforme o espaçamento aumenta, “c” se torna muito maior que “d” e a influência nas medidas tende também a aumentar muito [30].

É necessário lembrar que todos estes métodos sofrem influências significativas dos objetos metálicos próximos. A questão é como minimizar essas influências, já que não é possível anulá-las.

5.2.4.3 Camada do solo onde está localizado o objeto metálico

O tipo de solo também é um fator extremamente relevante na influência de objetos metálicos nas medidas de resistividade. No capítulo 4, figura 4-1, nota-se que a dispersão de corrente através do solo varia de acordo com a resistividade da primeira e da segunda camada. Neste contexto, é perceptível que a maior influência nas medidas advém de objetos metálicos presentes na camada de menor resistividade.

A explicação para este fato é que a corrente possui menor resistência a sua passagem em camadas de menor resistividade. Portanto caso o objeto metálico esteja localizado na camada de menor resistividade, a corrente gerada pelo equipamento de medição será atraída mais facilmente do que se o mesmo objeto estivesse localizado em uma camada de maior resistividade, ocasionando erros significantes nas medidas [30].

6 Conclusão

O objetivo deste trabalho foi elaborar um material teórico, de fácil compreensão, sobre os métodos de medição de resistência e resistividade de aterramento que pudesse ser consultado principalmente por alunos de graduação, de forma a suprir a lacuna de conhecimento sobre esse assunto nas universidades brasileiras. Procurou-se, ao longo do trabalho, explicitar a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre sistemas de aterramento para aprimorar a qualidade do Sistema Elétrico de Potência brasileiro e garantir a segurança da população no seu entorno.

. Para tanto, ao longo do trabalho os temas foram abordados de forma bem didática, sempre procurando demonstrar o passo a passo dos principais métodos, além do raciocínio por trás dos mesmos.

Foi elaborado um estudo teórico sobre os métodos consagrados de medição de resistência e resistividade. Destaca-se o método de queda de potencial com arranjo de Wenner (ou Método Wenner) por apresentar maior simplicidade na realização das medidas e maior precisão comparada com o de Schlumberger.

Métodos mais modernos e com ferramentas computacionais foram expostos como forma de medir com maior precisão a resistividade do solo e avaliar a resistência de aterramento. Para isso, foi apresentado o passo a passo e fluxograma dos métodos de medidas com múltiplas camadas e métodos para realizar medidas de resistência em subestações sem necessidade de desligá-las. Para os métodos de medida considerando múltiplas camadas, destaca-se o método de Pirson, que utilizando a curva $\rho(a) \times a$ do método Wenner estima a resistividade das camadas a partir de tratamento computacional e métodos matemáticos, garantindo maior precisão para dimensionar uma malha de aterramento. Já nas medidas de resistência em subestação, destaca-se o método de 70 Hz. Neste método não é necessária a injeção de correntes altas para diminuir os ruídos, pois a única fonte de 70 Hz no sistema era a própria fonte do equipamento usado para medir a resistência de aterramento.

Não obstante, é necessário levar em conta que o solo sofre influências ambientais e antrópicas. Neste trabalho procurou-se expor o comportamento de

diferentes agentes e suas modificações na resistividade do solo. Notou-se que as influências antrópicas ganham um grande papel nas medidas de resistência e resistividade. O tema foi abordado ao longo do trabalho de forma didática, demonstrando quais métodos e de que forma devem ser aplicados para minimizar as influências nas medidas. Dentro deste tema, foi exposto um comparativo entre hastes concretadas e tratamento químico do solo na resistência de aterramento. O estudo comparativo mostrou que os melhores resultados advêm da concretagem das hastes, pois o concreto absorve a umidade do solo e possibilita um aumento significativo da área de contato das hastes e o solo, reduzindo assim a chamada resistência de contato.

A influência de objetos metálicos nas medidas é muito representativa e deve ser tratada para garantir precisão. Notou-se que o melhor método para realização das mesmas é o método Wenner, por possuir a melhor relação de espaçamento entre os eletrodos. A melhor localização para realizar tais medidas depende da proximidade dos eletrodos a objetos metálicos, pois quando os eletrodos estão perto dos mesmos, a influência desses objetos é maior quando o espaçamento entre os eletrodos também é grande. Já para medidas distantes dos objetos metálicos, os melhores resultados advêm de espaçamentos maiores, pois espaçamentos pequenos não refletem a resistividade das vizinhanças dos objetos. Outro ponto relevante no trabalho é a influência desses objetos dependendo da camada em que estão localizados. Nota-se que os piores resultados advêm da localização dos mesmos em camadas com menor resistividade.

Por fim, no apêndice A, foram expostos os principais tipos de acidentes provenientes de uma descarga elétrica num sistema aterrado. Foram abordados os fenômenos de Tensão de Passo e Tensão de Toque. Suas consequências podem ser fatais e devem servir de incentivo para a contínua exploração desse estudo.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sabe-se que com o desenvolvimento de novas tecnologias computacionais e um mercado exigindo resultados em curto prazo, com precisão e baixo custo, novas técnicas não abordadas neste trabalho vem sendo desenvolvidas. Portanto, como trabalhos futuros pode-se apontar:

- Elaboração de estudos teóricos sobre métodos computacionais utilizando algoritmos genéticos e outras técnicas de sistemas inteligentes;
- Comparação de resultados computacionais dos métodos envolvendo sistemas inteligentes com resultados de métodos convencionais e para solos estratificados;
- Elaboração de um estudo da influência do diâmetro de hastes aterradas na resistência de aterramento.

7 Bibliografia

- [1] K. P. NACCARATO. "Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do brasil". 2006. 364 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geofísica Espacial, Inpe, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2014.
- [2] L. V. BEWLEY, "Theory and tests of the counterpoise, v. 53, n. 8," Pittsfield, IEEE, 1934, pp. 1163- 1172.
- [3] P. L. BELLASCHI e R. E. ARMINGTON, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds — III effect of lead in ground installation," *IEEE*, pp. 334-344, Junho 1943.
- [4] G. M. PETROPOULOS, "The high-voltage characteristics of earth resistances," em *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering*, v. 95, n. 43, Athens, IET, 1948, pp. 59-70.
- [5] E. D. SUNDE, *Earth conduction effects in transmission systems*, New York: Dover Publications, 1968.
- [6] B. R. GUPTA e B. THAPAR, "Impulse Impedance of Grounding Grids," em *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-99, n. 6, Chandigarh, IEEE, 1980, p. 99.
- [7] R. KOSZTALUK, M. LOBODA e D. MUKHEDKAR, "Experimental Study of Transient Ground Impedances," em *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-100, n. 11, Varsóvia, IEEE, 1981, pp. 4653-4660.
- [8] R. VELAZQUEZ e D. MUKHEDKAR, "Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-103, n. 6, pp. 1314 - 1322, Junho 1984.

- [9] M. LOBODA e Z. POCHANKE, "Experimental study of electric properties of soil with impulse current injections," *18th INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION – ICLP*, pp. 191-198, September 1985.
- [10] A. D. PAPALEXOPOULOS e A. P. MELIOPOULOS, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems," em *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 2, n.4, São Francisco, IEEE, 1987, pp. 1073 - 1081.
- [11] D. MUKHEDKAR, M. RAMAMOORTY, M. M. B. NARAYANAN e S. PARAMESWARAN, "Transient performance of grounding grids," em *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 4, Bangalore, IEEE, 1989, pp. 2053 - 2059.
- [12] L. GRCEV e F. DAWALIBI, "An electromagnetic model for transients in grounding systems," em *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 11, Yugoslavia, IEEE, 1990, pp. 1773-1781.
- [13] Y. LIU, M. ZITNIK e R. THOTTAPPILLIL, "An improved transmission-line model of grounding system," em *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 43, n. 3, Uppsala, IEEE, 2001, pp. 348-355.
- [14] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, "Guide for Safety in AC Substation Grounding," IEEE Power & Energy Society, Piscataway, 2000.
- [15] V. I. MERLIN, "EA Engenheiros Associados," 18 Setembro 2013. [Online]. Available:
http://www.engenheirosassociados.com.br/artigos/info_aterramento.php.
[Acesso em 13 Junho 2014].
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "NBR 7117 - Medição da resistividade do solo pelo método de quatro pontos (Wenner)," ABNT, Rio de Janeiro, 1981.
- [17] G. KINDERMAN e J. CAMPAGNOLO, *Aterramento Elétrico*, 3ª Edição, Porto

Alegre: Sagra DC Luzzatto, 1995.

- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “1° Projeto de revisão ABNT NBR 7117,” ABNT, Rio de Janeiro, 2011.
- [19] M. e. a. TELLÓ, *Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequências*, Porto Alegre: ediPUCRS, 2007.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 5419 - Proteção de Edificações Contra Descargas Elétricas Atmosféricas,” ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- [21] W. A. P. SOUZA, M. L. MOREIRA, I. P. SOUZA e R. O. SANTOS, “Instituto de Estudos Superiores da Amazônia,” [Online]. Available: <http://www3.iesampa.edu.br/ojs/index.php/TELECOM/article/viewFile/400/347>. [Acesso em 08 09 2014].
- [22] I. N. D. SILVA, R. A. FLAUZINO e J. F. RODRIGUES, “Uma Aplicação De Redes Neurais Artificiais Em Projetos De Aterramento Elétrico,” *40. SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 2-3, 08-10 Setembro 1999.
- [23] M. E. C. PAULINO e D. C. B. P. JUNIOR., “Medições de resistência de aterramento em subestações energizadas utilizando variação de frequência - experiência da celesc distribuição,” [Online]. Available: <http://www.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1613.pdf>. [Acesso em 04 08 2014].
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 15751 - Sistemas de aterramento de subestações — Requisitos,” ABNT, Rio de Janeiro, 2009.
- [25] W. C. BOAVENTURA, I. LOPES, P. S. A. ROCHA, R. M. COUTINHO, F. J. CASTRO e F. C. DART, “Testing and evaluating grounding systems of high voltage energized substations: alternative approaches,” em *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, Belo Horizonte, IEEE, 1999, pp. 923-927.

- [26] J. SETZER, "As características dos principais tipos de solo no estado de São Paulo," em *Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo*, v.1, n. 4, Campinas, São Paulo: BRAGANTIA, 1941, pp. 1-104.
- [27] A. F. SILVA, "Análise do aterramento de subestações," 2012. 71f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [28] W. CLAUSEN, M. FACCIONI, A. L. RAIZER e V. COELHO, "Nova técnica de aterramento para sistemas de distribuição de energia," *Revista Eletricidade Moderna*, n. 381, pp. 110-125, 2005.
- [29] K. T. SOUZA, R. F. MOURA e G. CINTRA, "Estudo de alternativas para a construção de malhas de aterramento num solo com alta resistividade elétrica," em *II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*, João Pessoa, 2007, pp. 1-8.
- [30] J. MA e F. P. DAWALIBI, "Study of influence of buried metallic structures on soil resistivity measurements," em *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 2, Montreal, IEEE, 1998, pp. 356 - 365.
- [31] C. M. LEITE e M. L. PEREIRA, "Técnicas de aterramentos elétricos: cálculos, projetos e softwares para aterramentos elétricos. 2.ed," São Paulo, Oficina de Mydia, 1996, p. 215.
- [32] J. MAMEDE FILHO, *Proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis: aterramento*, São Paulo: Érica, 1997.
- [33] J. M. BELTANI. "Medição de malha de terra em subestações energizadas".2007. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Unesp, Ilha Solteira, 2007. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/182-dissertacao_juliano_munhoz_beltani.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2014.

- [34] NORMA REGULAMENTADORA 10, "Segurança em instalações e serviços em eletricidade," 07 12 2004. [Online]. Available: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr10.htm>. [Acesso em 12 09 2014].
- [35] C. DALZIEL, "Electric Shock Hazard," em *Spectrum, IEEE*, v. 9, n. 2, Berkeley, IEEE, 1972, pp. 41-50.
- [36] S. R. C. BEZERRA. "Avaliação de sistemas de aterramento considerando a utilização de condutores e hastes envolvidos em concreto". 2011. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <file:///C:/Users/Consultor/Downloads/DissertSergio (1).pdf>. Acesso em: 25 maio 2014.
- [37] A. B. LIMA. "Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento típicos de torres de linhas de transmissão". 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8CZK62/2m.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 26 set. 2014.
- [38] N. P. SILVA, A. C. FRANCISCO, J. L. KOVALESKI e M. S. THOMAZ, "Avaliação do impacto das descargas atmosféricas na qualidade de energia fornecida pelas concessionárias: estudo de caso em uma empresa de distribuição de energia do sul do país," *Espacios*, pp. 1-5, 18 Fevereiro 2010.

Apêndice A – Segurança (tensão de toque e passo)

Quando uma pessoa é submetida a uma diferença de potencial, faz-se passar por ela uma corrente elétrica que pode causar efeitos diversos, colocando inclusive a sua vida em risco. No aterramento de sistemas elétricos de potência, existem duas principais situações de risco, são elas:

- Tensão de toque
- Tensão de passo

Quando se faz um projeto de aterramento devem-se considerar tais tensões para garantir que os efeitos em acidentes sejam minimizados.

A.1 Tensão de toque

A tensão de toque ocorre quando o indivíduo entra em contato com o equipamento aterrado ou com o condutor, fazendo com que haja uma diferença de potencial entre os seus membros superiores e inferiores e, conseqüentemente, passe uma corrente pelo seu corpo [31], [32].

A Figura 0-1 ilustra uma pessoa submetida a uma tensão de toque. O circuito equivalente entre o equipamento aterrado e o solo pode ser visto na Figura 0-2.

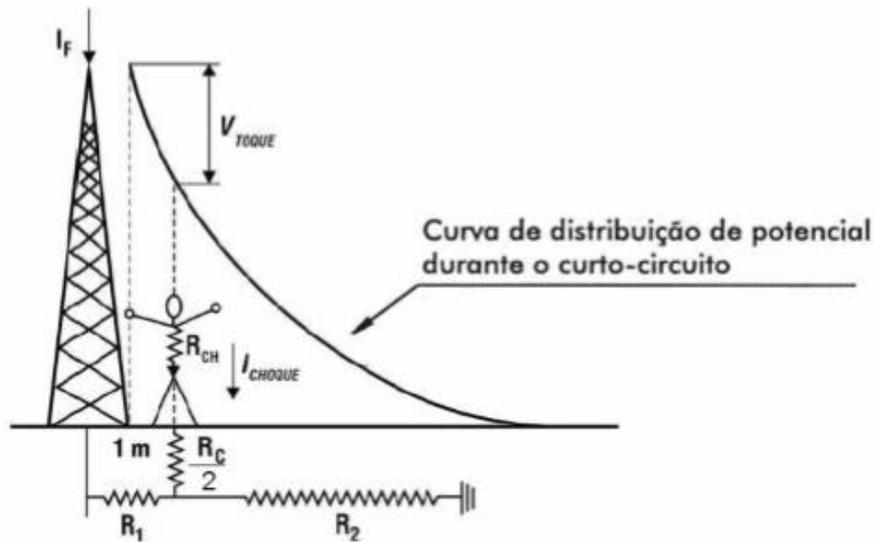


Figura 0-1 Tensão de toque [33]

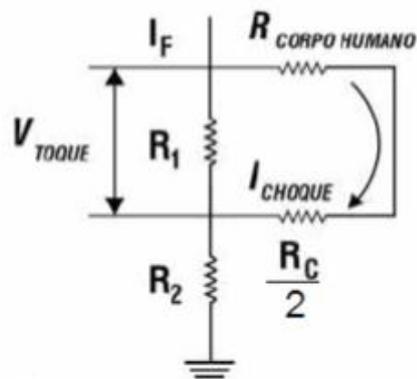


Figura 0-2 Circuito equivalente da tensão de toque [33]

Onde:

- $R_{CORPO\ HUMANO}$ = resistência do corpo humano $\sim 1000\Omega$;
- R_C = resistência de contato ~ 3 vezes a resistividade superficial do solo;
- I_{CHOQUE} = corrente de choque pelo corpo humano;
- I_F = corrente de falha no sistema;
- R_1 e R_2 = resistências dos trechos de terra considerados;
- V_{TOQUE} = tensão de toque.

Portanto, aplicando a lei de Kirchhoff para malha pode-se chegar à seguinte equação para tensão de toque:

$$V_{TOQUE} = \left(R_{CORPO HUMANO} + \frac{R_C}{2} \right) I_{CHOQUE} \quad (20)$$

A.2 Tensão de passo

A tensão de passo ocorre quando uma pessoa está transitando no interior de uma malha de aterramento e, naquele instante, flui na malha uma corrente muito alta. Isso provocará uma diferença de potencial entre os dois pés do indivíduo, fazendo com que circule uma corrente no seu corpo. [31], [32].

A Figura 0-3 mostra uma pessoa submetida a uma tensão de passo e Figura 0-4 o circuito equivalente.

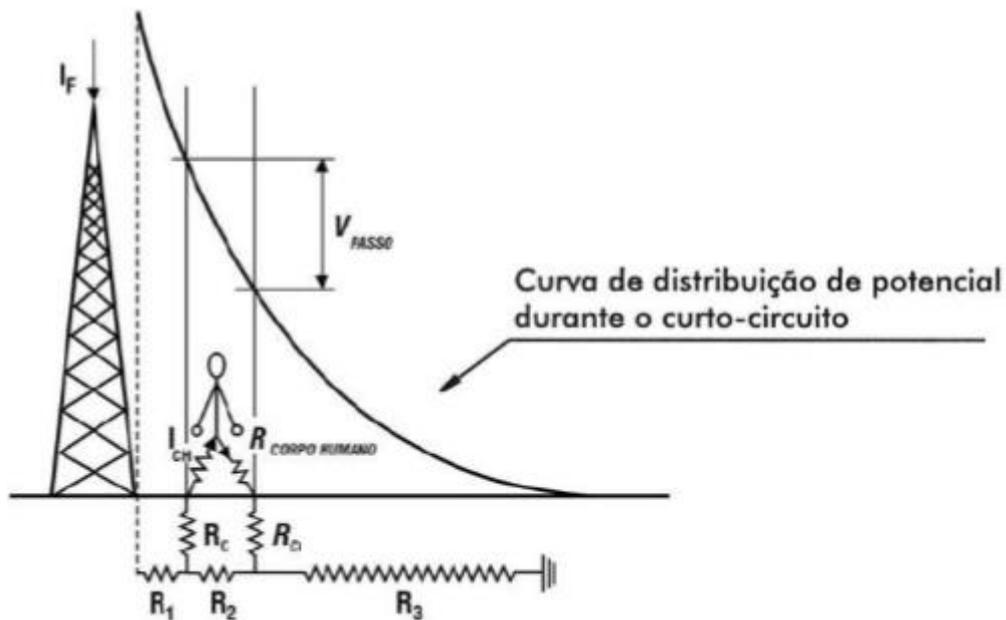


Figura 0-3 Tensão de passo [33]

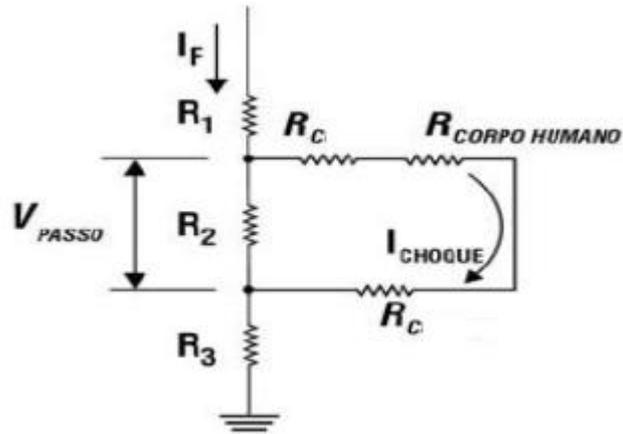


Figura 0-4 Circuito equivalente da tensão de passo [33]

Onde:

- $R_{CORPO\ HUMANO}$ = resistência do corpo humano $\sim 1000\Omega$;
- R_C = resistência de contato ~ 3 vezes a resistividade superficial do solo;
- I_{CHOQUE} = corrente de choque pelo corpo humano;
- I_F = corrente de falha no sistema;
- R_1 e R_2 e R_3 = resistências dos trechos de terra considerados;
- V_{PASSO} = tensão de passo.

Portanto, aplicando a lei de Kirchhoff para malha pode-se chegar à seguinte equação para tensão de passo:

$$V_{PASSO} = (2R_C + R_{CORPO\ HUMANO})I_{CHOQUE} \quad (21)$$

A.3 Efeitos no corpo humano

Os efeitos de tensões de passo e de toque no corpo humano dependem de vários fatores como intensidade e tempo de duração do choque, trajetória da corrente no corpo, frequência da corrente, valor da diferença de potencial e condições orgânicas do corpo humano. A Tabela 18 mostra alguns valores de corrente e suas consequências [34].

Tabela 18 Efeitos do choque no corpo humano para corrente alternada [34]

| Corrente alternada | | | | |
|---------------------------|---|--|-----------------------|---------------------------------|
| Intensidade (mA) | Perturbações | Possível estado após a descarga | Salvamento | Resultado final provável |
| 1 < | N/A | Normal | N/A | Normal |
| 1 a 9 | Sensação desagradável; contrações musculares. | Normal | N/A | Normal |
| 9 a 20 | Sensação dolorosa; contrações violentas; perturbações circulatórias. | Morte Aparente | Respiração artificial | Restabelecimento |
| 20 a 100 | Sensação insuportável; contrações violentas; asfixia; perturbações circulatórias; fibrilação ventricular. | Morte Aparente | Respiração artificial | Restabelecimento; Morte |
| >100 | Asfixia imediata; fibrilação ventricular. | Morte Aparente | Muito Difícil | Morte |

Nota-se que os piores casos estão associados à fibrilação ventricular e os efeitos podem ser diversos. Por isso Dalziel [35] recomenda uma fórmula para determinar, de forma aproximada, a corrente máxima que causaria fibrilação (I) em função do tempo de duração do choque (t).

$$I = \frac{0,116}{\sqrt{t}} (A) \quad (22)$$