

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS LUIS FERNANDES LERMEN

Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional de Estratificação do Solo

Porto Alegre

2019

MATHEUS LUIS FERNANDES LERMEN

Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional de Estratificação do Solo

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS LUIS FERNANDES LERMEN

Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional de Estratificação do Solo

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil.

Prof. Msc. Igor Pasa Wiltuschnig, UFRGS

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil.

Eng. Rafael Alves Pires

Graduado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre,
Brasil.

Porto Alegre, Dezembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família que sempre esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me proporcionarem todo o suporte ao longo desta jornada, aos meus queridos irmãos pelo apoio e motivação e minha fiel companheira pela atenção, auxílio e por estar comigo durante os momentos mais difíceis.

Ao professor Luiz Tiarajú pela orientação e disponibilidade durante este tempo e à UFRGS, que mesmo atravessando momentos de instabilidade financeira, sempre proporcionou ensino de excelência, sendo referência no ensino superior brasileiro.

Agradeço aos ex-colegas da CEEE-D, em especial ao amigo Marcos Tello pelo seu auxílio e disponibilidade, e também, pela ajuda na obtenção de dados de campo.

Por fim, agradeço a todos que acreditaram no meu potencial e aos colegas e amigos que de alguma forma serviram como motivação ou espelho para minha formação pessoal e intelectual.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional que auxiliará na obtenção dos parâmetros iniciais do projeto de malha de terra de subestações, realizando a estratificação do solo para estimar as resistividades da primeira e segunda camada do solo, assim como a espessura da primeira camada. Os dados de resistência elétrica são obtidos em campo considerando o Método de Wenner e servirão como fonte de dados de entrada da ferramenta para efetuar os procedimentos de cálculo. Os procedimentos de cálculo e a interface entre ferramenta e usuário serão desenvolvidas no software *Microsoft Excel*, onde o suplemento *Solver* será utilizado no processo otimização do sistema. A ferramenta será estruturada nos principais procedimentos adotados pela NBR 7117:2012 – Medição de resistividade e determinação da estratificação do solo e, além dos parâmetros do solo, ao final da execução do programa será traçada uma curva comparando as resistividades do solo obtidas em campo e as resistividades do solo calculadas através da ferramenta para cada espaçamento de Wenner.

Palavras-Chave: Estratificação do solo, Malha de Terra, Medição de Resistividade, Método de Wenner, Otimização.

ABSTRACT

The present work aims to develop a computational tool that will assist in obtaining the initial parameters of the substation ground mesh project, performing the soil stratification to estimate the resistivities of the first and second soil layer, as well as the thickness of the first layer. Electrical resistance data are obtained in the field considering the Wenner Method and will serve as the input source of the tool to perform the calculation procedures. The calculation procedures and the tool-user interface will be developed in Microsoft Excel software, where the Solver supplement will be used in the system optimization process. The tool will be structured in the main procedures adopted by NBR 7117:2012 - Resistivity measurement and determination of soil stratification and, besides the soil parameters, at the end of the program execution a curve will be drawn comparing the soil resistivities obtained in the field and the resistivities calculated by the tool for each Wenner spacing.

Keywords: Ground Mesh, Optimization, Resistivity Measurement, Soil Stratification, Wenner Method.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Motivação.....	12
1.2 Apresentação do Problema.....	12
1.3 Objetivos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Sistema Elétrico Brasileiro	14
2.2 Subestações de Energia Elétrica	15
2.2.1 Classificação das Subestações	16
2.2.2 Equipamentos de uma Subestação	18
3 ATERRAMENTO ELÉTRICO	21
3.1 Condutor Elétrico	22
3.2 Resistência de Aterramento	23
4 RESISTIVIDADE DO SOLO.....	26
4.1 Potencial Elétrico do Solo em um Ponto	27
4.2 Metodologia de Medição da Resistividade do Solo.....	29
4.2.1 Medição através do Método de Wenner	30
4.2.2 Procedimentos de Medição	31
4.2.3 Tratamento dos Dados	33
4.2.4 Condições Mínimas a Serem Observadas.....	34
5 MODELO DE SOLO EM DUAS CAMADAS	35
5.1 Modelagem do Método de Wenner	35
5.2 Modelagem do Solo em Duas Camadas Através do Método de Wenner	36
6 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO	40
6.1 Método Gráfico de Duas Camadas	40
6.2 Estratificação do Solo em Duas Camadas Utilizando Métodos Computacionais	42
6.3 Método de Estratificação de Solos de Várias Camadas – Método de Pirson ..	43
7 CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA.....	45
7.1 Limite de Corrente Tolerável pelo Ser Humano	45
7.2 Potencial de Toque	46

7.3 Potencial de Passo	47
8 METODOLOGIA PROPOSTA.....	49
8.1 Otimização	49
8.2 Gradiente Reduzido Generalizado (GRG)	50
8.2.1 Método do GRG.....	50
8.2.2 Aplicação do Método GRG via ®MICROSOFT EXCEL.....	52
9 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	55
9.1 Interface da Ferramenta Computacional.....	59
10 RESULTADOS	61
10.1 Análise de Resultados	66
11 CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS.....	69

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - SISTEMA DE POTÊNCIA.....	14
FIGURA 2 - MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	15
FIGURA 3 - VISTA AÉREA DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO.....	16
FIGURA 4 - SUBESTAÇÃO À GÁS SF ₆	18
FIGURA 5 - INSTALAÇÃO DOS CONDUTORES QUE COMPÕEM A MALHA DE TERRA.....	22
FIGURA 6 - CONEXÃO DA MALHA DE TERRA COM SOLDA EXOTÉRMICA.	23
FIGURA 7 – ARRANJO DAS TRÊS HASTES PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.	24
FIGURA 8 – CURVA PERFIL DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	25
FIGURA 9 - LINHAS DE CORRENTE ELÉTRICA EM UM SOLO INFINITO E HOMOGÊNEO.....	27
FIGURA 10 - PONTO EM UM SOLO HOMOGÊNEO E SUA IMAGEM.....	29
FIGURA 11 - DISPOSIÇÃO DAS HASTES UTILIZADAS NO MÉTODO DE WENNER.....	30
FIGURA 12 – MEDIDOR DIGITAL DE RESISTÊNCIA DE TERRA.	31
FIGURA 13 – CROQUIS PARA MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE.....	32
FIGURA 14 – SOLO ESTRATIFICADO EM DUAS CAMADAS.	35
FIGURA 15 – MÉTODO DAS IMAGENS PARA MEDIÇÃO DE POTENCIAL ELÉTRICO EM UM PONTO P.....	37
FIGURA 16 - CURVAS ρxa DECRESCENTE E CRESCENTE.....	40
FIGURA 17 – FAMÍLIA DE CURVAS PARA K NEGATIVO.....	41
FIGURA 18 – FAMÍLIA DE CURVAS PARA K POSITIVO.....	41
FIGURA 19 – CURVA $\rho(a)xa$ PARA UM SOLO DE VÁRIAS CAMADAS.	43
FIGURA 20 - TENSÃO DE PASSO NA OCORRÊNCIA DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	48
FIGURA 21 - FLUXOGRAMA BASEADO NO GRADIENTE.....	52
FIGURA 22 - <i>SOLVER MICROSOFT EXCEL</i>	53
FIGURA 23 - INTERFACE DO SUPLEMENTO SOLVER.....	53
FIGURA 24 - FLUXOGRAMA ADOTADO NO DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	56
FIGURA 25 - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA RESISTIVIDADE COM AUXÍLIO DE CÉLULAS DO <i>MICROSOFT EXCEL</i>	57
FIGURA 26 - LINHAS DE CÓDIGO DA FUNÇÃO <i>SOLVER</i>	58
FIGURA 27 - INTERFACE DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA.....	59
FIGURA 28 - INTERFACE PARA INSERÇÃO DE DADOS.....	60
FIGURA 29 - CURVAS $\rho(a)xa$	62
FIGURA 30 – CURVAS $k x h$	63
FIGURA 31 - CURVAS $\rho(a)xa$	65

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - TIPO DE SOLO E RESPECTIVA RESISTIVIDADE.....	26
QUADRO 2 – ÁREA DO TERRENO E RESPECTIVO NÚMERO DE LINHAS DE MEDIÇÃO.....	32
QUADRO 3 - ESPAÇAMENTOS RECOMENDADOS PARA OBTENÇÃO DE VALORES EM CAMPO.	33
QUADRO 4 - REAÇÕES E CONSEQUÊNCIAS DA PASSAGEM DE CORRENTE NO CORPO HUMANO.	46
QUADRO 5 - VALORES DE MEDIÇÃO E VALORES CALCULADOS.	61
QUADRO 6 - VALORES DO QUINTO E SEXTO PASSO DO MÉTODO DE ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO EM DUAS CAMADAS ATRAVÉS DE CURVAS.	63
QUADRO 7 - DADOS EXPERIMENTAIS.....	64
QUADRO 8 – VARIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	64
QUADRO 9 – VALORES DE MEDIÇÃO E VALORES CALCULADOS.....	65
QUADRO 10 – DADOS EXPERIMENTAIS.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CEEE-D: Companhia Estadual de Energia Elétrica - Distribuição

CGH: Central Geradora Hidrelétrica

EOL: Central Geradora Eólica

GIS: *Gas Insulated Switchgear*

GRG: *Generalized Reduced Gradient*

NBR: Norma Brasileira

ONS: Operador Nacional do Sistema

PCH: Pequena Central Hidrelétrica

SE: Subestação

SEP: Sistema Elétrico de Potência

SIN: Sistema Interligado Nacional

UFV: Central Geradora Fotovoltaica

UHE: Usina Hidrelétrica

UTE: Usina Termelétrica

UTN: Usina Termonuclear

VBA: *Visual Basic for Applications*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Tratando-se de instalações elétricas, tanto de baixa tensão quanto de alta tensão, é indispensável garantir a proteção de seres humanos, animais e equipamentos elétricos presentes na instalação, sendo esta proteção realizada através de sistemas de aterramento, que são responsáveis por escoar cargas estáticas e reduzir as tensões de toque e de passo.

Em subestações de energia, o projeto de uma malha de terra que atenda às especificações de funcionamento e proteção observados na norma NBR 15751:2013 - Sistemas de aterramento de subestações, depende de uma criteriosa análise das características elétricas do solo que suportará o sistema de aterramento a ser construído. É possível estratificar o solo em n camadas, entretanto a estratificação em duas camadas apresenta resultados satisfatórios para a maioria dos casos estudados, por esse motivo abordou-se a estratificação em duas camadas neste trabalho.

Através da estratificação do solo em duas camadas, alguns parâmetros podem ser observados, como a resistividade das camadas do solo e a espessura da primeira camada.

1.2 Apresentação do Problema

Em geral, os softwares que auxiliam na estratificação do solo são de difícil acesso e podem custar alguns milhares de reais, pois além do cômputo dos parâmetros do solo, os mesmos calculam demais parâmetros relacionados ao projeto da malha de terra de uma subestação. Além dos sofisticados softwares encontrados no mercado, existem técnicas que utilizam ábacos baseados em estudos e medições realizados em diferentes tipos de solos, que ao final da estratificação podem apresentar incertezas associadas aos resultados.

Como este trabalho tem como foco a estratificação do solo, ao final de seu desenvolvimento será apresentado um software enxuto e acessível em relação aos demais softwares presentes no mercado.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho está em desenvolver uma ferramenta computacional que auxiliará na estratificação do solo em duas camadas apresentando os parâmetros do solo, onde os dados de resistência do solo serão obtidos através do Método de Wenner, utilizando-se de um medidor de resistência de terra.

A ferramenta utilizará técnicas de otimização e será implementada através do software *Microsoft Excel*, baseando-se na linguagem de programação *Visual Basic* para a modelagem lógica do problema e construção da interface gráfica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema Elétrico Brasileiro

O Sistema Elétrico de Potência é definido como o conjunto de equipamentos e instalações responsáveis pela geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. O principal objetivo do SEP é abastecer o consumidor final, seja ele residencial ou comercial, para tanto, existem três princípios a serem seguidos, que são:

- Continuidade no atendimento, mantendo todos os consumidores abastecidos de acordo com sua carga;
- Qualidade no atendimento, mantendo os padrões de tensão e frequência com mínimas variações;
- Atender a carga com economia, o que representa seguir as premissas anteriores de forma eficiente com os menores custos possíveis. Essa premissa final vai de encontro principalmente com o planejamento do sistema elétrico de potência.

Figura 1 - Sistema de Potência.

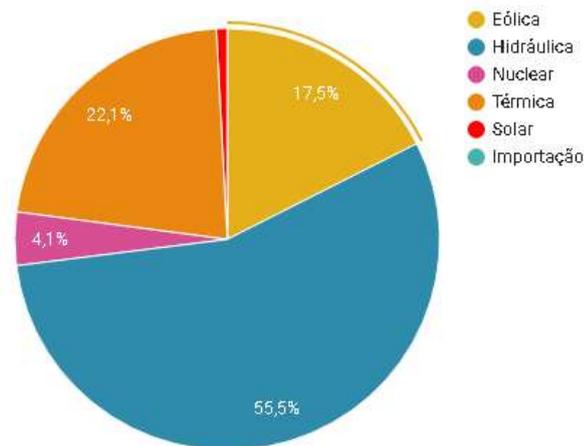


Fonte: berkan.com.br

O cenário da geração de energia no Brasil está em constante desenvolvimento, buscando, cada vez mais, formas alternativas e limpas de geração. A principal fonte energética no Brasil é a hidroelétrica, devido ao grande

potencial hidráulico que o país possui e, além das hidroelétricas (UHE, CGH e PCH), o sistema de geração é complementado por usinas termoeletricas (UTE), eólicas (EOL), nuclear (UTN) e fotovoltaica (UFV), compondo a matriz energética brasileira.

Figura 2 - Matriz energética brasileira.



Fonte: ons.org.br, 2019.

Com base na figura 2, nota-se a predominância das usinas hidráulicas, térmicas e eólicas, dando origem ao sistema conhecido como hidro-termo-eólico de grande porte. Este sistema de geração atrelado ao sistema de transmissão é controlado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), que realiza a interconexão dos sistemas elétricos por meio da malha de transmissão, facilitando o intercâmbio de energia entre subsistemas. Tais subsistemas são o Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e maior parte da região Norte [1].

As linhas de transmissão do SIN operam com uma extensão de mais de 131.300 km, sendo o SIN operado e controlado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), sob fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

2.2 Subestações de Energia Elétrica

As subestações de energia elétrica são componentes do sistema elétrico de potência, nos quais se encontram os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. As subestações são responsáveis por controlar o

fluxo de potência e modificar as características de tensão e corrente, permitindo a transmissão e distribuição de energia elétrica em níveis adequados.

A geração de energia ocorre em uma usina geradora, fazendo-se necessário elevar o nível de tensão através de subestações elevadoras para que seja possível transmitir a energia para centros urbanos distantes. A elevação da tensão é realizada com o objetivo de que a corrente que percorre os cabos de transmissão seja suficientemente pequena para que as perdas ôhmicas sejam aceitáveis.

Nos grandes centros, o nível de tensão utilizado na transmissão é diminuído em subestações abaixadoras com a finalidade de distribuir energia elétrica de forma econômica [2].

Figura 3 - Vista aérea de uma subestação de distribuição.



FONTE: Arquivo CEEE-D

2.2.1 Classificação das Subestações

As subestações podem ser classificadas quanto à função, à instalação e ao nível de tensão [2], [3].

Quanto à função, as subestações podem ser classificadas em transformadora e de manobra.

As subestações transformadoras são classificadas em:

- Elevadora, que elevam a tensão a níveis de transmissão e subtransmissão;

- Abaixadora, que realizam a redução dos níveis de tensão para realizar a distribuição da energia;
- De distribuição, tem como objetivo reduzir os níveis de tensão já reduzidos pela subestação abaixadora, para que seja possível entregar a energia ao consumidor residencial e comercial;
- Reguladora, compensam a queda de tensão nos alimentadores e auxiliam no equilíbrio do sistema elétrico utilizando-se de bancos de capacitores para efetuar o controle de níveis de tensão indesejados.

As subestações de manobra possibilitam o seccionamento de linhas de transmissão para fins de manutenção, isolação e proteção.

Quanto ao nível de tensão as subestações são classificadas em:

- Baixa tensão: subestações com níveis de tensão até 1kV;
- Média Tensão: subestações com níveis de tensão entre 1kV e 34,5kV, padronizadas em 6,6kV, 13,8kV, 23kV e 34,5kV;
- Alta tensão: subestações com nível de tensão entre 34,5kV e 230kV, padronizadas em 69kV, 138kV e 230kV;
- Extra-alta tensão: subestações com nível de tensão maior que 230kV, padronizadas em 345kV, 440kV, 500kV e 750kV.

Quanto à instalação, as subestações são classificadas em:

- Ao tempo: Construídas ao ar livre, normalmente requerem grandes terrenos e necessitam de proteção contra intempéries e, devido à exposição climática, necessitam de frequente manutenção;
- Abridadas: Construídas dentro de edificações, não estão sujeitas a degradações devido à exposição climática;
- Blindadas: São isoladas a gás SF₆ (Hexafluoreto de Enxofre) em locais abrigados, necessitam de uma área construída muito menor do que as subestações ao tempo, tornando-se ideal para locais onde não se dispõe de espaço. São denominadas subestações GIS (abreviatura em inglês de *Gas Insulated Switchgear*);

- Móveis: Dispostas em reboque, são utilizadas para eventos emergenciais ou pontuais.

Figura 4 - Subestação à gás SF₆.



Fonte: guindastetheodoro.com.br

2.2.2 Equipamentos de uma Subestação

A seguir serão descritos alguns dos principais equipamentos instalados em uma subestação de energia, utilizados na medição, transformação, proteção, controle e manobra [2], [3], [4].

Equipamentos de transformação:

- Transformador de força: Responsável pela transformação dos níveis de tensão, operam na faixa de MVA e são utilizados em sistemas de geração e transmissão;
- Transformador de potencial: Reproduz em seu secundário níveis de tensão reduzidos em relação ao seu primário, permitindo a utilização de equipamentos de medição, controle e proteção em sua saída;

- Transformador de Corrente: Reproduz em seu secundário níveis de corrente reduzidos em relação ao seu primário, permitindo a utilização de equipamentos de medição, controle e proteção em sua saída.

Religadores:

- Esses equipamentos são sensíveis a correntes de curto-circuito, e efetuam a interrupção automática de circuitos que encontram-se em sobrecorrente. Após a interrupção automática, o religador automaticamente religa, restaurando a continuidade do circuito que está mediante uma falta, ou interrompe o circuito permanentemente.

Disjuntores:

- São dispositivos de manobra responsáveis pela abertura e fechamento de circuitos, assim como a extinção de correntes. Ao interromper tais correntes, devem ser capazes de extinguir o arco elétrico formado pela manobra. São classificados de acordo com a maneira que este arco é extinto, sendo através de óleo, vácuo ou SF₆ os disjuntores mais utilizados.

Chaves seccionadoras:

- São chaves de manobra, responsáveis por isolar circuitos e realizar o *bypass* quando alguma linha ou equipamento deva ser isolado para manutenção ou reparo.

Relés de proteção:

- Fazem parte de um conjunto de proteção e são responsáveis pelas ações e controle dos disjuntores. A sua atuação ocorre através de um sinal de disparo, que é dado após o relé ser sensibilizado por perturbações no sistema.

Isoladores:

- São fabricados com materiais altamente isolantes, sendo de vidro, cerâmica ou poliméricos, e sua principal função é isolar os condutores entre fase-fase, fase-terra e fase-suporte, além de resistir a esforços mecânicos e perturbações climáticas.

Para-Raios:

- São resistores não lineares destinados à proteção que tem por objetivo resguardar os equipamentos instalados de surtos atmosféricos ou sobretensões provocadas por manobras do sistema. Normalmente encontram-se na entrada e saída de cada fase da linha e na entrada e saída dos equipamentos mais caros, como transformadores de força. Os para-raios normalmente utilizados são de Carboneto de Silício (SiC) ou de Óxido de Zinco (ZnO).

3 ATERRAMENTO ELÉTRICO

Para garantir o funcionamento seguro de um sistema elétrico seguindo as normas de segurança e proporcionar a continuidade do serviço, todos os equipamentos instalados em uma subestação assim como demais estruturas metálicas devem ser solidamente aterrados. O aterramento é feito através de um condutor, normalmente de cobre, que liga diretamente à malha de terra as partes metálicas, que eventualmente podem vir a ser energizadas. O aterramento é projetado com os objetivos fundamentais de [5]:

- Manter os potenciais de toque e de passo produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança;
- Proporcionar um caminho de escoamento para a terra de descargas atmosféricas;
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

A malha de terra é um conjunto de hastes, fios ou cabos, onde as hastes são enterradas verticalmente no solo a uma profundidade mínima de $0,5\text{ m}$, sendo admitida uma profundidade mínima de $0,25\text{ m}$ em área de piso concretado ou rochoso [5], enquanto os fios ou cabos são enterrados horizontalmente, podendo a malha assumir diversas configurações dependendo da necessidade da instalação elétrica e do terreno onde será implantado o sistema de aterramento. Em subestações, é comumente adotado o sistema onde o conjunto de cabos que compõem a malha são arrançados em formatos quadriculados. Na figura 5 observa-se a escavação do terreno para que os cabos sejam instalados e enterrados no solo [5], [6].

Figura 5 - Instalação dos condutores que compõem a malha de terra.



Fonte: Arquivo CEEE-D

3.1 Condutor Elétrico

O condutor utilizado tanto nas hastes quanto nos cabos de aterramento é o cobre devido a suas características de ductibilidade e maleabilidade, facilitando a construção da malha de terra, além de possuir boa condutividade elétrica e baixa resistência, o que contribui para o escoamento de correntes pela malha. Além do cobre, é possível utilizar condutores de alumínio, mas pela maior capacidade do condutor de cobre em resistir à oxidação e corrosão galvânica, opta-se por este que terá maior vida útil.

A melhor forma de realizar as conexões dos quadrículos da malha de aterramento é através de solda, ocorrendo a ligação molecular entre cobre-cobre. Devem-se evitar as conexões através de pressão superficial, o que pode acarretar em falhas e diminuição da vida útil do sistema de aterramento. São tipos de conexão [7]:

- Conexão exotérmica;
- Conexão por compressão;
- Conexão mecânica (aparafusada).

Figura 6 - Conexão da malha de terra com solda exotérmica.



Fonte: faw7.com.br

3.2 Resistência de Aterramento

A conexão à terra através de um condutor apresenta, além de resistência, características capacitivas e indutivas, influenciando no escoamento de correntes para o solo. Portanto, idealmente deve-se considerar uma impedância de aterramento e não uma resistência de aterramento.

Entretanto, para condições de baixa frequência e resistividade do solo não muito elevada, são desprezíveis os efeitos capacitivos e de ionização do solo, aproximando então a impedância de aterramento por uma resistência linear [6].

A quantificação da resistência de aterramento, também conhecida como resistência de terra, pode ser obtida através da lei de Ohm, por meio da relação entre o valor da tensão resultante aplicada ao eletrodo de teste e o valor da corrente injetada neste eletrodo, sendo:

$$R_{terra} = \frac{V_{eletrodo}}{I_{injetada}} \quad (1)$$

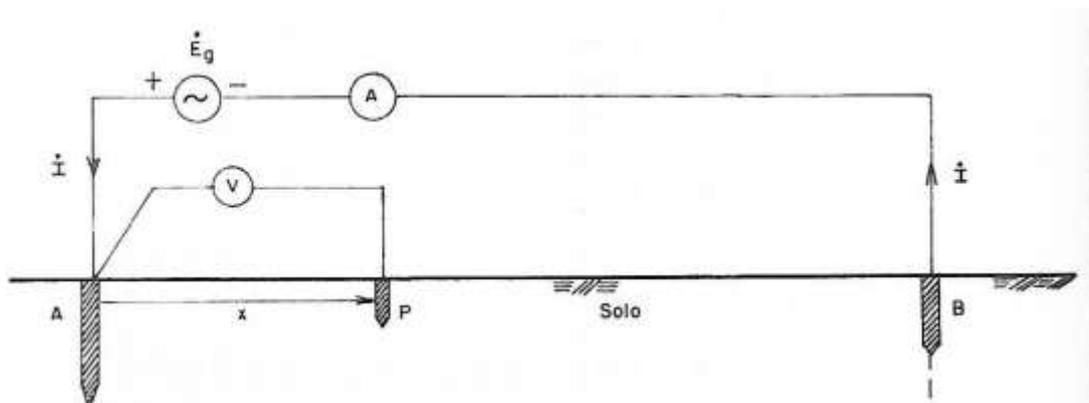
A natureza desta resistência à passagem de corrente através de um eletrodo provém de três principais características, que são:

- Resistência própria do eletrodo de aterramento e das ligações elétricas ao mesmo;

- Resistência de contato entre o eletrodo e a terra adjacente ao mesmo;
- Resistência de terra circunvizinha, que depende basicamente da resistividade do solo e da distribuição da corrente provinda do eletrodo.

Vale ressaltar que as hastes de aterramento possuem resistência muito baixa, visto que são fabricadas em material altamente condutor, como por exemplo o condutor bimetálico de aço cobreado, que é a união de um cabo de aço de alta condutividade revestido de cobre resistente à corrosão, realizada através de extrusão ou deposição eletrolítica do cobre sobre a alma do cabo de aço [6]. É possível obter a resistência de aterramento traçando uma curva perfil ao longo do solo com o auxílio do arranjo da figura 7 [5].

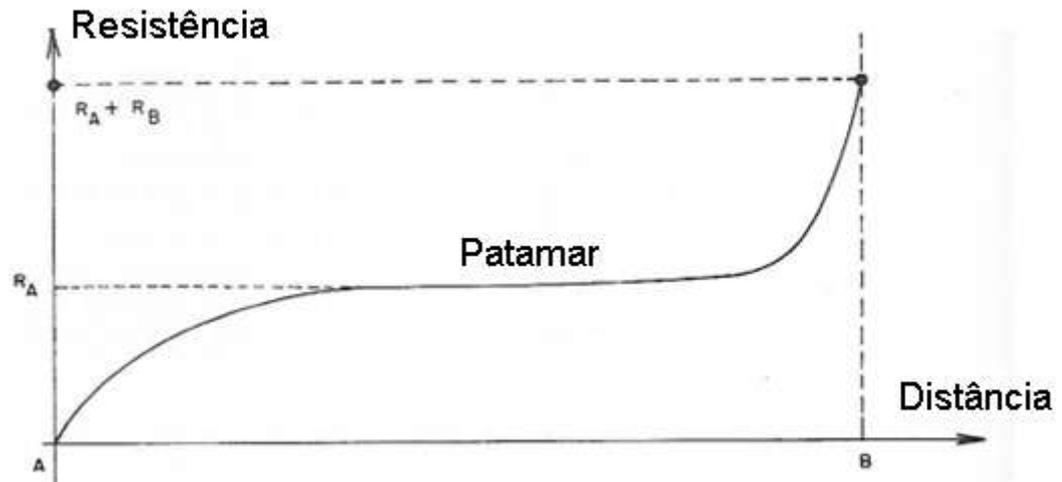
Figura 7 – Arranjo das três hastes para medição de resistência de aterramento.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

Na figura 7 onde é representado o método das três hastes, o eletrodo A é considerado o aterramento principal, enquanto o eletrodo B será auxiliar para o retorno da corrente I injetada no eletrodo A . O eletrodo P é o eletrodo de potencial, que será deslocado de A até B , onde x é a distância do eletrodo P ao eletrodo principal. Para cada posição do eletrodo de deslocamento é medido o valor da resistência elétrica, então deslocando o eletrodo P por todo percurso de A até B , será obtida a curva perfil da resistência de aterramento conforme figura 8 [8].

Figura 8 – Curva perfil da resistência de aterramento



Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

Observa-se através da curva de resistência de terra que existe um patamar constante em certo intervalo de medição. Neste patamar, encontra-se o valor da resistência de terra do sistema de aterramento principal, que pode ser calculado por:

$$R_A = \frac{V_{patamar}}{I} \quad (2)$$

Onde a corrente I é conhecida e constante e $V_{patamar}$ é medido entre os eletrodos A e P da figura 7.

Este patamar constante é atingido quando o eletrodo P está suficientemente distante do eletrodo A para que não haja interferência das linhas de campo emanadas pela corrente injetada no eletrodo A . Este patamar pode não ser alcançado pelo fato de não ser possível excursionar o eletrodo de deslocamento a distâncias desejáveis [8].

4 RESISTIVIDADE DO SOLO

O valor da resistividade aparente (ρ_a) em um mesmo tipo de solo pode variar de local para local devido a alguns fatores como umidade, temperatura, compactação e pressão, composição salina e outros fatores naturais. A profundidade das camadas que formam o solo também é influente no valor de resistividade, visto que o escoamento de correntes elétricas pela terra dependerá da espessura das camadas que compõem o solo. Essas camadas são normalmente horizontais, entretanto, devido a falhas geológicas, essas camadas podem apresentar-se inclinadas, ou até mesmo verticais.

Devido às diversas características que influenciam na resistividade do solo, é impossível atribuir um valor de resistividade a um determinado tipo de solo. Entretanto, é possível caracterizar faixas de valores de resistividade que diferentes tipos de solo podem apresentar nas suas condições usuais de umidade e temperatura. O quadro 1 apresenta a faixa de valores de resistividade para diferentes tipos de solo [8].

Quadro 1 - Tipo de Solo e Respectiva Resistividade.

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

Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

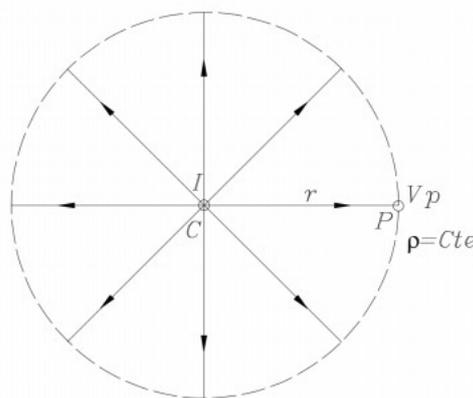
Nota-se, através do Quadro 1, que a presença da umidade é relevante no valor da resistividade, conseqüentemente a resistividade irá variar de acordo com a temperatura e umidade das estações do ano. Para solos com pouca umidade, ou praticamente secos, como no caso da areia seca, o solo terá comportamento que se

assemelhará a um material isolante, se opondo ao escoamento das correntes por camadas compostas por esse tipo de solo. Solos com baixa resistividade são favoráveis à implementação de sistemas de aterramento, porém, solos com umidade muito elevada podem ter características de compactação desfavoráveis ao projeto.

4.1 Potencial Elétrico do Solo em um Ponto

O potencial em um ponto "C" imerso sob a superfície de um solo homogêneo e infinito, comportando-se como uma fonte de corrente, produz uma distribuição de corrente "I" radialmente como mostra a figura 9 [8].

Figura 9 - Linhas de Corrente Elétrica em um solo infinito e homogêneo.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

O campo elétrico no ponto "P" da figura 9 é dado por (3):

$$E_P = \rho J_P \quad (3)$$

Onde:

E_P = Campo elétrico no ponto "P" [V/m]

ρ = Resistividade do Solo [$\Omega \cdot m$]

J_P = Densidade de corrente no ponto "p" [A.m]

A densidade de corrente sobre a superfície de raio "r" é dado por:

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

O que resulta em:

$$E_P = \rho \frac{I}{4\pi r^2} \quad (5)$$

Já o potencial no ponto "P" em relação a um ponto qualquer no infinito é dado por:

$$V_P = \int_r^{\infty} E dr \quad (6)$$

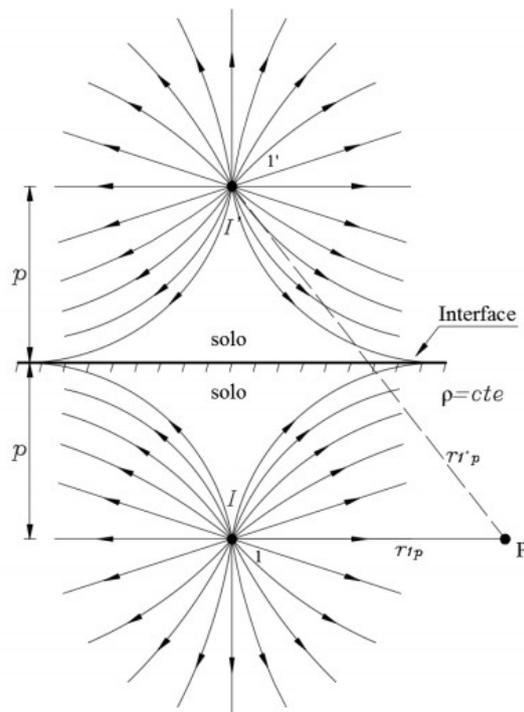
Onde dr é a variação infinitesimal na direção radial ao longo do raio r , então é possível escrever o potencial na forma:

$$V_P = \rho \frac{I}{4\pi r} \quad (7)$$

Agora considerando um solo homogêneo e não infinito, para encontrar o potencial em um ponto "P" utiliza-se o método das imagens como mostra o arranjo da figura 10 e, para efetuar a superposição de cada uma das fontes emanando corrente, basta somar as contribuições de cada ponto utilizando a equação (7), resultando em:

$$V_P = \rho \frac{I}{4\pi r_p} + \rho \frac{I'}{4\pi r_{1,p}} \quad (8)$$

Figura 10 - Ponto em um solo homogêneo e sua imagem.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

4.2 Metodologia de Medição da Resistividade do Solo

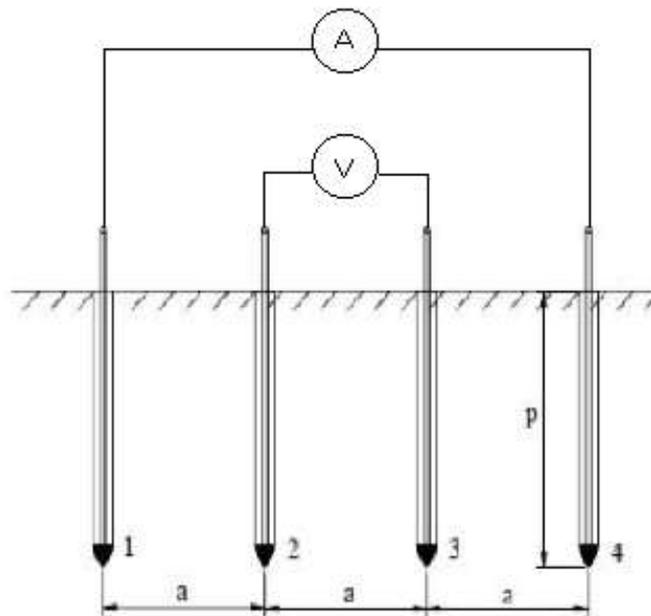
As medidas de resistividade do solo são realizadas em campo através de algum método de prospecção geoeletrica, onde destaca-se o Método de Wenner. Tal método é o mais indicado para medições que envolvem grandes volumes de terra, segundo a norma NBR 7117:2012 - Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo, que rege a medição de resistividade do solo. Além do método de Wenner, existem outros métodos de medição abordados pela norma NBR 7117 que são [9]:

- Arranjo de Schlumberguer;
- Arranjo de Schlumberguer – Palmer;
- Arranjo de Lee (ou das cinco hastes);
- Arranjo do Eletrodo Central;
- Método dos Quatro Eletrodos;
- Método dos Dois Eletrodos.

4.2.1 Medição através do Método de Wenner

Para efetuar as medições, quatro eletrodos são cravados na superfície do solo em mesma profundidade, igualmente espaçados e alinhados e, com o auxílio de um instrumento de medição, faz-se circular uma corrente entre os eletrodos extremos, enquanto os eletrodos centrais são responsáveis por auxiliar na medição da diferença de potencial gerada no solo devido à injeção de corrente, como mostra a figura 11. Os espaçamentos entre os eletrodos são denotados por " a ", enquanto o comprimento da haste é denotado por " p " [8].

Figura 11 - Disposição das hastes utilizadas no Método de Wenner.



Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

Tanto a medição quanto a injeção de corrente é realizada com o auxílio do instrumento medidor de resistência de terra, que possui dois terminais de corrente e dois de potencial e é equipado com uma fonte de corrente interna, responsável por fazer circular corrente entre os eletrodos das extremidades.

Salienta-se que o instrumento realiza a leitura de resistência elétrica (Ω) através da relação de corrente e tensão obtida com o auxílio do equipamento de medição e, a partir dos valores de resistência, são calculados os valores de

resistividade do solo até uma determinada profundidade proporcional ao espaçamento entre os eletrodos.

Figura 12 – Medidor Digital de Resistência de Terra.



Fonte: megabras.com

Os espaçamentos entre os eletrodos nas consequentes medições são regidos por $a = 2^n$, onde n é o número de medições realizadas, ou seja, a cada medição o espaçamento entre os eletrodos será 1m, 2m, 4m, 8m, 16m, 32m e assim sucessivamente, de acordo com o tamanho do terreno a ser realizada a medição.

4.2.2 Procedimentos de Medição

A norma NBR-7117 define uma medição como sendo um conjunto de leituras obtidas em uma mesma direção de cravamento e diversos espaçamentos entre hastes.

As medições de resistividade do solo devem compreender todo o terreno a ser projetada a malha de terra e isto dependerá da geometria e das características do solo e terreno a ser estudado. Apresenta-se no quadro 2 o número mínimo de linhas de medição que devem ser realizadas de acordo com as dimensões do terreno, assim como os correspondentes croquis que devem ser adotados para o procedimento de medição [9].

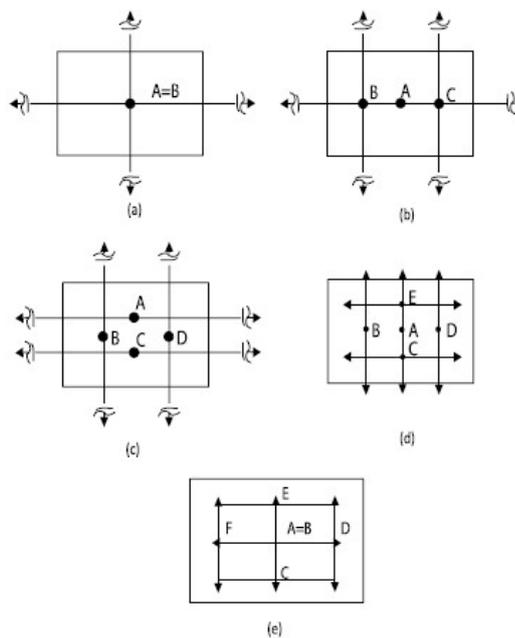
Quadro 2 – Área do terreno e respectivo número de linhas de medição.

Área do terreno (m ²)	Número mínimo de linhas de medição	Croquis para as linhas de medição
$S \leq 1000$	2	Figura 13-(a)
$1000 < S \leq 2000$	3	Figura 13-(b)
$2000 < S \leq 5000$	4	Figura 13-(c)
$5000 < S \leq 10000$	5	Figura 13-(d)
$10000 < S \leq 20000$	6	Figura 13-(e)

Fonte: NBR-7117.

Na figura 13, as linhas de medição são representadas pela legenda A, B, C, D e E.

Figura 13 – Croquis para medição de Resistividade.



Fonte: NBR-7117.

Ao final da coleta de dados de medição, deve-se calcular a média aritmética dos valores obtidos para cada espaçamento adotado, sendo possível preencher o quadro 3, como segue abaixo [9].

Quadro 3 - Espaçamentos recomendados para obtenção de valores em campo.

Espaçamento (m)	Resistência (Ω)	Resistividade($\Omega.m$)
1		
2		
4		
8		
16		
32		

Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

4.2.3 Tratamento dos Dados

Após o preenchimento do quadro 3 para as n linhas de medição efetuadas, observando o número mínimo de linhas de medição conforme o quadro 2, os dados devem passar por uma análise quanto a sua aceitação ou não, conforme segue [8]:

- 1) Calcular a média aritmética dos valores de resistividade para cada linha de medida efetuada na forma:

$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad (9)$$

Sendo:

- $\rho_M(a_j)$ a resistividade média para o respectivo espaçamento a_j ;
- n o número de medições efetuadas;
- $\rho_i(a_j)$ o valor da i -ésima resistividade com espaçamento a_j ;
- q o número de espaçamentos empregados.

- 2) Calcular o desvio de cada medida em relação ao valor médio na forma:

$$\left| \rho_i(a_j) - \rho_M(a_j) \right| \quad (10)$$

Nota-se que devem ser desprezados todos os dados de resistividade que tenham um desvio maior que 50% em relação à média, na forma:

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} \cdot 100 \geq 50\% \quad (11)$$

Caso seja observado um elevado número de medições com desvio maior que 50%, recomenda-se a realização de novas medições na linha de medida em questão. Caso este elevado desvio persistir, a região poderá ser considerada como independente para efeitos de modelagem.

- 3) Com as resistividades médias para cada espaçamento, é possível traçar a curva $\rho(a) \times a$ e aplicar as devidas técnicas de estratificação do solo para obter os parâmetros do solo.

4.2.4 Condições Mínimas a Serem Observadas

Para que o procedimento de medição seja corretamente executado e os valores obtidos não apresentem inconsistências, as seguintes condições devem ser observadas [8], [9]:

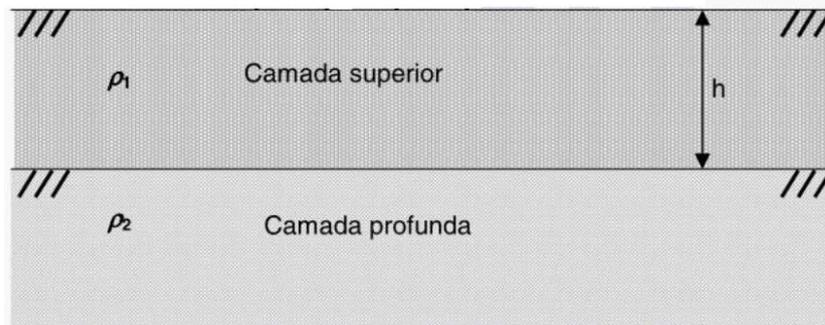
- Considerar a variação sazonal da resistividade do solo, devendo ser realizada uma medição no solo mais seco, conhecido como período crítico;
- Em áreas onde seja necessário corrigir o nível do terreno, pelo menos uma medição deve ser realizada após a terraplanagem;
- Pontos de uma área que sejam obtidos valores de resistividade com desvio superior a 50% em relação ao valor médio das medições realizadas podem caracterizar uma subárea, devendo ser realizadas medições complementares ao redor deste ponto. Caso não seja possível realizar as medições complementares, faz-se conveniente descartar a linha de medição;
- Caso o ponto de medição esteja próximo a malhas existentes, objetos condutores enterrados ou cercas aterradas, o ponto de medição deve ser afastado a uma distância conveniente para que interferências sejam reduzidas.
- Utilizar hastes de no mínimo 50 *cm* de comprimento e diâmetro entre 10 e 15 *mm*.

5 MODELO DE SOLO EM DUAS CAMADAS

Neste capítulo serão apresentados aspectos quanto à modelagem da metodologia a ser aplicada, assim como a modelagem do solo em duas camadas, que será tomado como base neste trabalho.

Na figura 14, observa-se um solo estratificado em duas camadas, onde a primeira camada possui resistividade ρ_1 e espessura h , enquanto a segunda camada possui resistividade ρ_2 e espessura infinita [9].

Figura 14 – Solo estratificado em duas camadas.



Fonte: NBR-7117.

5.1 Modelagem do Método de Wenner

Na haste 1, indicada na figura 11, é injetada uma corrente I que é coletada pela haste 4 na outra extremidade, produzindo uma diferença de potencial entre as hastes centrais do arranjo. Utilizando o método das imagens abordado no item 4.1, tem-se que o potencial na haste 2 é dado por [8]:

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (12)$$

Enquanto o potencial na haste 3 é dado por:

$$V_3 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right) \quad (13)$$

Sendo assim, a diferença de potencial entre as hastes 2 e 3 será:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (14)$$

Valendo-se da Lei de Ohm, dividindo o potencial V_{23} pela corrente I injetada na haste 1, obtém-se a resistência elétrica R do solo a uma profundidade de penetração da corrente injetada.

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (15)$$

Assim, a resistividade aparente do solo pode ser determinada através da equação (16).

$$\rho(a) = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad (16)$$

Que para um afastamento relativamente grande entre as hastes, a equação (16) se reduz a:

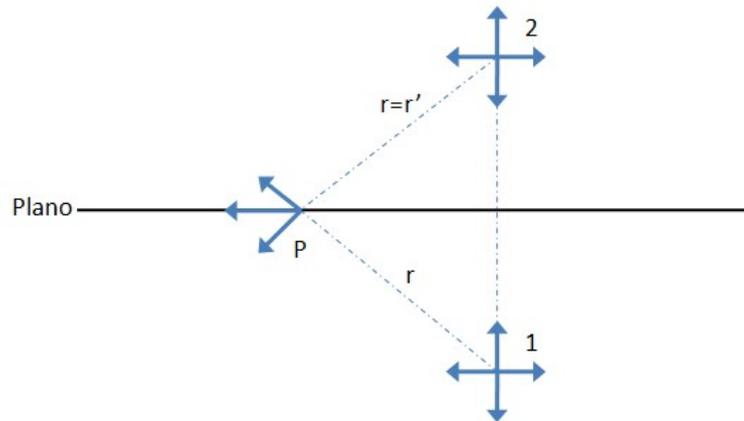
$$\rho = 2\pi a R \quad (17)$$

5.2 Modelagem do Solo em Duas Camadas Através do Método de Wenner

O ponto 1 localizado abaixo da superfície do solo, observado no arranjo da figura 15, irradia corrente em todas as direções produzindo potenciais ao longo do plano e encontra-se a uma distância r do ponto onde será medido o potencial. Este

potencial pode ser medido utilizando-se o método das imagens, que dará origem a um ponto acima da superfície do solo distante r' do ponto de medição do potencial [10].

Figura 15 – Método das imagens para medição de potencial elétrico em um ponto P.



Fonte: ADAPTADO DE SUNDE.D. Earth conduction effects in transmission systems.

O potencial resultante é formado por duas componentes: o potencial primário V' , que depende da simetria do arranjo, e o potencial secundário V'' , sendo:

$$V_1 = V'' + V_1'' \quad (18)$$

e

$$V_2 = V'' + V_2'' \quad (19)$$

Utilizando-se de (17) e sabendo que o potencial primário depende das direções radial r e z , tem-se:

$$V' = \frac{I\rho}{2\pi} (z^2 + r^2)^{-1/2} \quad (20)$$

Aplicando a Transformada de Fourier em (20), tem-se:

$$(z^2 + r^2)^{-1/2} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (21)$$

Então o potencial primário pode ser escrito como:

$$V' = \frac{I\rho}{2\pi} \int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (22)$$

Onde λ é o fator de integração e $J_0(\lambda r)$ é a Função de Bessel.

Generalizando (22), obtém-se os potenciais secundários, que podem ser escritos como:

$$V_1'' = \int_0^{\infty} [f_1(\lambda)e^{-\lambda z} + g_1(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (23)$$

$$V_2'' = \int_0^{\infty} [f_2(\lambda)e^{-\lambda z} + g_2(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (24)$$

Para satisfazer as condições de contorno na superfície da terra, o campo elétrico na direção z deverá ser $E_z = -dV/dz = 0$, assim como $f_1 = g_1$. Para obter o potencial quando z tende ao infinito, necessita-se $g_2 = 0$.

As funções $f_1(\lambda)$ e $f_2(\lambda)$ são obtidas através da condição de contorno $z = h$, onde os potenciais V_1 e V_2 devem ser iguais e as densidades de corrente J_1 e J_2 na direção z também devem ser iguais. Para $J_1 = -(1/\rho_1) dV_1/dz$ e $J_2 = -(1/\rho_2) dV_2/dz$ são obtidas as seguintes equações de contorno:

$$\frac{I\rho_1}{2\pi} e^{-\lambda h} + f_1(\lambda)(e^{-\lambda h} + e^{\lambda h}) = \frac{I\rho_1}{2\pi} e^{-\lambda h} + f_2(\lambda)e^{-\lambda h} \quad (25)$$

$$\frac{\lambda}{\rho_1} \left[-\frac{I\rho_1}{2\pi} e^{-\lambda h} + f_1(\lambda)(-e^{-\lambda h} + e^{\lambda h}) \right] = \frac{\lambda}{\rho_1} \left[-\frac{I\rho_1}{2\pi} e^{-\lambda h} + f_2(\lambda)e^{-\lambda h} \right] \quad (26)$$

A solução das equações (25) e (26) resulta em:

$$f_1(\lambda) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \frac{-ke^{-2\lambda h}}{1 + ke^{-2\lambda h}} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[-ke^{-2\lambda h} + k^2 e^{-4\lambda h} - k^3 e^{-6\lambda h} + \dots \right] \quad (27)$$

Sendo o coeficiente de reflexão dado por:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (28)$$

A resistência mútua na superfície do plano é dada por:

$$R(r) = \int_0^\infty \left(\frac{\rho_1}{2\pi} + 2f_1(\lambda) \right) J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1 - ke^{-2\lambda h}}{1 + ke^{-2\lambda h}} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (29)$$

Sabendo que o potencial é dado por $V = R(r)I$, então o potencial na superfície da terra será dado por:

$$V_P = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right) \quad (30)$$

As equações (17) e (30) aplicadas ao Método de Wenner, exemplificado em 4.2.1, levando em consideração a diferença de potencial entre as hastes 2 e 3, obtém-se a equação (31), que representa a resistividade aparente do solo em função do espaçamento a [10].

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (31)$$

6 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Com os dados de resistividade obtidos através do método de Wenner, a estratificação pode ser realizada por métodos mais simples ou mais complexos, dependendo do objetivo da estratificação ou da complexidade que apresenta o solo. Tratando-se do método de estratificação em duas camadas, é possível utilizar diferentes abordagens para obter os parâmetros deste tipo de solo, como por exemplo, através de métodos gráficos ou computacionais.

Os métodos mais aplicados são [8]:

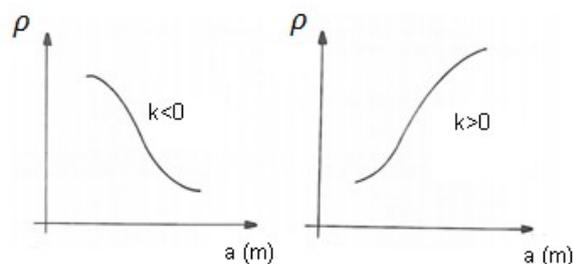
- Método Gráfico em duas camadas (Método de Sunde);
- Estratificação do Solo em Duas Camadas Utilizando Métodos Computacionais;
- Método de Estratificação de Solos de Várias Camadas.

6.1 Método Gráfico de Duas Camadas

O método gráfico de duas camadas consiste em analisar a variação do coeficiente de reflexão do solo " K ", que é delimitado por $-1 \leq K \leq 1$ através de dados experimentais. Este coeficiente indica se a curva de resistividade $\rho x a$ (onde " a " é o espaçamento entre os eletrodos de Wenner) é crescente ou decrescente, e é dado por (25).

Com os valores do parâmetro K é possível determinar se a resistividade da primeira camada é maior ou menor que a resistividade da segunda camada apenas pelo sinal de K , como mostram as curvas $\rho(a) x a$ da figura 16 [8].

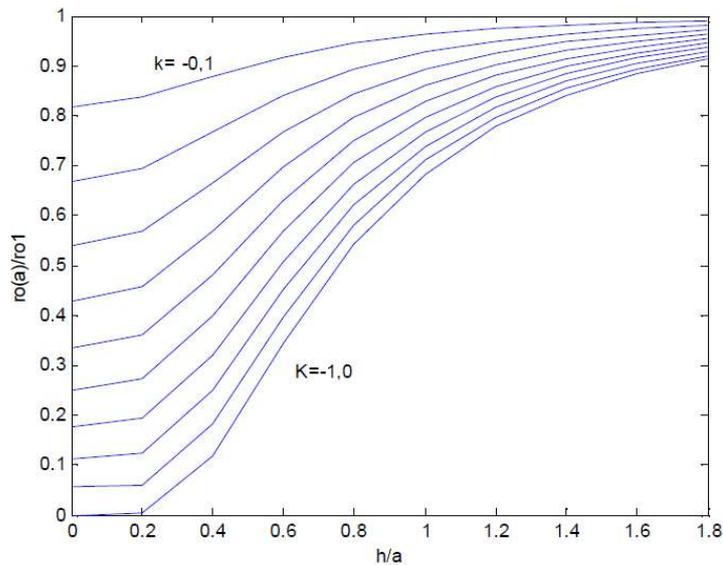
Figura 16 - Curvas $\rho x a$ decrescente e crescente.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

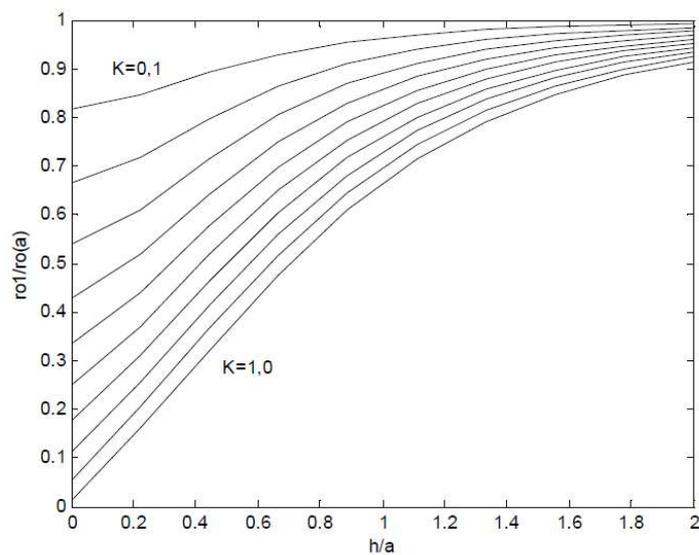
As curvas experimentais são traçadas cobrindo toda a faixa de variação de K , isto é, as curvas são obtidas para valores de K positivos e negativos. A família de curvas apresentadas nas figuras 17 e 18, para K negativo e positivo respectivamente, são obtidas através da expressão (31) para a curva $\rho(a) \times a$.

Figura 17 – Família de curvas para K negativo.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

Figura 18 – Família de curvas para K positivo.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

A seguir, apresenta-se o procedimento relativo a estratificação do solo através deste método [8]:

- 1) Traçar um gráfico $\rho(a) \times a$;
- 2) Prolongar a curva $\rho(a) \times a$ até cortar o eixo das ordenadas do gráfico, determinando o valor de ρ_1 ;
- 3) Escolher um valor arbitrário de espaçamento a_1 , correspondente a um valor de resistividade $\rho(a_1)$;
- 4) Pelo comportamento da curva traçada, determina-se o sinal de k ;
 - Se $k < 0$, calcula-se $\rho(a_1)/\rho_1$;
 - Se $k > 0$, calcula-se $\rho_1/\rho(a_1)$.
- 5) Com o valor de $\rho(a_1)/\rho_1$ ou $\rho_1/\rho(a_1)$ obtido, entra-se nas curvas teóricas correspondentes e traça-se um linha paralela correspondente ao eixo da abscissa. Esta reta corta as curvas distintas de k . Proceder todas as leituras distintas de k . Proceder a leitura de todos os específicos k e h/a correspondentes;
- 6) Multiplica-se todos os valores de h/a encontrados no quinto passo pelo valor de a_1 do terceiro passo. Assim, com o quinto e sexto passo, gera-se um quadro com os valores correspondentes de k , h/a e h .
- 7) Traça-se a curva $k \times h$ de acordo com os valores obtidos no sexto passo;
- 8) Um segundo valor de espaçamento a_2 é novamente escolhido, sendo $a_2 \neq a_1$, e todo processo é repetido, resultando em uma nova curva $k \times h$;
- 9) Traça-se a nova curva $k \times h$, sobrepondo a curva traçada no sétimo passo.
- 10) A intersecção das duas curvas $k \times h$ em um dado ponto resultará nos valores de k e h , e a estratificação está definida. [8]

6.2 Estratificação do Solo em Duas Camadas Utilizando Métodos Computacionais

Através de dados de resistividade obtidos em campo e utilizando-se de (28), podem ser utilizados métodos computacionais de otimização para a determinação

dos parâmetros ρ_1 , ρ_2 e h do solo. A otimização é aplicada com a finalidade de obter-se o menor desvio possível entre os valores medidos e calculados.

Existem diferentes métodos que podem ser aplicados para a otimização da equação (28), dentre os quais destacam-se [7], [8]:

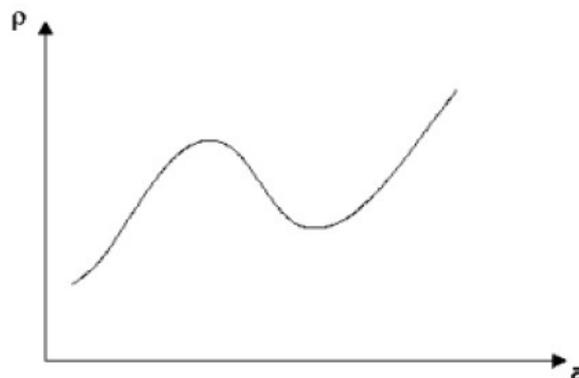
- Método Gradiente;
- Método do Gradiente Conjugado;
- Método de Newton;
- Método Quase-Newton;
- Método de Hooke e Jeeves.

Neste trabalho, será apresentado e proposto o método de otimização do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), visto que é o método presente no software *Microsoft Excel* indicado para resolução de problemas não lineares.

6.3 Método de Estratificação de Solos de Várias Camadas – Método de Pirson

Neste caso, a curva $\rho(a)$ x a traçada de acordo com os dados de resistividade apresenta trechos ascendentes e descendentes dando origem à forma ondulada da curva como mostra a figura 19.

Figura 19 – Curva $\rho(a)$ x a para um solo de várias camadas.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO.

Dividindo a curva em seus diferentes trechos ondulados, cada trecho pode ser considerado como uma extensão do solo de duas camadas, o que dá origem ao método de Pirson de várias camadas [8].

Para um primeiro trecho aproximado por um solo de duas camadas, o método de Pirson calcula os parâmetros do solo ρ_1 , ρ_2 e h e, para o próximo trecho considerado, calcula-se a resistividade aparente ρ_3 vista pela terceira camada, assim como sua espessura h .

7 CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA

Uma das principais motivações para o projeto e execução de um aterramento é garantir a segurança dos animais e seres humanos. Para isso, serão apresentados alguns conceitos básicos que devem ser observados no projeto de um aterramento. Tais conceitos de segurança devem ser aplicados também quando o sistema de aterramento é destinado especificamente a garantir o bom desempenho de determinado sistema elétrico ou eletrônico, o que é chamado de aterramento de serviço.

7.1 Limite de Corrente Tolerável pelo Ser Humano

O potencial de toque é a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica, situado ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto situado no chão a 1m da base da estrutura metálica. Segundo Kindermann, estudos realizados por Dalziel mostram que, a corrente elétrica que passa pelo corpo humano durante o período de defeito, não pode ser superior à corrente dada pela equação (32), para que não ocorra fibrilação ventricular.

$$I_{choque} = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (32)$$

Sendo,

I_{choqu} = Corrente elétrica que passa pelo corpo humano [A];

t_s = Tempo de duração do choque elétrico.

k = Constante relacionada à massa corpórea do ser humano, que pode assumir:

$k = 0,116[As^{\frac{1}{2}}]$ para pessoas com de massa de 50kg;

$k = 0,157[As^{\frac{1}{2}}]$ para pessoas com massa de 70kg.

A passagem de corrente elétrica pelo corpo humano pode causar fibrilação ventricular, que é um tipo de dessincronização das válvulas cardíacas que causa o

estado de tremulação irregular nas fibras musculares do coração, levando à ausência de circulação de sangue.

A seguir no quadro 4 apresentam-se as reações fisiológicas e as consequências da corrente elétrica no corpo humano, onde as reações vão de um simples formigamento até asfixia, queimaduras graves e fibrilação ventricular que podem levar a morte.

Quadro 4 - Reações e Consequências da passagem de corrente no corpo humano.

I (mA)		Reações Fisiológicas	Consequências
C.C	C.A		
Até 25	Até 80	1 mA (C.A) – Formigamento 5 – 15 mA (C.A) – Contração muscular 15 – 25 mA – Contração muscular e Problemas respiratórios	Asfixia e posterior morte aparente
25 - 80	80 - 300	- Contrações violentas - Asfixia	Morte aparente
>80	>300	- Asfixia imediata - Fibrilação Ventricular - Alteração muscular (química) - Queimaduras	Morte aparente
Ordem de Ampères		- Queimaduras - Necrose dos tecidos - Fibrilação ventricular - Asfixia imediata - Danos posteriores devido à eletrólise	-Morte aparente - Sequelas -Morte

Fonte: Adaptado de Kindermann, Campagnolo.

7.2 Potencial de Toque

Potencial de toque é definido como a diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo, separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa, considerando 1,0 m. O potencial de toque é considerado o mais perigoso, visto que pode passar diretamente pelo coração e causar fibrilação ventricular [8].

A expressão que calcula o potencial de toque pode ser observada em (33).

$$V_{toquw} = (1000 + 1,5\rho_s)I_{choque} \quad (33)$$

Onde,

ρ_s =Resistividade superficial do solo [$\Omega.m$]

I_{choque} = Corrente elétrica que passa pelo corpo humano [A]

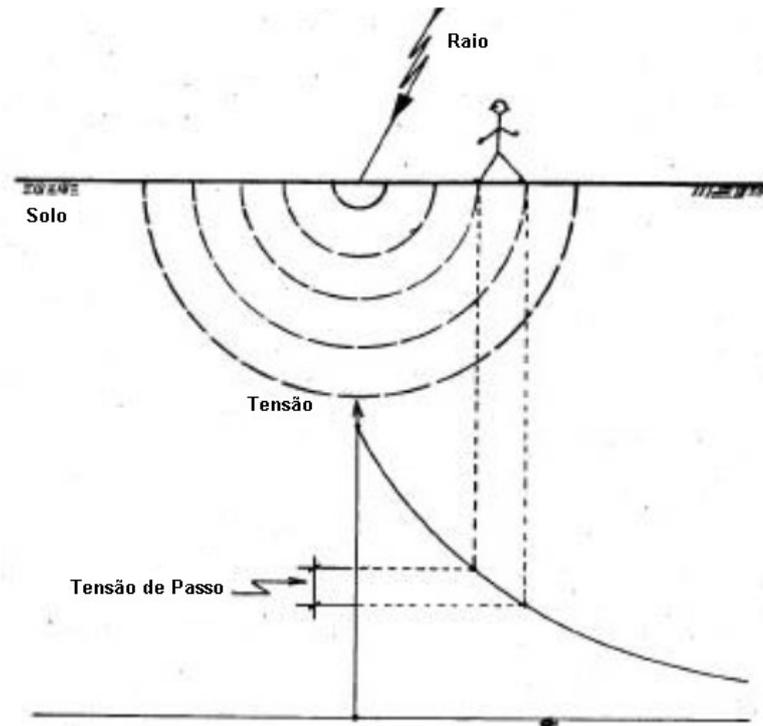
E o potencial de toque máximo admissível, para não causar fibrilação ventricular é determinado com o auxílio da corrente limite de Dalziel, dado por (34).

$$V_{toque} = (1000 + 1,5\rho_s) \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (34)$$

7.3 Potencial de Passo

Potencial de passo é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo, separados pela distância de um passo de uma pessoa, e considerando igual a 1,0 m. Essa diferença de potencial ocorre pelas diferentes linhas equipotenciais que se formam na superfície do solo na ocorrência do escoamento da corrente de curto-circuito. Através da figura 20, observa-se o potencial de passo existente entre os dois pés, sobre linhas equipotenciais diferentes. Se em um breve espaço de tempo ambos os pés estiverem sobre a mesma linha equipotencial, não haverá tensão de passo [8].

Figura 20 - Tensão de passo na ocorrência de uma descarga atmosférica.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO

Tem-se que a tensão de passo será dada por:

$$V_{passo} = (1000 + 6\rho_s)I_{choque} \quad (35)$$

E o potencial de passo máximo tolerável é dado com o auxílio da corrente limite de Dalziel através de:

$$V_{toquemáximo} = (1000 + 6\rho_s) \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (36)$$

8 METODOLOGIA PROPOSTA

A resolução do problema proposto será baseada no método de Wenner para a estratificação do solo em duas camadas, como foi abordado no capítulo 5 deste trabalho. Quanto à resolução do problema proposto, serão aplicadas técnicas de otimização via software computacional *Microsoft Excel* com o auxílio do suplemento *Solver*, que é baseado no método do Gradiente Reduzido Generalizado para resolução de problemas não lineares.

Esse método converge rapidamente para um ponto de mínimo ou máximo em problemas onde as condições iniciais são próximas do valor a ser encontrado e, tratando-se da estratificação em duas camadas, os valores das resistividades da primeira e da segunda camada do solo serão próximos aos valores de resistividade obtidos para o primeiro e o último espaçamento de Wenner, o que facilita a aplicação deste método ao problema proposto.

8.1 Otimização

Aplicam-se técnicas de otimização para a melhor solução de problemas buscando máximos e mínimos de variáveis conhecidas, onde é realizada a melhor seleção de elementos através de um conjunto limitado de alternativas. Para a solução de problemas, parte-se dos seguintes componentes [7], [8]:

- Função Objetivo;
- Modelagem e variáveis;
- Restrições.

A solução do problema de otimização está baseada em uma função objetivo que depende de um conjunto de variáveis que pode ser linear ou não linear. A otimização do problema é alcançada quando encontra-se o ponto ótimo da função objetivo, sendo conhecidos então os valores do conjunto de variáveis que maximizam ou minimizam esta função. Entretanto, nem sempre o ponto ótimo de uma função pode ser alcançado devido à escassez de possibilidades, restrições e não linearidades.

8.2 Gradiente Reduzido Generalizado (GRG)

O método GRG é amplamente utilizado em problemas de programação matemática não linear, sendo este método apresentado por Abadie e Carpentier (1966) no Quarto Congresso Internacional de Pesquisa Operacional.

Tal método foi baseado no método de Rosen, intitulado como Método do Gradiente Projetado (1960), elaborado para solução de problemas de programação matemática não linear, mas com restrições lineares. Em 1963, o método de Rosen foi reformulado por Wolfe que apresentou uma formulação mais simples da anteriormente proposta por Rosen, considerando restrições não lineares, que ficou conhecido como Método do Gradiente Reduzido. Então, em 1966, Abadie e Carpentier generalizaram o método de Wolfe, dando origem ao GRG [11].

Atualmente, o algoritmo é implementado na forma GRG2, como proposto por Lasdon em 1979 em uma versão mais robusta do que a proposta por Abadie e Carpentier [11], [12].

8.2.1 Método do GRG

O algoritmo GRG resolve problemas não lineares na forma [13]:

$$\text{Minimizar } f(X) \quad (37)$$

$$\text{Sujeito a } g_i(X) = 0, i = 0,1,2,\dots,m \quad (38)$$

$$l_i < X < u_i, i = 1,2,\dots,n \quad (39)$$

Onde:

X é o vetor de n variáveis;

$f(X)$ é a função a ser minimizada;

$g(X)$ são as restrições do problema proposto;

l_i e u_i são os limites inferior e superior respectivamente.

O método consiste em transformar desigualdades na forma de igualdades como é apresentado em (38), através de variáveis de folga que estão contidas no vetor X .

Considerando \tilde{X} um ponto factível para a solução do problema, y o vetor de variáveis básicas e x o vetor de variáveis não básicas em \tilde{X} , então o vetor X pode ser escrito na forma (40).

$$X = (y, x), \tilde{X} = (\tilde{y}, \tilde{x}) \quad (40)$$

Sendo assim, as restrições do problema podem ser escritas na forma:

$$g(y, x) = 0 \quad (41)$$

Assumindo que a função objetivo f e as restrições g_i são diferenciáveis e que (41) possuem solução na forma $y(x)$ para todo x na vizinhança de \tilde{x} , é suficiente para que a matriz base $m \times m$ $\partial g/\partial y$, avaliada em \tilde{X} , seja não singular. Dessa forma, a função objetivo pode ser expressa na forma:

$$F(x) = f(y(x), x) \quad (42)$$

Sendo os vetores limites superior e inferior delimitados por x próximos a \tilde{x} , agora escritos na forma (43),

$$l_{limite} \leq x \leq u_{limite} \quad (43)$$

Onde faz-se necessário x ser livre para variar na vizinhança do possível ponto \tilde{x} , respeitando os limites de (43). Atendidas as restrições de que f e g são diferenciáveis e que $\partial g/\partial y$ é não singular, então a função objetivo $F(x)$ pode ser minimizada utilizando-se do gradiente na forma $\nabla F(x)$ [13], [14].

Observa-se, através da figura 21, o fluxograma que exemplifica o método após o cálculo do gradiente da função, onde basicamente ocorre [15]:

- Calcula-se o gradiente para definir a melhor direção ao ponto ótimo da função;

- Adota-se um *step size* em direção ao novo ponto a ser calculado;
- Avalia a convergência do ponto. Se convergiu, o ponto ótimo da função $F(x)$ foi encontrado, se não o algoritmo calcula o gradiente no novo ponto.

Figura 21 - Fluxograma baseado no gradiente.



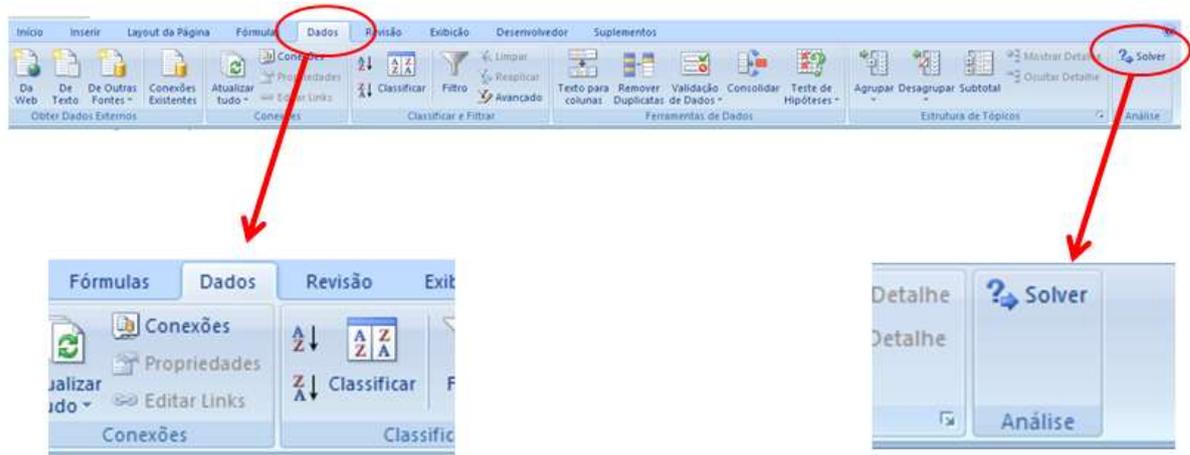
Fonte: O autor.

8.2.2 Aplicação do Método GRG via @MICROSOFT EXCEL

A modelagem do problema a ser resolvido pode ser inteiramente realizada através das células do software *Microsoft Excel* ou também através de linguagem de programação *Visual Basic*, que é uma linguagem de programação associada ao *Visual Basic for Applications (VBA)*.

No software *Microsoft Excel*, o método GRG é utilizado na solução de problemas através do suplemento *Solver*, que pode ser encontrado na guia “Dados” presente no Software.

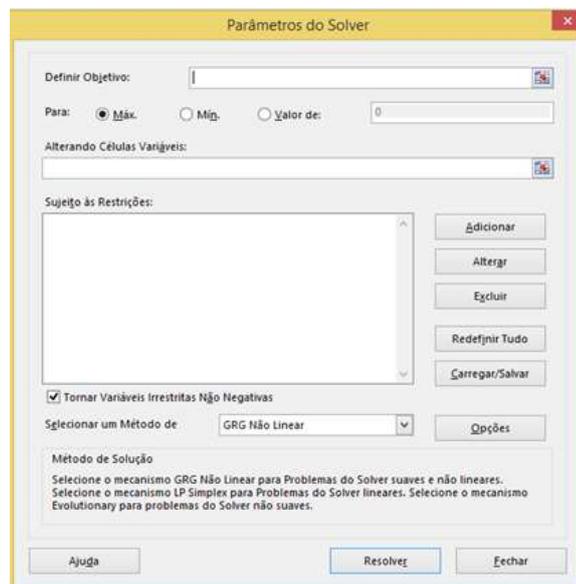
Figura 22 - *Solver Microsoft Excel*.



Fonte: O Autor.

Este suplemento trabalha baseado em um conjunto de células que podem ser ajustadas para que o problema possa ser otimizado. O processo de otimização ocorre até que a função objetivo convirja para um ponto ótimo e, ao atingir este ponto, os valores das células variáveis serão conhecidos.

Figura 23 - Interface do suplemento Solver



Fonte: O Autor.

Através da figura 23, observa-se os campos:

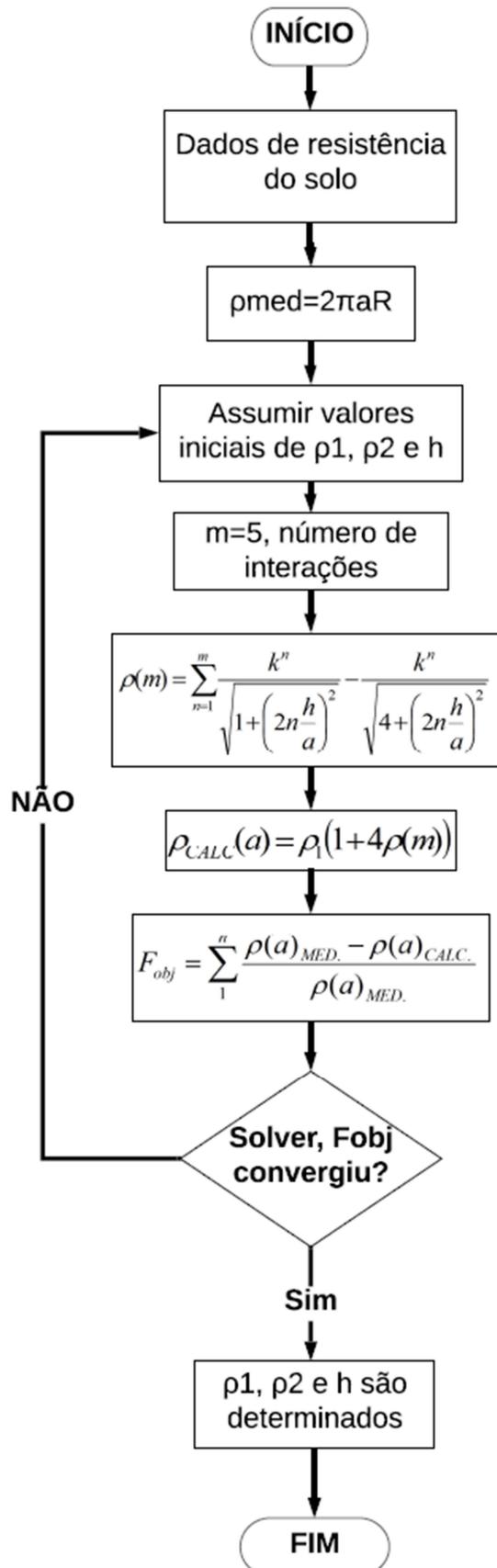
- a) Definir objetivo, que será a função objetivo do problema;
- b) Definir se a função objetivo será minimizada, maximizada ou se ela deve convergir para um valor específico;
- c) Células variáveis, que serão os valores que serão variados e determinados de acordo com o ponto ótimo da função objetivo;
- d) Restrições, caso existirem;
- e) Seleção do método GRG para resolução do problema;
- f) Botão “resolver”, que irá otimizar a função.

Caso a resolução tenha convergido para um ponto ótimo, as células variáveis apresentarão os valores que conduzem a função objetivo ao ponto ótimo.

9 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A ferramenta foi desenvolvida através da linguagem de programação VBA e baseou-se no fluxograma apresentado na figura 24 para obter os parâmetros do solo ρ_1 , ρ_2 e h em solo modelado em duas camadas, com dados de resistividade obtidos através do método de Wenner.

Figura 24 - Fluxograma adotado no desenvolvimento da ferramenta computacional.



Fonte: O autor.

A ferramenta necessita dos dados de entrada de resistência obtidos em campo para cada espaçamento "a" do método de Wenner. Logo em seguida, esses dados de resistência são convertidos para resistividade através de (17) e são assumidos como parâmetros iniciais de ρ_1 a resistividade do primeiro espaçamento, ρ_2 a resistividade do último espaçamento e $h = 1$.

Notou-se através de dados experimentais, que o somatório da equação (31) somava números significativos até a quinta interação, ou seja, $m = 5$, então através de uma planilha do *Microsoft Excel*, realiza-se o cálculo das resistividades parciais como mostra a figura 25.

Figura 25 - Procedimento de cálculo da resistividade com auxílio de células do *Microsoft Excel*.

a (m)	SOMATÓRIO					Resistividade Calculada(Ω.m)	Erro médio quadrático
	1	2	3	4	5		
1	-0,0305760	-0,0279110	-0,0283270	-0,0282391	-0,0282613	20,566	0,1053%
2	-0,1012618	-0,0864001	-0,0891666	-0,0885370	-0,0887020	14,961	0,7127%
4	-0,1829333	-0,1337142	-0,1465298	-0,1430187	-0,1440442	9,828	0,9374%
8	-0,2248251	-0,1359089	-0,1685577	-0,1569295	-0,1610502	8,250	0,7811%
16	-0,2382225	-0,1289444	-0,1774696	-0,1564629	-0,1653916	7,848	0,0318%
0							
0							
						Erro médio quadrático total	2,56830%

Fonte: O autor.

O erro médio quadrático total é a soma dos erros médios quadráticos das resistividades medidas e calculadas, sendo esta função adotada como função objetivo do problema proposto na forma (44).

$$F(\rho_1, \rho_2, h) = \min \sum_{i=1}^m \left(\frac{\rho_a^{\text{medido}}(a_i) - \rho_a^{\text{calculado}}(a_i)}{\rho_a^{\text{medido}}(a_i)} \right)^2 \quad (44)$$

Através do método GRG, a função objetivo será minimizada variando os parâmetros ρ_1 , ρ_2 e h e, quando o ponto ótimo da função objetivo for atingido, os parâmetros variáveis serão obtidos, tendo então um solo estratificado.

O ponto ótimo da função objetivo (44) será obtido quando a diferença entre o conjunto de valores de resistividade medidos e calculados para os mesmos espaçamentos entre os eletrodos utilizados nas medições for a menor possível. Ou

seja, existirão valores de ρ_1 , ρ_2 e h tal que os valores de $\rho_a^{\text{calculado}}(a_i)$ sejam os mais próximos possíveis de $\rho_a^{\text{medido}}(a_i)$ e minimizem a função objetivo.

Sabendo a localização das células dos parâmetros variáveis e da função objetivo, as linhas de código que utilizam do suplemento *Solver* presente no *Microsoft Excel* podem ser observadas na figura 26, onde os seguintes passos são executados:

- Limpar os valores existentes nas células dos parâmetros iniciais;
- Atribui-se o primeiro valor de resistividade inserido à ρ_1 como parâmetro inicial;
- Atribui-se o último valor de resistividade inserido à ρ_2 como parâmetro inicial;
- Atribui-se espessura unitária como parâmetro inicial;
- É executada a função *SolverOk* que:
 - Seleciona o Erro médio quadrático total como função objetivo;
 - Objetivo é minimizar a função;
 - Células variáveis são os parâmetros.

Figura 26 - Linhas de código da função *Solver*.

```
Sub Estratificar_Click()

    Sheets("CALCULOS").Activate 'ativa a planilha de cálculos

    Range("E9:G9").Select 'limpar as células dos parâmetros iniciais rho1, rho2 e h
    Selection.ClearContents

    Range("J14").Copy 'atribui o primeiro valor de resistividade ao parâmetro rho1
    Range("E9").PasteSpecial xlPasteValues

    Range("J14").End(xlDown).Copy 'atribuído o último valor de resistividade ao parâmetro rho2
    Range("F9").PasteSpecial xlPasteValues

    Range("G9").Value = 1 'atribui valor unitário ao parâmetro h

    SolverOk SetCell:="$k$34", MaxMinVal:=2, ValueOf:="0", ByChange:="$E$9:$G$9"
    'inicializa o aplicativo SOLVER
    'SetCell:="$k$34" indica a localização da função objetivo
    'MaxMinVal:=2 indica que a função objetivo deve ser minimizada
    'ValueOf:="0" indica o valor ótimo que a função objetivo deve alcançar
    'ByChange:="$E$9:$G$9" localização dos parâmetros variáveis rho1, rho2 e h
End Sub
```

Fonte: O autor.

Estas linhas de códigos são executadas após clicar no botão “Estratificar” presente na interface da ferramenta desenvolvida, como será mostrado no capítulo a seguir.

9.1 Interface da Ferramenta Computacional

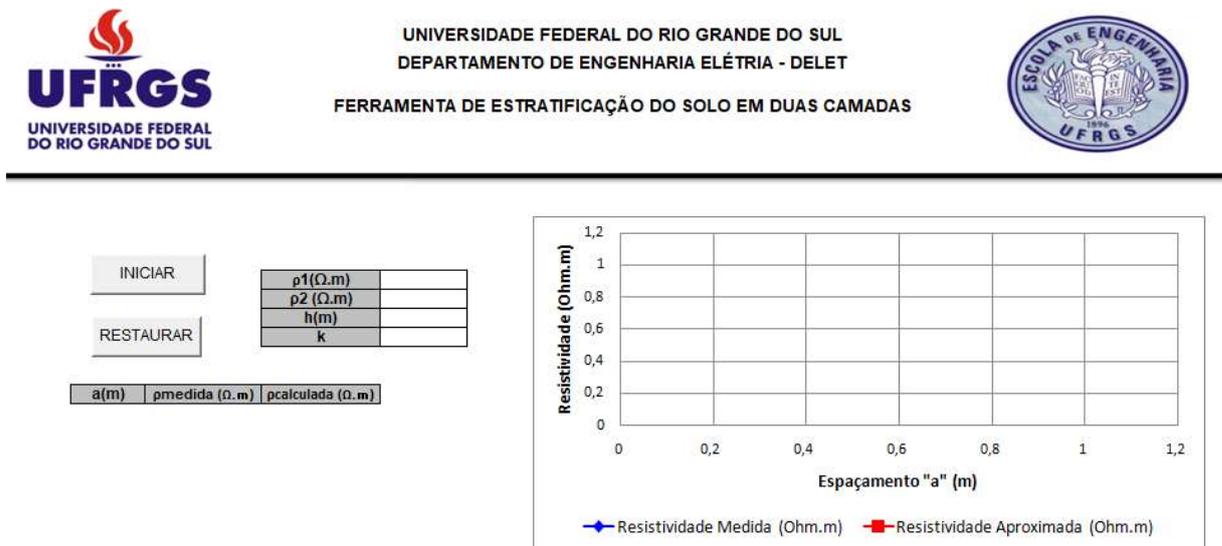
Logo ao abrir o programa no software *Microsoft Excel*, o usuário irá encontrar a interface como mostra a figura 27. Nesta interface observam-se dois botões:

- Iniciar: Ao clicar neste botão, o usuário será encaminhado a um formulário de preenchimento dos dados de entrada de Resistência e de espaçamento, obtidos através de medições.
- Restaurar: Ao clicar neste botão, os parâmetros do solo, caso existam, serão apagados e a interface gráfica será posta em uma forma padrão.

Além dos botões interativos, apresenta-se a interface gráfica que traça as curvas $\rho(a)$ x ados dados de resistividade medida e resistividade calculada, após a estratificação.

Realizada a estratificação, os parâmetros do solo ρ_1, ρ_2, h são apresentados nas células localizadas abaixo dos botões interativos.

Figura 27 - Interface da ferramenta desenvolvida



Fonte: O autor

Logo após o usuário clicar no botão “Iniciar” observado na figura 27, é apresentado o formulário que receberá os dados de resistência e espaçamento como mostra a figura 28.

Figura 28 - Interface para inserção de dados.

Fonte: O autor.

Os dados devem ser inseridos sequencialmente nas caixas de texto do “Espaçamento a” e da “Resistência”, após o preenchimento da caixa, faz-se necessário o usuário clicar no botão “Inserir”.

Os dados inseridos podem ser observados ao lado direito do formulário e, salienta-se que os dados de entrada são os dados de resistência elétrica (Ω) que são observados no equipamento de medição de resistência de terra, que são convertidos para resistividade ($\Omega.m$) através de (17).

Após todos os dados serem inseridos, deve-se clicar no botão “Estratificar” para que os parâmetros do solo ρ_1, ρ_2, h sejam calculados e apresentados na interface da figura 26 juntamente com as curvas $\rho(a) \times a$ dos dados de resistividade medida e resistividade calculada.

Além das funcionalidades anteriormente citadas, o formulário da figura 28 apresenta os botões “Limpar”, que apaga o último dado inserido, e o botão “Reset”, que apaga todos os dados anteriormente inseridos.

10 RESULTADOS

Os resultados obtidos através da ferramenta computacional desenvolvida foram comparados com resultados experimentais apresentados nas bibliografias [7] e [8]. Para fins de comparação, calculou-se a variação percentual entre os dados de medição e os dados obtidos por meio da ferramenta computacional desenvolvida.

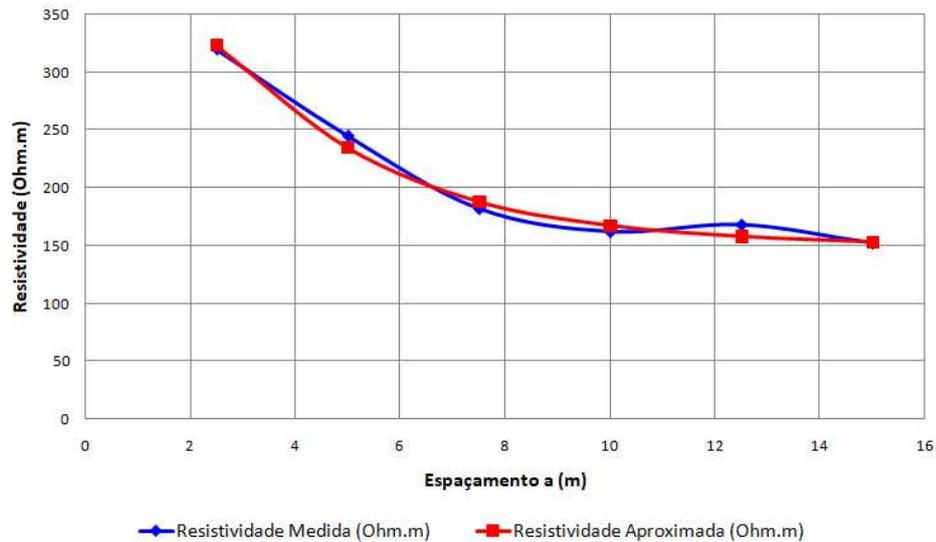
O quadro 5 apresenta os dados de espaçamento e resistividade que servem como dados de entrada da ferramenta para obtenção dos parâmetros do solo, assim como os dados obtidos através da ferramenta e a variação percentual entre estes dados.

Quadro 5 - Valores de medição e valores calculados.

Espaçamento a (m)	Resistividade Medida ($\Omega.m$)	Resistividade Calculada ($\Omega.m$)	Varição (%)
2,5	320	323,53	1,1
5	245	235,09	-4,04
7,5	182	188,22	3,42
10	162	167,69	3,51
12,5	168	158,3	-5,77
15	152	153,53	1,01

Fonte: O autor.

Observa-se através da figura 29 as curvas $\rho(a) \times a$ traçadas de acordo com os dados de resistividade medida (curva em azul) e resistividade calculada (curva em vermelho) observados no quadro 4 para cada espaçamento a .

Figura 29 - Curvas $\rho(a)$ x a .

Fonte: O autor.

Para fins de comparação e validação da ferramenta desenvolvida, realizou-se a estratificação do solo através do método gráfico de duas camadas baseando-se nos dados experimentais de resistividade apresentados anteriormente no quadro 5. O procedimento de estratificação através do método gráfico está descrito no capítulo 6.1 e os dados obtidos são apresentados no quadro 4.

O valor de resistividade ρ_1 foi obtido ao prolongar a curva dos dados de resistividade média até o eixo das ordenadas da figura 29. Para tanto, interpolou-se os três primeiros valores de espaçamento e resistividade medidos, resultando em (38).

$$\rho(a) = -27,6a + 387 \quad (45)$$

Através de (45) para $a = 0$, encontra-se $\rho(a) = 387$ e, observando a figura 29, nota-se um valor de k negativo. Para $\rho_1 = 387 \Omega.m$ e seguindo os procedimentos do capítulo 6.1 para um valor de k negativo, são obtidos os valores do quadro 6.

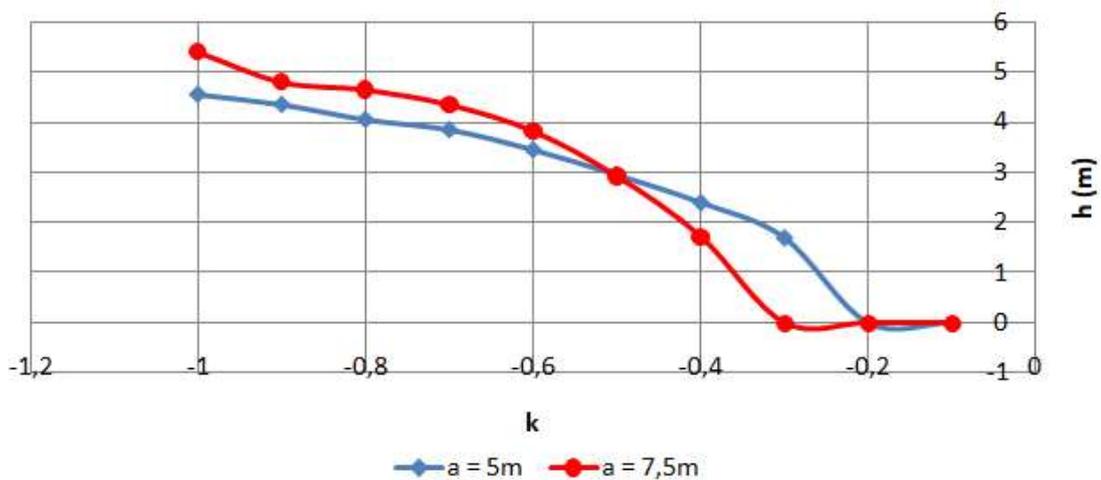
Quadro 6 - Valores do quinto e sexto passo do método de estratificação do solo em duas camadas através de curvas.

k	$a_1 = 5m \ \rho(a_1)/\rho_1 = 0,63$		$a_2 = 7,5m \ \rho(a_2)/\rho_1 = 0,47$	
	h/a	$h (m)$	h/a	$h (m)$
-0,1	0	0	0	0
-0,2	0	0	0	0
-0,3	0,34	1,7	0	0
-0,4	0,48	2,4	0,23	1,725
-0,5	0,59	2,95	0,39	2,925
-0,6	0,69	3,45	0,51	3,825
-0,7	0,77	3,85	0,58	4,35
-0,8	0,81	4,05	0,62	4,65
-0,9	0,87	4,35	0,64	4,8
-1	0,91	4,55	0,72	5,4

Fonte: O autor.

Com os valores de k e h do quadro 6, é possível traçar as curvas $k \times h$ observadas na figura 30, sendo que o ponto de interseção entre as duas curvas corresponderá à espessura da primeira camada do solo. Como mostra a figura 30, este ponto de interseção encontra-se aproximadamente em $k = -0,5$ para $h = 2,9m$. Sabendo os valores de ρ_1 , k e h , através de (28) obtém-se o valor de $\rho_2 = 129 \Omega.m$.

Figura 30 - Curvas $k \times h$



Fonte: O autor.

No quadro 7 são apresentados os resultados da estratificação do solo obtidos através de diferentes métodos, e a variação entre os valores obtidos com a ferramenta desenvolvida e os diferentes métodos de estratificação encontra-se no quadro 8.

Quadro 7 - Dados Experimentais.

Estratificação do Solo Calculada	Gradiente	Linearizado	Hooke-Jeeves	Hooke-Jeeves	Método de Curvas	Ferramenta Desenvolvida
Resistividade da 1ª Camada ($\Omega.m$)	383,49	364,67	364,33	377,33	387	372,93
Resistividade da 2ª Camada ($\Omega.m$)	147,65	143,61	144,01	145,4	129	145,85
Espessura da 1ª Camada (m)	2,56	2,82	2,827	2,65	2,9	2,67

Fonte: O autor.

Quadro 8 – Variação dos Resultados Obtidos.

	Variação (%)				
	Ferramenta Desenvolvida x Gradiente	Ferramenta Desenvolvida x Linearizado	Ferramenta Desenvolvida x Hooke-Jeeves	Ferramenta Desenvolvida x Hooke-Jeeves	Ferramenta Desenvolvida x Método de Curvas
Resistividade da 1ª Camada ($\Omega.m$)	2,83	-2,21	-2,31	1,18	3,77
Resistividade da 2ª Camada ($\Omega.m$)	1,23	-1,54	-1,26	-0,31	-11,55
Espessura da 1ª Camada (m)	-4,12	5,62	5,88	-0,75	8,61

Fonte: O autor

Analisou-se também dados de estratificação que foram obtidos no projeto da malha de terra da subestação SE ARENA GRÊMIO disponibilizados pela Companhia Estadual de Energia Elétrica CEEE-D. Os dados de resistividade medidos no ensaio para cada espaçamento, juntamente com os dados de

resistividade calculados através da ferramenta desenvolvida podem ser observados no quadro 9.

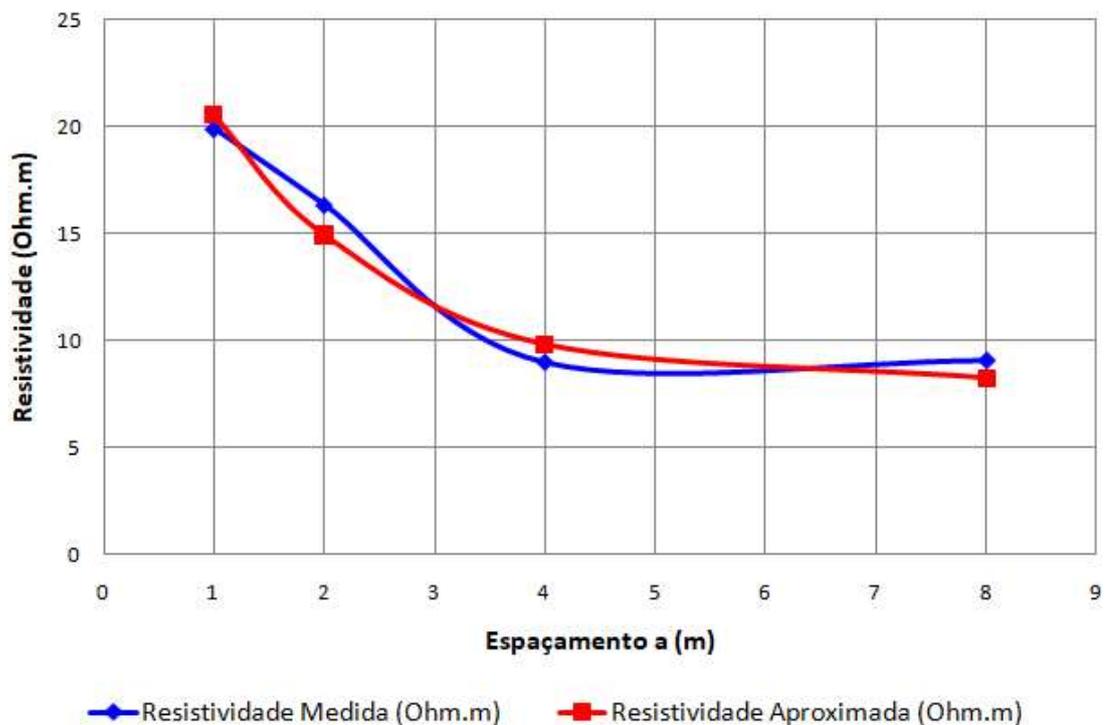
Quadro 9 – Valores de medição e valores calculados.

Espaçamento a (m)	Resistividade Medida ($\Omega.m$)	Resistividade Calculada ($\Omega.m$)	Varição (%)
1	19,92	20,56	3,21
2	16,34	14,96	-8,45
4	8,96	9,82	9,60
8	9,05	8,25	-8,84
16	7,71	7,84	1,69

Fonte: O autor.

Observa-se através da figura 31 as curvas $\rho(a) \times a$ traçadas de acordo com os dados de resistividade medida, curva em azul, e resistividade, calculada, curva em vermelho, que se encontram no quadro 9 para cada espaçamento a .

Figura 31 - Curvas $\rho(a) \times a$.



Fonte: O autor.

No quadro 10 são apresentados os resultados da estratificação do solo obtidos através do software utilizado pela CEEE-D e os resultados obtidos através da ferramenta desenvolvida, juntamente com a variação percentual entre estes valores.

Quadro 10 – Dados Experimentais.

Estratificação do Solo Calculada	Resistividade Medida ($\Omega.m$)	Resistividade Calculada ($\Omega.m$)	Variação (%)
Resistividade da 1 ^a Camada ($\Omega.m$)	23,01	23,18	0,74
Resistividade da 2 ^a Camada ($\Omega.m$)	7,8	8,02	2,82
Espessura da 1 ^a Camada (h)	1,27	1,21	-4,72

Fonte: O autor.

10.1 Análise de Resultados

Quanto aos resultados obtidos, de acordo com o quadro 5, observa-se uma pequena variação percentual entre os dados de resistividade medidos e calculados para o primeiro experimento, sendo as menores variações observadas nos extremos dos espaçamentos adotados. A curva resultante dos dados de resistividade calculada comporta-se de forma semelhante à curva resultante dos dados de resistividade medidos, como observa-se na figura 29.

No quadro 7 apresenta-se os valores obtidos através de diferentes métodos encontrados na bibliografia e o método utilizado no trabalho realizado, e no quadro 8, observa-se a variação dos valores obtidos com a ferramenta desenvolvida e os métodos encontrados na bibliografia. Destaca-se que os valores obtidos através da ferramenta desenvolvida seguem a mesma faixa dos valores obtidos por meio de otimização que são apresentados na bibliografia, não ultrapassando uma variação de 6%, entretanto, em comparação com o método de curvas, a variação mostra-se a maior em comparação com os demais métodos. Portanto, além do método de curvas ser mais trabalhoso, visto que devem ser observadas as curvas $\frac{\rho(a)}{\rho_1} x \frac{h}{a}$, os valores obtidos podem apresentar algumas discrepâncias, como mostra o quadro 8

principalmente no que se refere aos valores de resistividade da segunda camada e a espessura da primeira camada.

No segundo experimento, foram utilizados dados de resistividade medidos em campo disponibilizados pela CEEE-D e, em um primeiro momento, nota-se que os valores de resistividade são baixos, o que leva a crer que o solo tem uma característica úmida, equiparando-se à lama. Os resultados da estratificação encontrados no quadro 10 validam a ferramenta desenvolvida, pois as variações dos valores obtidos com a ferramenta desenvolvida e o software utilizado pela CEEE-D não ultrapassam a margem de 5%.

11 CONCLUSÕES

O estudo realizado mostra a importância da análise do solo a ser construída a malha de terra de uma subestação, onde a determinação dos parâmetros do solo pode ser realizada através de diferentes técnicas e abordagens, mas que resultados satisfatórios podem ser obtidos considerando previamente o solo como sendo estratificado em duas camadas e não homogêneo.

Foi desenvolvido o software com o intuito de efetuar os procedimentos de cálculo e facilitar a análise dos resultados da estratificação através dos parâmetros calculados e da interface gráfica apresentada.

Os resultados apresentados permitem concluir a viabilidade de desenvolver uma ferramenta de simples utilização para que seja uma alternativa confiável à utilização de softwares utilizados por grandes empresas, tendo em vista que validou-se a ferramenta através da análise dos resultados obtidos, com variação máxima de 2,83 para a resistividade da primeira camada, 2,82% para a resistividade da segunda camada e 5,88% para a espessura da primeira camada.

REFERÊNCIAS

[1] ONS OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Carga e Geração**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>> Acesso em: 10 de setembro de 2019.

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

[3] CARLETO, Nivaldo. **Subestações Elétricas**. Brasília: NT Editora, 2017.

[4] MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

[5] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações** - Requisitos, 2013.

[6] VISACRO FILHO, S. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber, 2002.

[7] TELLO, Marcos. **Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixas e Alta Frequências com Apresentação de Casos**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

[8] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1998.

[9] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Rio de Janeiro, 2012.

[10] SUNDE, E.D. **Earth conduction effects in transmission systems**. 2.ed. New York: Book Dover, 1968.

[11] SECCHI, Prof. Argimiro R. **COQ-897 OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS**. Rio de Janeiro, 2015.

[12] SACOMAN, Marco Antonio Rahal. **Otimização de Projetos Utilizando GRG, SOLVER e EXCEL**. Bauru, São Paulo, 2012.

[13] LASDON, L. S.; FOX, R. L.; RATNER, M. W. **Nonlinear Optimization using the Generalized Reduced Gradient Method**. *Revue Française d'Automatique, Informatique et Recherche Operationnelle*. França, 1974.

[14] Generalized Reduced Gradient. **Mathematical Programming Glossary**©.

Disponível em:

<https://glossary.informs.org/ver2/mpgwiki/index.php/Generalized_reduced_gradient_method>. Acesso em: 29 de novembro de 2019.

[15] DABBURA, Imad. **Gradient Descent Algorithm and Its Variants**. Towards Data Science, 2017. Disponível em: <<https://towardsdatascience.com/gradient-descent-algorithm-and-its-variants-10f652806a3>>. Acesso em: 29 de novembro de 2019.