

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Desenvolvimento de um Algoritmo de Cálculo da Resistência de Terra em Solos Heterogêneos com Eléttodos de Várias Configurações

Ricardo José Peixoto Coelho

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: José Rui da Rocha Pinto Ferreira

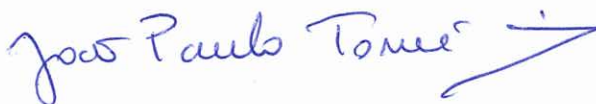
6 de Novembro de 2015

A Dissertação intitulada

“Desenvolvimento de um Algoritmo de Cálculo da Resistência de Terra em Solos Heterogéneos com Eléttodos de Várias Configurações”

foi aprovada em provas realizadas em 21-10-2015

o júri



Presidente **Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva**

Professor Associado do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professora Doutora Fernanda de Oliveira Resende

Professora Auxiliar da Universidade Lusófona



Professor Doutor José Rui da Rocha Pinto Ferreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Ricardo José Peixoto Coelho

Resumo

Hoje em dia, um sistema de terras é visto como sendo de extrema importância. Assim, deve ser realizado com critério rigoroso para que as correntes de defeito sejam escoadas para a terra e juntamente com os aparelhos de proteção diferencial, seja possível retirar de serviço o circuito com defeito, protegendo pessoas, animais e a própria instalação onde o sistema de terras está implementado.

Como o cálculo da resistência do sistema de terras depende da configuração do mesmo e da resistividade do solo onde está inserido, torna-se indispensável, primeiro, conhecer as características do solo, ou seja, estratificar o solo em camadas, e, só depois de resolver este problema, configurar um sistema de terras para o solo em questão, que satisfaça os valores de resistência de terra pré-definidos para a instalação.

Assim neste documento, será demonstrado como estratificar um solo heterogêneo em duas camadas utilizando o algoritmo genético, o método de Newton-Raphson, o método gráfico e o método das assíptotas.

Depois de se conhecer as características do solo, será estudado numa primeira fase a resistência de terra para solos homogêneos, onde com base na formulação deste estudo serão desenvolvidos os métodos de cálculo da resistência de terra para várias configurações de elétrodos implementados em solos heterogêneos com duas camadas. Por fim, será realizado uma análise sobre a influência de cada elemento do cálculo da resistência de terra, tais como o comprimento dos elétrodos e os espaçamentos entre os mesmos, e da configuração dos elétrodos.

Abstract

Nowadays, a grounding system is seen as being of very importance. It should therefore be performed with strict criteria so that the fault currents are disposed to land and alongside the differential protection devices, it is possible to decommission the fault circuit, protecting people, animals and the very facility where the grounding system is implemented.

As the calculation of the grounding system resistance depends on the configuration of the same and soil resistivity which is inserted, it is essential, first, to know the soil characteristics, i.e., stratify the soil in layers, and only after solve this problem, set up a grounding system to the ground in question, which meets the ground resistance values predefined for installation.

So this document is shown to stratify a heterogeneous soil in two layers using the genetic algorithm, the Newton-Raphson method and the graphic method of asymptotes.

Once you know the soil characteristics will be studied initially earth resistance for homogeneous soils, where based on the formulation of this study will develop the earth resistance calculation methods for various electrode configurations deployed in heterogeneous soils with two layers. Finally, an analysis will be conducted on the influence of each element of the calculation of the ground resistance, such as the length of the electrodes and spacings between them, and the configuration of electrodes.

Agradecimentos

O meu sincero agradecimento ao meu orientador Professor José Rui Ferreira, pela forma de como atendeu à minha vontade de desenvolver os meus conhecimentos sobre esta temática, pelo o apoio prestado e pelas suas recomendações.

Ao Eng^o Nuno do LABELEC, pelo esclarecimento de algumas dúvidas iniciais, e acima de tudo pela ajuda preciosa no desenvolvimento do software. Pois sem os dados simulados no seu local de trabalho, não seria possível de desenvolver os métodos utilizados no software.

À Ana Flores, pela constante disponibilidade, pela motivação e apoio e pela documentação fornecida, que no início do desenvolvimento desta dissertação, me foi particularmente útil.

Aos meus pais, pelas condições que me proporcionaram para que pudesse continuar a estudar, a quem dedico esta dissertação. Agradeço também por me terem acompanhado e apoiado durante todo o percurso académico, assim como em todas as fases da minha vida.

À minha madrinha e padrinho, aos meus avós e tios, em particular ao meu tio Luís, pela disponibilidade e ajuda prestada ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao meu irmão Eduardo e à Vânia Rodrigues pela paciência e por estarem sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis e stressantes, no desenvolvimento desta dissertação e também ao longo de todo o curso.

Aos meus amigos, quero agradecer pelo apoio e pelos momentos de descontração e pedir desculpas por em muitos momentos, me ausentar por longos períodos de tempo devido ao imenso trabalho que esta dissertação acarretou.

A todos o meu Muito Obrigado!

Ricardo José Peixoto Coelho

“Persistence is the shortest path to success.”

Charles Chaplin

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Sistemas de Terra	5
2.1	Características e implementação de um sistema de terras	5
2.2	Eléttodos de Terra	6
2.3	Porquê ligar à terra?	7
2.4	Proteção Diferencial	7
2.5	Dispositivos diferenciais e os regimes de neutro	9
2.5.1	Regime de neutro TT	10
2.5.2	Regime de neutro TN	10
2.5.3	Regime de neutro IT	11
2.6	Resumo	12
3	Estratificação do Solo	15
3.1	Resistividade do solo	15
3.2	Resistividade do solo em Portugal	17
3.3	Método de <i>Wenner</i>	18
3.4	Avaliação das medidas	21
3.5	Estratificação do solo em duas camadas	22
3.6	Resumo	26
4	Algoritmos de Otimização	27
4.1	O Problema Inverso	27
4.2	Solução para o Problema Inverso	28
4.3	Método das assintotas	30
4.4	Algoritmo Genético	32
4.4.1	População inicial	34
4.4.2	Clonar	35
4.4.3	Mutação	36
4.4.4	Avaliação	38
4.4.5	Seleção	38
4.5	Método de Newton-Raphson	40
4.6	Método Gráfico	44
4.6.1	Método das bisseções sucessivas	48
4.7	Resumo	49

5	Resistência de Terra	51
5.1	Sistemas de Terra	51
5.1.1	Limite da Resistência de Terra	52
5.2	Cálculo da Resistência de Terra em Solos Homogêneos	54
5.2.1	Elétrodo Vertical	54
5.2.2	Elétrodos Alinhados em Paralelo	55
5.2.3	Comparação entre métodos	60
5.2.4	Índice de Redução	62
5.3	Cálculo da Resistência de Terra em Solos de Duas Camadas	63
5.3.1	Malhas de terra	64
5.3.2	Elétrodos alinhados inseridos apenas na primeira camada	65
5.3.3	Elétrodos em paralelo alinhados inseridos nas duas camadas	66
5.3.4	Comparação entre métodos	68
5.4	Outras configurações	71
5.4.1	Configuração em Pé de Galo	71
5.4.2	Configuração em Estrela	71
5.4.3	Configuração em Anel	72
5.4.4	Comparação entre configurações	73
5.5	Resumo	74
6	Aplicação do Programa de Cálculo	75
6.1	Estratificação do solo	75
6.1.1	Algoritmo Genético	76
6.1.2	Método de Newton-Raphson	77
6.1.3	Método Gráfico	78
6.2	Resistência de Terra	79
6.2.1	Variação da resistência de Terra com o número de elétrodos	79
6.2.2	Variação da resistência de Terra com o comprimento dos elétrodos	80
6.2.3	Variação da resistência de Terra com o diâmetro dos elétrodos	83
6.2.4	Variação da resistência de Terra com o espaçamento entre elétrodos	84
6.2.5	Variação da resistência de Terra com a profundidade de enterro dos elétrodos	85
6.3	Resumo	87
7	Conclusões e Trabalho Futuro	89
7.1	Trabalho Futuro	91
A	Manual do software	93
A.1	Menu inicial	93
A.2	Resistividade do Solo	94
A.3	Resistência de terra	95
A.4	Proteção contra erros	96
A.5	Diagrama de estados	96
	Referências	99

Lista de Figuras

2.1	Eléctrodo de terra enterrado no solo	6
2.2	Aparelhagem de proteção diferencial	8
2.3	Esquema de um DDR monofásico [5]	8
2.4	Esquema TT [5]	10
2.5	Esquema TN-C-S [5]	11
2.6	Esquema IT [5]	12
3.1	Distribuição da corrente nos eléctrodos de terra [10]	16
3.2	Solo com duas camadas [11]	16
3.3	Resistividade média do solo em Portugal [9, 12, 13]	17
3.4	Método de <i>Wenner</i>	18
3.5	Medição da resistividade do solo para diferentes espaçamentos entre eléctrodos [15]	19
3.6	Direções de medida para sistemas de terras pequenos [16]	20
3.7	Direções de medida para sistemas de terras para subestações[17]	20
3.8	Solo estratificado em 2 camadas	22
3.9	Método de <i>Wenner</i> no solo de duas camadas	24
3.10	Significado da série infinita na equação da resistividade aparente (3.18).	25
4.1	Problema Direto e Problema Inverso	28
4.2	Fluxograma do problema inverso	29
4.3	Curvas $\rho(a) \times a$ para solos de duas camadas	30
4.4	Método de <i>Wenner</i> com $a = h$	31
4.5	Curva $\rho(a) \times a$ de um solo de duas camadas	31
4.6	Fluxograma do Algoritmo Genético	33
4.7	Formação de um indivíduo	34
4.8	Inicialização	35
4.9	População	35
4.10	Criação da população de clones	36
4.11	População de clones após a mutação	36
4.12	Distribuição Normal	37
4.13	Nova matriz da população	37
4.14	Anexação dos erros de aproximação associado a cada indivíduo	38
4.15	Avaliação dos indivíduos	38
4.16	Organização dos indivíduos	39
4.17	Seleção dos melhores indivíduos	39
4.18	Método de Newton-Raphson [33]	40
4.19	Comportamentos indesejáveis no método de Newton-Raphson [33]	41
4.20	Fluxograma do método de Newton-Raphson	44

4.21	Curvas $\rho_a(a) \times a$	45
4.22	Curvas para coeficiente de reflexão K negativos	45
4.23	Curvas para coeficiente de reflexão K positivos	46
4.24	Interseção das curvas $K \times h$	47
4.25	Fluxograma do método gráfico	47
4.26	Método das bisseções sucessivas [33]	48
5.1	Modelo elétrico para um eletrodo de terra e para eletrodos de terra em paralelo [39]	52
5.2	Eletrodo vertical enterrado num solo homogéneo	54
5.3	Comparação dos resultados obtidos pela equações (5.2) e (5.3)	55
5.4	Linhas equipotenciais de um eletrodo vertical enterrado num solo homogéneo [16]	56
5.5	Interferências entre eletrodos paralelos [16]	56
5.6	Linhas equipotenciais entre dois eletrodos verticais enterrados num solo homogéneo [16]	57
5.7	Distâncias necessárias para o cálculo de R_i	58
5.8	Agregação das resistências em paralelo	59
5.9	Variação dos espaçamentos para eletrodos em paralelo em solo homogéneo	61
5.10	Variação do número de eletrodos em paralelo em solo homogéneo	62
5.11	Comparação da redução dos valores da resistência de terra em função do espaçamento e do número de eletrodos em paralelo	63
5.12	Eletrodos enterrados num solo de duas camadas	64
5.13	Eletrodo enterrado num solo heterogéneo	67
5.14	Comparação dos resultados obtidos pelos métodos com os valores simulados	69
5.15	Análise dos valores da resistência de terra com a inversão das resistividade das diferentes camadas do solo	70
5.16	Configuração em Pé de Galo	71
5.17	Configuração em Estrela	72
5.18	Configuração em Anel	72
5.19	Comparação dos diferentes tipos de configurações de eletrodos	73
6.1	Comparação entre curvas para o Algoritmo Genético	76
6.2	Comparação entre curvas para o Método de Newton-Raphson	77
6.3	Comparação entre curvas para o Método Gráfico	78
6.4	Variação do número de eletrodos para o <i>Método 1</i>	80
6.5	Variação do número de eletrodos para o <i>Método 2</i>	80
6.6	Variação do comprimento dos eletrodos para o <i>Método 1</i>	81
6.7	Variação do comprimento dos eletrodos para o <i>Método 2</i>	81
6.8	Relação da resistência de terra com o comprimento dos eletrodos [52]	82
6.9	Sistema de união dos eletrodos de terra	82
6.10	Variação do diâmetro dos eletrodos para o <i>Método 1</i>	84
6.11	Variação do diâmetro dos eletrodos para o <i>Método 2</i>	84
6.12	Variação do espaçamento entre eletrodos para o <i>Método 1</i>	85
6.13	Variação do espaçamento entre eletrodos para o <i>Método 2</i>	85
6.14	Variação da profundidade de enterro dos eletrodos para o <i>Método 1</i>	86
6.15	Variação da profundidade de enterro dos eletrodos para o <i>Método 2</i>	86
A.1	Menu inicial	93
A.2	Painel do cálculo da resistividade do solo	94
A.3	Painel do cálculo da resistência de terra	95

A.4	Janela de erro	96
A.5	Diagrama de estados do software	97

Lista de Tabelas

4.1	Exemplo com cinco medidas experimentais	28
4.2	Leitura de h/a	46
4.3	Dados das curvas $K \times h$	47
5.1	Limites para os valores da resistência de terra para instalações a cargo da EDP . .	53
5.2	Resistência de terra em função de $I_{\Delta n}$	53
5.3	Dados da figura 5.3	55
5.4	Variação do espaçamento dos elétrodos em solo homogéneo	60
5.5	Variação do número de elétrodos em paralelo em solo homogéneo	61
5.6	Índice de redução	63
5.7	Variação do comprimento dos elétrodos num solo heterogéneo de duas camadas .	68
5.8	Variação das resistividades do solo heterogéneo	69
5.9	Comparação entre diferentes configurações	73
6.1	Medições efetuadas pelo método de <i>Wenner</i>	75
6.2	Dados adicionais para o Algoritmo Genético	76
6.3	Resultados obtidos após a simulação para o Algoritmo Genético	76
6.4	Resultados obtidos após a simulação para o Método de Newton-Raphson	77
6.5	Resultados obtidos após a simulação para o Método Gráfico	78
6.6	Coefficientes de reflexão	79
6.7	Variação do número de elétrodos	79
6.8	Variação do comprimento dos elétrodos	81
6.9	Variação do diâmetro dos elétrodos	83
6.10	Variação do espaçamento entre elétrodos	84
6.11	Variação da profundidade de enterro dos elétrodos	86

Abreviaturas e Símbolos

FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
EDP	Energias de Portugal
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MT	Média Tensão
PT	Posto de transformação
DDR	Dispositivo Diferencial Residual
R	Resistência elétrica
a	Espaçamento entre elétrodos
$\rho_{mdio}(a)$	Resistividade aparente média correspondente ao espaçamento a
ρ_a	Resistividade aparente
V	Potencial elétrico
ρ_1	Resistividade da primeira camada
ρ_2	Resistividade da segunda camada
h	Profundidade da primeira camada
K	Coefficiente de reflexão
U_L	Tensão limite convencional de contacto
d	Diâmetro do eléctrodo
ℓ	Comprimento do eléctrodo
N	Número de elétrodos
τ	Índice de redução
h_e	Profundidade de enterro dos elétrodos
ℓ_1	Comprimento do eléctrodo inserido na primeira camada
ℓ_2	Comprimento do eléctrodo inserido na segunda camada
$\rho_{aT}(a)$	Resistividade aparente teórica em função do espaçamento entre elétrodos
$\rho_{aE}(a)$	Resistividade aparente experimental em função do espaçamento entre elétrodos

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, a qualidade de vida, mesmo nos países menos desenvolvidos, não seria a mesma sem a presença da energia elétrica pelo que se pode afirmar que o mundo está praticamente dependente da energia elétrica. Desde a produção de alimentos até a cuidados hospitalares, passando pelo desenvolvimento de novas tecnologias que facilitam o nosso quotidiano, a energia elétrica está sempre presente. No entanto, é preciso ter cuidado quanto à sua utilização.

Só em Portugal no ano transato, ou seja, em 2014, foram contabilizadas pelo menos 30 mortes devido a acidentes elétricos [1]. Por isso, todos os engenheiros eletrotécnicos e eletricitas devem estar consciencializados que para além da eletricidade ser um bem essencial para a população mundial, esta também é potencialmente perigosa e faz vítimas todos os anos. Assim sendo, quando um projeto elétrico é executado, é importante não haver facilitismos por parte dos engenheiros e eletricitas, de modo a reduzir o número de vítimas e garantir a segurança dos utilizadores.

Numa instalação elétrica, o número de equipamentos como eletrodomésticos ou máquinas, tende a aumentar de ano para ano, provocando assim um aumento da sua complexidade. Por vezes, estes equipamentos com o decorrer dos anos ficam desgastados e avariam. Estas avarias podem ser potencialmente perigosas para os seus utilizadores e para o próprio equipamento. Para o caso dos utilizadores, é muito recorrente em caso de avarias, surgirem na carcaça dos equipamentos tensões muito perigosas para o ser humano. Um exemplo deste tipo de equipamentos são os frigoríficos e máquinas de lavar roupa muito comum nas nossas casas. No caso dos equipamentos, estes podem danificar a instalação elétrica e num caso extremo provocar um incêndio. Importa referir que a própria instalação elétrica, ao longo do tempo também envelhece, pelo que também pode provocar avarias e colocar em perigo os utilizadores.

Uma vez surgido o defeito, o sistema de terras deve ser capaz de escoar de forma rápida, segura e eficaz as correntes de defeito e de curto-circuito para o solo provocadas pelo referido defeito. Deste modo, o sistema de terras deve apresentar uma resistência de terra mais baixa possível, facilitando desta forma o escoamento das correntes de defeito e de curto-circuito para o solo. Também o tempo de atuação dos equipamentos de proteção e a eficiência dos mesmos é melhorada devido à baixa resistência do sistema de terras, permitindo retirar de serviço os circuitos defeituosos num menor tempo possível. Assim a proteção do ser humano e da própria instalação é

melhorada, pelo que os sistemas de terras tem um papel fundamental na segurança das instalações elétricas.

O valor da resistência de terra depende da configuração dos elétrodos, das características dos elétrodos e do próprio solo envolvente. Nesta dissertação será abordado o tema da resistividade do solo, com vista a obter as características de um solo heterogéneo de duas camadas e a respetiva resistência de terra para várias configurações de elétrodos de terra. Uma vez que o tema da dissertação é desenvolver um software de cálculo para a resistência de terra, juntamente com a informação teórica dos temas, serão explicados e justificados todos os passos que permitiram o seu desenvolvimento.

1.1 Motivação

Nas últimas décadas, os sistemas de terras tem ganho um relevo enorme nas instalações elétricas, quer em subestações quer em edifícios. Como esta temática é muito incerta e pouco desenvolvida faz com que a maior parte dos sistemas de terras em edifícios seja realizada de uma forma aleatória até obter os valores de resistência de terra pretendidos. Na prática, um sistema de terra é realizado seguindo o método tentativa e erro, ou seja, inicialmente começa-se por enterrar um elétrodo no solo e efetua-se uma medição para conhecer o valor da resistência deste sistema de terras, enquanto os valores medidos não satisfizerem os requisitos, continua-se a colocar elétrodos no solo e a medir a resistência do sistema até se alcançarem os valores desejados.

Logo, os principais motivos para a realização desta dissertação, são realizar um estudo aprofundado sobre sistemas de terras em solos heterogéneos de duas camadas, e a partir dos conhecimentos obtidos produzir um software que permita estratificar o solo e calcular a resistência de terra de um determinado sistema de elétrodos. Um outro motivo desta dissertação, é com este software otimizar a execução de sistemas de terras, principalmente em edifícios e com isso economizar no custo do sistema, poupando no material e na mão-de-obra.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um algoritmo para o cálculo da resistência de terra para solos heterogéneos com elétrodos de várias configurações, para que futuros sistemas de terras possam ser implementadas com mais rigor e critério, aumentando a qualidade destes sistemas e possivelmente diminuindo o seu custo. É importante referir que os sistemas de terras estão diretamente relacionados com a velocidade de atuação dos aparelhos de proteção diferencial, pelo que ao melhorar a qualidade dos sistemas de terras, que por outras palavras significa diminuir a sua resistência, a corrente de defeito vai ser maior, permitindo assim aos aparelhos de proteção diferencial retirar de serviço o circuito defeituoso.

Assim sendo, é importante definir etapas para o processo de investigação de soluções e para a realização do software:

- Estudo da resistividade do solo, assim como métodos para medir esta resistividade;

- Pesquisa de soluções e algoritmos para o problema inverso da estratificação do solo de duas camadas;
- Estudo de métodos de cálculo de resistência de terra em solos heterogêneos;
- Desenvolver o algoritmo para o cálculo da resistência de terra em sistemas com N eletrodos e em solos com duas camadas;
- Testar a veracidade do programa de cálculo com um sistema de terra exemplo.

1.3 Estrutura da Dissertação

O documento está estruturado em sete capítulos, que desenvolveram todos os aspectos teóricos subjacentes ao tema desta dissertação. De seguida segue-se uma descrição sumaria de cada um:

O capítulo 1 é de carácter introdutório à presente dissertação, onde se apresenta o enquadramento da dissertação e motivações, define-se objetivos e descreve-se a estrutura do documento.

No capítulo 2 serão apresentados conceitos básicos sobre sistemas de terras, assim como as suas funções. Também irá ser abordado o tema de dispositivos de proteção diferencial, uma vez que está diretamente relacionado com os sistemas de terras.

No capítulo 3 irá ser abordado o tema da resistividade do solo. Assim sendo, neste capítulo serão apresentados métodos de medir a resistividade aparente, e será demonstrada a equação que será usada para a modelagem do solo em duas camadas.

No capítulo 4 será resolvido o problema inverso da estratificação do solo em duas camadas, isto é, através da resistividade aparente medida em campo, obter o solo equivalente com duas camadas de resistividades diferentes. Portanto, irão ser demonstradas a adaptação do algoritmo genético, o método de Newton-Raphson e o método das curvas, assim com a descrição das principais vantagens e desvantagens para cada método.

No capítulo 5 irá ser abordado o tema do cálculo da resistência de terra. Assim sendo, serão apresentadas fórmulas de cálculo para sistemas de terra em malha, sistemas de terras em anéis e uma possível fórmula de cálculo para sistemas com N eletrodos em paralelo, já que este tipo de configuração é muito pouco desenvolvida pela comunidade científica que estuda este tipo de casos. Salienta-se o facto de estas fórmulas serem para sistemas de terras realizados em solos com duas camadas.

No capítulo 6 será apresentado o software produzido para a presente dissertação, assim como alguns testes e análise dos resultados do software que permitem a sua validação. Este capítulo divide-se em duas partes, sendo uma primeira parte relativa a modelização de solos heterogêneos a partir de medições de resistividade aparente, e uma segunda parte relativa ao cálculo de resistências de terra.

No capítulo 7 serão apresentadas as principais conclusões retiradas no decorrer do trabalho, assim como sugestões de possíveis para trabalhos que poderão ser realizados no futuro.

Capítulo 2

Sistemas de Terra

Como a presente dissertação pretende estudar sistemas de terras para instalações elétricas, ou seja, sistemas de terra não direcionadas para subestações como o caso de malhas de terra, este capítulo tem o objetivo de apresentar conceitos preliminares sobre este tipo de sistemas de terras. Assim, irá ser abordada a constituição e as funções a desempenhar pelo sistemas de terras numa instalação elétrica, assim como os requisitos a obedecer na sua realização.

Contudo, não serão tratados os assuntos relativos à segurança dos sistemas de terras, como por exemplo os efeitos da corrente no corpo humano, tensão de passo e tensão de toque. No entanto, estes assuntos são aprofundados em [2]. Porém, será estudada a relação entre os sistemas de terra, com os dispositivos de proteção diferencial e os regimes de neutro.

2.1 Características e implementação de um sistema de terras

Um sistema de terra é um circuito elétrico constituído por elétrodos, por condutores e pelos equipamentos a ele ligados. Assim sendo, este sistema tem a função de escoar para o interior do solo todos os tipos de correntes de terra, sendo estas correntes provenientes de descargas atmosféricas ou correntes de defeito à frequência de $50Hz$.

Portanto, para que uma ligação à terra seja boa, não é suficiente que a resistência desta ligação seja baixa na hora em que se realizou a última medição, sendo necessário que a resistência de terra de um sistema de terra seja o mais baixa possível ao longo do seu tempo de duração e ao longo das estações do ano, garantindo assim que o aparecimento de tensões de passo e de contacto não sejam elevadas em nenhum momento do ano. Assim sendo, a fim de evitar o aumento da resistividade do terreno onde está situado o sistema de terras, devido ao gelo no inverno, ou à redução da humidade no solo no verão, os elétrodos de terra, ou outro tipo de material condutor como chapas ou tubos, devem ficar enterrados a uma profundidade mínima de $0,8\text{ m}$, e para cabos e fitas, esta profundidade não deve ser inferior a $0,6\text{ m}$ [3].

Existem dois tipos de sistemas de terras, nomeadamente, terra de proteção e terra de serviço. Designa-se por terra de serviço quando somente pontos de circuitos elétricos são ligados à terra, com a finalidade de influenciar as condições de exploração destes circuitos elétricos, como por

exemplo a fixação do potencial. Designa-se de terra de proteção quando todas as partes metálicas de uma instalação normalmente sem tensão, mas com hipóteses de ocorrer uma passagem fortuita de corrente capaz de provocar diferenças de potencial perigosas e principalmente não previstas são ligadas a um sistema de terras.

2.2 Elérodos de Terra

Um eléctrodo de terra é um material condutor enterrado em contacto direto com o solo, ou então embebido em betão em contacto com o solo, destinado a assegurar uma boa ligação eléctrica com a terra, como ilustra a figura 2.1. Portanto, é através do eléctrodo de terra que as correntes de defeito e de descargas atmosféricas escoam para a terra. Assim sendo, os eléctrodos de terra devem possuir um conjunto de características que os tornem indicados para o objetivo em vista. Logo, estes eléctrodos devem ser de materiais metálicos, como por exemplo o cobre, ferro fundido, ferro zincado ou ligas, suficientemente resistentes à corrosão de forma a suportarem as agressões impostas pelo solo, onde estes eléctrodos vão ficar implementados. Também é necessário considerar as ações destrutivas resultantes das solicitações eléctricas e químicas para que o potencial e o gradiente de potencial à superfície do solo seja menor.



Figura 2.1: Eléctrodo de terra enterrado no solo

Mas um sistema de terras não se faz só com eléctrodos de terra, é necessário também condutores de terra para interligar os eléctrodos, com os respetivos acessórios de ligação. Os sistemas de terra por sua vez são idealizados consoante as proteções de contacto ou defeitos à terra, pelo que a sua resistência de terra é limitada em função do tipo de proteção e finalidade. Posto isto, se a resistência de terra for muito elevada, quando um condutor se coloca em contacto com uma parte

metálica de uma instalação ou equipamento ligados à terra, originará uma corrente de defeito muito baixa. Assim, neste caso os aparelhos de proteção diferencial e de sobrecarga não atuaram, pelo que a parte metálica em questão estará com uma tensão potencialmente perigosa e difícil de detetar antes de um acidente.

2.3 Porquê ligar à terra?

Com o objetivo de garantir a eficiência de exploração, e mais importante ainda, garantir a segurança dos seus utilizadores torna-se cada vez mais vital a existência de um sistema de terras numa instalação. Os níveis de tensão e correntes de defeito em causa em certos equipamentos podem ser mortais, pelo que o aspeto da segurança das pessoas torna-se numa questão completamente incontornável. Contudo, os custos relacionados à reparação ou à substituição de equipamentos implica que a própria salvaguarda do material seja igualmente uma questão de alta relevância, bem como a proteção contra incêndio e ruído em circuitos eletrónicos. Assim, como já referido, estes sistemas tem como função a proteção de pessoas, instalações e equipamentos, e portanto, o seu projeto e execução necessita de especial cuidado [4].

Em resumo, um sistema de terra pretende assegurar:

- A segurança das pessoas;
- A integridade do equipamento;
- Proteção contra uma situação de potencial incêndio;
- Proteção do equipamento eletrónico;
- Criação de um potencial de referência.

2.4 Proteção Diferencial

Um sistema de terras por si só não protege pessoas e bens de uma instalação, à exceção de um sistema de terras com a finalidade de escoar correntes provenientes das descargas atmosféricas. Assim sendo, é obrigatório complementar a proteção de pessoas e a própria instalação com equipamentos de proteção diferencial.

Um dispositivo diferencial residual (DDR), é um equipamento de proteção que verifica constantemente as correntes residuais existentes numa instalação elétrica ou apenas em alguns circuitos. Na figura 2.2 estão representados um dispositivo diferencial residual monofásico e um trifásico. Como a corrente elétrica circula num circuito fechado, a soma das correntes dos condutores ativos, ou seja, fases e neutro, é nula. Assim, de uma forma resumida, os dispositivos diferenciais residuais medem a soma das correntes de todos os condutores ativos, e calculam indiretamente qual o valor da corrente desviada para a terra.



Figura 2.2: Aparelhagem de proteção diferencial

Portanto, um dispositivo diferencial residual é constituído por um toro, um sistema de desarme e contactos elétricos, como ilustra a figura 2.3. O toro é constituído por material ferromagnético, e é utilizado para verificar a corrente elétrica no seu estado de funcionamento normal. Assim, no caso de ausência de defeitos, a soma das correntes dos condutores ativos deverá ser nula, e portanto, os contactos do DDR deverão manter-se fechado, caso contrário deverão abrir imediatamente [5].

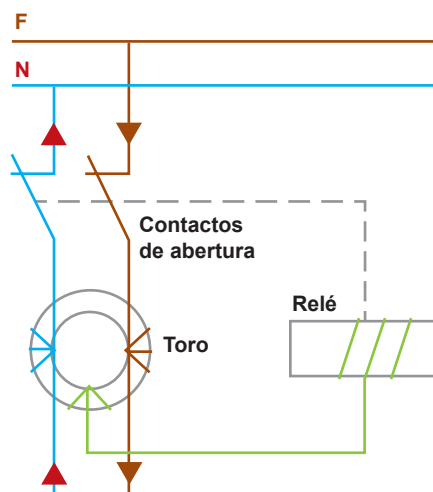


Figura 2.3: Esquema de um DDR monofásico [5]

O sistema de desarme é composto por um relé eletromecânico ou eletrônico. No caso dos sistemas eletromecânicos, uma corrente é conduzida do toro para um relé de imane permanente de ferro e níquel. Na ocorrência de um desequilíbrio na corrente que chega ao relé, este inverte o campo magnético do imane permanente e faz com que um êmbolo seja acionado, fazendo atuar o

mecanismo de disparo. No sistema eletrónico, a corrente que é enviada para o relé é amplificado, que consequentemente faz atuar uma bobina de disparo.

Os contactos elétricos que constituem um DDR, por ação do relé ou da bobina de disparo, abrem o circuito, interrompendo a alimentação do mesmo.

Uma vez que este tipo de dispositivo são exclusivamente para instalações de corrente alternada, a diferença entre estes depara-se no tipo de correntes de fugas que são capazes de detetar. Logo, os DDR são divididos em três classes [6]:

- Classe AC – dispositivos sensíveis apenas a correntes alternadas sinusoidais. Esta classe é a mais usada para as aplicações mais comuns em Portugal.
- Classe A – dispositivos sensíveis a correntes alternadas sinusoidais e a corrente alternada com componente contínua pulsante, geradas por cargas não lineares, como é o caso dos retificadores de onda tipo ponte de wheatstone.
- Classe B – dispositivos sensíveis a correntes alternadas sinusoidais, a corrente alternada com componente contínua pulsante e a correntes contínuas puras. Esta classe adequa-se a circuitos para inversores, ascensores, UPS, variadores trifásicos e equipamentos médicos.

Posto isto, a sensibilidade de um aparelho de proteção diferencial é definida pela Corrente Diferencial Residual Estipulada (I_{an}), isto é, o valor de corrente de fuga originário de um defeito, que obrigatoriamente provoca a abertura do circuito defeituoso, sendo que por vezes o circuito abre para valores inferiores, mas próximos do valor estipulado. Assim, as normas IEC definem três categorias, quanto à sensibilidade de um DDR e de acordo com o seu valor estipulado I_{AN} :

- Alta sensibilidade – 6mA, 10mA e 30mA;
- Média sensibilidade – 100mA, 300mA, 500mA e 1A;
- Baixa sensibilidade – 3A, 10A e 30A.

Os dispositivos de alta sensibilidade são os mais utilizados em habitações, pois são os mais indicados para proteger os utilizadores da instalação contra contactos indiretos. Os de média sensibilidade tem como principal objetivo a proteção contra riscos de incêndio. No entanto, ambos os dispositivos, tanto os de alta sensibilidade como os de média sensibilidade asseguram ainda a proteção contra contactos indiretos, assim com a proteção de equipamentos.

2.5 Dispositivos diferenciais e os regimes de neutro

Para garantir a correta proteção de pessoas contra todos os tipos de defeitos que eventualmente possam acontecer numa instalação, conforme o regime de neutro existente, é fundamental aplicar as proteções adequadas. Assim sendo, segundo a norma internacional IEC 60364, o regime de neutro de uma instalação de baixa tensão é determinada pela posição do neutro e das massas, ou seja, todas as partes metálicas onde a tensão é normalmente nula [7].

2.5.1 Regime de neutro TT

O regime de neutro TT é o mais utilizado, uma vez que em habitações apenas é permitido este tipo de regime de neutro. Neste regime, o neutro é ligado diretamente à terra de serviço e as massas são ligadas à terra de proteção, e é obrigatório o uso de dispositivos de proteção diferencial, assim como interruptores diferenciais, disjuntores diferenciais ou relés diferenciais, como mostra a figura 2.4. No entanto, todas as massas protegidas pelo mesmo dispositivo de proteção diferencial devem ser ligadas à mesma terra de proteção. De salientar que, a terra de serviço e a terra de proteção são sistemas de terras distintos. Assim, a saída de serviço do circuito defeituoso é obrigatória logo ao primeiro defeito de isolamento.

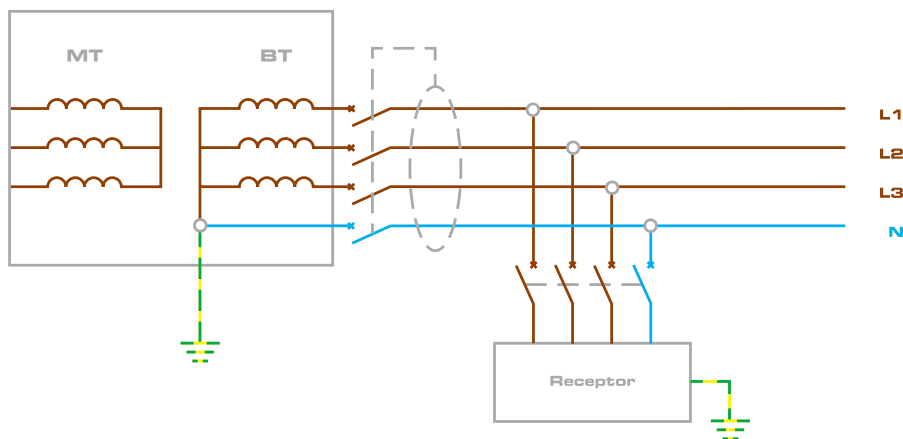


Figura 2.4: Esquema TT [5]

2.5.2 Regime de neutro TN

O regime de neutro TN é usado principalmente em instalações industriais ou em redes elétricas, nas quais é complicado e dispendioso conseguir boas ligações à terra ou devido à grande potência dos circuitos não ser possível proteger estes com dispositivos diferenciais. A terra de serviço e a terra de proteção estão ligados ao mesmo sistema de terras. Portanto, consideram-se três tipos de regimes de neutro TN.

2.5.2.1 Regime de neutro TN-C

Neste regime de neutro, o neutro e a terra de proteção seguem num condutor único, sendo expressamente proibido efetuar o corte do neutro por algum equipamento de manobra. Contudo, a proteção de contactos diretos e indiretos está assegurada pelos equipamentos de proteção contra sobrecorrentes, tais como os disjuntores e os fusíveis. No entanto, é impotente referir que este tipo de regime pode ser muito interessante com o intuito de baixar o custo da instalação. Se a corrente de defeito não for suficiente para atuar estes equipamentos de proteção contra sobrecorrentes, a instalação deve ser redimensionada para que a proteção de pessoas esteja garantida.

2.5.2.2 Regime de neutro TN-S

Neste regime de neutro, o neutro e a terra de proteção seguem em condutores separados. Assim, a proteção contra contactos diretos e indiretos, fica garantida pelos dispositivos de proteção diferencial.

2.5.2.3 Regime de neutro TN-C-S

Este regime é um regime misto, pois uma parte de instalação tem um regime de neutro TN-C e outra parte da instalação tem o regime de neutro TN-S, efetuando-se em cada um dos regimes a proteções anteriormente descritas, como ilustra a figura 2.5. Como a separação do neutro com o condutor de proteção é obrigatória antes da proteção diferencial, implica que o regime TN-C se localize sempre a montante das proteções diferenciais e o regime TN-S a jusante das proteções diferenciais. Assim, em qualquer regime TN, a saída de serviço do circuito defeituoso é obrigatório logo ao primeiro defeito de isolamento.

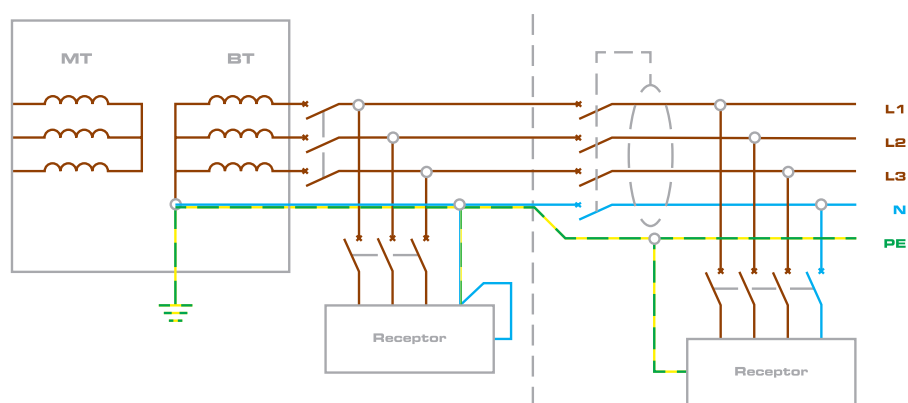


Figura 2.5: Esquema TN-C-S [5]

2.5.3 Regime de neutro IT

O regime IT é um regime em que o neutro fica isolado, ou seja, o neutro não é ligado à terra ou então é ligado através de uma impedância de valor elevado. Assim, este regime de ligação é o mais apropriado para instalações onde não se pretende o corte do circuito defeituoso logo ao primeiro defeito de isolamento. Portanto, este tipo de propriedade do regime IT garante uma maior continuidade de serviço, sendo muito utilizado em locais como blocos operatórios de hospitais, redes elétricas em aeroportos, minas e instalações com riscos de incêndio ou explosão.

Uma vez que, as ligações entre massas são efetuadas através de um condutor de proteção, em caso de defeito de isolamento no condutor ativo, a corrente de defeito terá um valor reduzido, motivando que não seja necessário a abertura do circuito defeituoso imediatamente após o surgimento do primeiro defeito. No entanto, se o primeiro defeito não for reparado, ao ocorrer uma segunda

falha de isolamento, sucederá um curto-circuito fase-fase, que conseqüentemente irá fazer atuar os dispositivos contra sobreintensidades. Este corte, para além de ser obrigatório, também é inevitável pelos motivos acima descritos. De salientar ainda o facto de não se utilizarem dispositivos de proteção diferencial, pois estes são inúteis para este regime de neutro, uma vez que a malha de defeito não se fecha pela terra, mesmo que as massas estejam interligadas pelo condutor de proteção.

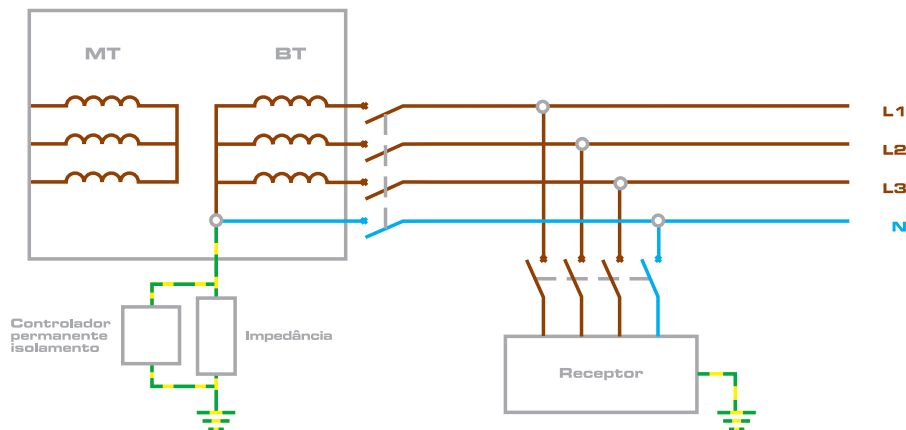


Figura 2.6: Esquema IT [5]

2.6 Resumo

Neste capítulo, inicialmente foram destacados aspetos relevantes dos sistemas de terras, assim como a sua importância na proteção de pessoas e bens. A ocorrência de uma falha de isolamento, pode provocar tensões de toque fatais para o ser humano. Logo, com o intuito de reduzir a tensão de toque, ou em caso de choque elétrico diminuir o seu tempo, são colocados dispositivos diferenciais residuais nas instalações elétricas, para que juntamente com o sistema de terras, possam dissipar estas situações.

Como é sabido, o dispositivo diferencial residual é um dispositivo de proteção, normalmente instalado nos quadros elétricos, que permite retirar de serviço um circuito onde seja detetada uma corrente de defeito que seja suscetível de criar tensões de toque perigosas. Contudo, este dispositivo pode ser necessário ou não, dependendo do tipo de regime de neutro adotado para a instalação elétrica.

Foi realizada a comparação entre os diferentes regimes de neutro. Assim sendo, o dispositivo de proteção diferencial é obrigatório para os regimes de neutro TT e TN-S, uma vez que as massas são interligadas pelo condutor de proteção que segue em separado do neutro. Para os regimes de neutro TN-C e IT, este dispositivo torna-se inútil, sendo a proteção de pessoas garantida por outros dispositivos. Como no regime de neutro TN-C, as massas são ligadas ao neutro, caso ocorra um defeito de isolamento, este irá provocar um curto-circuito fase-terra, fazendo atuar os dispositivos

de proteção contra sobreintensidades. Por fim, no regime de neutro IT, na ocorrência de um defeito de isolamento, este não consegue fechar a malha de defeito, permitindo manter o circuito em funcionamento sem colocar em perigo o ser humano. No entanto, num segundo defeito de isolamento serão atuados os dispositivos de proteção contra sobreintensidades, sendo muito útil instalar um dispositivo que permita detetar o primeiro defeito de isolamento, para que este seja reparado num momento oportuno.

Capítulo 3

Estratificação do Solo

Neste capítulo serão desenvolvidos os temas da resistividade do solo e da sua estratificação em duas camadas horizontais. Referir-se-á o tipo de medições necessárias realizadas no terreno e a formulação para a resolução da estratificação do solo.

3.1 Resistividade do solo

A resistividade do solo é um dos parâmetros fundamentais para o cálculo da resistência de terra, pois influencia diretamente o seu valor. Em [2, 8] é definida a resistividade do solo, e o motivo de ser expressa em Ωm . No entanto, a resistividade do solo não é sempre igual para todos os lugares do planeta nem sempre constante ao longo do ano. Portanto, existem inúmeros fatores que influenciam a resistividade do solo, tais como:

- tipo de solo;
- humidade do solo;
- concentração e tipo de sais dissolvidos na água;
- compactidade do solo;
- granulometria do solo;
- temperatura do solo;
- estrutura geológica – anisotropia – estratificação do solo.

Entretanto, estes fatores devem ser caracterizados e compreendidos, de maneira a perceber o seu impacto na resistividade do solo. Assim, em [2, 8, 9] é realizado um estudo aprofundado sobre a importância de cada um dos fatores mencionados.

Atendendo ao facto de que os solos normalmente apresentam características heterogéneas devido à sua própria formação geológica ao longo dos anos, faz com que a estratificação do solo em

camadas horizontais seja um assunto fulcral. Contudo, há solos em que a disposição das camadas são inclinadas ou até mesmo verticais, provocado por alguma falha geológica ocorrida no local.

Porém, este tipo de solos não aparecem com muita frequência. Portanto, em função das diferentes resistividades entre as camadas do solo, o comportamento da corrente que flui para o solo também se altera.

Segundo [10], e observando a figura 3.1, um eletrodo de terra dividido em pequenos segmentos Δl enterrado num solo homogêneo, ou seja, com resistividade uniforme ao longo de todo o solo, a corrente que percorre cada segmento é igualmente distribuída pelo solo à frequência original. Contudo, em solos heterogêneos, a corrente que percorre cada segmento do eletrodo de terra varia com a resistividade do solo em contacto com o mesmo.

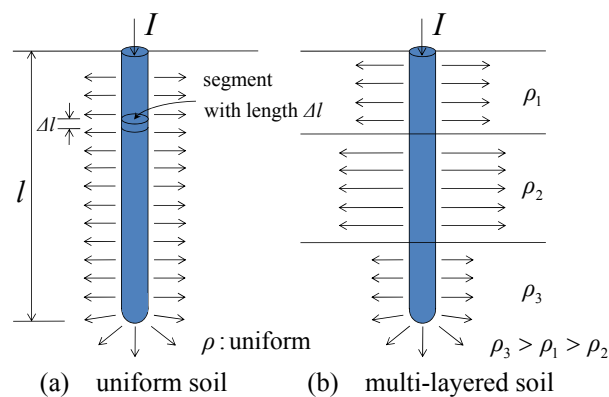


Figura 3.1: Distribuição da corrente nos eletrodos de terra [10]

Portanto, a estratificação do solo permite obter um solo eletromagneticamente equivalente e organizado em camadas horizontais, que possibilitará posteriormente efetuar estudos e calcular a resistência de terra em solos heterogêneos. Posto isto, na figura 3.2 pode-se observar um solo estratificado em camadas horizontais.



Figura 3.2: Solo com duas camadas [11]

Dado o exposto, um solo pode ser estratificado em N camadas, porém será necessário obter medidas de resistividade ρ do solo em função de diferentes espaçamentos a entre os elétrodos. Tendo as medidas obtidas em campo, ou seja, no local da execução do sistema de terras a implementar, existem vários métodos para estratificar o solo em N camadas. No entanto, como o assunto desta dissertação é sobre sistemas de terras em solos heterogêneos estratificados em duas camadas, apenas este tipo será aprofundado.

3.2 Resistividade do solo em Portugal

Apesar de ser sempre necessário efetuar medições no terreno quando se projeta um sistema de terras, é possível efetuar uma previsão quanto à dificuldade de obter bons valores para a resistência de terra em Portugal. A figura 3.3 representa o mapa de Portugal Continental com a distribuição dos valores médios da resistividade do solo.

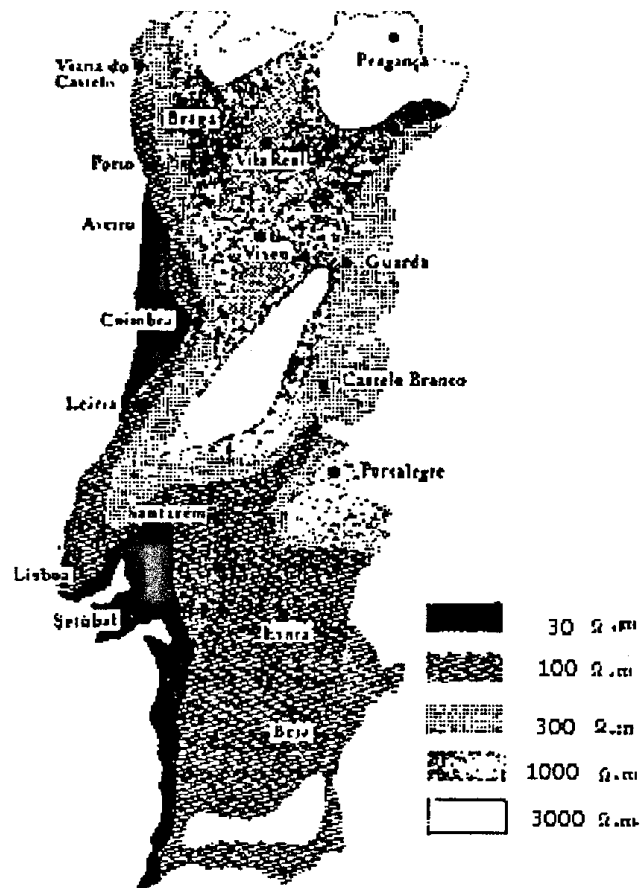


Figura 3.3: Resistividade média do solo em Portugal [9, 12, 13]

Observando o mapa, verifica-se que a zona com menor resistividade do solo situa-se praticamente em toda a costa litoral. Significa que nestas zonas, para se obter resistências de terras baixas, não são necessários grandes sistemas de terras, nem se exigem grandes elétrodos para

se atingirem profundidades maiores. Por outro lado, regiões mais secas do país como a região transmontana e regiões montanhosas como a Serra da Estrela e a Serra do Caldeirão apresentam resistividades do solo elevadas. Portanto, nestas regiões, para se conseguirem bons valores para a resistência de terra, serão certamente necessários sistemas de terras com muitos elétrodos de terra em paralelo e com grandes comprimentos, sendo necessário em casos extremos efetuar tratamento físico e químico do solo [9, 12].

Uma vez que as resistividades do solo apresentadas na figura 3.3 são meramente indicativas, torna-se sempre necessário realizar medições em campo, de maneira a conhecer efetivamente a resistividade do solo onde será construído o sistema de terras. Portanto, com vista a posteriormente prever a resistência de terra com o máximo de rigor possível, será desenvolvido o método de *Wenner*. Sendo este método o mais conhecido para determinar a resistividade do solo, será também incorporado no software de cálculo realizado na presente dissertação.

3.3 Método de *Wenner*

Atualmente existem diversos métodos para efetuar medições da resistividade do solo aparente no local onde será implementado o sistema de terras. Estes métodos são os seguintes:

- Método de *Wenner*;
- Método de *Schlumberger*;
- Método *Driven Rod*.

Dos métodos apresentado acima, o método de *Wenner* é o método mais utilizado para realizar as medições para a elaboração da curva da resistividade aparente do solo. Contudo, em [2] é explicado o funcionamento dos restantes métodos, e por este motivo só o método de *Wenner* será aprofundado.

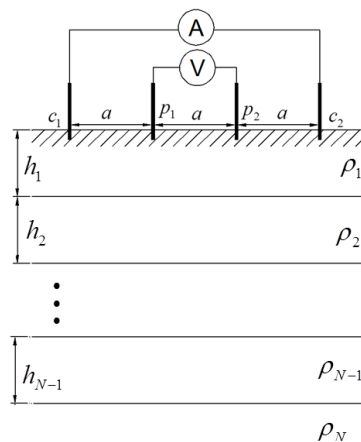


Figura 3.4: Método de *Wenner*

O método de *Wenner* utiliza quatro elétrodos verticais alinhados, com o mesmo espaçamento entre si e enterrados à mesma profundidade como representado na figura 3.4. Assim ao injetar uma corrente elétrica através do elétrodos externos C_1 e C_2 , produz-se uma tensão que é medida pelos elétrodos internos P_1 e P_2 . Uma vez que os elétrodos se encontram igualmente espaçados, ao conhecer a relação da tensão medida entre elétrodos internos U e a corrente que flui pelos elétrodos externos I é possível conhecer a resistência elétrica do solo para um espaçamento a . Basicamente, esta resistência elétrica é obtida através da Lei de *Ohm*.

$$R(a) = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

Estas medições são repetidas para vários espaçamentos, aumentando o espaçamento entre elétrodos de medição para medição. Deste modo, obtêm-se várias resistências do solo para diferentes espaçamentos. Assim nas medições os espaçamentos devem seguir a expressão (3.2) [14]:

$$a = 2^n, \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \quad (3.2)$$

Segundo [15], os espaçamentos mais curtos avaliam o comportamento do solo para regiões mais próximas da superfície. Por outro lado, para espaçamentos maiores entre elétrodos, a corrente injetada no solo flui a uma profundidade maior e, portanto, consegue-se avaliar o comportamento do solo em regiões mais profundas, como ilustra a figura 3.5.

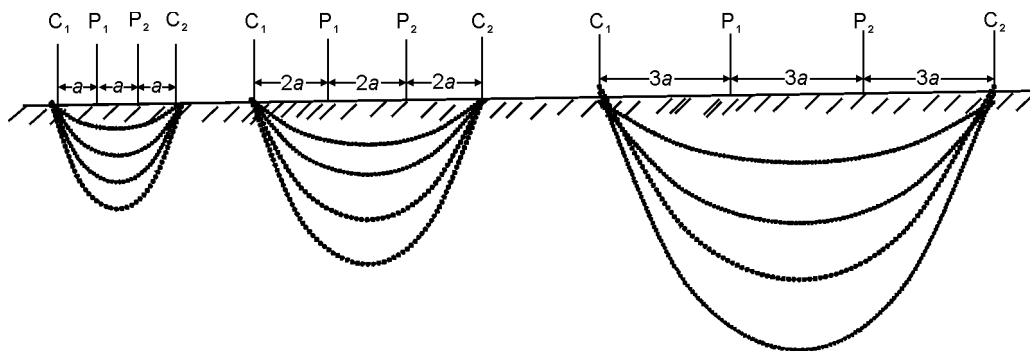


Figura 3.5: Medição da resistividade do solo para diferentes espaçamentos entre elétrodos [15]

Um fator importante nas medições são o número de direções a realizar para as medições da resistência do solo, permitindo, deste modo, alcançar o máximo de área possível. Portanto, estas direções dependem da área, das características do terreno onde o sistema de terras será implementado e da própria dimensão do sistema de terra. Assim sendo, para o caso de um sistema de terra pequeno, como por exemplo, os sistemas de terras de habitações e de postos de transformação, devem ser efetuadas medições em três direções como a figura 3.6 ilustra.

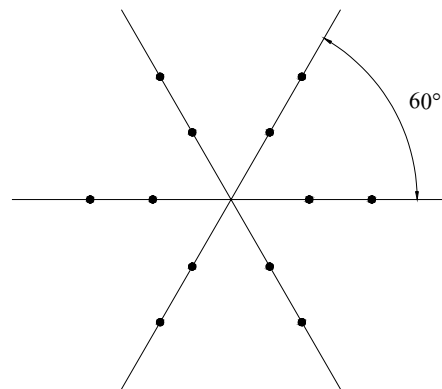


Figura 3.6: Direções de medição para sistemas de terras pequenos [16]

Por outro lado, no caso de sistemas de terras maiores, como os das subestações, as medições devem cobrir uma área ainda maior. Assim sendo, as medições da resistividade do solo devem ser realizadas como indica a figura 3.7.

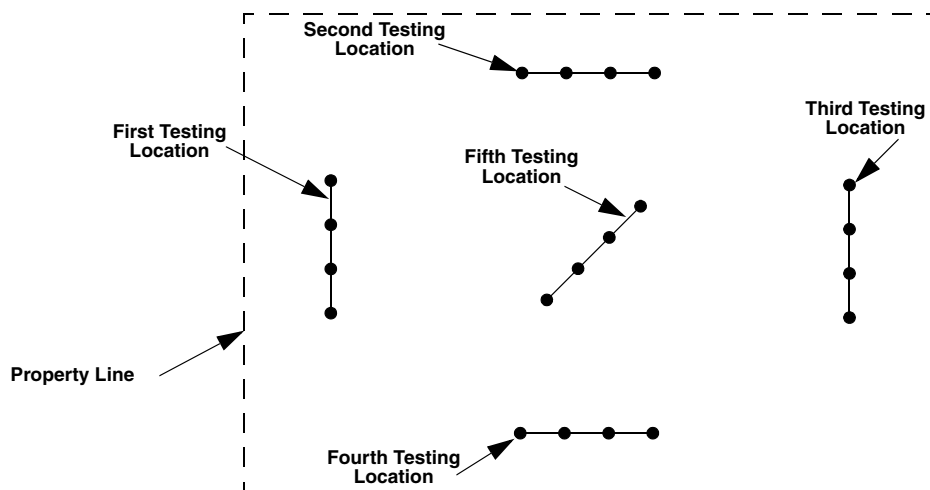


Figura 3.7: Direções de medição para sistemas de terras para subestações[17]

Portanto, com os elétrodos enterrados no solo a uma profundidade b , a resistividade aparente do solo para um espaçamento entre elétrodos a é representada pela equação (3.3) [14, 18, 19].

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} \quad (3.3)$$

Uma vez que os elétrodos utilizados neste método são muito pequenos, ou seja, não devem ultrapassar um décimo do espaçamento entre elétrodos $b \ll 0,1a$, significa que se pode simplificar a expressão (3.3) ao desprezar b [14].

$$\rho = 2\pi aR \quad (3.4)$$

Pela equação (3.4), podemos analisar que a profundidade dos elétrodos tem muito pouco impacto nas medições realizadas pelo método de *Wenner*. No entanto, em casos em que b é relativamente grande para ser desprezado, a expressão (3.3) poder ser igualmente simplificada.

$$\rho = 4\pi aR \quad (3.5)$$

Contudo, no ato das medições é necessário ter cuidado com alguns aspetos. Os elétrodos no momento da medição devem estar alinhados, igualmente espaçados e conectados com fios isolados. O telurómetro, ou seja, o equipamento que mede as resistividades do solo, deve ser colocado simetricamente entre os elétrodos, e supõe-se que este se encontra devidamente calibrado e com carga, quer o equipamento use pilhas quer use bateria. Com vista a possibilitar um bom contacto com o solo, deve-se limpar os elétrodos, retirando o máximo de óxidos e gorduras. Por fim, as medições não devem ser realizadas com condições atmosféricas adversas, no entanto, como as condições atmosféricas alteram a resistividade do solo, estas devem ser registadas durante as medições.

3.4 Avaliação das medidas

Uma vez realizadas várias medições para vários espaçamentos, estes devem ser analisados de modo a serem avaliados quanto à sua veracidade. Isto é, se uma dada medida possuir um valor de resistividade elétrica muito afastado em comparação com as restantes medidas para o mesmo espaçamento, este deve ser descartado. Logo, para avaliar as medições obtidas, começa-se por calcular a média aritmética dos valores de resistividade medidos para cada espaçamento.

$$\rho_{\text{médio}}(a) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a) \quad (3.6)$$

Onde,

$\rho_{\text{médio}}(a)$ – resistividade aparente média correspondente ao espaçamento a ;

n – número de medições para o mesmo espaçamento;

i – número da medida;

a – espaçamento entre elétrodos;

$\rho_i(a)$ – resistividade aparente para o espaçamento a .

Utilizando o valor médio das resistividades como valor de referência, calcula-se o desvio de cada medida em relação a este valor, já calculado anteriormente. Estas resistividades correspondem sempre ao mesmo espaçamento.

$$|\rho_i(a) - \rho_{\text{médio}}(a)| \quad (3.7)$$

Segundo [16], sempre que uma medida da resistividade $\rho_i(a)$ tiver um desvio superior a 50% em comparação com o valor da resistividade de referência, este deve ser descartado como indica a equação (3.8). Por outro lado, se o valor da resistividade $\rho_i(a)$ corresponder a menos de 50% em comparação com o valor de referência, então esta medida deve ser considerada.

$$\frac{|\rho_i(a) - \rho_{\text{médio}}(a)|}{\rho_{\text{médio}}(a)} \times 100 \geq 50\% \quad (3.8)$$

Importa referir que, no caso em que se identifique um número acentuado de medidas com desvios superiores a 50%, deve-se efetuar novas medições no local onde se situará o sistema de terras. Com as medições retificadas, volta-se a proceder ao cálculo da média das medidas consideradas válidas, seguindo a equação (3.6). Deste modo, com as resistividades médias calculadas para cada espaçamento, torna-se possível construir a curva $\rho(a) * a$ que mais se aproxima às características do solo do respetivo local, usando o máximo de resistividades medidas em campo. Esta curva é muito importante e necessária para estratificar o solo em duas camadas horizontais, pelo que não seria possível aplicar os métodos descritos no capítulo 4 sem ela.

3.5 Estratificação do solo em duas camadas

A estratificação do solo em duas camadas é obtida através da aplicação de teorias do eletromagnetismo em solos de duas camadas horizontais e com o recurso a medidas efetuadas pelo Método de *Wenner*. Desta forma, a estratificação do solo indica a resistividade do solo da primeira e segunda camada, assim como a profundidade da primeira camada.

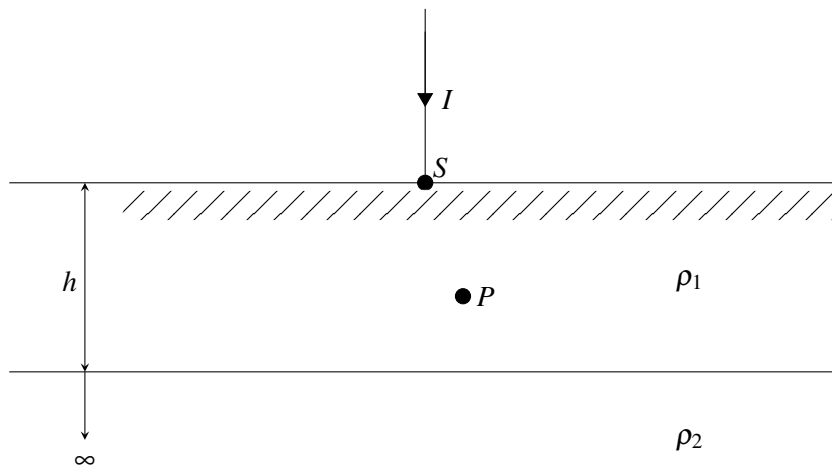


Figura 3.8: Solo estratificado em 2 camadas

Em virtude do que foi mencionado, ao injetar uma corrente elétrica I no solo S ilustrado na figura 3.8, vão-se criar potenciais elétricos na primeira camada que terão que satisfazer a Equação

de Laplace formalizada na equação (3.9).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.9)$$

Onde V é o potencial elétrico na primeira camada do solo.

Continuando a desenvolver a equação de Laplace, o potencial V em qualquer ponto P da primeira camada do solo é dada pela equação (3.10) [16, 20].

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (3.10)$$

Onde,

V_p – potencial elétrico em qualquer ponto P na primeira camada;

ρ_1 – resistividade da primeira camada;

h – profundidade da primeira camada;

r – distancia entre o ponto P e o local foi injetada a corrente, neste caso é no ponto S ;

K – coeficiente de reflexão.

O coeficiente de reflexão K , por sua vez é definido na equação (3.11) [18, 21]:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (3.11)$$

Onde ρ_2 corresponde à resistividade da segunda camada.

Analisando a equação (3.11), podemos constatar que o coeficiente de reflexão tem como valores máximo e mínimos 1 e -1 respetivamente.

$$-1 \leq K \leq 1$$

Posto isto, observando a figura 3.9 e aplicando o método de *Wenner*, ao injetar uma corrente elétrica I pelo eletrodo A , esta retorna pelo eletrodo D . Os eletrodos B e C correspondem aos eletrodos que irão medir a diferença de potencial provocada pela corrente I . Portanto, aplicando a expressão (3.10), a tensão em B provocada pela corrente I é representada pela equação (3.12).

$$\begin{aligned} V_B &= V_{BA} - V_{BD} \\ &= \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] \end{aligned} \quad (3.12)$$

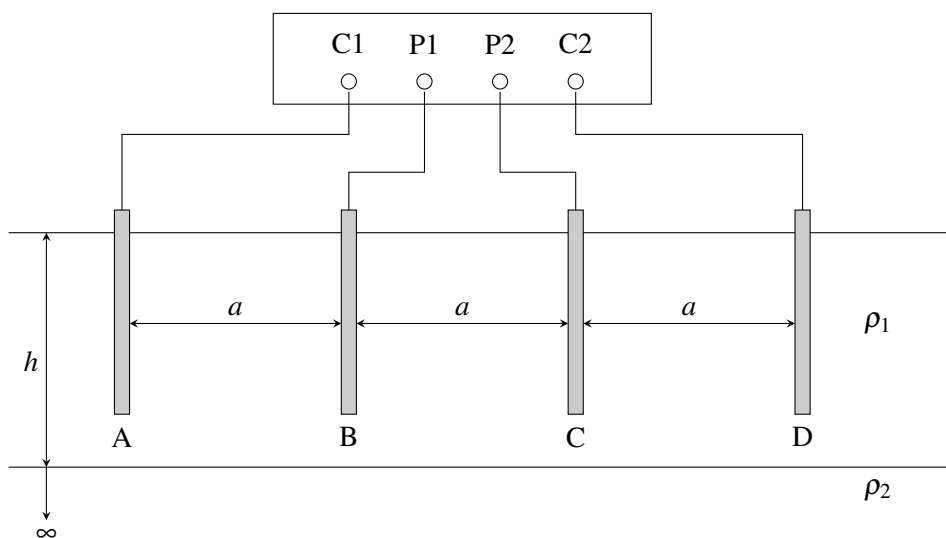


Figura 3.9: Método de *Wenner* no solo de duas camadas

Aplicando o mesmo princípio ao eletrodo *C*, obtemos a expressão para a tensão no eletrodo *C*:

$$\begin{aligned}
 V_C &= V_{CA} - V_{CD} \\
 &= \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

Logo, a diferença de potencial entre os eletrodos *B* e *C* é:

$$V_{BC} = V_B - V_C \quad (3.14)$$

Substituindo as equações correspondentes, tem-se:

$$V_{BC} = \frac{I\rho_1}{2\pi a} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right\} \quad (3.15)$$

Manipulando a equação (3.15), obtém-se a expressão (3.16):

$$2\pi a \frac{V_{BC}}{I} = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right\} \quad (3.16)$$

Aplicando a equação (3.1) à equação (3.16):

$$2\pi a R = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right\} \quad (3.17)$$

Por fim, utilizando a equação (3.4) na equação (3.17), tem-se:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \quad (3.18)$$

Onde,

ρ_a – resistividade aparente medida pelo método de *Wenner* em função do espaçamento entre elétrodos;

ρ_1 – resistividade da primeira camada;

h – profundidade da primeira camada;

a – espaçamento entre elétrodos;

K – coeficiente de reflexão.

Portanto, a equação (3.18) relaciona a resistividade aparente medida em campo pelo método de *Wenner* em função dos espaçamentos dos elétrodos com as características de um solo heterogéneo de duas camadas horizontais [18]. Assim sendo, esta equação é essencial para a estratificação do solo em duas camadas horizontais. Contudo, a equação (3.18) apresenta uma série infinita, pelo que pode causar dúvidas quanto à sua finalidade. Logo, para uma melhor esclarecimento a figura 3.10 foi construída desenvolvendo a série desde $n = 1$ até $n = 10$ para vários coeficientes de reflexão K . De salientar ainda a utilização de $\frac{h}{a} = 0,2$.

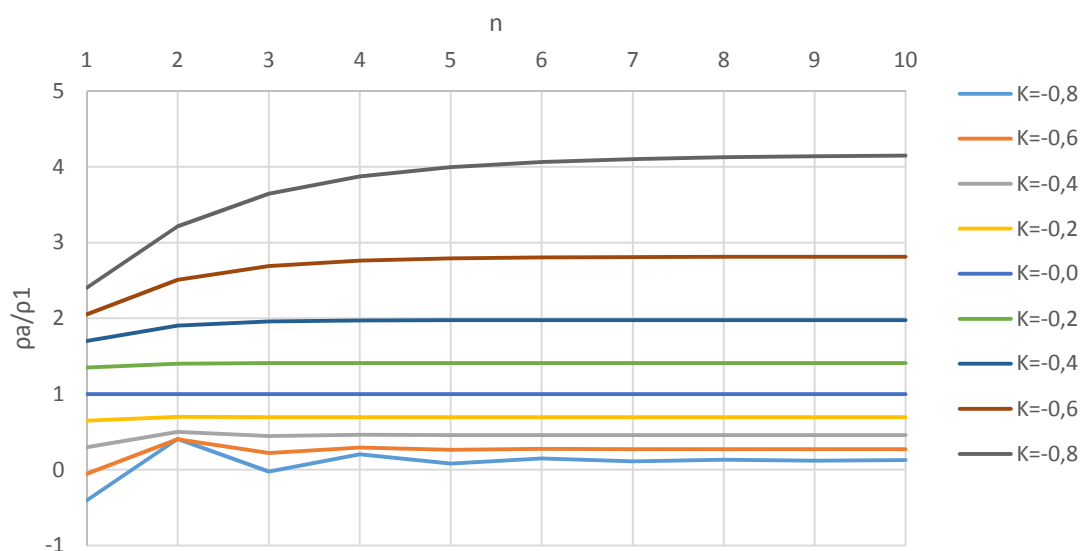


Figura 3.10: Significado da série infinita na equação da resistividade aparente (3.18).

Pela figura 3.10, podemos observar que quanto mais se estende a série, ou seja, quanto mais se aumentar n , a equação (3.18) tende para um determinado valor fixo. Contudo, podemos afirmar

que não é fiável realizar a equação (3.18) até $n = \infty$, pois para a maior parte dos coeficientes de reflexão K , a partir de $n = 8$, o desenvolvimento da série praticamente deixa de ser significativo para o resultado final. Mesmo assim, para os cálculos do software desenvolvido, a série é estendida a $n = 10$, uma vez que a nível computacional, o tempo de cálculo entre $n = 8$ e $n = 10$ é impercetível e o resultado final de equação já está bastante consolidado. Também através da visualização da figura 3.10, é possível concluir que para $-0,2 \leq K \leq 0,2$ o resultado é praticamente constante para qualquer n . Mais uma vez, importa salientar a importância do desenvolvimento da série, pois como é possível observar para $K = 0,8$, o resultado da relação entre a resistividade aparente com a resistividade da primeira camada do solo para $n = 1$ é negativo. Isto significa que umas das resistividades anteriormente descritas é negativa, pelo que é fisicamente impossível. Logo, a série da equação (3.18) não pode ser ignorada, realizando o cálculo para $n = 1$, pelo que é extremamente importante efetuar os cálculos até pelo menos $n = 8$, por mais trabalho que isso implique.

3.6 Resumo

Neste capítulo foram introduzidos os conceitos de resistividade do solo e da estratificação do solo, assim como métodos para medir a resistividade do solo. No entanto, só o método de *Wenner* foi estudado em pormenor.

Devido à heterogeneidade dos solos, estes podem ser estratificados em infinitas camadas possíveis, contudo no estudo desenvolvido apenas foi considerado solos estratificáveis em duas camadas horizontais. Pois, apenas solos com características específicas, que serão abordadas no capítulo 4, são estratificáveis em duas camadas.

Para obter os parâmetros de um solo estratificado em duas camadas, ou seja, a resistividade da primeira e segunda camada e a profundidade da primeira camada, sendo que a a profundidade da segunda camada é infinita, são necessários recolher medidas das resistividade aparente do solo. Para isso, é utilizado o método de *Wenner*. Assim sendo, são efetuadas várias medições para diferentes espaçamentos entre elétrodos, onde posteriormente estas medições são avaliadas.

Por fim, recorrendo à formulação apresentada neste capítulo, obtém-se um modelo eletromagneticamente equivalente do solo real e estratificado em duas camadas horizontais. Esta estratificação é essencial para o cálculo da resistência de terra, que será abordado no capítulo 5, permitindo determinar valores para a resistência de terra mais fidedignos.

Capítulo 4

Algoritmos de Otimização

Neste capítulo, irão ser apresentados conceitos base de algoritmos para a estratificação do solo, ou seja, será explicado como obter os parâmetros que caracterizam um solo heterogêneo de duas camadas horizontais (ρ_1 , ρ_2 e h). Posteriormente, serão adaptados vários métodos de otimização para calcular os parâmetros desejados.

4.1 O Problema Inverso

Para calcular a resistência de um sistema de terras, para além da configuração da mesma, é também necessário conhecer as características do solo onde este será implementado. Contudo, como referido no capítulo 3, raramente um solo tem características homogêneas, pelo que para uma melhor previsão da resistência de um sistema de terras é necessário aproximar as características do solo à realidade. Para isso, estratifica-se o solo em duas camadas, tendo como objetivo conhecer a resistividade da primeira e segunda camada, assim com a profundidade da primeira camada.

Posto isto, a melhor solução para obter as características de um solo heterogêneo de duas camadas horizontais, é utilizar a expressão teórica da resistividade aparente ρ_a em função do espaçamento a . É importante referir, que esta solução também permite identificar os erros consequentes dos cálculos da modelagem do solo.

Como só dispomos da resistividade aparente ρ_a em função do espaçamento a medida em campo para modelar um solo em duas camadas, significa que temos menos informação sobre a característica do solo antes de realizar a modelagem do solo do que depois da modelagem. Portanto, estamos perante um caso de problema inverso, ou seja, as soluções do problema são determinadas com base na observação das suas consequências [22]. Pelo contrário, no problema direto a solução é obtida por métodos analíticos ou numéricos, em que a solução representa as consequências apoiadas na descrição completa das causas do problema.

Em suma, o cálculo da curva de resistividade teórica $\rho_{aT}(a)$ é identificado como um problema direto, uma vez que é resolvido diretamente pela forma analítica, através da simples substituição dos parâmetros pelos respetivos valores numéricos. Contudo, o cálculo da curva da resistividade

aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ é considerado um problema inverso como já referido. Os valores de ρ_a obtidos através de medições de campo são interpolados obtendo-se deste modo a curva experimental $\rho_{aE}(a)$, permitindo assim determinar os parâmetros no caso de um solo estratificado em duas camadas horizontais ρ_1 , ρ_2 e h , como ilustra a figura 4.1.

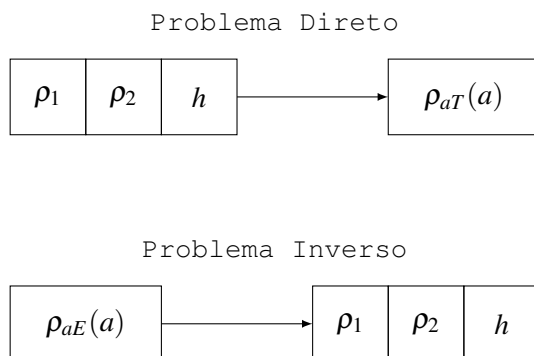


Figura 4.1: Problema Direto e Problema Inverso

4.2 Solução para o Problema Inverso

Em virtude dos factos mencionados, o problema inverso consiste em determinar os parâmetros ρ_1 , ρ_2 e h a partir de $\rho_{aE}(a)$ e deste modo obter a curva teórica $\rho_{aT}(a)$. Contudo, ao comparar os resultados das curvas, usando métodos de otimização é possível minimizar o erro entre as duas curvas e obter a melhor solução para a estratificação do solo. Portanto a curva teórica $\rho_{aT}(a)$ deverá ser o mais próximo da curva experimental $\rho_{aE}(a)$, pois quanto mais idênticas forem as duas curvas, menor será o erro da curva teórica $\rho_{aT}(a)$ e, portanto mais próximos os parâmetros ρ_1 , ρ_2 e h serão da realidade.

Assim, o erro relativo é expresso na equação (4.1):

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\rho_{aE_i} - \rho_{aT_i}}{\rho_{aE_i}} \right| \times 100 \quad (4.1)$$

Como podemos observar o exemplo da tabela 4.1, para cada medida experimental, é necessário reduzir o erro.

Tabela 4.1: Exemplo com cinco medidas experimentais

i	ρ_{aT_i}	ρ_{aE_i}	ε_i
1	$\rho_{aT}(\rho_1, \rho_2, h, a_1)$	$\rho_{aE}(a_1)$	ε_1
2	$\rho_{aT}(\rho_1, \rho_2, h, a_2)$	$\rho_{aE}(a_2)$	ε_2
3	$\rho_{aT}(\rho_1, \rho_2, h, a_3)$	$\rho_{aE}(a_3)$	ε_3
4	$\rho_{aT}(\rho_1, \rho_2, h, a_4)$	$\rho_{aE}(a_4)$	ε_4
5	$\rho_{aT}(\rho_1, \rho_2, h, a_5)$	$\rho_{aE}(a_5)$	ε_5
$\sum \varepsilon$			<i>Desvio</i>

Com o intuito de formar uma única função objetivo, englobando todas as medidas experimentais, somam-se os erros relativos de todas as medidas como indicado na equação (4.2):

$$Desvio = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (4.2)$$

Desta forma, juntado as equações (4.1) e (4.2), o desvio entre a curva experimental e teórica ao longo do processo de otimização é expressa na equação (4.3) [23, 24].

$$Desvio = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\rho_{aE_i} - \rho_{aT_i}}{\rho_{aE_i}} \right| \times 100 \quad (4.3)$$

Analisando a equação (4.3), em que n é o número de medidas da resistividade aparente do solo efetuadas no terreno onde se situará o sistema de terras em função do espaçamento dos elétrodos, e i o índice da respetiva medida, podemos afirmar que quando $\rho_{aT}(\rho_1, \rho_2, h, a) \approx \rho_{aE}(a)$, o solo fica representado em camadas horizontais bastante próxima da realidade. Assim sendo, a função objetivo para todos os métodos que irão ser apresentados é descrita pela equação (4.4).

$$\min Desvio \quad (4.4)$$

Com a função objetivo bem definida, o problema inverso torna-se num processo iterativo com vista a otimizar a função objetivo, ou seja, a minimizar os desvios entre a curva teórica $\rho_{aT}(a)$ e a curva experimental $\rho_{aE}(a)$, como já referido.

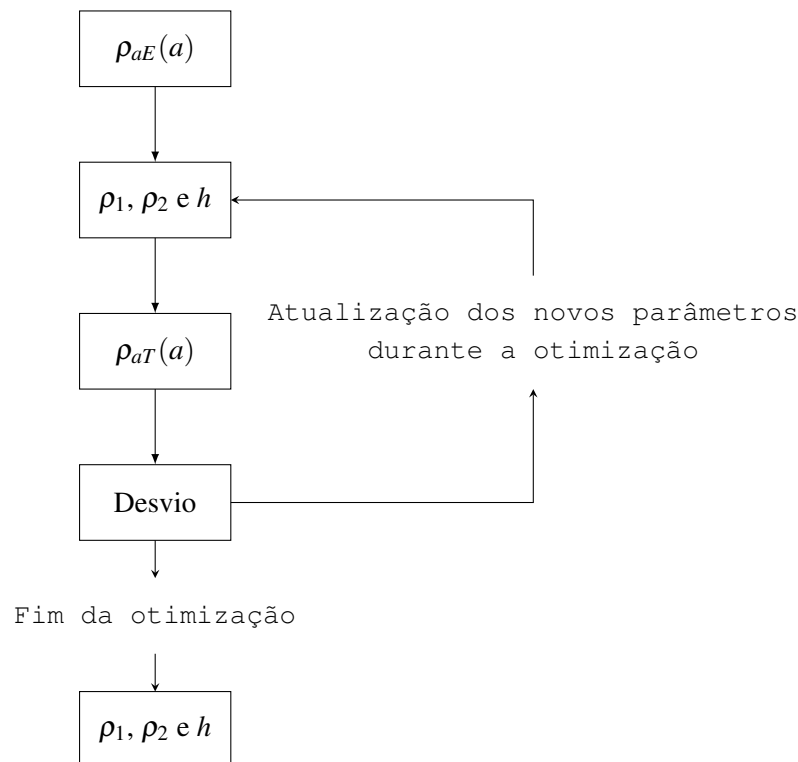


Figura 4.2: Fluxograma do problema inverso

Por fim, o algoritmo para resolver o problema inverso é dividido em várias etapas como demonstra o fluxograma da figura 4.2.

4.3 Método das assintotas

Uma forma muito simples de se conseguir uma boa aproximação das características do solo com duas camadas é através do cálculo das assintotas da curva $\rho(a) \times a$. Para isso, a curva $\rho(a) \times a$ deverá possuir uma aparência semelhante às curvas representadas na figura 4.3, pois são curvas que indicam que o solo é estratificável em duas camadas. De salientar, ainda que estas curvas são construídas a partir de medidas obtidas pelo método de *Wenner*.

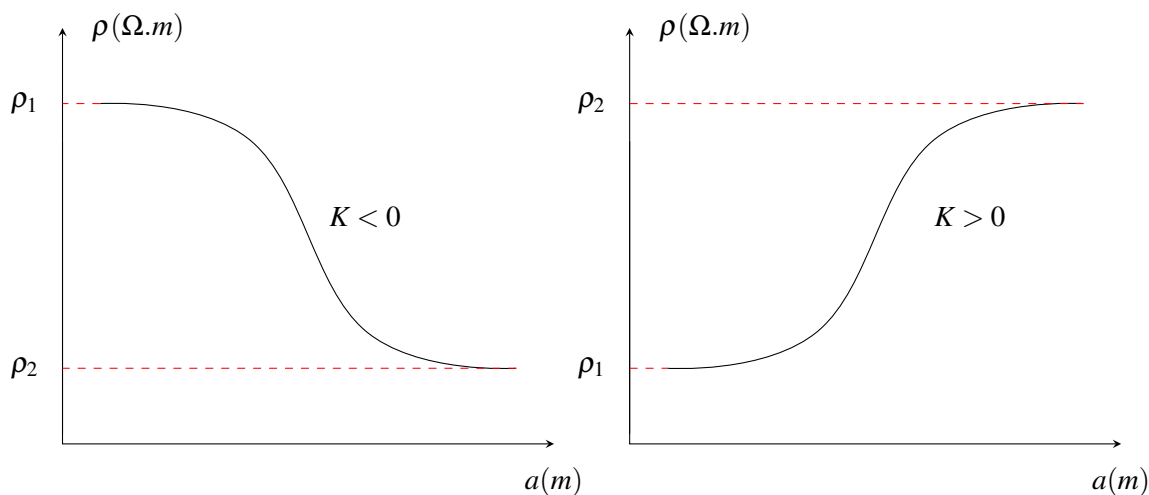
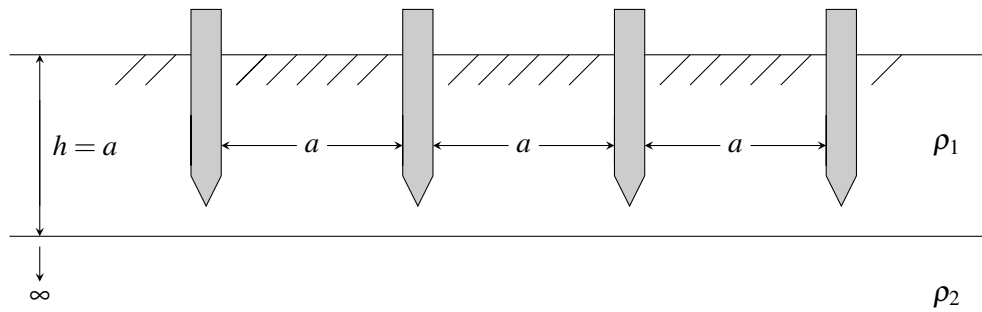


Figura 4.3: Curvas $\rho(a) \times a$ para solos de duas camadas

Segundo [25], e analisando a figura 4.3, a assintota correspondente a espaçamentos pequenos indica a resistividade do solo para a primeira camada. Esta assintota, por vezes é substituída pelo prolongamento da curva $\rho(a) \times a$. Por outro lado, a assintota que corresponde a espaçamentos maiores aponta para o valor da resistividade da segunda camada do solo. Sendo que estas duas resistividades são diferentes, conclui-se que se tratam de solos diferentes, logo permite confirmar que estamos perante um solo de duas camadas. Assim sendo, com as resistividades da primeira e segunda camada são conhecidas, ρ_1 e ρ_2 respetivamente, falta apenas conhecer a profundidade da primeira camada, h , para a estratificação do solo ficar concluída.

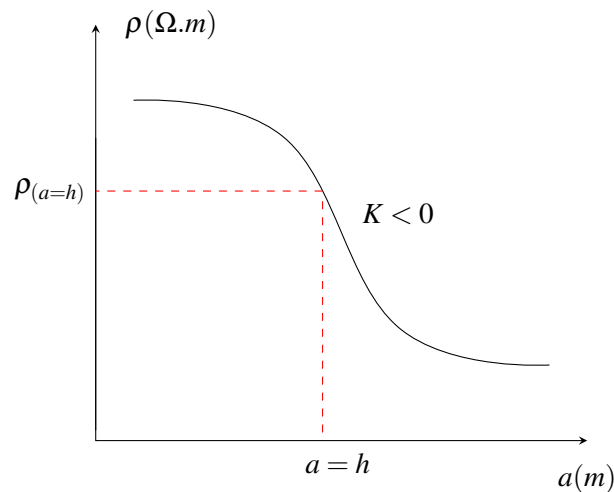
O método para determinar a profundidade da primeira camada consiste em distanciar os elétrodos do método de *Wenner*, de maneira a que o espaçamento entre os elétrodos e a profundidade da primeira camada sejam coincidentes, ou seja, $a = h$ como ilustra a figura 4.4.

Figura 4.4: Método de Wenner com $a = h$

Então, com $a = h$, significa que $\frac{h}{a} = 1$, logo pela equação (3.18) determina-se a expressão (4.5) que possibilita calcular a resistividade aparente do solo, para a qual o espaçamento entre eletrodos é igual à profundidade da primeira camada, isto é, $\rho_{(a=h)}$.

$$\rho_{(a=h)} = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n)^2}} \right] \right\} \quad (4.5)$$

Depois de calculado $\rho_{(a=h)}$, com a curva $\rho(a) \times a$ produzida a partir das medições obtidas pelo método de Wenner, determina-se a profundidade da primeira camada h , como demonstra a figura 4.5. Como na realidade a curva $\rho(a) \times a$ são um conjunto de pontos/medições, pode ser necessário interpolar estes pontos para obter efetivamente uma curva, pois a resistividade aparente calculada em que $a = h$ pode não coincidir com nenhuma medição. Ou seja, $\rho_{(a=h)}$ pode coincidir com um valor intermédio das medições realizadas.

Figura 4.5: Curva $\rho(a) \times a$ de um solo de duas camadas

Posto isto, percebe-se que o método consegue obter resultados satisfatórios e computacionalmente é fácil de ser implementado. Contudo, não é dos métodos mais precisos para obter as carac-

terísticas do um solo de duas camadas, embora permita obter valores que facilitam a inicialização de algoritmos mais avançados e precisos.

4.4 Algoritmo Genético

O algoritmo genético é um algoritmo heurístico, ou seja, é um algoritmo que normalmente localiza boas soluções, embora nem sempre isso aconteça ou então em determinadas situações pode demorar mais tempo a encontrar a solução ótima do que outras [26]. Por outras palavras, é um método fiável, no entanto poderá não convergir para a melhor solução em todos os casos. Contudo, o algoritmo genético usa valores iniciais estocásticos, ou seja, valores completamente aleatórios, e é independente de derivadas, o que significa que matematicamente é um método simples de concretizar.

O algoritmo genético foi concebido em 1960 pelo cientista John Holland [27]. O objetivo inicial deste algoritmo consistia através da computação estudar fenómenos relacionados com a seleção natural e a adaptação das espécies descrita na Teoria da Evolução de Charles Darwin [28]. Portanto, este algoritmo simula processos naturais de evolução e reprodução das espécies necessárias para a sua sobrevivência. Assim, indivíduos da mesma espécie lutam entre si pela própria sobrevivência ou com o objetivo de garantir gerações futuras da sua espécie através da reprodução, ou seja, quem demonstrar ser mais forte ganha. Indivíduos mais fortes reproduzir-se-ão em maior número, passando o seu código genético para as gerações futuras, enquanto que os mais fracos acabarão por desaparecer, garantido deste modo uma evolução favorável à respetiva espécie.

Uma vez que o algoritmo genético é inspirado na natureza, as soluções são apresentadas em forma de um código genético. A população inicial deve ser diversificada de maneira a que o algoritmo possa produzir igualmente soluções iniciais diversificadas, pois aumenta deste modo a probabilidade de obter a melhor solução possível para o problema [29]. Como normalmente a evolução das espécies é caracterizada por mutações genéticas, neste método deve-se igualmente criar mutações, ou seja, pequenas alterações nos resultados ao longo das iterações, mantendo assim a diversidade da população. Para o método convergir favoravelmente, deve-se criar restrições juntamente com penalidades para as soluções fora dos limites da solução ideal, evoluindo iteração após iteração a qualidade da solução. Por fim, em cada iteração serão selecionados os melhores indivíduos da população, sendo que os piores indivíduos serão descartados.

O algoritmo genético indica as soluções do problema de otimização como indivíduos de uma população. Estes indivíduos da mesma espécie vão evoluir, ou seja, convergir para a melhor solução a cada iteração, que podemos imaginar como gerações da população. Logo, o algoritmo genético representado na figura 4.6, pode ser descrito nas seguintes etapas:

- Em primeiro lugar define-se uma população com um determinado número de indivíduos estabelecidos aleatoriamente, contudo quando se conhece aproximadamente a solução final, pode-se produzir uma população próxima desta solução como será o nosso caso;

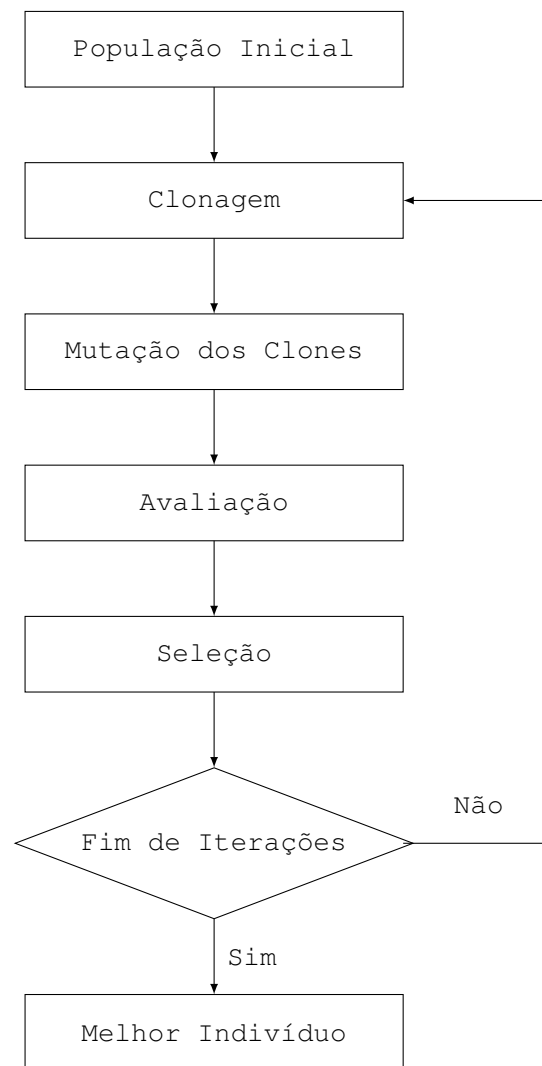


Figura 4.6: Fluxograma do Algoritmo Genético

- A próxima etapa é clonar a população inicial, obtendo desta forma uma população com o dobro dos indivíduos. Esta etapa serve principalmente para guardar a solução achada na geração anterior ou inicial;
- Seguidamente, impõe-se pequenas alterações à população clonada, ou seja, os clones passam por um processo de mutação. A população original mantém-se inalterável para o caso das mutações não demonstrarem ser benéficas para a evolução do problema;
- Depois, toda a população é avaliada, isto é, população original mais a população clonada e mutada, seguindo um critério definido por uma função de avaliação da qualidade do indivíduo;
- Posteriormente a população é reduzida ao número de indivíduos inicial através de um processo de seleção. Como óbvio, só os melhores indivíduos são selecionados, os outros serão

eliminados.

- Enquanto o algoritmo não atingir o número de gerações previamente definido, ou seja, o número de iterações. A população gerada na etapa anterior será clonada e percorrerá todas as etapas novamente até chegar ao limite máximo de gerações.
- No fim de tudo, o melhor indivíduo da última geração, será a solução final do problema.

4.4.1 População inicial

A população inicial num algoritmo genético é normalmente gerada aleatoriamente, pois não se conhece à partida uma solução perto da solução otimizada e também não depende de valores iniciais próximos da solução final para o algoritmo convergir [30]. Porém, em casos pontuais, como iremos analisar mais tarde, o algoritmo genético poderá ser inicializado com uma população já evoluída ou então uma população gerada por um algoritmo inicializador que garanta uma população inicial perto da solução desejada. No entanto, é importante referir que o tamanho inicial da população tem de ser obrigatoriamente predefinida. Este tamanho não deve ser escolhido aleatoriamente, isto é, a população inicial deve ser grande o suficiente para permitir uma maior diversidade de indivíduos, mas em simultâneo deve ser moderada para que o algoritmo não seja excessivamente demorado.

Para a estratificação do solo, podemos afirmar que temos duas populações distintas, uma população para a resistividade de cada camada do solo e outra para a profundidade da primeira camada do solo. A separação da população inicial em duas é devido a estas serem de dimensões e unidades diferentes, pois os valores iniciais e as mutações aplicadas possuirão pesos diferentes. Contudo, no decorrer do algoritmo, principalmente na etapa da avaliação e seleção estas duas populações são acopladas numa só, formando um indivíduo completo como na figura 4.7.

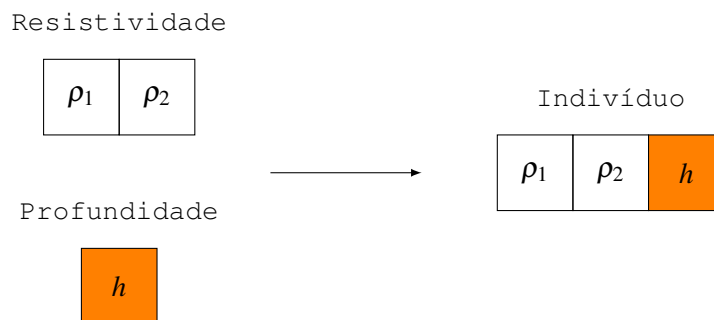


Figura 4.7: Formação de um indivíduo

Um indivíduo pode ser representado por letras, códigos, números ou como uma sequência de bits desde que sejam adequados para o funcionamento de algoritmo [31]. No caso desta dissertação, cada parcela ou gene do indivíduo é representado por números reais.

4.4.1.1 Inicialização

Como explicado em 4.3, é relativamente fácil obter uma boa estimativa para as resistividades das duas camadas do solo, assim como para a profundidade da primeira camada. Posto isto, na adaptação do algoritmo genético para a resolução do problema inverso da estratificação do solo, o valor da resistividade da primeira camada do solo será igual ao valor da resistividade aparente medida em campo com o espaçamento menor. Por sua vez, o valor da resistividade da segunda camada do solo será igual ao valor da resistividade aparente medida em campo com maior espaçamento. Por fim, a profundidade da primeira camada será o valor obtido pelo método das assíntotas explicado em 4.3. A figura 4.8 ilustra o algoritmo de inicialização do algoritmo genético.

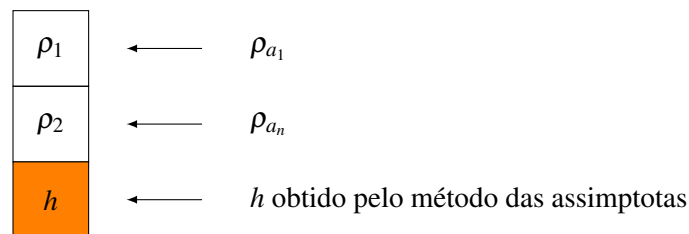


Figura 4.8: Inicialização

Para que os indivíduos da população não sejam todos iguais, estes são submetidos a uma mutação violenta para que logo desde a primeira geração surja diversidade suficiente para o algoritmo convergir para a solução ótima. No fim de obter o número de indivíduos definidos, estes são agrupados numa matriz seguindo para a próxima etapa, como indica a figura 4.9.

População

	I_1	I_2	I_3	I_4
ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1
ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2
h	h	h	h	h

Figura 4.9: População

4.4.2 Clonar

Esta etapa visa principalmente prevenir que os melhores indivíduos da geração anterior desapareçam. Pois através das mutações que estes indivíduos sofrem, o algoritmo pode em alguns momentos divergir e conseqüentemente demorar mais tempo ou não conseguir chegar à solução

pretendida no número de iterações definido. Numa linguagem simples, esta etapa surge para guardar a informação de cada geração, pois nem todas as mutações são benéficas. Deste modo, o algoritmo garante que a evolução dos indivíduos ao longo das gerações seja sempre positivo. Assim, quando clonamos uma população, estamos a copiar a informação dos indivíduos para uma nova população de clones como ilustra a figura 4.10.

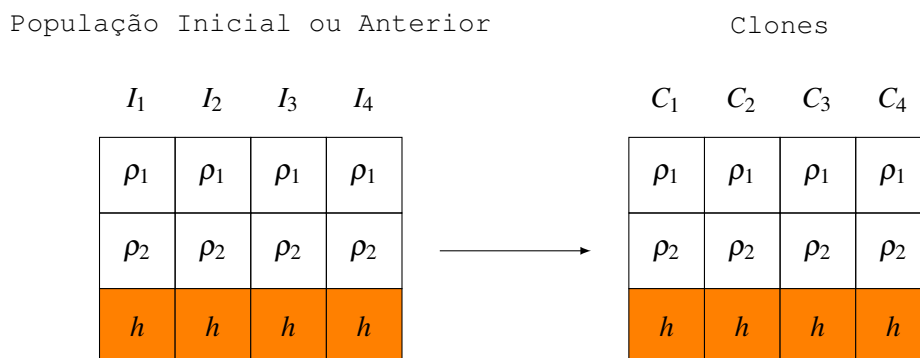


Figura 4.10: Criação da população de clones

4.4.3 Mutação

Nesta etapa, basicamente modifica-se aleatoriamente todos os genes dos indivíduos clonados, como ilustra a figura 4.11. Pois está-se a contribuir para o aumento da diversidade de indivíduos da população e sem desfazer a evolução já obtida até ao momento. Portanto, a mutação ao permitir o aumento da diversidade das características dos indivíduos da população, pode por vezes conduzir a um caminho alternativo para a solução ótima e com melhores resultados.

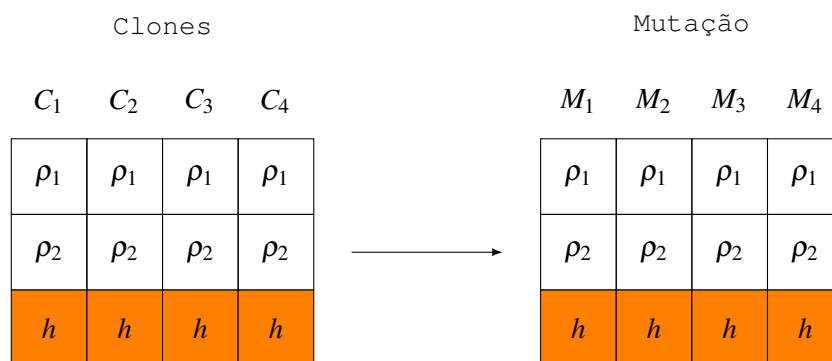


Figura 4.11: População de clones após a mutação

É comum nesta etapa, numa fase inicial das gerações, provocar fortes mutações nos indivíduos. Ao longo das gerações, estas mutações vão gradualmente ser cada vez mais pequenas. Perto do final das gerações, estas mutações devem ser de tal ordem pequenas, permitindo apenas pequenas afinações do resultado final [32]. Como o problema inverso para a estratificação do solo apresenta

uma solução inicial perto do ótimo, não faz sentido aplicar este tipo de mutações, pois os efeitos observados no resultado final não seriam significativos. Portanto, o estilo de mutações adotado foi um estilo com um grau constante de mutação ao longo de todas as gerações.

$$\rho_{mut} = \rho_c + \Delta\rho \quad (4.6)$$

$$h_{mut} = h_c + \Delta h \quad (4.7)$$

Analisando as equações (4.6) e (4.7), a cada gene do indivíduo clonado é aplicada uma alteração no seu valor através dos fatores $\Delta\rho$ e Δh . Estes fatores são calculados aleatoriamente através da curva da distribuição normal. Esta curva da distribuição normal representada na figura 4.12 tem a sua média μ situada em zero, permitindo deste modo obter valores positivos e negativos com iguais probabilidades. No entanto, é de referir que mutações mais pequenas tem mais probabilidade de acontecer do que mutações maiores.

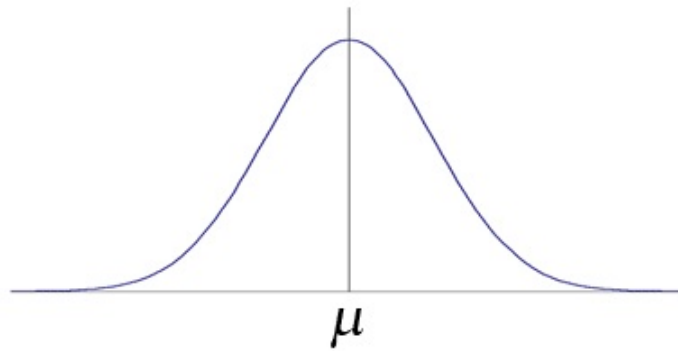


Figura 4.12: Distribuição Normal

Após aplicada a mutação em todos os indivíduos clonados, esta nova matriz da população é anexada à população gerada na iteração anterior. Logo, esta nova matriz terá o dobro do tamanho, aumentando as opções de escolha, como se verifica pela figura 4.13.

População Total

I_1	I_2	I_3	I_4	M_1	M_2	M_3	M_4
ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1
ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2
h	h	h	h	h	h	h	h

Figura 4.13: Nova matriz da população

4.4.4 Avaliação

Esta etapa é considerada a mais importante do algoritmo genético [27]. Para que o algoritmo genético evolua positivamente, é necessário definir uma função que avalie a qualidade de um indivíduo dentro das populações geradas a cada momento. Esta função é definida em 4.2 pela equação (4.3). Assim, para cada indivíduo é calculado o erro de aproximação da curva da resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(a)$ com a curva da resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(a)$.

População Total

I_1	I_2	I_3	I_4	M_1	M_2	M_3	M_4
ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1
ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2
h	h	h	h	h	h	h	h
$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$

Figura 4.14: Anexação dos erros de aproximação associado a cada indivíduo

Pela figura 4.14, uma nova linha é adicionada à matriz existente com os erros relativos à aproximação das curvas de cada indivíduo. Esta linha adicionada é muito importante para o algoritmo genético, pois irá permitir a avaliação de cada indivíduo.

4.4.5 Seleção

Esta é a etapa onde se tomam todas as decisões. Depois de os indivíduos serem submetidos a uma avaliação, é fácil de identificar quais os indivíduos com melhores soluções após cada geração.

I_1	I_2	I_3	I_4	M_1	M_2	M_3	M_4
ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1
ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2
h	h	h	h	h	h	h	h
$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$	$\sum \varepsilon$

Figura 4.15: Avaliação dos indivíduos

Para isso basta apenas identificar quais os indivíduos com menores erros de aproximação entre as duas curvas. Na figura 4.15 segue-se um exemplo, em que os indivíduos com o somatório do erro pintado de verde apresentam melhores resultados e os indivíduos com o somatório do erro pintado de vermelho apresentam piores resultados.

De seguida, os indivíduos são organizados de maneira a que os primeiros indivíduos da matriz da população sejam os mais fortes e os últimos indivíduos da matriz os mais fracos. Na busca pelos melhores indivíduos da população, sempre que um indivíduo é selecionado, a sua avaliação é mudada para um valor muito elevado. Este procedimento permite que este indivíduo não volte novamente a ser escolhido. A figura 4.16 ilustra o procedimento da organização da matriz da população.

I_2	I_3	M_1	M_3	I_1	I_4	M_2	M_4
ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1
ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2
h	h	h	h	h	h	h	h
$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$

Figura 4.16: Organização dos indivíduos

Por fim, a primeira metade da matriz é selecionada, pois contém os melhores indivíduos para a geração futura da população ilustrado na figura 4.17.

Geração Futura				Indivíduos Eliminados			
I_2	I_3	M_1	M_3	I_1	I_4	M_2	M_4
ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1
ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2	ρ_2
h	h	h	h	h	h	h	h
$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$	$\Sigma \varepsilon$

Figura 4.17: Seleção dos melhores indivíduos

É de referir que esta nova matriz da população tem a mesma dimensão que a matriz da população inicial. Portanto permite que o algoritmo genético produza gerações futuras quantas vezes necessárias. A segunda metade da matriz é eliminada, pois não contribui positivamente para a evolução da solução.

4.5 Método de Newton-Raphson

Um dos métodos que também permite resolver o problema inverso da estratificação do solo é o método de Newton-Raphson. O método de Newton-Raphson é um dos métodos mais eficientes para resolver equações não lineares do tipo $f(x) = 0$ [33]. Este método é um método recursivo, pois através de uma estimativa inicial x_0 consegue criar uma sucessão x_n .

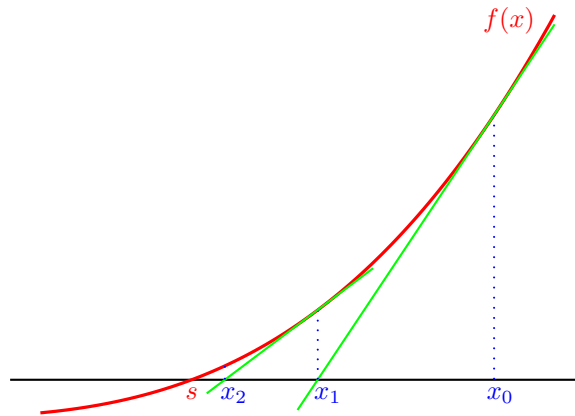


Figura 4.18: Método de Newton-Raphson [33]

Analisando a figura 4.18, para calcular x_1 a partir de x_0 através do método de Newton-Raphson é necessário conhecer a reta tangente que passa no ponto $(x_0, f(x_0))$ da função e que interseca obrigatoriamente o eixo das abscissas. Portanto, a equação da reta tangente em $(x_0, f(x_0))$ cuja inclinação é expressa por $m = f'(x_0)$ é representada na equação (4.8).

$$f(x_1) - f(x_0) = f'(x_0) * (x_1 - x_0) \quad (4.8)$$

Uma vez que esta reta interseca o eixo das abscissa em x_1 , ou seja no ponto $(x_1, 0)$, então:

$$0 - f(x_0) = f'(x_0) * (x_1 - x_0) \quad (4.9)$$

Manipulando a equação (4.9):

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (4.10)$$

Portanto, substituindo na equação x o ponto $(x_0, f(x_0))$ por $(x_n, f(x_n))$ e o ponto $(x_1, f(x_1))$ por $(x_{n+1}, f(x_{n+1}))$, obtemos a expressão de recorrência do método de Newton-Raphson.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (4.11)$$

Como este método depende de retas tangentes da função, por vezes há certos comportamentos da função em que o método não converge para a solução desejada ou simplesmente não encontra nenhuma solução. Na figura 4.19 segue-se dois exemplos deste tipo de comportamentos indesejáveis.

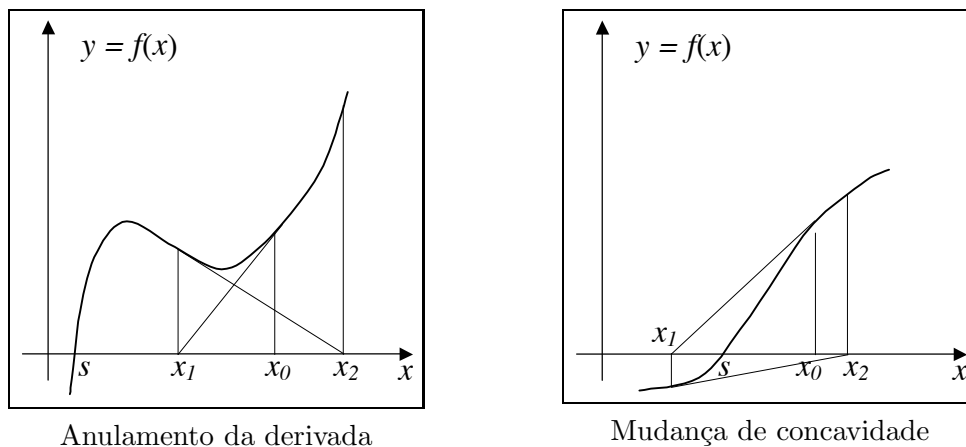


Figura 4.19: Comportamentos indesejáveis no método de Newton-Raphson [33]

Logo, antes de se iniciar o método de Newton-Raphson deve-se obter condições de convergência suficientes para que este funcione corretamente. Por vezes, estas condições não são necessárias, pois há situações em que estas não se verificam e o método converge [33, 34]. De qualquer maneira, é um bom ponto de partida para escolher o x_0 para o método. Então, para uma função contínua em $[a,b]$, podemos ter a certeza que o método converge se:

$$\begin{aligned} x_0 &\in [a, b] \\ f(x_a) \times f(x_b) &< 0 \\ f(x) &\neq 0 \\ f(x_0) \times f''(x_0) &\geq 0 \end{aligned}$$

Assim sendo, o problema inverso é um problema multivariável e as equações são do tipo não-lineares, o que complica a utilização do método como a formulação acima apresentada. Portanto, é necessário generalizar o método de Newton-Raphson para que consiga resolver um sistema de

equações como descrito na equação (4.12).

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_3(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

Como já referido, o método de Newton-Raphson utiliza uma expressão de recorrência para gerar uma sucessão de pontos $\{x_k\}$ que converge para a solução do problema, neste caso para a solução do sistema de equações [33, 35]. Então, a sucessão de pontos é calculada segundo a equação (4.13).

$$x_{k+1} = x_k - [J_F(x_k)]^{-1} F(x_k), \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.13)$$

Em que $F(x)$ é um vetor que representa as equações do problema.

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_k) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_k) \\ f_3(x_1, x_2, \dots, x_k) \\ \vdots \\ f_k(x_1, x_2, \dots, x_k) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Uma vez que o método Newton-Raphson carece das derivadas das equações, significa que é necessário, para o método, calcular o Jacobiano $J_F(x_k)$ de $F(x)$. A equação (4.15) representa as derivadas parciais de $J_F(x_k)$.

$$J_F(x_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_k}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_k}{\partial x_k} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

À semelhança do método de Newton-Raphson para uma só equação, ou seja, unidimensional, também se deve verificar as condições de convergência. Portanto, quando a equação (4.16) é verificada, então a sucessão gerada pelo método de Newton-Raphson converge para a solução pretendida desde que o ponto inicial x_0 seja suficientemente próximo da solução [33].

$$\det J_F(x_k) \neq 0 \quad (4.16)$$

Dado o exposto, para a adaptação do método de Newton-Raphson basta apenas manipular a equação (3.18) e calcular a sua derivada. Sendo o método vocacionado para encontrar as raízes de um sistema de equações do tipo (4.12), manuseando a equação (3.18) obtemos a seguinte

expressão.

$$\rho_{aT_k}(\rho_1, \rho_2, h) = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] - \frac{\rho_a}{\rho_1} + 1 = 0 \quad (4.17)$$

Como o problema inverso consiste em obter os parâmetros (ρ_1, ρ_2, h) do solo, então o vetor x_k corresponde às variáveis do problema a calcular.

$$x_k = \begin{bmatrix} \rho_{1k} \\ \rho_{2k} \\ h_k \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Portanto, sendo necessário calcular três variáveis, o vetor $F(x)$ tem que obrigatoriamente conter três equações (4.17). Logo, este método necessita de no mínimo de três medições da resistividade aparente medidas em campo, embora se consiga utilizar quantas medidas se pretender. Uma vez que se pretende um x_k (4.18) compatível como todas as equações de $F(x)$, significa que todas as equações de $F(x)$ tendem para zero quando x_k consegue aproximar a curva da resistividade aparente teórica à curva da resistividade aparente experimental.

De salientar ainda que o espaçamento a e a resistividade aparente ρ_a correspondente a este espaçamento são apenas constantes ao longo do processo de otimização, pois já se conhecem antes de se iniciar o método de Newton-Raphson. Portanto, a equação (4.19) representa a formulação final do método de Newton-Raphson para a resolução do problema inverso.

$$\begin{bmatrix} \rho_{1k+1} \\ \rho_{2k+1} \\ h_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{1k} \\ \rho_{2k} \\ h_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{aT_1}}{\partial \rho_1} & \frac{\partial \rho_{aT_1}}{\partial \rho_2} & \frac{\partial \rho_{aT_1}}{\partial h} \\ \frac{\partial \rho_{aT_2}}{\partial \rho_1} & \frac{\partial \rho_{aT_2}}{\partial \rho_2} & \frac{\partial \rho_{aT_2}}{\partial h} \\ \frac{\partial \rho_{aT_3}}{\partial \rho_1} & \frac{\partial \rho_{aT_3}}{\partial \rho_2} & \frac{\partial \rho_{aT_3}}{\partial h} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \rho_{aT_1} \\ \rho_{aT_2} \\ \rho_{aT_3} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Em suma, o método de Newton-Raphson apenas necessita de um ponto para se inicializar, embora careça de uma aproximação relativamente perto da solução final, pois caso contrário o método pode divergir ou encontrar uma solução não desejável. Contudo, quando o método converge, tem uma convergência quadrática, mas o cálculo da derivada em cada iteração pode dificultar a adaptação do método para algumas funções, tornando o método a nível computacional lento ou mesmo impossível.

Para o caso do problema inverso, as derivadas parciais para a construção da matriz Jacobiana foram calculadas a partir da equação (4.17) com recurso ao software MATLAB, pois de outra forma seria extremamente difícil. Na figura 4.20 está representado o fluxograma referente ao método de Newton-Raphson.

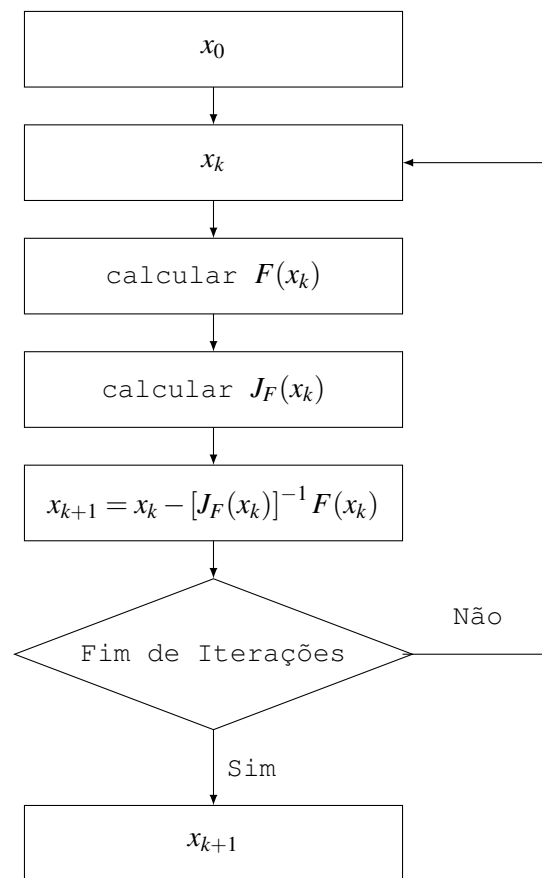


Figura 4.20: Fluxograma do método de Newton-Raphson

4.6 Método Gráfico

O método gráfico é um método desenvolvido por *Sunde* e consiste em obter as características do solo através da interseção gráfica das curvas das resistividades aparentes teóricas e experimentais [36]. De referir que estas curvas são baseadas no método de *Wenner*.

Assim sendo, para aplicar o método gráfico, basta seguir etapas as descritas a seguir [16]. Uma vez recolhidas as resistividades aparentes ρ_a em função do espaçamento a no local do futuro sistema de terras através do método de *Wenner* 3.3, deve-se desenhar graficamente a curva $\rho_a(a) \times a$. Ao prolongar a curva $\rho_a(a) \times a$ até ao eixo das ordenadas, obtemos diretamente o valor da resistividade da primeira camada ρ_1 . Note-se que para uma melhor aproximação de valor de ρ_1 , deve-se realizar várias medições com o método de *Wenner* para espaçamentos muito curtos, pois a corrente injetada no solo pelo método de *Wenner* circula principalmente na primeira camada. De referir que o prolongamento da curva até ao eixo das ordenadas pode, por exemplo, ser produzida através da interpolação das primeiras medições realizadas, destacando deste modo a importância de algumas medições com o espaçamento curto.

De seguida, escolhe-se aleatoriamente duas medições da resistividade aparente $\rho_a(a)$ com os respetivos espaçamentos a . Com vista em reduzir o erro final dos resultados deste método, é

aconselhável nesta etapa escolher medições com espaçamentos intermédios, ou seja, medições que fiquem na parte central da curva experimental $\rho_a(a) \times a$.

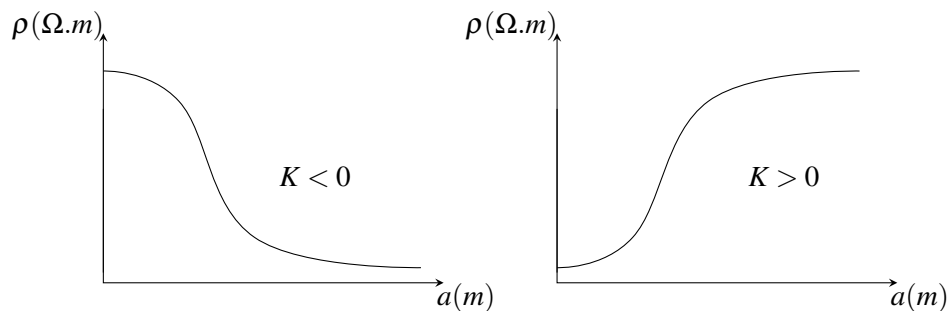


Figura 4.21: Curvas $\rho_a(a) \times a$

Posto isto, pela simples observação do comportamento da curva $\rho_a(a) \times a$, determina-se o sinal do coeficiente de reflexão K . Se a curva $\rho_a(a) \times a$ for decrescente indica que o coeficiente de reflexão é negativo, logo efetua-se o cálculo de $\rho_a(a)/\rho_1$. Por outro lado, se a curva $\rho_a(a) \times a$ for ascendente, o coeficiente de reflexão é positivo e faz-se o cálculo de $\rho_1/\rho_a(a)$.

Com os resultados do cálculo de $\rho_a(a)/\rho_1$ ou $\rho_1/\rho_a(a)$ alcançados, através do gráfico correspondente ao sinal do coeficiente de reflexão K , para todos os K proceder à leitura de todos os h/a correspondentes e anotar numa tabela. O gráfico para o coeficiente de reflexão negativo está representado na figura 4.22 e o gráfico para o coeficiente de reflexão positivo está representado na figura 4.23.

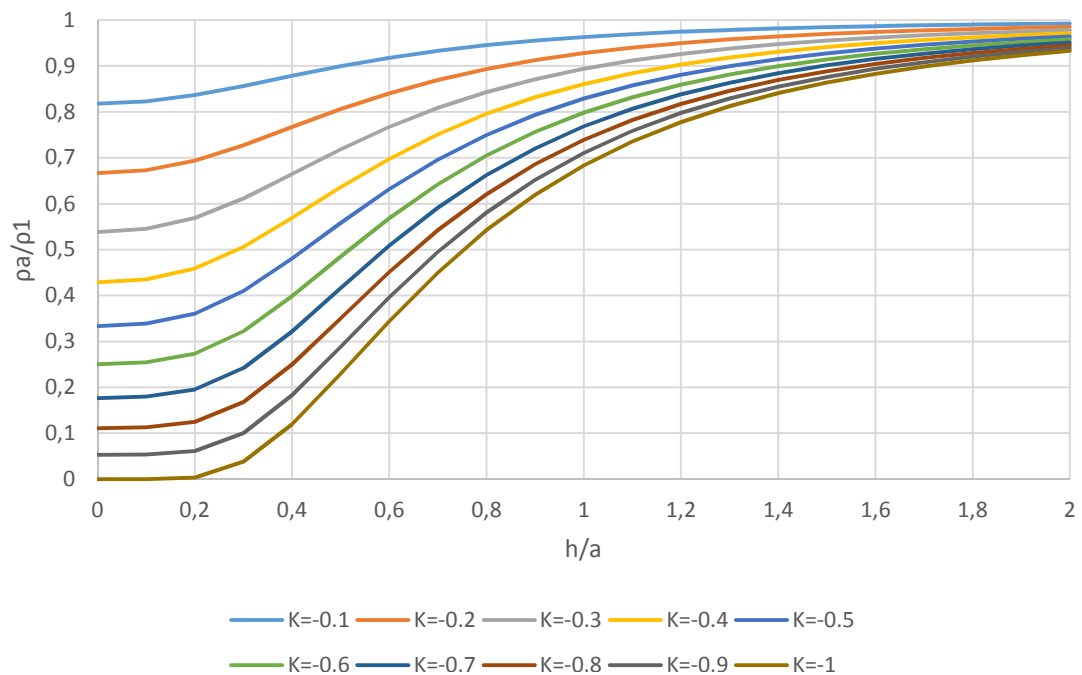


Figura 4.22: Curvas para coeficiente de reflexão K negativos

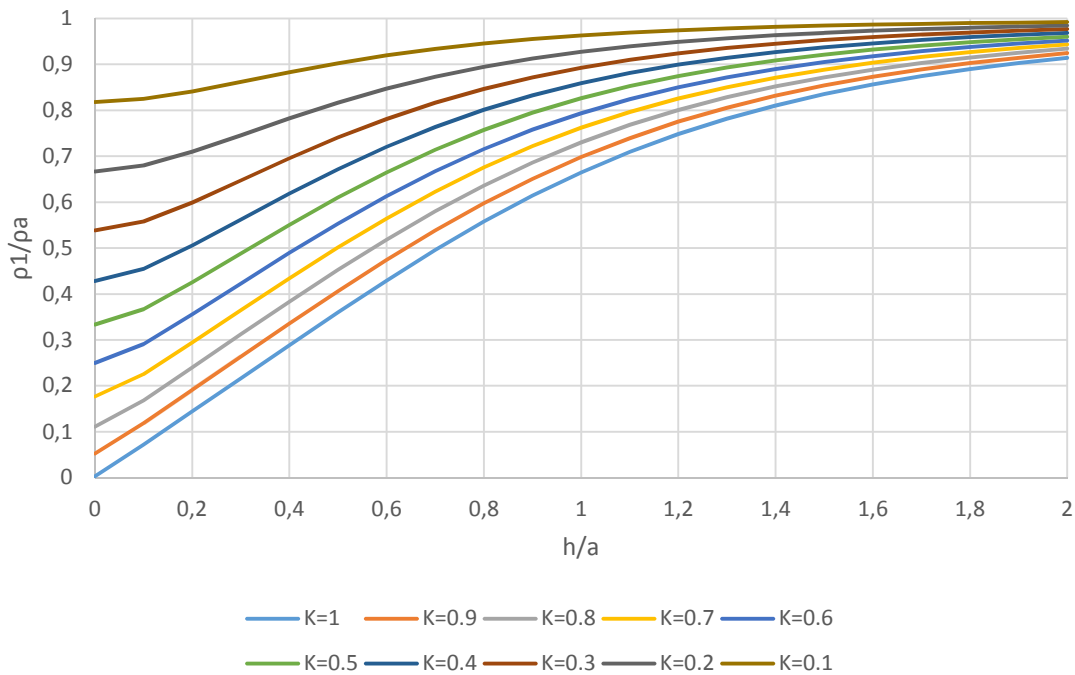


Figura 4.23: Curvas para coeficiente de reflexão K positivos

A tabela acima referida pode ser realizada, por exemplo, traçando uma reta paralela ao eixo das abscissas e passando em $\rho_a(a)/\rho_1$ correspondente, caso o coeficiente de reflexão seja negativo. Deste modo, as leituras de h/a fica facilitada. A tabela 4.2 corresponde a uma leitura do valores de h/a para uma curva com coeficiente de reflexão negativo, $\rho_a(a)/\rho_1 = 0,7$ e um espaçamento $a = 5m$. Importa referir, que esta tabela tem que obrigatoriamente ser construída para as duas medições escolhidas previamente.

Tabela 4.2: Leitura de h/a

K	h/a	$h(m)$
-0,1	-	-
-0,2	0.2200	1.1001
-0,3	0.4656	2.3282
-0,4	0.6041	3.0206
-0,5	0.7074	3.5371
-0,6	0.7913	3.9565
-0,7	0.8625	4.3124
-0,8	0.9246	4.6228
-0,9	0.9797	4.8987
-1	1.0293	5.1467

Com as duas tabelas referentes às medições escolhidas, é possível traçar uma curva $K \times h$ para cada tabela e interseção as curvas. Assim, a interseção das duas curvas resultará nos parâmetros K e h que caracterizam um solo de duas camadas horizontais. A figura 4.24 representa a interseção das duas curvas $K \times h$ com os dados da tabela 4.3.

Tabela 4.3: Dados das curvas $K \times h$

$\rho_a(a)/\rho_1$	$a(m)$
0,7	5
0,4	9

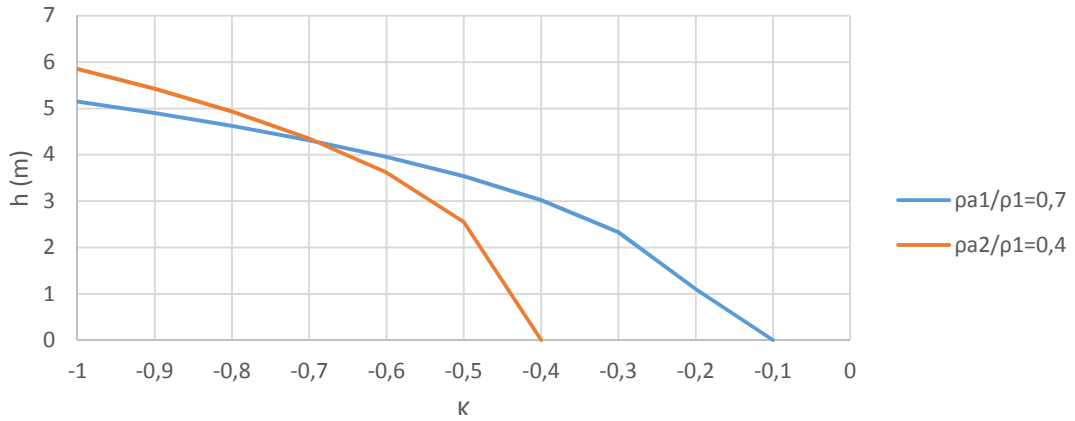


Figura 4.24: Interseção das curvas $K \times h$

Dado o exposto, o método gráfico não é um método iterativo, necessitando de apenas duas medições. Porém, a estimação de ρ_1 carece de várias medições com espaçamentos pequenos.

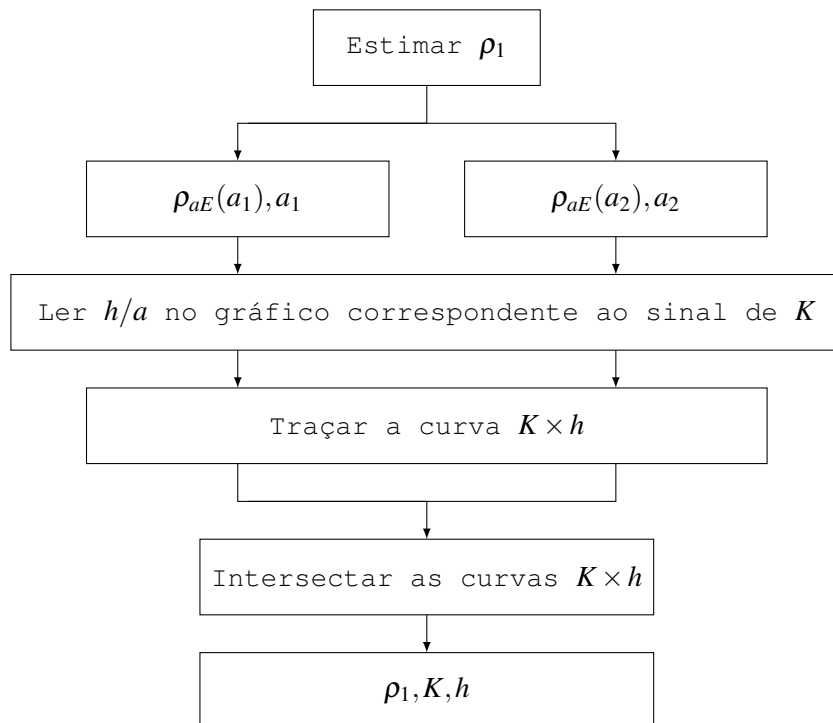


Figura 4.25: Fluxograma do método gráfico

Em vista dos argumentos apresentados e para uma maior compreensão do método, a figura [4.25](#)

representa o fluxograma do método gráfico. Contudo, neste método é necessário calcular muitas intersecções como no caso da leitura do h/a e na intersecção das curvas $K \times h$. Como as equações destas intersecções são bastante complexas, o cálculo torna-se impossível pela via normal, ou seja, manipulando as equações. Portanto, optou-se por calcular estas intersecções por métodos iterativos, nomeadamente o método das bisseções sucessivas.

4.6.1 Método das bisseções sucessivas

O método das bisseções sucessivas é um método numérico iterativo para determinar as raízes de uma função. Este método foi escolhido para calcular as intersecções do método gráfico por ser um método simples, robusto e de fácil implementação computacional. Embora este método possa demorar mais tempo até encontrar a solução, pois necessita de mais iterações de que outros métodos iterativos, este método converge muito facilmente e não necessita de derivadas.

Assim, para o método das bisseções sucessivas convergir, só é necessário verificar o teorema dos valores intermédios ou também conhecido como teorema de Bolzano-Cauchy [37]. Uma função f continua num intervalo $[a, b]$ tal que $f(a) \times f(b) < 0$, permite afirmar que neste intervalo existe pelo menos uma solução s tal que $f(s) = 0$.

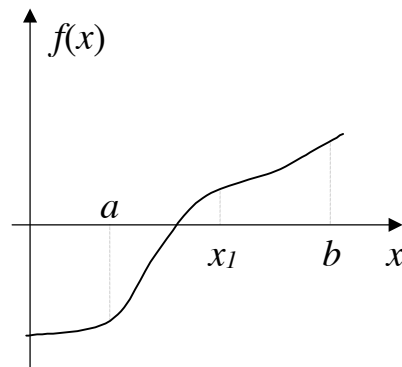


Figura 4.26: Método das bisseções sucessivas [33]

Portanto, num intervalo inicial $[a, b]$ em que a condição $f(a) \times f(b) < 0$ se verifica, é produzido em cada iteração um intervalo com metade do comprimento do intervalo atual. Para isso, o intervalo atual é dividido a meio gerando dois subintervalos. O intervalo em que se verificar a condição $f(a) \times f(b) < 0$, será o intervalo para a próxima interação [33]. Ou seja, sendo o intervalo $[a_n, b_n]$ na interação n , calcula-se o meio do intervalo segundo a equação (4.20).

$$x_{n+1} = \frac{a_n + b_n}{2} \quad (4.20)$$

Posteriormente, o valor x_{n+1} calculado, irá substituir a_n ou b_n conforme $f(x_{n+1}) \times f(a_n) < 0$ ou $f(x_{n+1}) \times f(b_n) < 0$. Deste modo, garante-se a convergência do método em qualquer iteração.

4.7 Resumo

Neste capítulo foram apresentados quatro algoritmos que permitem obter os parâmetros de um solo estratificado em duas camadas horizontais. Contudo, um destes métodos é utilizado como inicializador. Este método é o método das assíptotas.

Analisando os outros três métodos, conclui-se que todos cumprem o seu objetivo. Porém, uns apresentam mais vantagens em alguns aspetos do que outros. Começando pelo método gráfico, este é o método mais fácil de implementar computacionalmente, embora apresenta alguma dificuldade em obter as intersecções necessárias para o método. Em relação aos resultados obtidos, este método é o que possui maior erro, uma vez que este método é fortemente influenciado pelo ρ_1 estimado no início do método e por usar unicamente duas medições ao longo do método.

Quanto ao método de Newton, este tem a desvantagem de se ter que calcular uma matriz Jacobiana em todas as interações do método. Este método também carece de uma solução inicial muito próxima da solução final, pois a convergência do método é difícil de garantir. Contudo, quando o método de Newton converge, este apresenta resultados muito satisfatórios e o tempo de execução do método a nível computacional é muito curto, mesmo ao usar apenas três medições.

O algoritmo genético é o que produz melhores resultados e o que melhor converge. Este algoritmo é relativamente fácil de adaptar ao problema inverso da estratificação do solo e não necessita de derivadas. Porém, devido ao número elevado de iterações que o algoritmo precisa para obter a solução do problema, faz com que a nível computacional seja um pouco demorado, sendo o mais lento a chegar ao resultado final.

Capítulo 5

Resistência de Terra

Neste capítulo serão apresentados sistemas de terras compostos por N elétrodos verticais em paralelo dispostos em várias configurações. Como esta dissertação é principalmente vocacionada para sistema de terras simples, apenas será realizada uma breve referência aos sistemas de terra em malha, pois este tipo de configuração é particularmente usado nas subestações e não muito comum em edifícios e PTs. Contudo, em [2] são descritos vários métodos para calcular a resistência de terra de uma malha de terra, já que para uma subestação é estritamente necessário conseguir uma tensão de passo baixa para que segurança de quem tenha que trabalhar neste local esteja garantida.

Com a exaustiva pesquisa bibliográfica, constatou-se que devido à dificuldade de prever a resistência de terra num elétrodo enterrado num solo de duas camadas, não é possível conceber uma única expressão analítica para este problema [38]. Assim sendo, inicialmente serão apresentadas várias formulações para o cálculo da resistência de terra em solos homogêneos, e com base nestas formulações será feita uma adaptação para os solos de duas camadas e para várias configurações.

5.1 Sistemas de Terra

Um sistema de terra é caracterizado por uma resistência, uma capacitância e uma indutância que influencia a capacidade de condução de corrente para o solo. Logo, um sistema de terra não é uma simples resistência, mas sim uma impedância [8]. Assim, no caso das descargas atmosféricas e para solos com uma resistividade elevada, deve-se considerar o efeito capacitivo e a influência da reactância indutiva ao longo dos condutores e elétrodos, uma vez que são correntes de grande intensidade e de alta frequência. Contudo, para correntes e frequências baixas e com valores de resistividade do solo não muito elevados, os efeitos capacitivos e de ionização do solo são desprezados, simplificando o comportamento do sistema de terras a uma resistência linear como ilustra a figura 5.1.

Portanto, como nos edifícios os defeitos que provocam descargas à terra, à exceção das descargas atmosféricas, são sempre fenómenos lentos e com frequências de valor reduzido, é usual simplificar o sistema de terras a uma resistência linear. Logo, o valor desta resistência, ou seja,

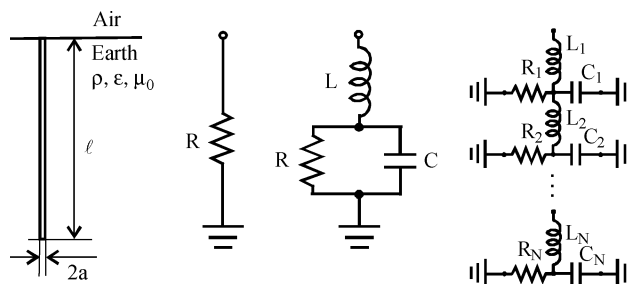


Figura 5.1: Modelo elétrico para um eletrodo de terra e para eletrodos de terra em paralelo [39]

da resistência de terra, pode ser calculado pela relação entre a tensão V_T aplicada a um sistema de terras e pela corrente I resultante desta tensão, como mostra a equação (5.1).

$$R_T = \frac{V_T}{I} \quad (5.1)$$

Esta resistência de terra idealmente pretende-se que seja o mais baixa possível. Porém, dificilmente se consegue obter valores aceitáveis com um único eletrodo de terra. Como a resistência de terra é fortemente influenciada pelas características do solo e pela própria configuração do sistema de terras, é possível manipular estes aspetos de maneira a reduzir o seu valor. Logo, o valor da resistência de terra poder ser reduzida aplicando as seguintes soluções:

- aumentar o número de eletrodos em paralelo;
- aumentar o comprimento dos eletrodos;
- aumentar a secção/diâmetro dos eletrodos;
- aumentar o espaçamento entre eletrodos;
- melhorar a resistividade do solo quimicamente;
- melhorar a resistividade do solo fisicamente.

Em [2, 8] é explicado detalhadamente o comportamento e a influência no valor da resistência de terra para cada uma das soluções descritas.

5.1.1 Limite da Resistência de Terra

Como já referido, o valor da resistência de terra tem influência direta nos dispositivos diferenciais residuais (DDR). Logo, uma resistência de terra elevada, poderá fazer com que o dispositivo diferencial residual não funcione corretamente numa situação de defeito. Portanto é necessário

estabelecer limites para o valor da resistência de terra. Em instalações da responsabilidade da EDP, os valores da resistência de terra são limitados em função do tipo de instalação, como indica a tabela 5.1 [40].

Tabela 5.1: Limites para os valores da resistência de terra para instalações a cargo da EDP

Tipo de Instalação	Limite Máximo (Ω)
Redes MT	20
Redes BT e IP	10 ou 20
Postos de Transformação	20

Contudo, em edifícios com regime de neutro TT e IT não há nenhum limite para o valor da resistência de terra, pois as RTIEBT assim não o obrigam [41]. No entanto, segundo as regras técnicas é obrigatório garantir que tensão limite convencional de contacto U_L seja inferior a 25V (481.3.1.1) para estabelecimentos agrícolas ou pecuniários, estaleiros e locais húmidos e molhados como casas de banho, cozinhas e piscinas, e 50V (413.1.4.2) para os restantes locais. Assim, através da equação (5.1), podemos construir a tabela 5.2 de valores limites para a resistência de terra em função da proteção diferencial escolhida, para que a tensão de contacto limite não seja ultrapassada.

Tabela 5.2: Resistência de terra em função de $I_{\Delta n}$

$I_{\Delta n}(mA)$	$U_L = 25V$	$U_L = 50V$
500	50 Ω	100 Ω
300	83,3 Ω	166,67 Ω
100	250 Ω	500 Ω
30	833,3 Ω	1666,67 Ω
10	2500 Ω	5000 Ω

Porém, quando a alimentação de uma instalação provém de uma rede de distribuição em baixa tensão, e esta é protegida na origem por um disjuntor de entrada que inclua a função diferencial, como é o caso dos limitadores de potência instalados em habitações mais antigas, a resistência de terra deve ser inferior a 100 Ω . Este valor foi calculado de modo a que tensão limite convencional de contacto seja inferior a 50V utilizando dispositivos de proteção diferencial com um $I_{\Delta n} = 500mA$, ou seja, este valor para a resistência de terra calculado pretende que a proteção diferencial presente nos limitadores de potência atue corretamente. Quando não for possível obter valores de resistência de terra inferiores a 100 Ω , a instalação elétrica deve ser protegida por meio de dispositivos diferenciais de valor de corrente estipulada $I_{\Delta n}$ adequada ao valor da resistência de terra obtida [41, 801.5.6.1]. No momento da execução de uma obra, segundo [42, Art.º 598] a tensão limite convencional de contacto máxima é $U_L = 25V$.

Por fim, no caso de existir uma terra única, ou seja, a terra de proteção e de serviço estarem interligadas ao mesmo sistema de terras, as regras técnicas limitam o valor máximo da resistência de terra a 1 Ω [41, 442.3.2].

5.2 Cálculo da Resistência de Terra em Solos Homogêneos

5.2.1 Eléttrodo Vertical

Um único eléttrodo de terra vertical enterrado no solo é considerado a forma mais simples de um sistema de terras. Contudo, é difícil calcular a sua resistência com exatidão, uma vez que este valor é influenciado por vários fatores, sendo uma delas a resistividade do solo. Assim sendo, durante a investigação sobre este assunto, foi constatado que não havia um consenso por parte dos investigadores sobre qual a fórmula certa para calcular a resistência de terra de um eléttrodo vertical num solo homogêneo. Porém, as fórmulas são quase idênticas, apresentando resultados bastante próximos como iremos ver mais adiante.

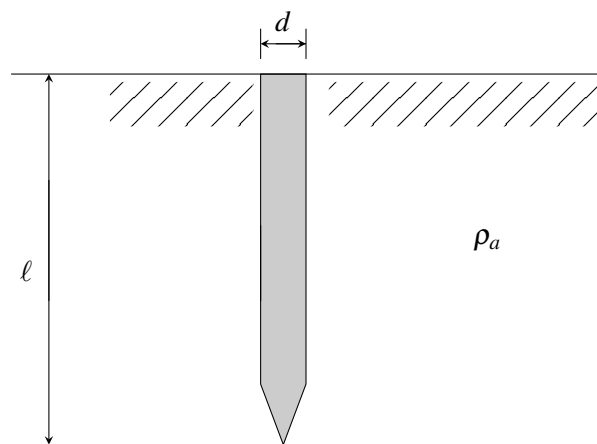


Figura 5.2: Eléttrodo vertical enterrado num solo homogêneo

Considerando a figura 5.2, segundo [39, 43, 44] a expressão utilizada para calcular a resistência de terra para um eléttrodo vertical enterrado em um solo homogêneo é expressa pela equação (5.2).

$$R_{\text{eléttrodo}} = \frac{\rho_a}{2\pi\ell} \ln\left(\frac{4\ell}{d}\right) \quad (5.2)$$

Contudo, em [38, 45, 46, 47, 48] a resistência de terra para o mesmo caso é calculada segundo a equação (5.3).

$$R_{\text{eléttrodo}} = \frac{\rho_a}{2\pi\ell} \ln\left(\frac{8\ell}{d} - 1\right) \quad (5.3)$$

Onde,

ρ_a – resistividade aparente do solo homogêneo;

d – diâmetro do eléttrodo;

ℓ – comprimento do eléttrodo;

Observando as equações (5.2) e (5.3), nota-se que as semelhanças são evidentes, como já referido. Assim, utilizando os dados da tabela 5.3 e variando o comprimento do eletrodo, é possível construir um gráfico 5.3 para comparar ambas as fórmulas.

Tabela 5.3: Dados da figura 5.3

Dados	
Resistividade Aparente (ρ_a)	100 Ωm
Diâmetro do eletrodo (d)	0,015 m

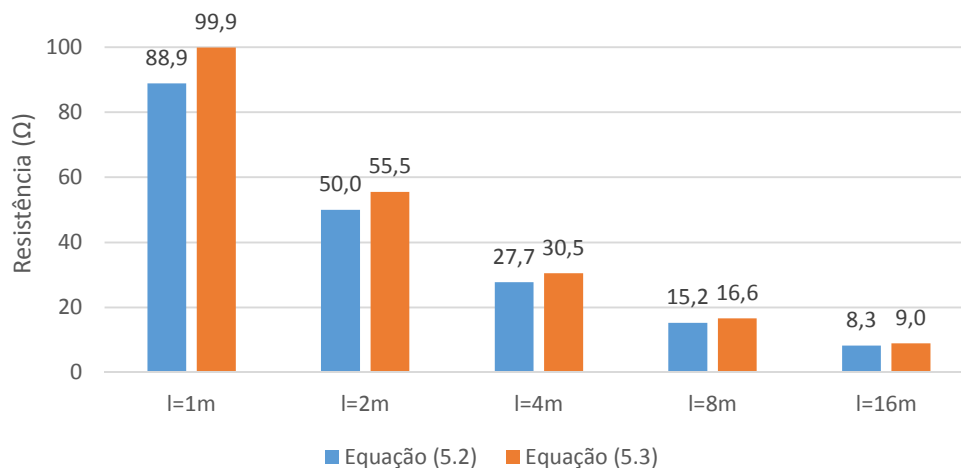


Figura 5.3: Comparação dos resultados obtidos pela equações (5.2) e (5.3)

Em vista dos resultados obtidos pela figura 5.3, conclui-se que a resistência de terra calculada pela equação (5.3) é ligeiramente maior do que calculada pela equação (5.2). Porém, ambas as fórmulas apresentam resultados semelhantes, observando o facto de que quanto maior o comprimento do eletrodo, mais próximos são as resistências calculadas por ambas as fórmulas.

5.2.2 Eléttodos Alinhados em Paralelo

Uma das maneiras para diminuir a resistência de terra total de um sistema de terras é colocar N eletrodos em paralelo. No entanto, a passagem de corrente pelo eletrodo provoca uma distribuição de potencial no solo em volta do eletrodo como ilustra a figura 5.4.

Quando um sistema de terras é composto por N eletrodos em paralelo, esta distribuição de potencial no solo provoca interferências entre eletrodos, que consequentemente aumenta a resistência de cada eletrodo. Ou seja, quanto mais reduzido for o espaçamento entre os eletrodos em paralelo, mais acentuado são as interferências sentidas pelos eletrodos. Assim sendo, estas interferências reduzem o fluxo de corrente de cada eletrodo. Posto isto, num caso em que os eletrodos se dispõem alinhados, os eletrodos centrais irão sentir mais dificuldades a escoar a corrente proveniente de um defeito ou de uma descarga atmosférica para o solo. Por outro lado, os eletrodos situados na periferia sentirão menos dificuldade, uma vez que estes tem menos interferências provocadas

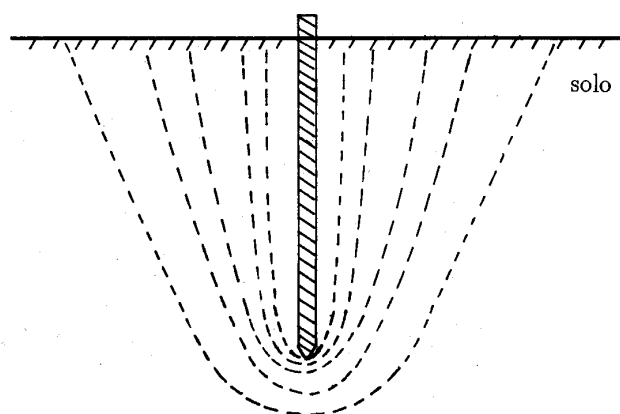


Figura 5.4: Linhas equipotenciais de um eletrodo vertical enterrado num solo homogêneo [16]

pelos eletrodos vizinhos que os eletrodos centrais [36]. A figura 5.5 ilustra a zona de interferência entre dois eletrodos em paralelo.

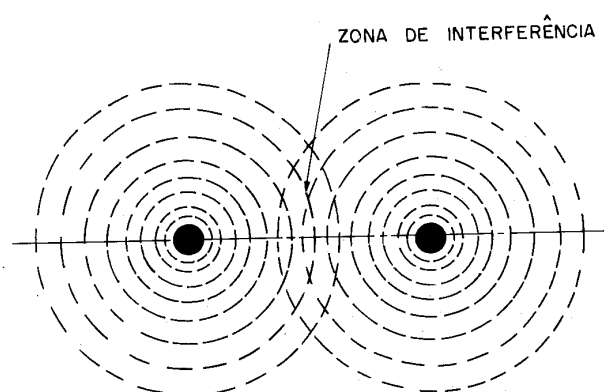


Figura 5.5: Interferências entre eletrodos paralelos [16]

Deste modo, não é possível obter de forma direta a resistência total dos eletrodos em paralelo, uma vez que ao efetuar o cálculo das resistências em paralelo utilizando o valor das resistências individuais de cada eletrodo, não engloba o efeito das interferências entre eletrodos. Porém, quanto maior for o espaçamento entre eletrodos, menor será a interferência entre eletrodos. Assim, para um espaçamento infinito entre eletrodos, teoricamente a interferência entre eletrodos seria nula, onde a resistência total do sistema seria calculado através da associação em paralelo das resistências de cada eletrodo [16]. A figura 5.6 mostra as linhas equipotenciais entre dois eletrodos verticais enterrados num solo homogêneo.

Portanto, o acréscimo de resistência motivado pela interferência entre os eletrodos tem de ser incorporado no cálculo da resistência de terra para sistemas com eletrodos em paralelo. Contudo, segundo vários investigadores, existem várias fórmulas para calcular a resistência de terra para N eletrodos em paralelo enterrados num solo homogêneo. Por uma questão de facilitar posteriormente a análise dos diferentes métodos, estes serão numerados.

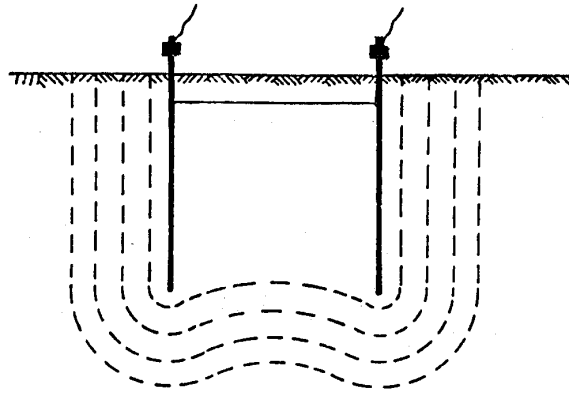


Figura 5.6: Linhas equipotenciais entre dois eletrodos verticais enterrados num solo homogêneo [16]

5.2.2.1 Método 1

Segundo [16] e atendendo à figura 5.7, a resistência de um eletrodo de terra inserido num sistema com N eletrodos em paralelo é calculado pela expressão (5.4).

$$R_i = R_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N R_{ij} \quad (5.4)$$

Em que,

R_i – resistência total do eletrodo i ;

R_{ii} – resistência individual de cada eletrodo, sem a adição das interferências provocados pelos restantes eletrodos, calculado pela expressão (5.2);

N – número de eletrodos em paralelo;

R_{ij} – resistência provocada pela a interferência dos restantes eletrodos em paralelo j , calculado pela expressão (5.5);

$$R_{ij} = \frac{\rho_a}{4\pi\ell} \ln \left[\frac{(b_{ij} + \ell)^2 - a_{ij}^2}{a_{ij}^2 - (b_{ij} - \ell)^2} \right] \quad (5.5)$$

Onde,

a_{ij} – distancia entre o eletrodo i e j ;

ℓ – comprimento do eletrodo;

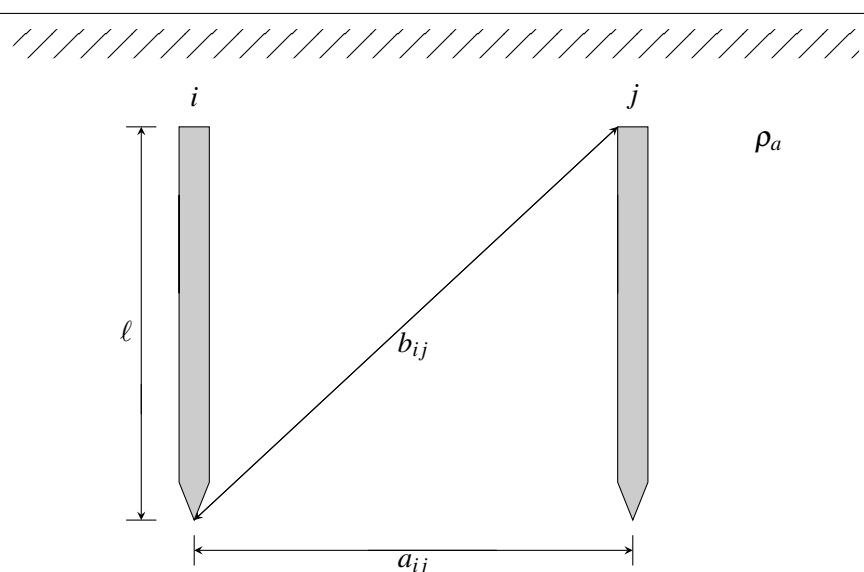


Figura 5.7: Distâncias necessárias para o cálculo de R_i

Na figura 5.7, apresentam-se todas as medidas necessárias para o cálculo da resistência de terra total de cada eletrodo, ou seja, já com as interferências que aumentam a resistência de cada eletrodo. Note-se que b_{ij} resulta da aplicação do teorema de *Pitágoras* como indica a expressão (5.6).

$$b_{ij} = \sqrt{\ell^2 + a_{ij}^2} \quad (5.6)$$

5.2.2.2 Método 2

Segundo [43, 46], as interferências entre os eletrodos paralelos são calculadas com base na expressão (5.7). Contudo, importa referir que esta expressão apenas se aplica a casos em que o espaçamento entre eletrodos a_{ij} é maior que o comprimento dos eletrodos ℓ .

$$R_{ij} = \frac{\rho_a}{2\pi a_{ij}^2} \left[1 - \frac{\ell^2}{3a_{ij}^2} \right] \Omega, \quad a \geq \ell \quad (5.7)$$

Assim sendo, a resistência total de um eletrodo R_i é calculada segundo a expressão (5.4), em que R_{ii} é determinado pela fórmula (5.3), ao contrário do *Método 1* em 5.2.2.1.

Posto isto, para ambos os métodos já apresentados, ou seja, *Método 1* e *Método 2*, já com as resistências individuais de cada eletrodo R_i calculadas, a resistência equivalente de um sistema com N eletrodos em paralelo será determinada pela agregação das resistências em paralelo em uma única resistência, como representa a figura 5.8.

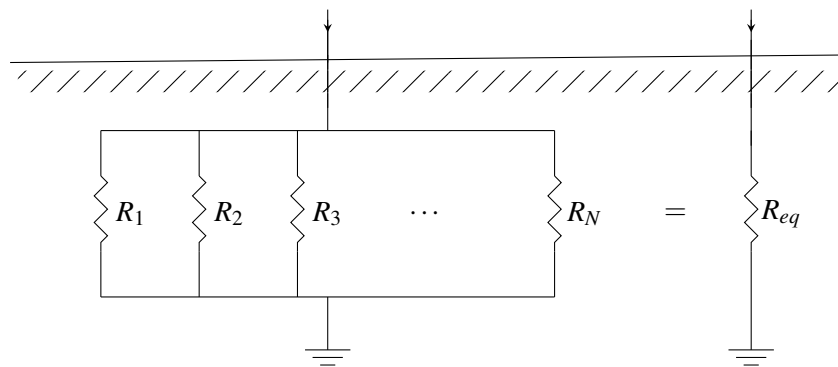


Figura 5.8: Agregação das resistências em paralelo

Portanto, analisando a figura 5.8, para um sistema de terras com N eletrodos em paralelo, temos tantas equações quanto o número de eletrodos de terra. Logo, as equações a resolver estão especificadas na equação (5.8).

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + \dots + R_{1N} \\
 R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + \dots + R_{2N} \\
 &\vdots \\
 R_N &= R_{N1} + R_{N2} + R_{N3} + \dots + R_{NN}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Por fim calcula-se a resistência equivalente R_{eq} resultante do paralelo das resistências do sistema de terras, como indicam as equações (5.9) e (5.10).

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N} \tag{5.9}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}} \tag{5.10}$$

Então, para um caso em que um sistema de terras é composto por quatro resistências em paralelo temos as seguintes equações.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} \\
 R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} \\
 R_3 &= R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} \\
 R_4 &= R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} \tag{5.12}$$

5.2.2.3 Método 3

Em [47, 49], é apresentada uma outra alternativa de cálculo para um sistema com N eléttodos em paralelo. Ao contrário dos métodos anteriores, este método oferece uma expressão de cálculo geral, sendo bastante simples determinar a resistência total do sistema de terras. Assim sendo, o cálculo é efetuado recorrendo à equação (5.13).

$$R_{eq} = \frac{R_{el\acute{e}ttodo} \times F}{N} \quad (5.13)$$

Em que,

$$F \approx 0,377527 \times \ln(N) + 0,89057$$

Onde,

$R_{el\acute{e}ttodo}$ – resistência individual de cada eléttodo calculado pela expressão (5.3);

N – número de eléttodos que compõe o sistema de terras;

Salienta-se o facto deste método não necessitar do espaçamento entre eléttodos para o cálculo da resistência de terra, tornando-o num método menos preciso. Porém, este método é bastante válido para situações em que o espaçamento entre eléttodos seja semelhante ao comprimento dos mesmos.

5.2.3 Comparação entre métodos

Uma vez apresentados três métodos diferentes de calcular a resistência de terra para um sistema com N eléttodos alinhados em paralelo, surge a necessidade de comparar os métodos. Pois para o mesmo sistema de terras obtém-se resultados diferentes, embora estes sejam semelhantes entre os métodos. Portanto, numa primeira análise serão comparados os resultados dos métodos para variação dos espaçamentos e posteriormente para a variação do número de eléttodos em paralelo.

Assim sendo, para um sistema de terras com as características da tabela 5.4, variando o espaçamento entre eléttodos, obtém-se a figura 5.9.

Tabela 5.4: Variação do espaçamento dos eléttodos em solo homogéneo

Características dos eléttodos e do solo	
Comprimento (ℓ)	4m
Diâmetro (d)	0,015m
Número de Eléttodos (N)	6
Resistividade (ρ_a)	100 $\Omega.m$

Pela figura 5.9, constata-se que o valor da resistência de terra decresce com o aumento do espaçamento como se esperava, com a exceção do *Método 3*. Pois, o *Método 3* não engloba o

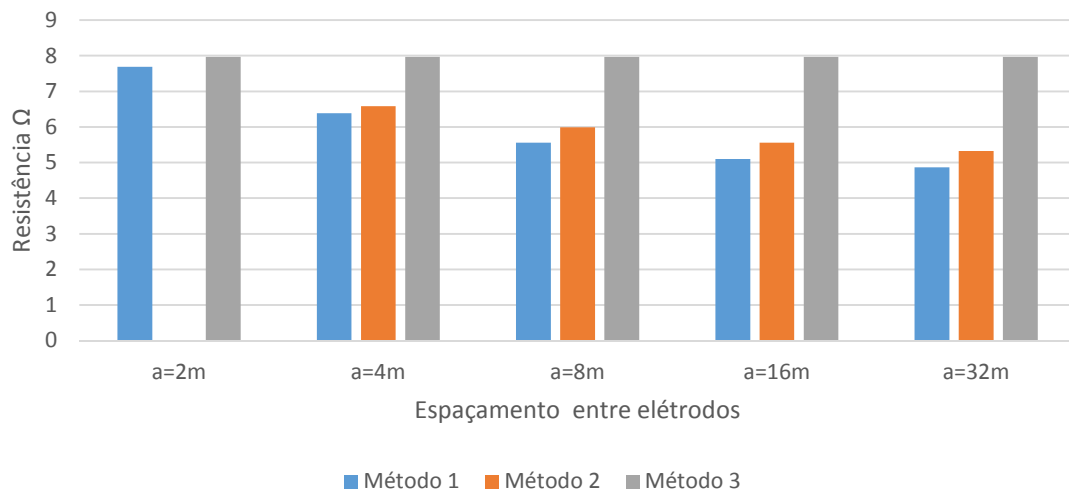


Figura 5.9: Variação dos espaçamentos para elétrodos em paralelo em solo homogêneo

espaçamento no cálculo, apresentando para este caso um resultado sempre constante. Note-se ainda a ausência do resultado para o *Método 2* para um espaçamento de $a = 2m$, pois $a < \ell$, logo não é possível utilizar o *Método 2*. Porém, salienta-se o facto de para espaçamentos em que $a \geq \ell$, os resultados apresentarem valores muito semelhantes, com o *Método 1* a obter resultados um pouco mais otimistas que o *Método 2*.

Variando agora o número de elétrodos em paralelo para um sistema de terras com as características apresentadas na tabela 5.5, construiu-se o gráfico da figura 5.10.

Tabela 5.5: Variação do número de elétrodos em paralelo em solo homogêneo

Características dos elétrodos e do solo	
Comprimento (ℓ)	$4m$
Diâmetro (d)	$0,015m$
Espaçamento (a)	$4m$
Resistividade (ρ_a)	$100\Omega.m$

Observando a figura 5.10, é perceptível que com o aumento do número de elétrodos em paralelo, o valor da resistência de terra diminui como era previsível. Também para este caso o *Método 1* volta a apresentar resultados mais otimistas que os restantes métodos, sendo o *Método 3* o mais pessimista. No entanto, verifica-se a proximidade entre os resultados. Importa referir o facto de o resultado do *Método 3* deixar de ser constante, uma vez que este método tem em consideração o número de elétrodos em paralelo. Devido ao *Método 3* ser pessimista nos resultados que produz, torna este método especialmente interessante, pois é o único método com uma expressão simples e direta, permitindo realizar um cálculo rápido do valor da resistência de terra para casos em que $a \approx \ell$.

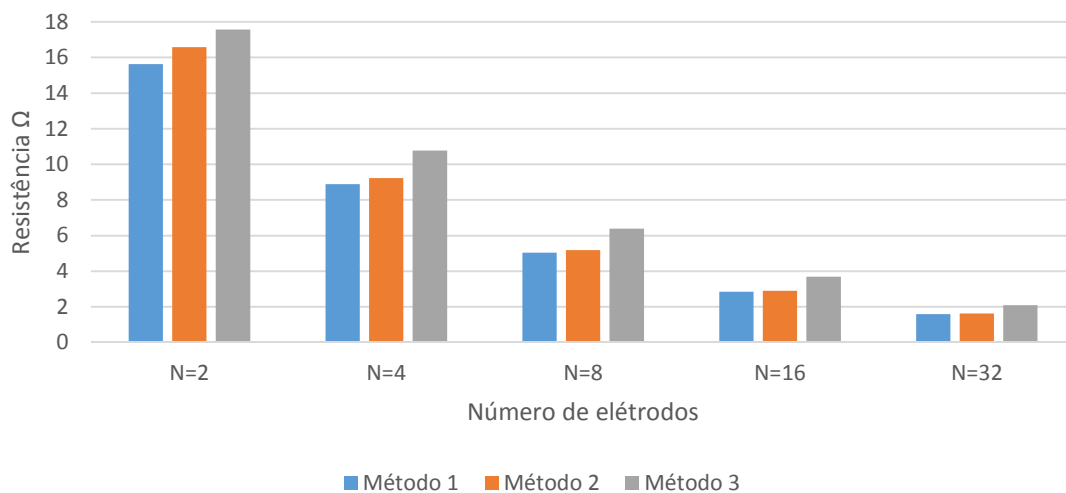


Figura 5.10: Variação do número de eletrodos em paralelo em solo homogêneo

5.2.4 Índice de Redução

O índice de redução traduz-se na relação entre a resistência total do sistema de terras e a resistência individual de cada eletrodo sem a interferência dos outros eletrodos. Sendo τ a variável que representa o índice de redução, este é calculado segundo a expressão (5.14).

$$\tau = \frac{R_{eq}}{R_{eletrodo}} \quad (5.14)$$

Assim, deste modo, é possível tabular os índices de redução τ para diferentes tipos de eletrodos e configurações para solos homogêneos. Portanto, a resistência total de um sistema de terra com N eletrodos em paralelo, pode ser calculada conhecendo a resistência de um eletrodo isolado e o valor do índice de redução τ para a característica do sistema de terras em questão. Logo, manipulando a expressão (5.14), obtém-se a seguinte fórmula (5.15) para o cálculo da resistência total de um sistema de terras.

$$R_{eq} = \tau \times R_{eletrodo} \quad (5.15)$$

Em suma, com a variação das características do solo e do sistema de terras, constata-se que o índice de redução τ também varia. Deste modo, é possível construir um gráfico que permita visualizar de forma mais eficaz a variação deste índice em função da característica do sistema de terras. Este sistema de terras será composto por eletrodos em paralelo com as características descritas na tabela 5.6 dispostos em fila, onde será variado o número de eletrodos em paralelo e o espaçamento entre eletrodos. De salientar também que os valores do índice de redução da figura 5.11 foram calculados com a formulação do método 1 descrito em 5.2.2.1.

Analisando a figura 5.11, consegue-se extrair dados importantes sobre o comportamento do sistema de terras quanto à variação do espaçamento entre eletrodos, uma vez que a partir de espaçamentos maiores que oito metros, a redução da resistência total do sistema é praticamente

Tabela 5.6: Índice de redução

Características dos eléttodos	
Comprimento (ℓ)	2m
Diâmetro (d)	0,015m

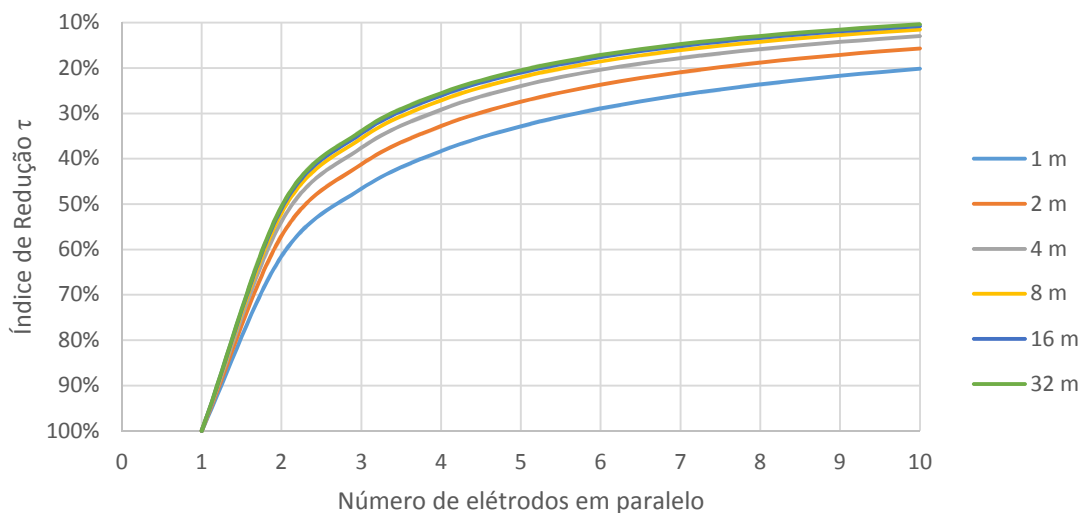


Figura 5.11: Comparação da redução dos valores da resistência de terra em função do espaçamento e do número de eléttodos em paralelo

insignificante. Este acontecimento é justificável devido facto das interferências provocadas pelos eléttodos vizinhos serem quase impercetíveis para o cálculo da resistência real de um eléttodo. Portanto, tendo em vista os factos mencionados, torna-se inútil aumentar para mais de oito metros o espaçamento entre eléttodos com o intuito de reduzir a resistência total do sistema, pelo que é aconselhável utilizar outros métodos para reduzir a resistência total do sistema de terras. Já para o aumento do número de eléttodos em paralelo, nota-se uma redução acentuada do valor da resistência total do sistema de terras. Embora na figura 5.11 o número de eléttodos em paralelo esteja limitado a dez eléttodos, não significa que a partir deste número de eléttodos em paralelo, o investimento para redução da resistência de terra do sistema seja inviável.

Por fim, importa referir que, como estes índices de redução são calculados para o mesmo solo, ou seja, com a resistividade do solo sempre constante, o valor destes índices é sempre igual para qualquer solo homogéneo, isto é, para qualquer resistividade do solo.

5.3 Cálculo da Resistência de Terra em Solos de Duas Camadas

Concluída a análise de sistemas de terras em solos homogéneos, será estudado o caso de sistemas de terras enterrados em solo heterogéneos com duas camadas horizontais. Como já referido, é muito difícil encontrar solos homogéneos quando se realiza um sistema de terras. Portanto,

quando se pretende prever o valor da resistência para um determinado sistema de terras com alguma exatidão, é necessário adicionar as características reais do solo aos cálculos.

5.3.1 Malhas de terra

As malhas de terra são um caso muito particular das subestações, embora em casos raros seja também uma opção economicamente viável para outros tipos de instalações. Um exemplo deste tipo de casos é quanto no local de uma instalação com um PT incluído, apresenta uma resistividade do solo elevada, e para que legalmente seja permitido interligar as terras de proteção às terras de serviço, a instalação é obrigada a ter uma resistência de terra inferior a 1Ω .

Portanto, o método escolhido para software desenvolvido será o método desenvolvido por *Chow et al* [2, 50, 51]. Este método permite calcular a resistência de malhas de terra para solos com duas camadas de forma direta e precisa. Assim sendo, o método de *Chow* não necessita de constantes empíricas obtidas a partir de curvas de gráficos previamente traçadas para um número reduzido de casos, como é o caso dos métodos desenvolvidos por *Schwarz* e *Nahman* também apresentados em [2].

Analisando a figura 5.12, *Chow* conclui que para malhas de terra em que os seus elétrodos estejam envolvidos pelas duas camadas do solo, a resistência de terra poderia ser calculada realizando o paralelo entre as duas resistências determinadas para cada resistividade do solo. Portanto, o paralelo entre as duas resistências é realizado segundo a equação (5.16).

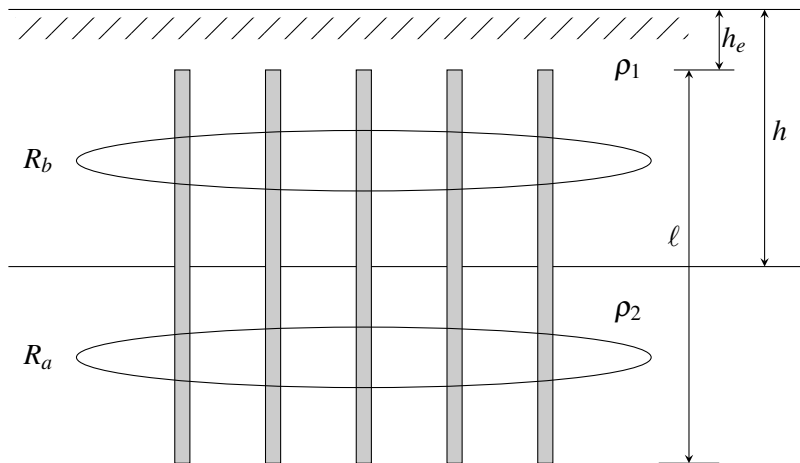


Figura 5.12: Elétrodos enterrados num solo de duas camadas

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad (5.16)$$

Posto isto, as equações (5.17) e (5.18) referem-se ao cálculo da resistência da primeira e segunda camada respetivamente.

$$R_b = \frac{\rho_1}{(h - h_e)} \cdot g_0 \frac{F_0}{N} + \frac{\rho_1}{h} \cdot \phi_0 \quad (5.17)$$

$$R_a = \frac{\rho_2}{(\ell + h_e - h)} \cdot g_0 \frac{F_0}{N} \quad (5.18)$$

Onde,

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{4\ell}{d} \right) - 1 + \frac{\ln(2)}{1 + \frac{4h_e \ln(2)}{\ell}} \right] \quad (5.19)$$

$$F = 1 + \left(N - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \cdot \frac{R_s}{R_\ell} \quad (5.20)$$

Devido às múltiplas reflexões provocadas pelo solo de duas camadas, é necessário corrigir o comprimento dos elétrodos. Assim sendo, F_0 é calculado para o comprimento do elétrodo especificado na equação (5.21).

$$F_0 = F \Big|_{\ell \rightarrow \frac{\ell}{1-0,9k}} \quad (5.21)$$

As restantes variáveis são calculados segundo as equações (5.22) e (5.23).

$$\frac{R_s}{R_\ell} = \frac{\sqrt{\frac{\ell}{r} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{\ell}{\ell + \frac{r}{2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}}{2\pi g_0} \quad (5.22)$$

$$\phi_0 = \frac{\frac{1}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{1}{1-k} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N}{F_0} - 1 \right)^2 \left(\frac{\ell + h_e}{h} \right)^2 + 1}} \quad (5.23)$$

Onde r corresponde ao raio do círculo da área ocupada pela malha de terra. No caso da forma geométrica da área ocupada pela malha de terra ser diferente de um círculo, r deve ser calculado de maneira a que o perímetro do círculo seja igual ao perímetro da área ocupada.

5.3.2 Elétrodos alinhados inseridos apenas na primeira camada

Num solo de duas camadas, nem sempre um elétrodo de terra chega a entrar em contacto com a camada mais profunda, como acontece em elétrodos com comprimentos pequenos. No entanto, esta camada influencia a resistência do elétrodo de terra. Assim sendo, segundo o IEEE [18], o cálculo da resistência para um elétrodo isolado é realizada segundo a expressão (5.24).

$$R_{elétrodo} = \frac{\rho_1}{2\pi\ell} \ln \left(\frac{4\ell}{d} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[K^n \times \ln \left(\frac{2nh + \ell}{2nh - \ell} \right) \right] \quad (5.24)$$

No entanto, quando se aplica a expressão (5.24) a um solo homogéneo, ou seja, com $K = 0$, obtém-se a equação (5.2) referente a solo homogéneo.

5.3.3 Eléttodos em paralelo alinhados inseridos nas duas camadas

No caso em que os eléctrodos entram em contacto com as duas camadas do solo, as expressões para o cálculo da resistência de terra ainda não estão muito desenvolvidos. Portanto, foi necessário adaptar algumas expressões para conseguir realizar o cálculo da resistência de terra para eléctrodos em paralelo. Assim sendo, serão apresentados dois métodos que permitem este cálculo, e onde apresentam resultados semelhantes.

5.3.3.1 Método 1 : Adaptação do comprimento dos eléctrodos

Segundo [44], o cálculo da resistência de terra de um único eléctrodo enterrado num solo heterogéneo é dado pela expressão (5.25).

$$R_{\text{eléttodo}} = \frac{\rho_2}{2\pi\ell_e} \ln \left(\frac{4\ell_e}{d} \right) \quad (5.25)$$

Onde o comprimento do eléctrodo é adaptado segundo a expressão (5.26).

$$\ell_e = \ell_2 + \ell_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (5.26)$$

Em que,

ρ_1 – resistividade da primeira camada do solo;

ρ_2 – resistividade da segunda camada do solo;

ℓ_1 – comprimento do eléctrodo inserido na primeira camada do solo;

ℓ_2 – comprimento do eléctrodo inserido na segunda camada do solo.

Esta formula é valida quando $0,1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 10$ e $0,1 \leq \frac{\ell}{h} \leq 5$. No entanto, só permite calcular a resistência de terra para um único eléctrodo de terra. Assim sendo, num sistema de terras com N eléctrodos em paralelo, é necessário calcular as interferências provocadas pelos eléctrodos mais próximos como já referido. Uma vez que a expressão (5.25) é muito semelhante à expressão (5.2), as interferências serão calculadas segundo a formulação abordada em 5.2.2.1, com a particularidade de $\ell = \ell_e$ e $\rho_a = \rho_2$, como mostra a equação (5.27).

$$R_{ij} = \frac{\rho_2}{4\pi\ell_e} \ln \left[\frac{(b_{ij} + \ell_e)^2 - a_{ij}^2}{a_{ij}^2 - (b_{ij} - \ell_e)^2} \right] \quad (5.27)$$

Onde as medidas relacionadas com o eléctrodo, necessárias para a resolução do método, estão identificadas na figura 5.13. Note-se ainda que b_{ij} é calculado segunda e equação (5.28).

$$b_{ij} = \sqrt{\ell_e^2 + a_{ij}^2} \quad (5.28)$$

5.3.3.2 Método 2 : Paralelo dos elétrodos entre resistividades

Este método surge com base na ideia de *Chow* exposta em 5.3.1. Ou seja, primeiramente é calculada a resistência para cada resistividade do solo e depois é realizado o paralelo entre estas, obtendo-se deste modo a resistência total do sistema de terras. Como a resistência de terra de cada solo é calculada de forma independente, ou seja, o cálculo é realizado para solos homogêneos, será utilizada a formulação apresentada em 5.2.2.1 por ser mais completa e mais geral.

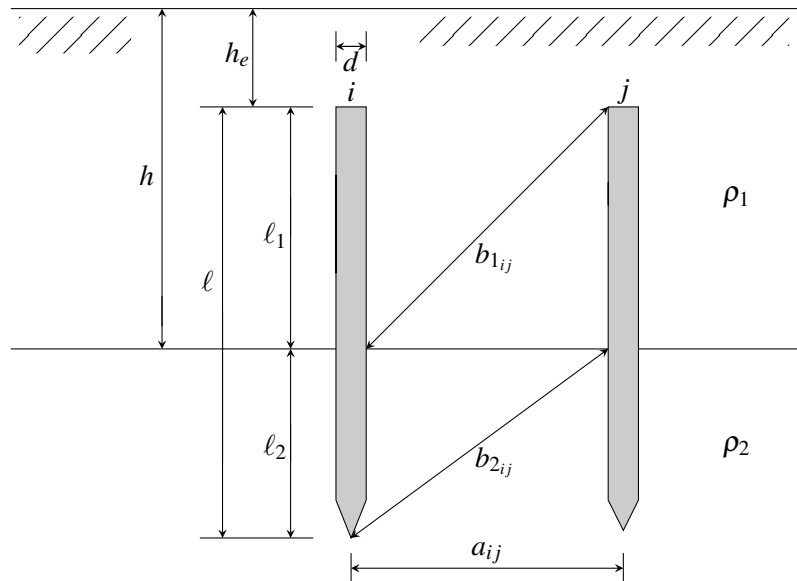


Figura 5.13: Elétrodo enterrado num solo heterogêneo

Portanto, observando a figura 5.13 a resistência de terra de cada elétrodo da primeira camada é determinada pela equação (5.29).

$$R_{1i} = R_{1ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n R_{1ij} \quad (5.29)$$

Onde,

$$R_{1ii} = \frac{\rho_1}{2\pi\ell_1} \ln \left(\frac{4\ell_1}{d} \right) \quad (5.30)$$

$$R_{1ij} = \frac{\rho_1}{4\pi\ell_1} \ln \left[\frac{(b_{1ij} + \ell_1)^2 - a_{ij}^2}{a_{ij}^2 - (b_{1ij} - \ell_1)^2} \right] \quad (5.31)$$

Logo, a resistência total referente à primeira camada é obtida pela equação (5.32).

$$R_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{1i}}} \quad (5.32)$$

Por sua vez, a resistência de terra de cada elétron da segunda camada é calculada pela equação (5.33).

$$R_{2i} = R_{2ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n R_{2ij} \quad (5.33)$$

Em que,

$$R_{2ii} = \frac{\rho_2}{2\pi\ell_2} \ln\left(\frac{4\ell_2}{d}\right) \quad (5.34)$$

$$R_{2ij} = \frac{\rho_2}{4\pi\ell_2} \ln\left[\frac{(b_{2ij} + \ell_2)^2 - a_{ij}^2}{a_{ij}^2 - (b_{2ij} - \ell_2)^2}\right] \quad (5.35)$$

Onde a resistência total dos elétrons da segunda camada é dada pela equação (5.36).

$$R_2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{2i}}} \quad (5.36)$$

Assim sendo, pela equação (5.37) realiza-se o paralelo entre as duas resistências calculadas para cada camada, obtendo-se deste modo a resistência equivalente total para o sistema de terras.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (5.37)$$

5.3.4 Comparação entre métodos

Para a comparação dos métodos apresentados será utilizado um sistema de terra com as características descritas na tabela 5.7, onde será variado o comprimento dos elétrons. As características do solo também se encontram na mesma tabela. Assim sendo, foi possível através da empresa LABLELEC simular este sistema de terras por um software profissional e obter valores da resistência de terra bastante próximos da realidade. Portanto, na figura 5.14 é realizada uma comparação dos métodos estudados para solos com duas camadas e também é efetuada uma comparação com os resultados cedidos pelo LABLELEC.

Tabela 5.7: Variação do comprimento dos elétrons num solo heterogéneo de duas camadas

Características dos elétrons e do solo	
Diâmetro (d)	0,015 m
Espaçamento (a)	7 m
Profundidade do elétron (h_e)	1 m
Número de Elétrons (N)	6
Resistividade da 1ª camada (ρ_1)	1000 $\Omega.m$
Resistividade da 2ª camada (ρ_2)	400 $\Omega.m$
Profundidade da 1ª camada (h)	2 m

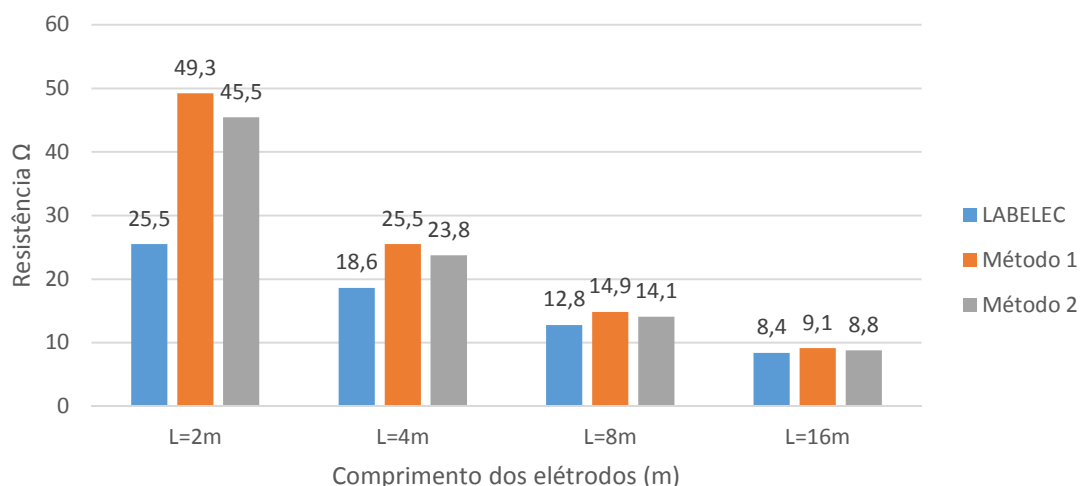


Figura 5.14: Comparação dos resultados obtidos pelos métodos com os valores simulados

Pela figura 5.14 conclui-se que o *Método 1* é mais pessimista do que o *Método 2*. No entanto verifica-se a proximidade entre resultados. Deste modo, é possível validar o desempenho do *Método 2*, pois trata-se de um método inovador e ainda não explorado para sistemas de terras com configurações simples, como é o caso dos elétrodos de terra em paralelo, cuja configuração não é em malha.

Embora a diferença entre valores seja considerável para elétrodos pequenos, é de salientar que os resultados determinados pelos métodos desenvolvidos são sempre pessimistas, ou seja, a resistência de terra calculada é sempre maior do que a medida em campo. Assim sendo, o software desenvolvido nesta dissertação com base nos métodos descritos, permite obter uma ideia pessimista dos valores da resistência de terra de um determinado sistema de terras. Uma vez que é sempre preferível prever a resistência de terra para um cenário mais pessimista do que para um cenário otimista, faz com que o software desenvolvido seja uma boa ferramenta para este tipo de estudos.

Dado que as diferentes resistividades das camadas do solo alteram a resistência de terra de um sistema, será realizada uma análise dos métodos abordados em função desta particularidade, para isso, será usado um sistema de terras com as características indicadas na tabela 5.8.

Tabela 5.8: Variação das resistividades do solo heterogéneo

Características dos elétrodos e do solo	
Diâmetro (d)	0,015 m
Espaçamento (a)	5 m
Comprimento do elétrodo (ℓ)	2 m
Profundidade do elétrodo (h_e)	1 m
Número de Elétrodos (N)	8
Profundidade da 1ª camada (h)	2 m

Com vista a perceber o comportamento dos métodos, serão invertidas somente as resistividades

das camadas do solo. Note-se que neste sistema de terras, metade do comprimento dos eléctrodos está na primeira camada e a outra metade está na segunda camada, pelo que permitirá também perceber o efeito das resistividades das camadas no valor da resistência de terra. Mais uma vez, este sistema de terras foi simulado pelo software do LABELEC, possibilitando comparar resultados, como ilustra a figura 5.15.

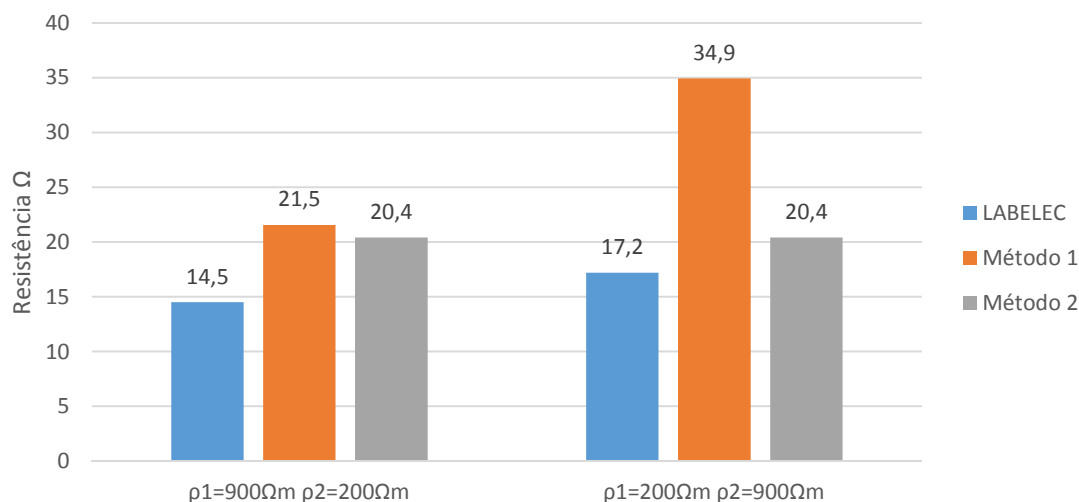


Figura 5.15: Análise dos valores da resistência de terra com a inversão das resistividade das diferentes camadas do solo

Observando a figura 5.15, pode-se confirmar o pessimismo dos resultados obtidos por ambos os métodos, com mais uma vez o *Método 2* a obter valores ligeiramente menores do que o *Método 1*. Posto isto, começando a análise pelos resultados fornecidos pelo LABELEC, constata-se que o valor da resistência para as duas situações são diferentes. Pois, nota-se uma diminuição do valor da resistência de terra para o caso em que a resistividade da segunda camada é menor em relação à resistividade da primeira camada. Portanto, é possível concluir que a segunda camada tem mais influência no valor da resistência de terra do que a primeira camada, pois a profundidade da segunda camada é muito superior à profundidade da primeira camada, lembrando que a profundidade da segunda camada é infinita.

Analisando os métodos, pode-se verificar que o *Método 1* consegue diferenciar a inversão das resistividades das diferentes camadas do solo. O mesmo não acontece com o *Método 2*, sendo previsível a igualdade dos resultados para ambos os casos. Este acontecimento justifica-se pelo facto de o *Método 2* efetuar o cálculo da resistência de terra separando e tratando de forma independente a resistência de terra para cada camada do solo. Ou seja,

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1(\rho_1=900)} + \frac{1}{R_2(\rho_2=200)}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1(\rho_1=200)} + \frac{1}{R_2(\rho_1=900)}}$$

Já no *Método 1* o cálculo da resistência de terra é realizada de um modo global, ajustando apenas o comprimento do eléctrodo em função da característica do solo.

5.4 Outras configurações

As configurações apresentadas nos pontos 5.2.2 e 5.3.3 são configurações onde os elétrodos em paralelo estão alinhados. No entanto existem outros tipos de configurações para elétrodos verticais em paralelo, tais como:

- Configuração em Pé de Galo;
- Configuração em Estrela;
- Configuração em Anel.

5.4.1 Configuração em Pé de Galo

A configuração em pé de galo, também conhecida como configuração em pé de ave, é uma configuração particularmente muito utilizada em pequenos edifícios, como por exemplo habitações. Esta configuração necessita apenas de quatro elétrodos dispostos segundo a figura 5.16, que se assemelha com uma pata de um galo, tendo o nome desta curiosidade. Portanto, em edifícios com pouco espaço para construir o sistema de terras e que não tenha a necessidade de obter valores para a resistência de terra pequenos, normalmente é esta a configuração escolhida. Pois, desta forma permite rentabilizar melhor a área disponível, maximizando o espaçamento a entre elétrodos.

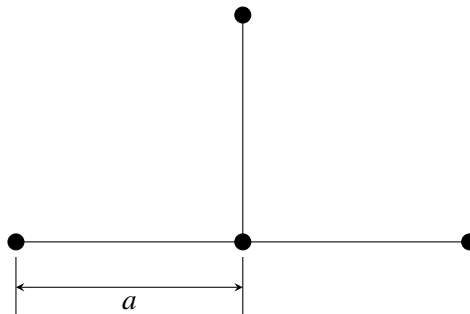


Figura 5.16: Configuração em Pé de Galo

5.4.2 Configuração em Estrela

A configuração em estrela é muito utilizada em edifícios com necessidades de obter valores para a resistência de terra baixos, como é o caso de edifícios alimentados em MT onde se pretende juntar a terra de proteção com a terra de serviço. Observando a figura 5.17, percebe-se o porquê do nome desta configuração, pois o lugar geométrico dos elétrodos correspondem aos vértices de uma estrela. Assim sendo, esta configuração é ideal para sistemas de terras com mais de cinco elétrodos em paralelo, permitindo economizar espaço necessário para a sua construção. Note-se ainda que esta configuração é definida pelo espaçamento entre elétrodos, como indica a

figura 5.17. No entanto, a ligação dos elétrodos pode ser efetuada segunda a figura 5.17 ou em forma de anel fechado. Adicionalmente, em muitos projetos, este tipo de sistemas de terras são ligados à estrutura dos edifícios, conseguindo baixar ainda mais a resistência de terra.

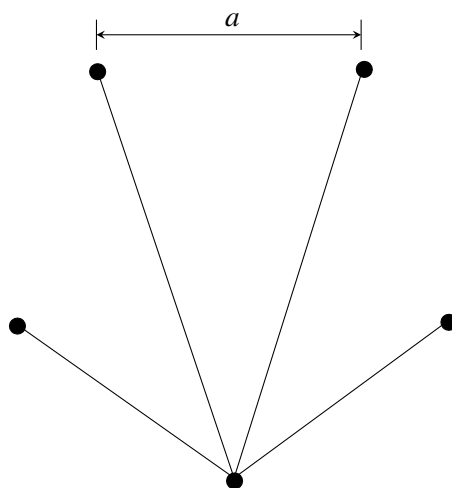


Figura 5.17: Configuração em Estrela

5.4.3 Configuração em Anel

A configuração em anel segue a mesma metodologia que a configuração em Estrela, porém esta é definida pelo raio do anel, ao contrário da configuração em estrela que é definida pelo espaçamento entre elétrodos. A figura 5.18 representa a configuração em anel para um sistema de terras com seis elétrodos em paralelo.

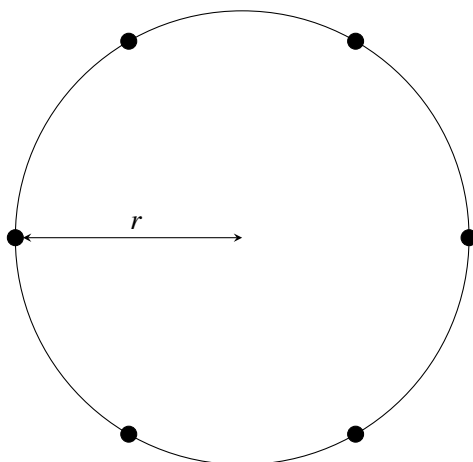


Figura 5.18: Configuração em Anel

5.4.4 Comparação entre configurações

Uma vez que os métodos abordados em 5.2.2 e 5.3.3 permitem efetuar o cálculo para qualquer configuração de elétrodos, será então realizada uma análise sobre o comportamento de cada tipo de configuração mencionado. Portanto, utilizando um sistemas de terras com as caraterísticas definidas na tabela 5.9 e variando o espaçamento entre elétrodos, obtém-se o gráfico da figura 5.19.

Tabela 5.9: Comparação entre diferentes configurações

Características dos elétrodos e do solo	
Diâmetro (d)	0,015 m
Comprimento do elétrodo(ℓ)	5 m
Profundidade do elétrodo(h_e)	1 m
Número de Elétrodos (N)	4
Resistividade da 1ª camada (ρ_1)	800 $\Omega.m$
Resistividade da 2ª camada (ρ_2)	250 $\Omega.m$
Profundidade da 1ª camada (h)	2 m

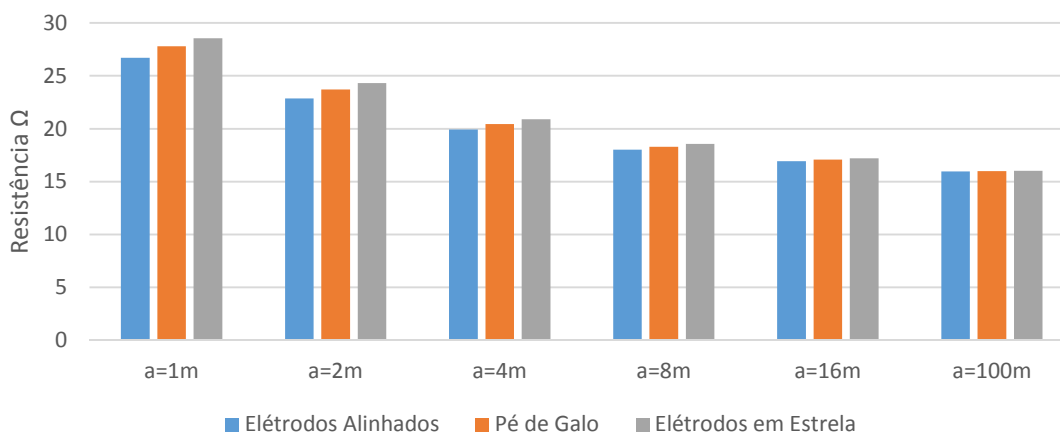


Figura 5.19: Comparação dos diferentes tipos de configurações de elétrodos

Pelo gráfico da figura 5.19, verifica-se a diminuição do valor da resistência de terra com o aumento do espaçamento, como previsto. Note-se que no gráfico da figura 5.19 não se incluiu a configuração em anel, pois esta configuração é muito semelhante à configuração em estrela.

Assim sendo, constata-se que a configuração em estrela apresenta valores da resistência de terra ligeiramente mais elevados do que as restantes configurações, pois, esta configuração concentra mais elétrodos numa determinada área, aumentando deste modo as interferências entre elétrodos, o que por sua vez aumenta o valor da resistência de terra. Porém, como referido, não necessita de muito espaço para a sua implementação, sendo uma boa alternativa para situações deste tipo. No entanto, quando para espaçamento elevados a resistência de terra para todas as configurações tendem a ser iguais, como se observa no gráfico da figura 5.19, pois as interferências entre elétrodos é insignificante.

5.5 Resumo

Um sistema de terras é um conjunto de condutores e elétrodos enterrados, com o objetivo de conectar no caso das terras de proteção todas as massas de uma instalação ao solo com a menor impedância possível. Já no caso das terras de serviço, o objetivo é estabelecer uma tensão de referência em 0V. Neste capítulo começou-se por compreender a origem da resistência de terra, quais os limites impostos pelas regras técnicas e quais os parâmetros necessários para efetuar o seu cálculo.

Assim sendo, o estudo da resistência de terra foi efetuado inicialmente para solos homogêneos com um único eletrodo enterrado no solo, e posteriormente com N elétrodos em paralelo. No entanto, para um cálculo da resistência de terra mais realista é necessário considerar um solo heterogêneo. Logo, com vista a realizar previsões sobre a resistência de terra, ou do número de elétrodos necessários para obter um determinada resistência de terra, foi necessário adaptar a formulação referente a solos homogêneos para solos heterogêneos.

Uma vez que esta resistência é diretamente influenciada pela configuração dos elétrodos, pelas próprias características dos elétrodos e pela resistividade do solo, faz com que a sua previsão não seja exata e precisa. Para além de a resistividade do solo variar em função das condições meteorológicas, não existe nenhuma formulação para o cálculo de sistemas de terras simples para solos heterogêneos. Portanto, neste capítulo foram apresentados diferentes métodos de prever a resistência de terra. Contudo, estes métodos não tem o intuito de calcular a resistência de terra com precisão, mas de garantir uma dada resistência de terra, pois ao usar os métodos desenvolvidos, obtém-se valores pessimistas para a resistência de terra.

Capítulo 6

Aplicação do Programa de Cálculo

Um dos objetivos da presente dissertação é desenvolver um software, que permita calcular a resistência de terra. Uma vez que o cálculo da resistência de terra depende das características do solo, foram implementados no software os algoritmos abordados no capítulo 4, adicionando ao software uma ferramenta útil para a estratificação do solo.

Este capítulo apresenta de modo comparativo os resultados obtidos com a aplicação desenvolvida, recorrendo aos conceitos teóricos até ao momento adquiridos. Como o software é composto por duas ferramentas de cálculo distintas, o capítulo será dividido em duas partes. Assim sendo, a primeira parte refere-se à estratificação do solo e a segunda parte refere-se ao cálculo da resistência de terra.

6.1 Estratificação do solo

O software desenvolvido permite, através de um conjunto de medidas efetuadas no terreno onde será implementado o sistema de terras, conhecer as resistividades de um solo com duas camadas, assim como a profundidade da primeira camada, diminuindo os custos associados a este tipo de estudos.

Portanto, com vista a experimentar e comparar os métodos integrados do software sobre a estratificação do solo, serão usadas as medidas apresentadas na tabela 6.1. Estas medidas correspondem ao tipo de solo mais frequente, ou seja, com coeficientes de reflexão negativo $K < 0$.

Tabela 6.1: Medições efetuadas pelo método de *Wenner*

a (m)	$\rho_{aE}(a)$ (Ωm)
1	680
2	610
4	420
6	300
8	240
16	190
32	180

6.1.1 Algoritmo Genético

O algoritmo genético é um algoritmo que permite ser personalizado. Esta personalização incide em modificar o tamanho da população e o número de iterações, assegurando o dinamismo deste algoritmo. Contudo, quanto maior a população e o número de iterações, mais cálculos são realizados pelo algoritmo, necessitando de mais tempo para se obter os resultados. No entanto, esta espera por vezes pode compensar, uma vez que os resultados ficam mais refinados. Nesta simulação, para além dos dados da tabela 6.1 serão também utilizados os dados da tabela 6.2.

Tabela 6.2: Dados adicionais para o Algoritmo Genético

Algoritmo Genético	
Tamanho da população	5
Número de iterações	1000

Após a simulação, o software devolveu os resultados representados na tabela 6.3. Salienta-se que o somatório dos erros é meramente indicativo, uma vez que este somatório é fortemente influenciado pelo número de medidas.

Tabela 6.3: Resultados obtidos após a simulação para o Algoritmo Genético

Características do solo	
Resistividade da 1 ^a camada	692,1 Ωm
Resistividade da 2 ^a camada	178,8 Ωm
Profundidade da 1 ^a camada	2,6 m
$\sum \varepsilon$	2,1%

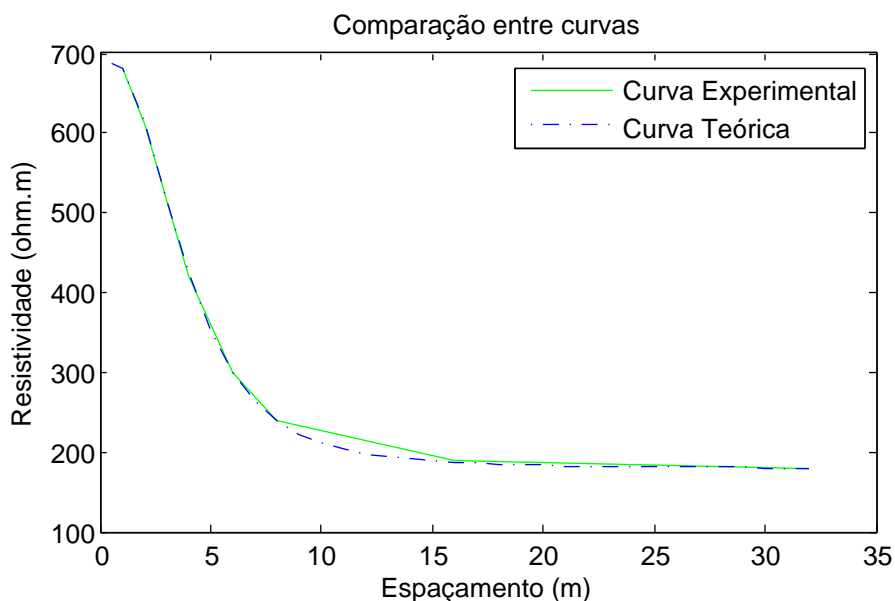


Figura 6.1: Comparação entre curvas para o Algoritmo Genético

A figura 6.1 é obtida diretamente do software MATLAB e compara a curva experimental com a curva teórica conseguida através do algoritmo genético. Assim sendo, pela análise da figura apresentada, verifica-se que a curva experimental e a curva teórica são praticamente coincidentes, permitindo desta forma assegurar a qualidade da estratificação do solo realizada.

6.1.2 Método de Newton-Raphson

No software desenvolvido, o método de Newton-Raphson apenas necessita de três medições indicadas na tabela 6.1, como referido no capítulo 4. Estas medições correspondem às medições com o menor e o maior espaçamento e uma medição com um espaçamento intermédio. Assim sendo, a tabela 6.4 traduz os resultados determinados depois da simulação.

Tabela 6.4: Resultados obtidos após a simulação para o Método de Newton-Raphson

Características do solo	
Resistividade da 1 ^a camada	694,3 Ωm
Resistividade da 2 ^a camada	177,3 Ωm
Profundidade da 1 ^a camada	2,6 m
$\sum \varepsilon$	3,3%

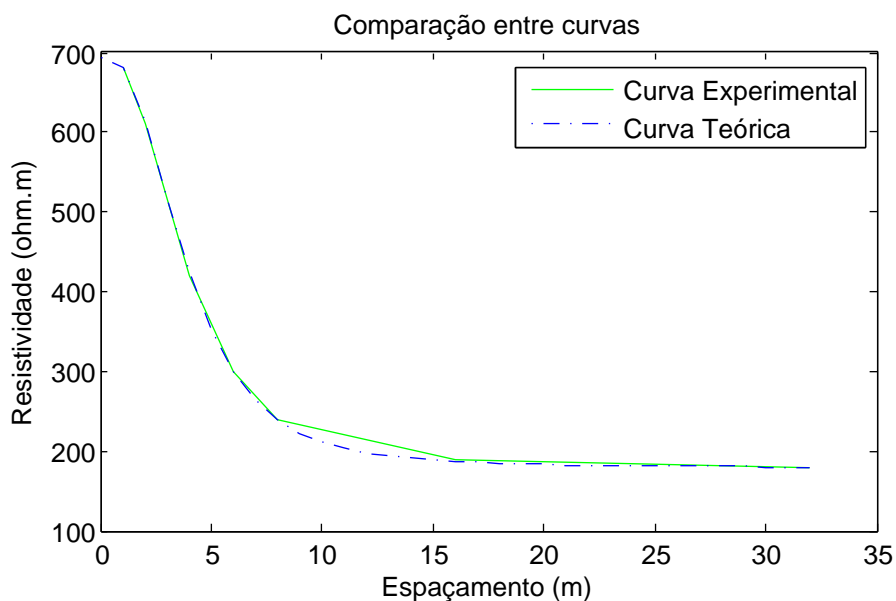


Figura 6.2: Comparação entre curvas para o Método de Newton-Raphson

Analisando os resultados da tabela 6.4 e observando a figura 6.2, verifica-se a proximidade dos resultados obtidos pelo método de Newton-Raphson com os resultados alcançados pelo Algoritmo Genético. Uma vez que o método de Newton-Raphson apenas necessita de três medições, conclui-se que para estratificar um solo em duas camadas horizontais, basta apenas realizar três medições com espaçamentos suficientemente elevados.

6.1.3 Método Gráfico

O método com menor dificuldade de implementar computacionalmente é o método gráfico. Pois, este não é iterativo, não necessita de derivadas e apenas utiliza duas medições, preferencialmente com espaçamentos intermédios. Contudo, o método necessita de conhecer previamente a resistividade a primeira camada, como indicado no capítulo 4. Logo, o método ao requerer pouca informação, produz resultados com maior erro. Portanto, após a simulação do método gráfico pelo software, obteve-se os resultados indicados na tabela 6.5.

Tabela 6.5: Resultados obtidos após a simulação para o Método Gráfico

Características do solo	
Resistividade da 1 ^a camada	733,3 Ωm
Resistividade da 2 ^a camada	180,7 Ωm
Profundidade da 1 ^a camada	2,5 m
$\Sigma \varepsilon$	13,9%

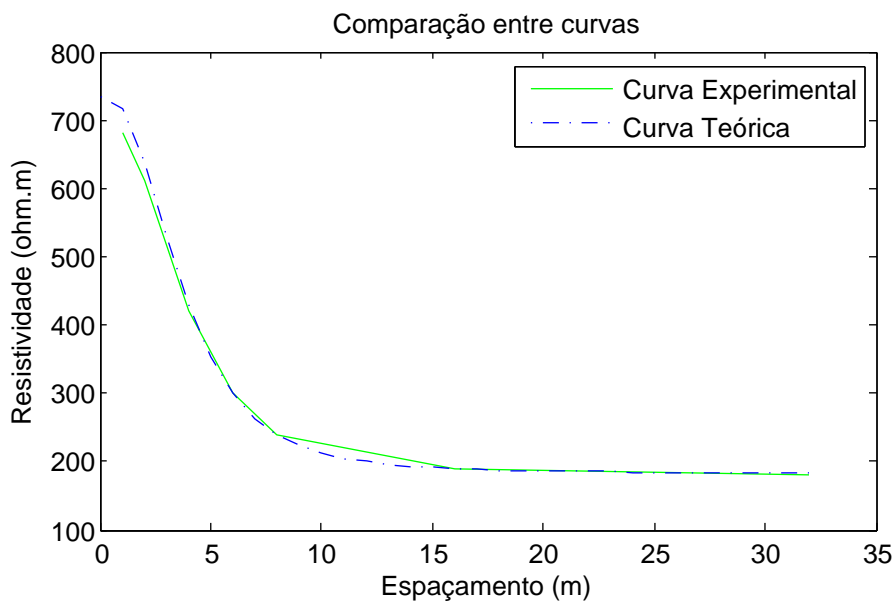


Figura 6.3: Comparação entre curvas para o Método Gráfico

Pelos resultados da tabela 6.3 e analisando a figura 6.3, confirma-se que o método gráfico alcança resultados mais desviados da curva experimental. No entanto, constata-se que é um método igualmente eficaz. Contudo, o método gráfico inserido no software apenas considera solos com coeficientes de reflexão negativos, uma vez que são solos muito habituais, fazendo este método pouco dinâmico quanto à diversidade dos solos.

6.2 Resistência de Terra

Com vista a testar os métodos desenvolvidos no capítulo 5, mais concretamente na secção 5.3.3, são vários os elementos que influenciam diretamente a resistência de terra. Em [2], é realizada uma análise aos métodos de cálculo da resistência de terra em malhas. Assim sendo, a configuração de elétrodos escolhida foi a de elétrodos em paralelo alinhados. Contudo, serão usados cinco solos com resistividades diferentes para cada tipo de estudo. Estes solos estão descritos na tabela 6.6.

Tabela 6.6: Coeficientes de reflexão

$\rho_1 (\Omega m)$	$\rho_2 (\Omega m)$	K
1000	200	-0,67
800	400	-0,33
600	600	0
400	800	0,33
200	1000	0,67

6.2.1 Variação da resistência de Terra com o número de elétrodos

A colocação de um maior número de elétrodos de terra em paralelo é uma das formas mais eficazes de se conseguir reduzir a resistência de terra. No entanto, para que esta solução seja ainda mais vantajosa, estes elétrodos devem ter um espaçamento suficientemente grande para que as interferências entre elétrodos sejam insignificantes.

Portanto, prevê-se neste estudo que consoante o aumento do número de elétrodos, a resistência de terra diminua, uma vez que as correntes de defeito tem mais caminhos por onde se escoar para o solo. Assim sendo, para além do acréscimo do número de elétrodos, ao longo do estudo, as restantes varáveis serão fixas. Estas variáveis estão indicadas na tabela 6.7, que posteriormente originam as figuras 6.4 e 6.5.

Tabela 6.7: Variação do número de elétrodos

Características dos elétrodos e solo	
Comprimento (ℓ)	10m
Diâmetro (d)	0,015m
Espaçamento (a)	6m
Profundidade do elétrodo (h_e)	2m
Profundidade da 1ª camada (h)	5m

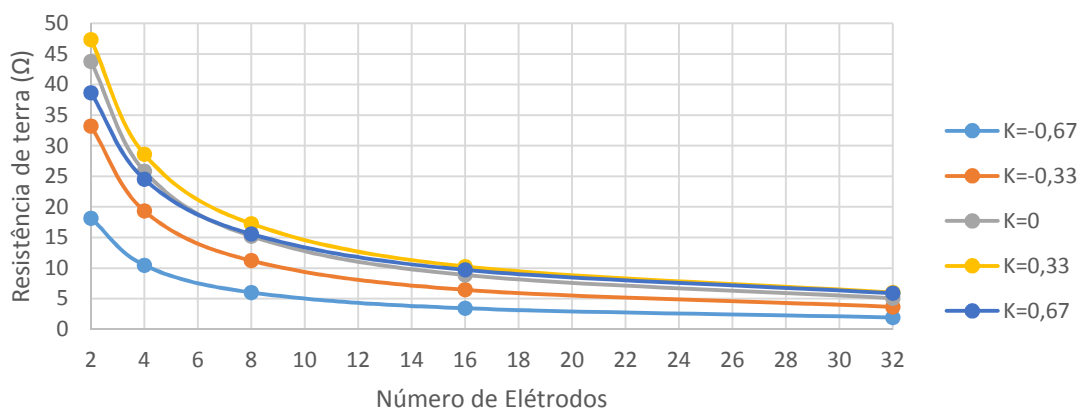


Figura 6.4: Variação do número de eletrodos para o *Método 1*

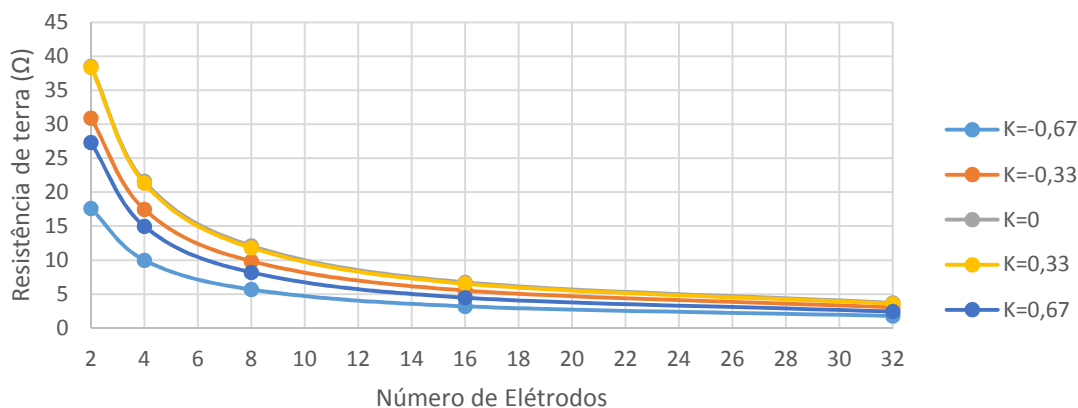


Figura 6.5: Variação do número de eletrodos para o *Método 2*

Observando as figuras 6.4 e 6.5, verifica-se a diminuição da resistência de terra em função do aumento do número de eletrodos, como previsto. No entanto, conclui-se que economicamente não é uma solução vantajosa implementar um sistema de terras com um número elevado de eletrodos, neste caso com mais de dezasseis eletrodos, uma vez que a redução da resistência de terra não compensa o investimento necessário.

Confirma-se ainda o pessimismo dos resultados obtidos pelo *Método 1* em comparação com o *Método 2*. Contudo, constata-se que o padrão do decréscimo da resistência de terra é praticamente o mesmo.

6.2.2 Variação da resistência de Terra com o comprimento dos eletrodos

O próximo estudo incide sobre a influência do comprimento dos eletrodos na diminuição da resistência de terra. Para isso, será variado apenas o comprimento dos eletrodos, aumentando estes progressivamente, permanecendo constantes as restantes variáveis, representadas na tabela 6.8. As figuras 6.6 e 6.7 mostram os resultados obtidos no estudo.

Tabela 6.8: Variação do comprimento dos eléttodos

Características dos eléttodos	
Diâmetro (d)	0,015m
Espaçamento (a)	6m
Número de Eléttodos (N)	8
Profundidade do eléttodo (h_e)	3m
Profundidade da 1ª camada (h)	5m

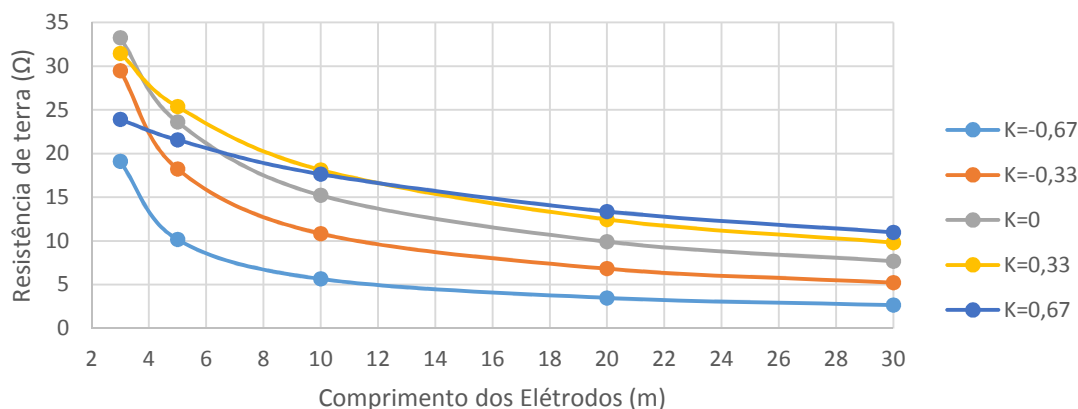


Figura 6.6: Variação do comprimento dos eléttodos para o Método 1

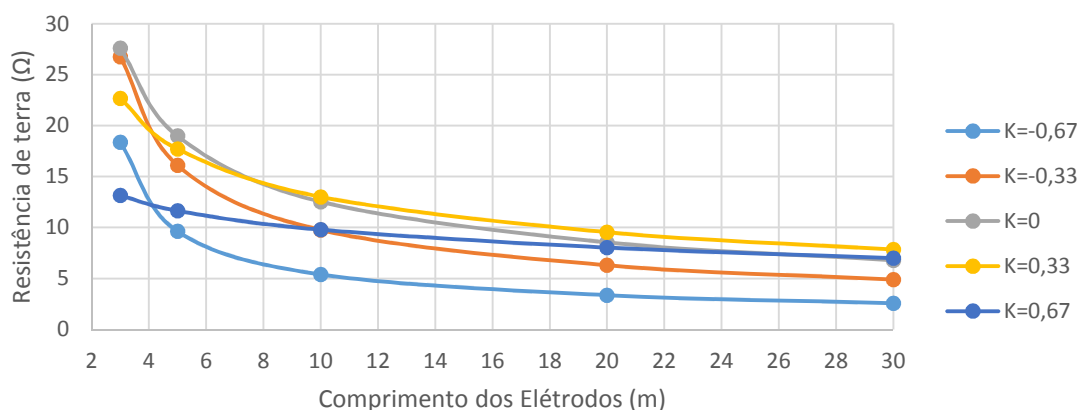


Figura 6.7: Variação do comprimento dos eléttodos para o Método 2

Analisando as figuras 6.6 e 6.7, constata-se que em todas as situações, a resistência de terra diminuiu com o aumento do comprimento dos eléttodos. Importa salientar que a redução da resistência de terra é mais acentuada para coeficientes de reflexão K negativos do que para os positivos, uma vez que a maior parte do eléttodo se encontra na camada com menor resistividade. Esta diminuição deve-se principalmente ao facto de o sistema de terra abranger um maior volume do solo, permitindo deste modo uma melhor dispersão da corrente.

Atendendo ao facto de que na realidade a maioria dos solos apresentam resistividades menores para camadas mais profundas do que para camadas mais superficiais, esta solução permite de uma forma eficaz reduzir bastante a resistência de terra, como se pode observar no exemplo ilustrado

na figura 6.8.

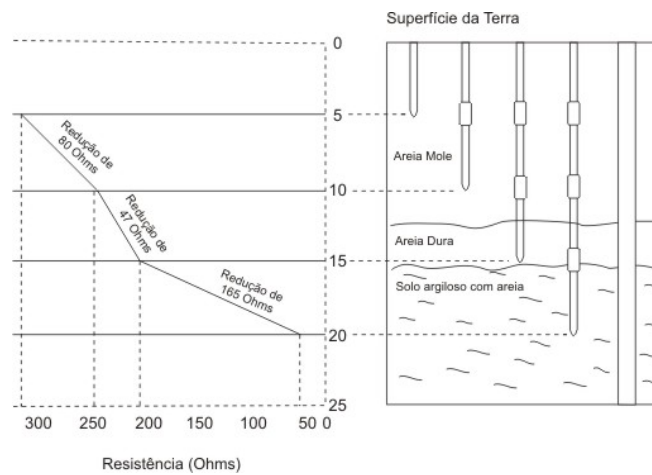


Figura 6.8: Relação da resistência de terra com o comprimento dos eletrodos [52]

Para além das vantagens enunciadas, os eletrodos ao atingirem grandes profundidades, permitem chegar a solos com temperaturas e humidades constantes ao longo do tempo, possibilitando obter uma resistência de terra igualmente constante ao longo do tempo. Por outro lado, nos solos superficiais, as temperaturas e humidades do solo podem não ser constantes ao longo do tempo, sendo necessário ter um especial cuidado quanto à utilização de eletrodos pequenos a baixas profundidades, pois a resistência de terra pode variar ao longo das épocas do ano, tomando valores não satisfatórios para o bom funcionamento dos dispositivos diferenciais. Portanto, somando todas as factos apresentados, faz desta solução a mais viável e vantajosa de todas as soluções.

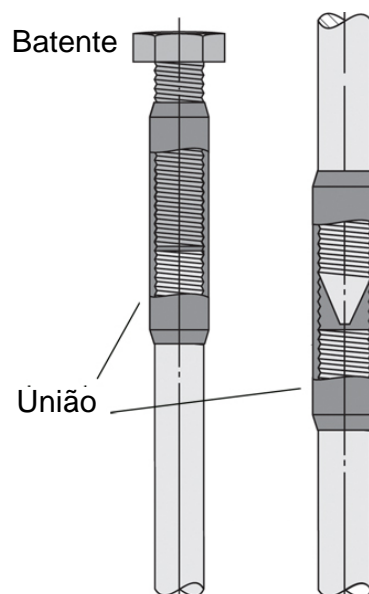


Figura 6.9: Sistema de união dos eletrodos de terra

Importa referir ainda que, na prática para se obter elétrodos de terra com grandes comprimentos, é necessário conectar vários elétrodos, como indica a figura 6.9. Pois em Portugal, os elétrodos de terra mais comercializados correspondem aos comprimentos $1,5m$ e $2m$. Assim sendo, aquando a implementação do sistema de terras, é primeiramente enterrado no solo um eletrodo simples com um batente para não danificar a extremidade, como ilustrado na figura 6.9. No entanto, estes batentes não tem que ser necessariamente iguais ao do esquema apresentado, existindo batentes que permitem a junção com o eletrodo sem o uso de uma união. Os elétrodos são enterrados recorrendo à força humana, utilizando um simples martelo, ou com um martelo pneumático. Com o eletrodo suficientemente enterrado, é conectado o próximo eletrodo através de uma união, voltando a enterrar os elétrodos. Este processo é repetido até se alcançar o comprimento do eletrodo pretendido, ou até se obter a resistência de terra desejada. De salientar ainda, a facilidade de implementar um sistema de terras com elétrodos com grandes comprimentos, uma vez que estes são produzidos por elétrodos menores [52].

6.2.3 Variação da resistência de Terra com o diâmetro dos elétrodos

De seguida será realizada uma análise sobre variação da resistência de terra em função do diâmetro dos elétrodos. Para isso, as variáveis apresentadas na tabela 6.9 persistirão inalteradas ao longo do estudo, aumentando gradualmente o diâmetro dos elétrodos de terra. Embora seja previsível que o aumento do diâmetro dos elétrodos diminua a resistência de terra, esta medida não terá uma influência significativa na resistência de terra, pois, o solo que envolve os elétrodos é muito mais determinante para a resistência de terra do que o diâmetro dos elétrodos. Assim sendo, as figuras 6.10 e 6.11 evidenciam os factos mencionados.

Tabela 6.9: Variação do diâmetro dos elétrodos

Características dos elétrodos	
Comprimento (ℓ)	$10m$
Espaçamento (a)	$6m$
Número de Elétrodos (N)	8
Profundidade do eletrodo (h_e)	$3m$
Profundidade da 1ª camada (h)	$5m$

Pelas figuras 6.10 e 6.11, verifica-se que a resistência de terra sofre uma diminuição substancial com o aumento do diâmetro dos elétrodos. Note-se que para este estudo foram considerados diâmetros excessivamente elevados, com a exceção do primeiro valor, que ronda os diâmetros comerciais, ou seja, $d = 0,015m$. Portanto, em virtude dos factos mencionados, é confirmada a pouca influência do diâmetro dos elétrodos na resistência de terra. Contudo, o diâmetro dos elétrodos é um parâmetro que à priori tem que ser definido antes da implementação do sistema de terras, sendo impossível alterar este parâmetro posteriormente, tornando esta solução pouco viável numa tentativa de reduzir a resistência de terra,

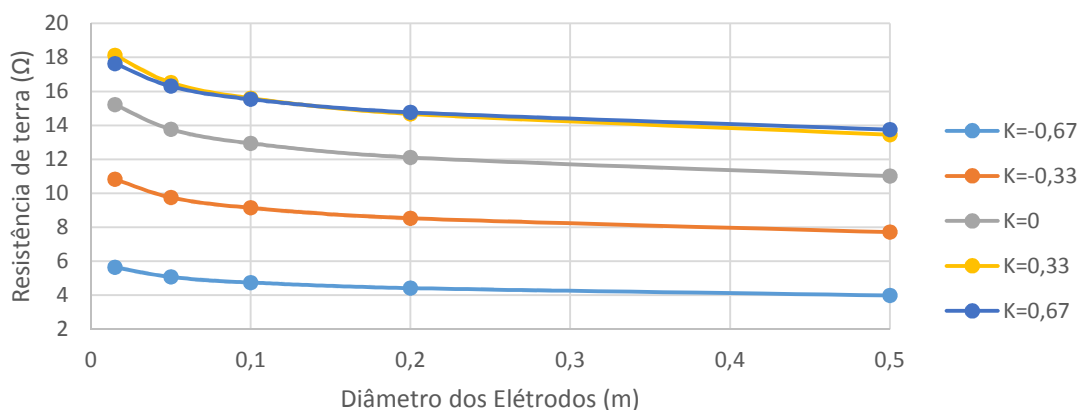


Figura 6.10: Variação do diâmetro dos elétrodos para o Método 1

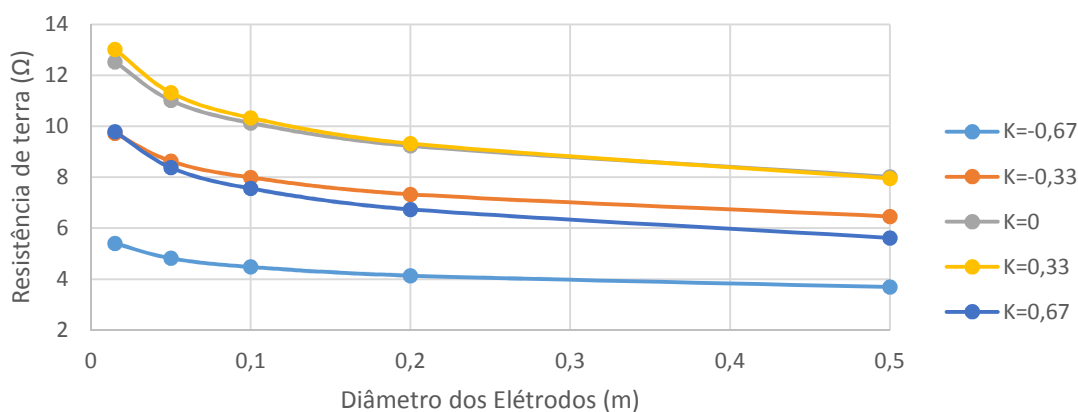


Figura 6.11: Variação do diâmetro dos elétrodos para o Método 2

6.2.4 Variação da resistência de Terra com o espaçamento entre elétrodos

O espaçamento entre elétrodos é um dos parâmetros que, à semelhança do comprimento dos elétrodos e do número de elétrodos, influencia bastante a resistência de terra. Portanto, com vista a analisar esta influência, será realizado um estudo sobre a variação da resistência de terra em função do espaçamento entre elétrodos. Assim sendo, serão fixadas as variáveis indicadas na tabela 6.10, modificando apenas o espaçamento entre elétrodos, permitindo obter as figuras 6.12 e 6.13.

Tabela 6.10: Variação do espaçamento entre elétrodos

Características dos elétrodos	
Diâmetro (d)	0,015m
Comprimento (ℓ)	10m
Número de Elétrodos (N)	8
Profundidade do elétrodo(h_e)	3m
Profundidade da 1ª camada (h)	5m

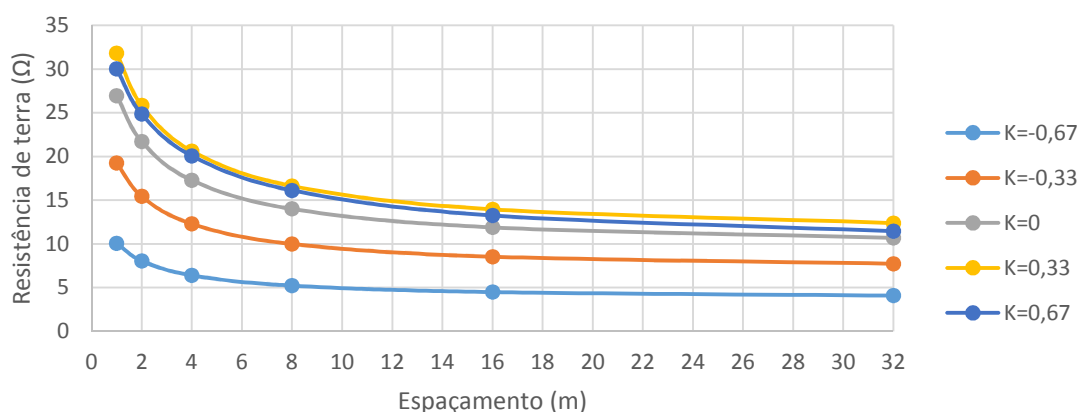


Figura 6.12: Variação do espaçamento entre eletrodos para o Método 1

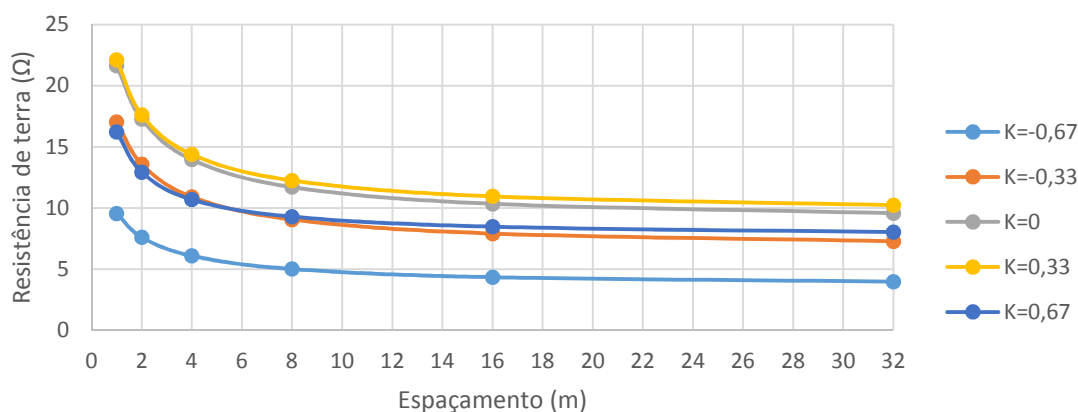


Figura 6.13: Variação do espaçamento entre eletrodos para o Método 2

Observando as figuras 6.12 e 6.13, confirma-se como era esperado, uma diminuição da resistência de terra em função do aumento do espaçamento entre eletrodos. Uma vez que o cálculo da resistência de terra para os eletrodos é independente do espaçamento, faz com que a variação da resistência de terra seja provocada pelas interferências entre eletrodos, também conhecida como resistência mútua. .

Resumindo, o espaçamento entre eletrodos, influencia a resistência mútua, que por sua vez eleva o valor da resistência de terra. Assim sendo, para espaçamentos curtos, esta resistência mútua é elevada. Por outro lado, para grandes espaçamentos, a resistência mútua é apenas residual, tendo pouca influência no resultado final da resistência de terra. De salientar ainda que, para um espaçamento infinito, a resistência mútua é nula como referido no capítulo 5.

6.2.5 Variação da resistência de Terra com a profundidade de enterramento dos eletrodos

O estudo da variação da resistência de terra em função da profundidade de enterramento dos eletrodos, irá permitir sobretudo visualizar a influência das diferentes camadas com a resistência de terra. Portanto, este estudo consiste em enterrar um eletrodo com comprimento fixo, de maneira a

que a porção de eléctrodo em cada camada seja variável. Assim sendo, será variada a profundidade de enterro dos eléctrodos enquanto que as restantes variáveis se mantêm constantes como indica a tabela 6.11. Após a realização do estudo, obtém-se as figuras 6.14 e 6.15.

Tabela 6.11: Variação da profundidade de enterro dos eléctrodos

Características dos eléctrodos	
Diâmetro (d)	0,015m
Comprimento (ℓ)	10m
Espaçamento (a)	6m
Número de Eléctrodos (N)	8
Profundidade da 1ª camada (h)	10m

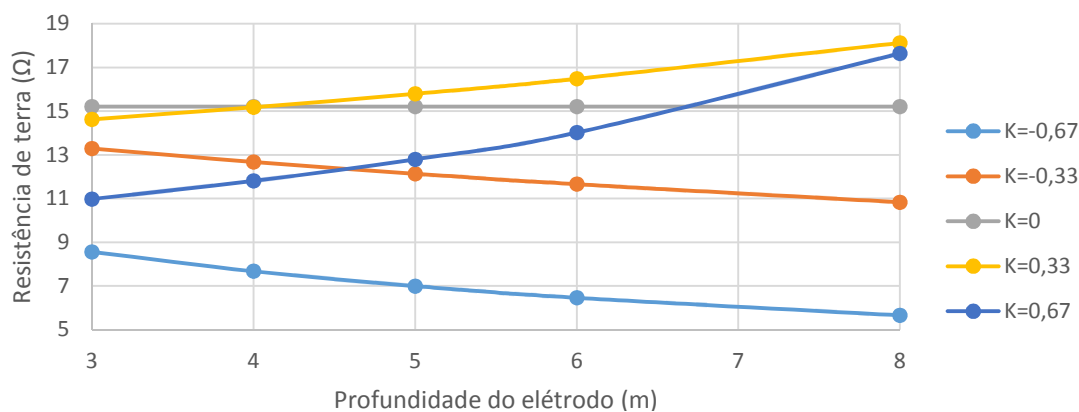


Figura 6.14: Variação da profundidade de enterro dos eléctrodos para o *Método 1*

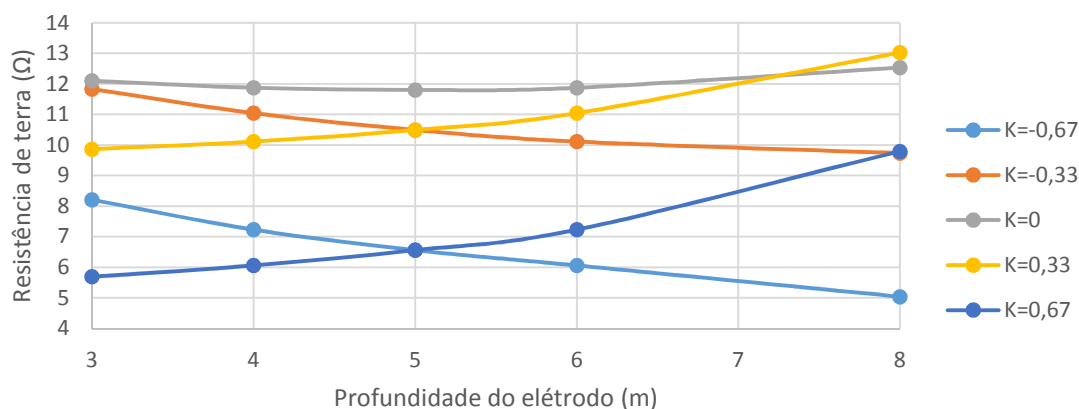


Figura 6.15: Variação da profundidade de enterro dos eléctrodos para o *Método 2*

Analisando as figuras 6.14 e 6.15, constata-se que para coeficientes de reflexão positivos, a resistência aumenta com a profundidade de enterro. Este facto acontece devido à resistividade da camada mais profunda ser superior à camada mais superficial, e como a maior porção do eléctrodo é empurrada para a camada com maior resistividade, a resistência de terra aumenta. Por outro lado,

para os casos em que os coeficientes de reflexão são negativos, verifica-se uma redução do valor da resistividade. Pois, os elétrodos de terra "caminham" para uma camada do solo com resistividade menor.

Realizando uma análise para os casos com solo homogêneo, ou seja, $K = 0$, verifica-se pela figura 6.14 que a resistência de terra é sempre constante ao longo do estudo. Este facto deve-se ao comprimento dos elétrodos ser sempre constante ao longo do estudo, correspondendo com a teoria enunciada no capítulo 5. No entanto, na figura 6.15 esta linearidade não se verifica, observando-se uma ligeira redução da resistência de terra onde os elétrodos estão repartidos na mesma proporção pelas duas camadas do solo. Esta particularidade deve-se à evidência de o *Método 2* tratar a resistência de terra como o paralelo de duas resistências calculadas para cada camada do solo e por isso, como os comprimentos dos elétrodos variam para cada camada, alteram deste modo as suas resistências.

6.3 Resumo

Neste capítulo foi realizado um estudo teórico, utilizando como ferramenta de cálculo o software desenvolvido. Deste modo, foi possível comparar e contrapor os resultados obtidos com os esperados em teoria, permitindo concluir o bom desempenho do software e os métodos estudados ao longo desta dissertação.

Portanto, este estudo iniciou-se pelos métodos adaptados para a estratificação do solo, ou seja, realizando uma comparação entre o Algoritmo Genético, o método de Newton-Raphson e o método gráfico. Para este efeito foi considerado um conjunto de medições efetuadas pelo método de *Wenner* iguais para todos os métodos. Deste modo, foi possível constatar que o Algoritmo Genético e o método de Newton-Raphson chegaram a resultados muito próximos. Apesar de o Algoritmo Genético apresentar uma melhor convergência e resultados mais precisos, embora também mais lento, o método de Newton-Raphson ao utilizar apenas três medições, revelou-se um método muito eficaz e rápido. Já o método gráfico, sem surpresa, apresentou resultados menos satisfatórios, uma vez que para estratificar o solo em duas camadas usa apenas duas medições, revelando-se, face aos outros dois métodos, o menos eficiente.

Posteriormente, efetuou-se o estudo relativo ao cálculo da resistência de terra. Este estudo consistiu em variar apenas cada elemento constituinte do cálculo da resistência de terra, a fim de se perceber a sua influência neste cálculo. Assim sendo, conclui-se que aumentando todos estes elementos, com a exceção da profundidade de enterro dos elétrodos, provoca uma diminuição da resistência de terra. No entanto, verifica-se que para o aumento do número de elétrodos, do espaçamento e do comprimento dos elétrodos, esta diminuição da resistência de terra é mais acentuada. Por outro lado, o diâmetro dos elétrodos tem uma influência praticamente insignificante na diminuição da resistência de terra. Já a profundidade de enterro é fortemente influenciada pelas características do solo, podendo ser viável em situações em que a camada mais profunda apresente uma resistividade menor que a camada mais superficial, destacando deste modo a importância da

estratificação do solo. Por fim, constata-se que em todos os estudos da resistência de terra, o *Método 2* apresenta valores ligeiramente menores que o *Método 1*, confirmando o otimismo deste método em relação ao *Método 1*, embora estes resultados estejam majorados face à realidade, como observado no capítulo 5.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

Hoje em dia, os sistemas de terras são considerados como algo muito importante e sério, uma vez que são projetados para proteger pessoas e bens, como referido no capítulo 2. Logo, é necessário garantir uma boa resistência de terra para que a proteção seja verdadeiramente eficaz. A presente dissertação foi realizada com o intuito de efetuar uma previsão da resistência de terra, de maneira a idealizar um sistema de terra que garanta os valores mínimos definidos. Como a resistência de terra é influenciada pela resistividade do solo, para além da configuração do sistema de terras, esta dissertação foi dividida em duas partes, sendo nos capítulos 3 e 4 abordados o assunto da estratificação do solo e no capítulo 5 o assunto da resistência de terra.

Quanto à estratificação do solo, foram desenvolvidos quatro métodos, sendo um deles utilizado para obter uma aproximação suficientemente boa para iniciar os outros métodos, como é o caso do método das assíptotas. O desenvolvimento destes métodos surge da necessidade de estratificar um solo heterogéneo com características desconhecidas, num solo com duas camadas de resistividades diferentes bem definidas, eletromagneticamente equivalente. Posteriormente, esta estratificação possibilitará obter resultados para a resistência de terra com melhor precisão. Assim sendo, todos os métodos desenvolvidos foram implementados num software de cálculo desenvolvido, e com o qual se permite estratificar o solo através de um conjunto de medidas efetuadas no terreno pelo método de *Wenner*. No capítulo 6, é realizada a análise destes métodos, onde se verifica a boa prestação dos mesmos, uma vez que graficamente conseguem aproximar a curva teórica obtida com o auxílio do software, com a curva experimental construída a partir das medidas realizadas em campo. Desta forma, conclui-se que um dos objetivos é superado com grande êxito.

Uma vez concluída a análise da resistividade do solo, foi concretizado um estudo da resistência de terra em sistemas de terra com configurações de elétrodos simples. Porém, realizou-se uma breve referência a um método para o cálculo da resistência de terra para malhas em solos com duas camadas, ou seja, ao método de *Chow*. Como constatado ao longo desta dissertação, mais concretamente na pesquisa bibliográfica, o tema da resistência de terra é pouco desenvolvido, havendo uma escassez de artigos sobre o assunto. Contudo, esta dificuldade na procura de bibliografia aumenta para sistemas de terras simples. Portanto, face a esta dificuldade, com base

no conceito de *Chow*, foi concebido um novo método que permite calcular a resistência de terra para várias configurações de sistemas de terras simples. Este método está desenvolvido na seção 5.3.3.2. Contudo, foi também aprofundado um outro método para o cálculo de resistências de terra simples, que permitiu comparar os resultados obtidos por ambos os métodos.

Após uma análise profunda dos métodos apresentados em 5.3.3, foi possível verificar qual destes elementos influencia com mais relevo a resistência de terra. Esta análise consistiu em variar o número de elétrodos em paralelo, o tamanho e o diâmetro dos mesmos, bem como o espaçamento entre elétrodos e a profundidade de enterro. Assim sendo, pode-se concluir que o número de elétrodos, o tamanho e o espaçamento dos mesmos, tem uma influência mais acentuada do que os restantes elementos. No entanto, é aconselhável o uso de elétrodos com comprimentos grandes como primeira medida para reduzir a resistência de terra. Portanto, para além desta medida reduzir consideravelmente a resistência de terra ao alcançar por vezes camadas do solo com resistividades menores, permite que a resistência de terra não oscile em função das estações do ano, uma vez que a humidade e a temperatura do solo a grandes profundidades é mais constante do que na superfície. De salientar ainda a análise da resistência de terra em relação à profundidade de enterro dos elétrodos. Esta análise permitiu perceber a interação da resistência de terra com as diferentes resistividades das camadas do solo, alertando para um especial cuidado na execução de um sistema de terras para solos com coeficientes de reflexão positivos. Portanto, neste tipo de solo é aconselhável optar por aumentar o número de elétrodos em paralelo, estando estes inseridos maioritariamente na primeira camada, ou seja, com elétrodos curtos, aproveitando melhor o facto da camada superficial apresentar menor resistividade.

Ainda foram comparados os diferentes tipos de configurações de elétrodos, nomeadamente a configuração em que os elétrodos se dispõem alinhados, a configuração em estrela/anel e ainda a configuração em pé de galo. Esta comparação permitiu concluir que a disposição dos elétrodos, quando estes tem as mesmas características e o mesmo espaçamento, praticamente não influencia a resistência de terra, sendo qualquer configuração uma boa opção. Contudo, no caso em que os elétrodos se encontram alinhados, verificou-se que a resistência de terra era ligeiramente menor do que nas restantes configurações, porém necessita de mais espaço para a sua implementação. Assim, em terrenos com pouco espaço para a execução do sistema de terras, o pé de galo ou a configuração em estrela são definitivamente as melhores soluções.

Com a ajuda do LABLELEC, foi possível obter a resistência de terra através da simulação por um software profissional e licenciado, de um sistema de terras inserido num solo de duas camadas, com os quais foi realizada uma comparação, que permitisse validar o software, assim como os métodos utilizados para o desenvolvimento do mesmo. Depois de comparar os resultados fornecidos pelo LABLELEC, com os obtidos pelo software, verificou-se que para elétrodos pequenos, a diferença entre resultados era considerável. Por outro lado, para elétrodos com tamanhos maiores, o valor das resistências de terra obtido pelo software eram bastante próximos em comparação com os valores conseguidos pela simulação. Contudo, em todos os cenários da simulação, os resultados calculados através do software revelaram-se sempre pessimistas. Logo, embora os resultados para elétrodos pequenos não seja tão rigoroso quanto se desejava, o software desenvolvido permite

garantir que, para um determinado sistema de terras implementado num solo heterogéneo de duas camadas, a resistência de terra real é menor do que a obtida pelo software. Assim, este software pioneiro poderá ser uma mais-valia para qualquer engenheiro, uma vez que oferece resultados majorados face à realidade.

Em suma, todos os objetivos propostos inicialmente para esta dissertação foram cumpridos, traduzindo-se numa grande satisfação por todos os resultados obtidos. Assim sendo, esta dissertação permitiu obter conhecimentos com alto rigor científico, tornando-se num bom ponto de partida para qualquer trabalho futuro.

7.1 Trabalho Futuro

Nesta dissertação, foram abordadas soluções para a estratificação do solo e para o cálculo da resistência de terra com base em formulação analítica. Contudo, é possível aprofundar este tema, utilizando novos métodos, completamente diferentes dos anunciados.

Embora a bibliografia sobre este tema não seja muito abundante, neste momento começa a haver uma crescente preocupação em desenvolver e melhorar os resultados obtidos para a resistência de terra. Portanto, com esta preocupação começam a aparecer novos artigos que estudam novas soluções utilizando métodos modernos. Assim sendo, destacam-se algumas vertentes ainda por explorar que, num próximo trabalho, seria interessante aprofundar:

- **Estudo da resistência de terra através do método dos elementos finitos**- este estudo consiste em determinar a resistência de terra, assim como a tensão de passo e a tensão de toque utilizando o método dos elementos finitos. Este método permite obter um nível de detalhe e qualidade muito superior aos simples métodos analíticos.
- **Estudo da resistividade do solo através de redes neuronais artificiais**- ao longo desta dissertação, foi-se destacando a importância da resistividade do solo para o cálculo da resistência de terra. Deste modo, começa já a aparecer artigos a explorar esta opção para a estratificação do solo, sendo muito interessante explorar esta nova vertente.
- **Estratificação do solo em mais de duas camadas e o respetivo cálculo da resistência de terra**- devido às características do solo, por vezes não é possível estratificar este em duas camadas. Assim sendo, é necessário obter um solo estratificado em camadas horizontais que se adegue às medidas realizadas em campo através do método de *Wenner*. Contudo, no cálculo da resistência de terra, deve-se ter em conta todas as camadas do solo. No entanto, durante a pesquisa bibliográfica, foram encontrados vários métodos que permitem converter um solo de N camadas num solo com duas camadas, sendo um deles o método de *Pirson*.

Anexo A

Manual do software

O anexo que se segue, tem como finalidade apresentar a interface do software desenvolvido a partir dos métodos e algoritmos estudados.

A.1 Menu inicial



Figura A.1: Menu inicial

Na figura A.1, está representado o menu inicial do software. Este menu permite escolher entre calcular a resistividade do solo, ou calcular a resistência de terra de um determinado sistema de terra. Como se pode observar, o menu é muito simples e intuitivo de se utilizar.

A.2 Resistividade do Solo

A figura A.2 representa a interface do painel referente à estratificação do solo. Assim sendo, neste painel é possível obter os parâmetros de um solo composto por duas camadas de resistividades diferentes.

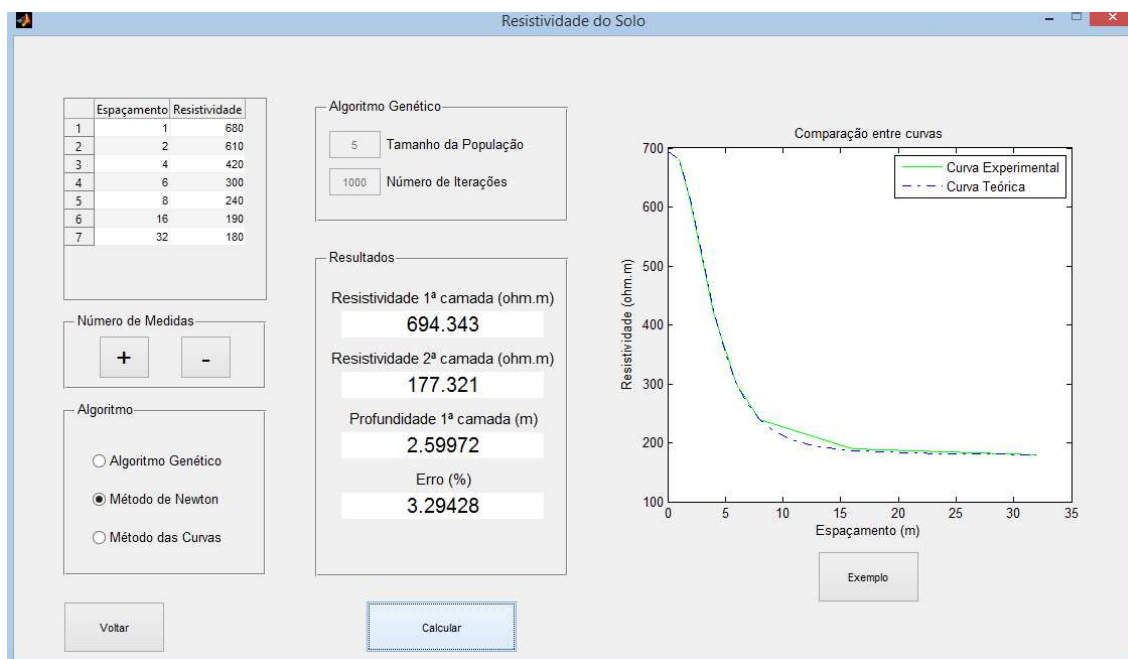


Figura A.2: Painel do cálculo da resistividade do solo

Pela figura A.2, podemos verificar que esta apresenta um interface simplista, sendo muito fácil na primeira utilização de perceber o seu funcionamento. Portanto, começando pelo canto superior esquerdo, está representado um painel onde se inserem as medições da resistividade aparente em função do espaçamento entre elétrodos. Uma vez que este painel se apresenta em forma de tabela, mais abaixo temos um outro painel onde é possível adicionar ou retirar linhas a esta tabela. Importa referir, que é obrigatório preencher todas as linhas desta tabela, caso contrário será apresentado um erro. Mais abaixo, temos um painel onde permite escolher qual o método a ser utilizado para a estratificação do solo, salientando a particularidade de o algoritmo genético, apresentar um outro painel, onde se deve definir o tamanho da população e o número de iterações.

Para efetuar a estratificação do solo, basta clicar no botão "Calcular", sendo apresentados os resultados da estratificação, bem como um gráfico onde é possível verificar a aproximação da curva teórica com a curva experimental.

A.3 Resistência de terra

A figura A.3 representa a interface do painel referente ao cálculo da resistência de terra. Assim sendo, este painel permite obter a resistência de terra, para solos heterogêneos com duas camadas, para vários tipos de configurações de elétrodos. No entanto, o software também permite realizar o cálculo da resistência de terra, para solos homogêneos, devendo nesse caso, colocar as resistividades iguais para as duas camadas, e colocar uma profundidade aleatória, pois esta não terá influência no cálculo.

Figura A.3: Painel do cálculo da resistência de terra

Portanto, pela figura A.3, nota-se que este painel não é tão intuitivo como o painel da estratificação do solo. Assim sendo, inicialmente deve-se escolher o método de cálculo a utilizar para a obtenção da resistência de terra, tendo posteriormente que escolher o tipo de configuração. Importa referir que, a escolha do método para calcular malhas de terra, é independente da escolha do tipo de configuração de elétrodos. Uma vez selecionado o método e a configuração do sistema de terra, deve-se inserir os dados para o cálculo da resistência de terra. Concluída esta etapa, é só iniciar o cálculo, para a obtenção dos resultados.

A.4 Proteção contra erros

A figura A.4 apresenta o exemplo de uma janela de aviso, onde é indicada a falta de um parâmetro para o cálculo da resistência de terra. Assim sendo, o software oferece um conjunto de avisos, com o objetivo de alertar o utilizador de algum dado em falta ou inserido incorretamente.

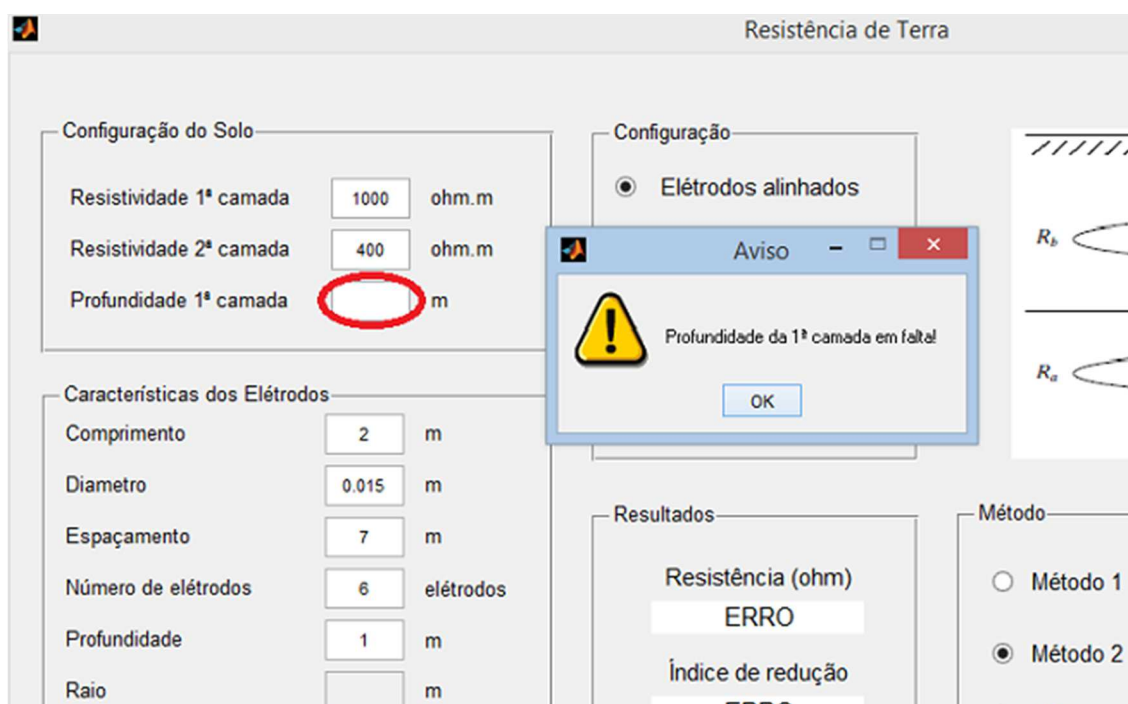


Figura A.4: Janela de erro

A.5 Diagrama de estados

Com intuito de facilitar a utilização do software, na figura A.5 está representado o diagrama de estados do software. Observando mais atentamente o diagrama de estados, percebe-se que o software, é simples e de fácil utilização e que permite resolver um problema de elevada complexidade.

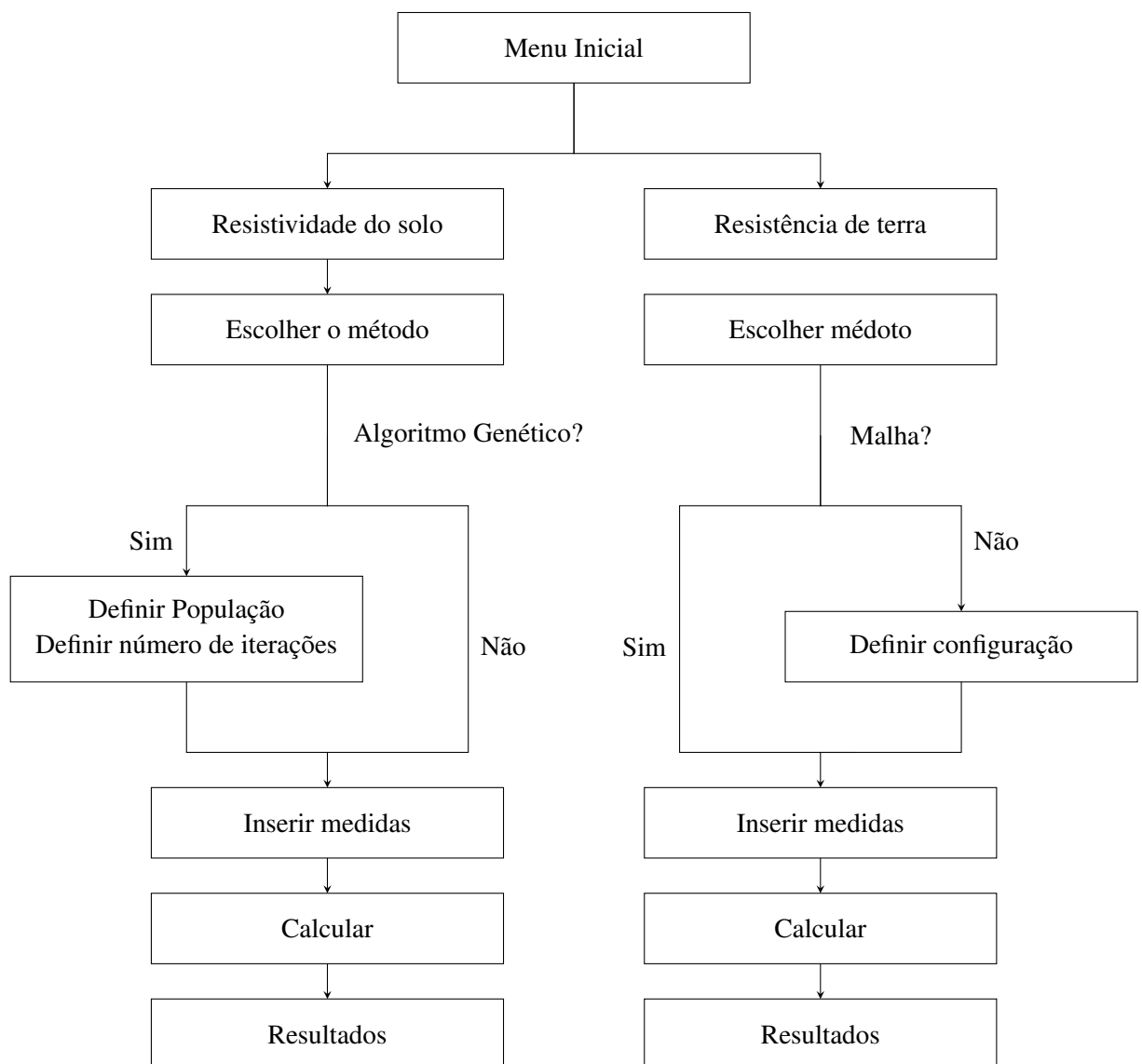


Figura A.5: Diagrama de estados do software

Referências

- [1] CERTIEL – Associação Certificadora de Instalações Eléctricas. Acidentes de origem eléctrica em Portugal, Fevereiro 2015. Disponível em <http://www.youblisher.com/p/1097792-Relatorio-do-ano-de-2014/>, acessado a última vez em 19 de Abril de 2015.
- [2] Ana José Martins Flores. Análise e aplicação de métodos para o cálculo da resistência de terra em sistemas com n eléctrodos instalados em solos heterogéneos. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [3] António Nunes Ribeiro. Terras em instalações de energia. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1992.
- [4] Ernesto Miguel Pereira Pinto. Projecto, melhoria e medição de terras : relatório final do pstfc, 2005. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, EDP - Energias de Portugal, S. A.
- [5] Indusmelec. Protecção diferencial, Janeiro 2014. Disponível em http://www.indusmelec.pt/newsletter/09/Proteccao_Diferencial.pdf, acessado a última vez em 10 de Maio de 2015.
- [6] ABB, S.A. - Low Voltage Products. Interruptores diferenciais - system pro m compact. Disponível em [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/c1a46ef3e011953dc125792100327967/\\$FILE/6+-+11+Interruptores+diferenciais.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/c1a46ef3e011953dc125792100327967/$FILE/6+-+11+Interruptores+diferenciais.pdf), acessado a última vez em 13 de Junho de 2015.
- [7] Pedro Jorge Vieira Meireles. Regimes de neutro em redes e instalações de bt : vantagens/inconvenientes para a segurança das pessoas, bens e para a exploração dos sistemas. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [8] Silvério Visacro Filho. *Aterramentos eléctricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento*. Artliber, 2002.
- [9] Nuno Filipe Barbosa Coelho. Eléctrodos de terra. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [10] Bok-Hee Lee, Jeong-Hyeon Joe, e Jong-Hyuk Choi. Simulations of frequency-dependent impedance of ground rods considering multi-layered soil structures. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 4(4):531–537, 2009.
- [11] Md Abdus Salam. Grounding resistance measurement by grid electrode in brunei darussalam. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 8(2):196–208, 2012.

- [12] Fernando Jorge Teiga Teixeira. Modelização de eléctrodos de terra em sistemas eléctricos de energia. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [13] Manuel da Ressurreição Cordeiro. Métodos computacionais para o tratamento eficiente dos parâmetros fundamentais no projecto, execução e exploração das redes de terra em instalação eléctricas. Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 1994.
- [14] M. Telló. *Aterramento eléctrico: impulsivo em baixa e alta frequências - Com apresentação de casos*. Edipucrs, 2007.
- [15] ZHU Jiao-Jun, KANG Hong-Zhang, e Y Gonda. Application of wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land. *Pedosphere*, 17(6):801–812, 2007.
- [16] G. Kindermann e J.M. Campagnolo. *Aterramento eléctrico*. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 3ª edição, 1995.
- [17] INC. MOTOROLA. Standards and guidelines for communication sites, 2005. Disponível em <http://www.repeater-builder.com/antenna/site-stuff/are-fifty-six-man-2005.pdf>, acessado a última vez em 14 de Julho de 2015.
- [18] Ieee guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system part 1: Normal measurements. *IEEE Std 81-1983*, páginas 1–44, March 1983. doi:10.1109/IEEESTD.1983.82378.
- [19] IF Gonos, AX Moronis, e IA Stathopoulos. Variation of soil resistivity and ground resistance during the year. Em *Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2006), Kanazawa, Japan*, páginas 740–744, 2006.
- [20] W.M. Telford, W. M. Telford, L.P. Geldart, e R.E. Sheriff. *Applied Geophysics*. Monograph series. Cambridge University Press, 1990.
- [21] J.A. Sullivan. Alternative earthing calculations for grids and rods. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, 145(3):271–280, May 1998. doi:10.1049/ip-gtd:19981696.
- [22] M. Rudnicki P. Neittaanmäki e A. Savini. *Inverse Problems and Optimal Design in Electricity and Magnetism*. Oxford Science Publications, 1996.
- [23] Ioannis F Gonos, Ioannis Stathopoulos, et al. Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 20(1):100–106, 2005.
- [24] N. Mohamad Nor, R. Rajab, e Z. Othman. Validation of the earth resistance formulae using computational and experimental methods for gas insulated sub-station (gis). *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 43(1):290 – 294, 2012.
- [25] Gary Gilbert. *High Voltage grounding Systems*. Tese de doutoramento, University of Waterloo, 2011.
- [26] Roberto Battiti. Reactive search: Toward self-tuning heuristics. Em V. J. Rayward-Smith, I. H. Osman, C. R. Reeves, e G. D. Smith, editores, *Modern Heuristic Search Methods*, páginas 61–83. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 1996.

- [27] John H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, 1975.
- [28] David B. Fogel. *Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*. Wiley-IEEE Press, 3ª edição, 2006.
- [29] Lawrence David Davis. *Handbook Of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [30] Ajith Abraham Nadia Nedjah e Luiza de Macedo Mourelle. *Genetic Systems Programming: Theory and Experiences*. Springer; 2006 edition, 2006.
- [31] Hiroaki Kitano. Neurogenetic learning: an integrated method of designing and training neural networks using genetic algorithms. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 75(1-3):225–238, Agosto 1994.
- [32] Zbigniew Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs (3rd Ed.)*. Springer-Verlag, London, UK, UK, 1996.
- [33] Aníbal Castilho Coimbra de Matos. *Apontamentos de Análise Numérica*. Setembro 2005. FEUP.
- [34] J.S. Chitode. *Numerical Methods*. Technical Publications, 2010.
- [35] C.T. Kelley. *Solving Nonlinear Equations with Newton's Method*. Fundamentals of Algorithms. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2003.
- [36] IEEE Power Engineering Society. Substations Committee e IEEE-SA Standards Board. Ieee guide for safety in ac substation grounding. páginas 1–192, 2000.
- [37] B.E. Blank e S.G. Krantz. *Calculus: Single Variable*. Número vol. 1. Key College Pub., 2006.
- [38] Mauricio Valencia Ferreira Da Luz e Patrick Dular. Analytical and finite element modeling of grounding systems. Em *IX International Symposium on Lightning Protection*, páginas 375–379, 2007.
- [39] Leonid Greev e Marjan Popov. On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 20(2):1598–1603, 2005.
- [40] EDP Distribuição-Energia S.A. *Guia Técnico de Terras*. 2010.
- [41] Direcção Geral de Geologia e Energia. *Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão*. CERTIEL, 2006.
- [42] R.S.I.U.E.E. – *Regulamento de Segurança das Instalações de Utilização de Energia Eléctrica*.
- [43] M. Abdel-Salam. *High-Voltage Engineering: Theory and Practice, Second Edition, Revised and Expanded*. Electrical and Computer Engineering. Taylor & Francis, 2000.
- [44] J. Nahman e D. Salamon. A practical method for the interpretation of earth resistivity data obtained from driven rod tests. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 3(4):1375–1379, Oct 1988. doi:10.1109/61.193934.

- [45] HB Dwight. Calculation of resistances to ground. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, páginas 1319–1328, 1937.
- [46] Lin Li, Vladimir Rakov, et al. Distribution of currents in the lightning protective system of a residential building—part ii: Numerical modeling. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 23(4):2447–2455, 2008.
- [47] Roy B Carpenter Jr e Joseph A Lanzoni. Designing for a low resistance earth interface (grounding). *an IEC publication, revised July*, 1997.
- [48] Leonid Grcev. Impulse efficiency of ground electrodes. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 24(1):441–451, 2009.
- [49] P. Simmons. *Electrical Grounding and Bonding*. Cengage Learning, 2014.
- [50] Ramdan E Rajab, N Mohamad Nor, e K Ramar. Investigations of two-layer earth parameters at low voltage: measurements and calculations. *Am J Eng Appl Sci*, páginas 165–170, 2009.
- [51] YL Chow, MM Elsherbiny, e MMA Salama. Resistance formulas of grounding systems in two-layer earth. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 11(3):1330–1336, 1996.
- [52] Departamento de Engenharia e Produto e Mercado Grupo Intelli. Princípios e medidas práticas para a obtenção de aterramentos seguros e confiáveis por meio de eletrodos cravados. Disponível em <http://docslide.com.br/documents/aterramento-seguro.html>, acessado a última vez em 24 de Agosto de 2015.