

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Eléctrodos de Terra

Nuno Filipe Barbosa Coelho

VERSÃO PROVISÓRIA

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Hélder Filipe Duarte Leite
Co-orientador: Sr. Eng. António Guedes Mesquita

31 de Janeiro de 2011

© Nuno Filipe Barbosa Coelho, 2011

Resumo

No projecto de um Posto de Transformação, dever-se-á dimensionar correctamente o sistema de terras, sabendo que o mesmo deve ser feito de forma criteriosa e cuidada, evitando-se assim a implementação de sistemas de terras pouco reflectidos. O sistema de terras de um Posto de Transformação tem como objectivo, permitir o correcto escoamento das correntes de defeito para a terra, protegendo-se desta maneira não só os equipamentos da própria instalação mas essencialmente as pessoas e animais que se encontrem próximo da instalação. Sendo assim, é necessário aquando da realização do projecto de um sistema de terras atender-se a vários critérios de segurança.

O comportamento apresentado pelos diversos eléctrodos de terra que constituem o sistema de terras varia em função das suas dimensões, assim como em função da resistividade do solo no qual se encontram instalado.

Este trabalho visa a caracterização rigorosa do comportamento apresentado pelos variados eléctrodos, sejam eles eléctrodos verticais ou horizontais, com principal referência aos eléctrodos usados pela Operadora da rede de distribuição de electricidade, assim como a apresentação de algumas técnicas para melhoramento da resistividade do solo. São ainda descritas algumas das técnicas usadas para se efectuar a medição da resistividade do solo e da resistência de terra, apresentando-se posteriormente aplicações práticas destas técnicas.

Por fim será feita uma análise crítica à normalização actualmente em vigor na Operadora da rede de distribuição de electricidade, apresentando-se ainda a elaboração de um procedimento padrão na escolha dos eléctrodos de terra e no projecto de um sistema de terras.

Abstract

In a Low Voltage Switching Boards project, sizing the ground system properly must be a priority, keeping in mind it should be done judiciously and carefully, to avoid a slightly reflected grounds systems implementation. The Low Voltage switching Boards ground system aims to allow a proper drain for default currents, protecting not only its own equipments but, most of all, people and animals which might be around the facility. Therefore, it is necessary to ensure several safety criteria when a system grounds project is about to start.

The behavior exhibited by several ground electrodes, which are part of the ground system, varies according to their size, as well as according to the soil resistivity, which they are in.

This work aims to characterize accurately the behavior exhibited by several electrodes, whether they be vertical or horizontal, referencing mainly electrodes used by the electricity network distribution Operator, as well as to present some techniques regarding the improvement of the soil resistivity. Some of the techniques used to perform soil resistivity and ground resistance measurements are also described, with further presentation of practical applications of these techniques.

Finally a critical analysis to the standardization ruling on the electricity network distribution Operator will be done and the elaboration of a standard procedure to pick up both ground electrodes and ground system project will be introduced.

Agradecimentos

Esta página serve para lembrar todas as pessoas que me aconselharam, motivaram, apoiaram e colaboraram ao longo deste meu percurso.

As palavras escritas não transmitem a gratidão que tenho para vós, no entanto vou tentar expressar-me da melhor forma.

Ao meu orientador, o Prof. Doutor Hélder Filipe Duarte Leite, pela confiança depositada em mim, pelos níveis de exigência, pelos conselhos e críticas sempre com o intuito de melhorar a minha aprendizagem assim como a minha dissertação.

À EDP Distribuição, Área Operacional de Penafiel e a todos os seus colaboradores por me terem acolhido com simpatia e de braços abertos, com particular destaque para o Engenheiro António Guedes Mesquita por me ter proporcionado todas as condições para a realização desta dissertação assim como pela oportunidade concedida.

Aproveito para agradecer a todos os meus amigos, que sempre partilharam uma palavra amiga, a alegria de um bom sorriso, a sua opinião em momentos decisivos, bem como o apoio para vencer todos os desafios.

À minha namorada Marta, por ter estado sempre a meu lado nesta fase decisiva da minha vida académica.

À minha mãe, meu pai, minha irmã Sofia, madrinha, afilhado, primos, avós, tios, em particular à minha tia Lina e tio Júlio, agradeço tudo o que me proporcionaram ao longo da vida, em especial aos meus pais, a quem dedico esta dissertação, por me terem acompanhado e apoiado no dia-a-dia, não só durante este percurso académico mas como em todas as etapas da minha vida.

A todos o meu Muito Obrigado!

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvi
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Importância dos Sistemas de Terras.....	1
1.2 - Motivação e Objectivos	2
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	3
Capítulo 2	5
CrITÉrios de Segurança nos Sistemas de Terras.....	5
2.1 - Sistema de Terras de um Posto de Transformação: Introdução.....	5
2.2 - Sistema de Terras de um Posto de transformação: Funcionalidades	7
2.3 - Segurança dos Sistemas de Terras	8
2.3.1 - Amplitude e Duração da Corrente.....	9
i - Equação de Dalziel.....	10
ii - Equação de Osypka	10
iii - Equação de Geddes	10
iv - Equação de Biegelmeier	11
2.3.2 - Impedância do Corpo Humano	11
2.3.3 - Tensões de Choque.....	12
i - Tensão Transferida	12
ii - Tensão de Toque	13
iii - Tensão de Passo	14
2.3.4 - CritÉrios de Segurança	15
2.4 - Resumo.....	16
Capítulo 3	17

Resistividade do Solo	17
3.1 - Resistividade do Solo: Introdução	17
3.2 - Factores que Determinam a Resistividade do Solo	18
3.3 - Resistividade Característica do Solo em Portugal	23
3.4 - Resistividade do Solo: Métodos de Medição	25
3.4.1 - Medição por Amostragem da resistividade do solo	25
3.4.2 - Medição Local da resistividade do solo	26
i - Método de Wenner	27
ii - Método de Schlumberger	28
iii - Comparação entre o Método de Wenner e o Método de Schlumberger	29
3.5 - Resumo	30
Capítulo 4	31
Resistência de Terra	31
4.1 - Limites para o Valor da Resistência de Terra	32
4.2 - Secção Mínima dos Condutores do Sistema de Terras	33
4.3 - Determinação da Resistência de Terra	34
4.3.1 - Eléctrodo Vertical	34
i) Eléctrodo Vertical com Brocagem do Furo Artesiano	36
4.3.2 - Eléctrodo Rectilíneo Enterrado Horizontalmente	36
i) Serpentina Simples	37
ii) Serpentina Dupla	37
iii) Serpentina Dupla Longa	38
4.3.3 - Eléctrodo de Braços Radiais	38
4.3.4 - Eléctrodo Hemisférico	40
4.3.5 - Eléctrodo Esférico Enterrado com Ligação Isolada	41
4.3.6 - Eléctrodo Chapa Circular	42
4.3.7 - Eléctrodo Chapa Vertical	43
4.3.8 - Eléctrodo em Anel	43
4.3.9 - Influência de Solos Não Homogéneos na Determinação da Resistência de Terra	44
4.3.10 - Eléctrodos de Terra Paralelos	46
i - Dois Eléctrodos Hemisféricos Ligados por Cabo Isolado	46
ii - Dois Eléctrodos Verticais Ligados por Cabo Isolado	47
iii - Dois Eléctrodos Verticais Ligados por Cabo de Cobre Nu de Secção 35mm ²	48
iv - Eléctrodos de Terra em Paralelo em Solos Heterogéneos	48
v - Influência da Proximidade dos Eléctrodos de Terra de Retorno da Corrente	48
vi - Acoplamento Resistivo entre Eléctrodos de Terra Paralelos	49
4.4 - Métodos de Medição da Resistência de Terra	50
4.4.1 - Princípio de Medição de um Sistema de Terras	50
4.4.2 - Método da Queda de Potencial	52
i - Regra dos 62%	53
4.4.3 - Método Selectivo	54
4.4.4 - Método de Medição sem Eléctrodos Auxiliares	55
4.5 - Considerações sobre os Métodos de Medição da Resistência de Terra e da Resistividade do Solo	55
4.6 - Técnicas de Melhoria da Resistência de Terra	56
4.7 - Resumo	60
Capítulo 5	61
Eléctrodos de Terra: Implementações Práticas	61
5.1- Sistema de Terras Combinando Eléctrodos Verticais com o Cabo Rectilíneo	61

5.2 - Comparação entre a Interligação de duas Varetas com Cabo Isolado ou Cabo Nu	64
5.2.1 - Comparação Prática de duas Varetas Interligadas por Cabo Isolado ou por Cabo Nu.....	65
5.2.2 - Comportamento de dois Eléctrodos Verticais Ligados por Cabo de Cobre Nu com a Adição de Sal	66
5.3 - Terra de Serviço de um Posto de Transformação.....	66
i) Medição da Resistividade do Terreno	67
ii) Implementação da Terra de Serviço.....	67
iii) Experiências de Medições para Diversas Disposições Durante a Implementação	68
5.4 - Terra de Protecção do Posto de Transformação.....	70
5.5 - Comparação do Valor da Resistência de Terra para Diferentes Eléctrodos.....	71
5.6 - Soluções Normalizadas pela Operadora da Rede de Distribuição.....	72
5.6.1 - Limite do Valor da Resistência de Terra imposto pela DGEG.....	72
5.6.2 - Eléctrodos de Terra: Normalização	72
5.6.3 - Profundidade de Enterramento dos Eléctrodos de Terra.....	73
5.6.4 - Tratamento Físico e Químico do Solo.....	73
5.7 - Procedimento Padrão no Projecto de um Sistema de Terras.....	74
5.8 - Resumo.....	77
Capítulo 6	79
Conclusões Finais e Trabalhos Futuros	79
6.1 - Conclusões Finais.....	79
6.2 - Contribuição do Trabalho	80
6.3 - Trabalhos Futuros	81
Referências	82
Anexo A.....	84
Eléctrodos de Terra: Figuras.....	84
A.1 - Telurómetro.....	84
A.2 - Método de Medida sem Eléctrodos Auxiliares	85
A.3 - Figura com a Tabela das Variáveis da Equação Eq. 4.1	85
A.4 - Eléctrodos de Terra: Resistência de Terra	86
A.5 - Figuras para as Constantes K_1 e K_2	90
Anexo B.....	92
Imagens das Experiências Práticas.....	92

Lista de figuras

Figura 2.1 - Constituição genérica de uma ligação à terra.....	6
Figura 2.2 - Componentes da corrente no solo [1].....	6
Figura 2.3 - Zonas dos efeitos fisiológicos da passagem de uma corrente alternada 50-60 Hz no corpo humano em função da duração e da intensidade da corrente [1, 2]......	9
Figura 2.4 - Corrente de fibrilação em função da duração do tempo de choque de acordo com Dalziel, Osypka ou Biegelmeier [1].	11
Figura 2.5 - Resistência do corpo humano, em função da tensão [1].	12
Figura 2.6 - Tensão de Toque [1, 5].	13
Figura 2.7 - Tensão de Passo [1, 5].	14
Figura 3.1 - Cubo de 1m de aresta com duas faces de metal [5].	18
Figura 3.2 - Efeito da humidade na resistividade do solo [1].	20
Figura 3.3 - Efeito do tipo de concentração de sais e ácido na resistividade do solo [5]......	21
Figura 3.4 - Comportamento da água em função da temperatura [5].	22
Figura 3.5 - Representação do solo estratificado em quatro camadas, onde a última camada é considerada infinita [5].	23
Figura 3.6 - Resistividade média do solo em Portugal [1].	24
Figura 3.7 - Medição por amostragem da resistividade aparente de um solo.	26
Figura 3.8 - Método de Wenner: circuito utilizado.	27
Figura 3.9 - Método de Schlumberger: circuito utilizado.	29
Figura 4.1 - Potencial no solo de um eléctrodo hemisférico em função da distância.	32
Figura 4.2 - Eléctrodo Vertical.	34
Figura 4.3 - Representação da zona de influência dos eléctrodos verticais.	35
Figura 4.4 - Distribuição do Potencial em volta do eléctrodo com a cabeça enterrada (a) ou à superfície (b) [4].	36

Figura 4.5 - Eléctrodo rectilíneo horizontal.....	37
Figura 4.6 - Serpentina simples [13].....	37
Figura 4.7 - Serpentina dupla [13].	38
Figura 4.8 - Serpentina dupla longa [13].	38
Figura 4.9 - Disposição Estrela com 3 braços a 120° [13].	39
Figura 4.10 - Eléctrodo hemisférico enterrado em solo homogéneo [7].	40
Figura 4.11 - Distribuição do potencial na superfície de um solo homogéneo para um eléctrodo hemisférico [4].	41
Figura 4.12 - Eléctrodo esférico enterrado num solo homogéneo [4].	42
Figura 4.13 - Eléctrodo chapa circular num solo homogéneo [1].	42
Figura 4.14 - Eléctrodo Chapa Vertical.	43
Figura 4.15 - Eléctrodo em anel [1].	44
Figura 4.16 - Linhas equipotenciais e de escoamento da corrente em torno de um eléctrodo de terra, para diferentes valores da resistividade do subsolo [4].	45
Figura 4.17 - Dois eléctrodos hemisféricos colocados em paralelo num solo homogéneo.	46
Figura 4.18 - Circuito genérico utilizado para medição da resistência de um Eléctrodo de Terra.....	49
Figura 4.19 - Circuito utilizado para obtenção do perfil do potencial do solo [1].	51
Figura 4.20 - Perfil do potencial na superfície do solo.....	51
Figura 4.21 - Variação do perfil do potencial em função da distância entre eléctrodos de corrente [1].	52
Figura 4.22 - Circuito utilizado para medição da resistência de terra através do método da queda de potencial.	53
Figura 4.23 - Variação do potencial pelo método da queda de potencial [5].	54
Figura 4.24 - Esquema de medição da resistência de terra pelo método selectivo.....	54
Figura 4.25 - Resistência de terra em função do número de eléctrodos verticais colocados em paralelo e em função do comprimento (em metros) e do diâmetro (em polegadas: $I_{pol}=0,0254m$) dos eléctrodos [1].	57
Figura 4.26 - Sistema de colocação de vários eléctrodos verticais em profundidade.	58
Figura 4.27 - Resistência de terra de um eléctrodo vertical em função da profundidade de colocação do mesmo, para um solo com uma camada inferior de menor resistividade.....	58
Figura 4.28 - Variação da resistividade do solo em função da percentagem de água, carvão e sal [20].	59

Figura 4.29 - Exemplo da técnica de envolver o eléctrodo em Bentonite para baixar a sua resistência de terra [18].	59
Figura 5.1 - 4 Eléctrodos verticais interligados por cabo nu.	62
Figura 5.2 - Distribuição da corrente no solo para diferentes profundidades e diferentes disposições.	63
Figura 5.3 - 2 Eléctrodos Verticais paralelos.	64
Figura 5.4 - Variação da resistividade do solo em função da percentagem de sal adicionado.	74
Figura A.1 - Aparelho para medição da resistividade do solo e da resistência de terra.	84
Figura A.2 - Método de medida da resistência de terra sem eléctrodos de terra auxiliares. ...	85
Figura A.3 - Tabela com as constantes a preencher na Equação Eq. 4.1.	86
Figura A.4 - Resistência de terra do eléctrodo vertical tipo vareta.	87
Figura A.5 - Resistência de terra do eléctrodo vertical em função do comprimento.	87
Figura A.6 - Resistência de terra do eléctrodo vertical em função do diâmetro.	88
Figura A.7 - Resistência de terra de 2 eléctrodos verticais em paralelo, interligadas por cabo isolado vv 35 mm ² , em função da distância s entre os eléctrodos.	88
Figura A.8 - Resistência de terra do eléctrodo horizontal tipo estrela de acordo com as Equações Eq. 4.11 e Eq. 4.12.	89
Figura A.9 - Resistência de terra do eléctrodo horizontal em função do número de braços. ...	89
Figura A.10 - Gráfico de K ₁ em função do rácio entre o comprimento e a largura da malha e a profundidade h [m].	90
Figura A.11 - Gráfico de K ₂ em função do rácio entre o comprimento e a largura da malha e a profundidade h [m].	91
Figura B.1 - Medição da resistividade do solo através do método de Wenner.	92
Figura B.2 - 2 eléctrodos verticais interligados por cabo isolado.	93
Figura B.3 - Eléctrodos verticais paralelos interligados por cabo de cobre nu 35 mm ² . Terra de serviço de um Posto de Transformação.	93
Figura B.4 - Pormenor da ligação do cabo rectilíneo horizontal ao eléctrodo vertical.	94
Figura B.5 - Terra de Protecção de um PT: Pormenor de a vala depois de fechada ficar com a terra pouco compactada.	94

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Resistividade característica [1].....	18
Tabela 3.2 - Variação do valor da resistividade dos solos mais comuns [8].	19
Tabela 3.3 - Relação entre a quantidade de sal adicionado e a resistividade alcançada pelo solo [1, 5].....	20
Tabela 3.4 - Relação Temperatura - Resistividade [4].	22
Tabela 4.1 - Valores máximos para a resistência de terra.	32
Tabela 4.2 - Tabela com as constantes fornecidas pela Operadora da rede de distribuição de electricidade.	34
Tabela 5.1 - Valores de resistência de terra para a malha de terra.....	63
Tabela 5.2 - Dados para o cálculo da resistência de terra de dois eléctrodos verticais.	65
Tabela 5.3 - Medição da resistividade do terreno.	65
Tabela 5.4 - Valores da resistência de terra, para os diferentes casos.	66
Tabela 5.5 - Medição da resistividade do terreno.	67
Tabela 5.6 - Resistência de terra de 5 eléctrodos verticais.....	68
Tabela 5.7 - Resistência de terra para diferentes números de eléctrodos verticais.....	68
Tabela 5.8 - Resistência de terra para diferentes eléctrodos de terra.	69
Tabela 5.9 - Resistência de terra para diferentes medições.	69
Tabela 5.10 - Resistência de terra antes e depois do melhoramento.	70
Tabela 5.11 - Resistência de terra para diferentes eléctrodos.	71
Tabela 5.12 - Limites de resistividade para diferentes tipos de eléctrodos.	75

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

A	Ampere. Unidade do Sistema Internacional da corrente
BT	Baixa Tensão. Na rede de distribuição em Portugal corresponde a uma tensão de 400V
d.d.p.	diferença de potencial
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
m	metros
MT	Média Tensão. Na rede de distribuição em Portugal corresponde aos níveis de tensão de 6,5KV, 10KV, 15KV e 30KV
PT	Posto de Transformação
s	segundos
V	Volt. Unidade do Sistema Internacional da tensão

Lista de símbolos

Ω	Ohm. Unidade do Sistema Internacional da impedância
ρ	Resistividade do solo

Capítulo 1

Introdução

As sociedades modernas estão cada vez mais dependentes da energia eléctrica, o que implica um crescente investimento no sistema eléctrico de energia de forma a satisfazer os consumidores. Este investimento traduz-se num aumento do número de aparelhos eléctricos e arrasta consigo uma maior exposição do utilizador às perturbações eléctricas, tornando cada vez mais importantes, questões relacionadas com os sistemas de protecção quer para os equipamentos eléctricos, quer principalmente para a segurança do ser humano.

Neste capítulo em específico, será destacada a importância de um bom dimensionamento de um sistema de terras, bem como a motivação, os objectivos e a estrutura da dissertação.

1.1 - Importância dos Sistemas de Terras

A dependência das sociedades desenvolvidas face à electricidade, é um fenómeno cada vez mais importante nos nossos dias, podendo-se mesmo afirmar que não haver electricidade, significa muitas vezes não haver trabalho.

A utilização de um cada vez maior número de aparelhos eléctricos implica um aumento da exposição do utilizador às perturbações eléctricas. Os equipamentos eléctricos, entre outros os computadores, telefones, electrodomésticos, máquinas industriais etc., oferecem uma melhor qualidade de vida ao ser humano, mas também ocasionam grandes prejuízos económicos quando sofrem os efeitos de uma sobretensão eléctrica. Torna-se assim necessário garantir aquando do projecto e implementação das instalações eléctricas, questões relacionadas com a protecção dos equipamentos eléctricos e sobretudo com a segurança do ser humano. Para que isto seja possível de satisfazer, é indispensável limitar os efeitos das sobretensões que se propagam ao longo da rede eléctrica devido a fenómenos transitórios, sejam eles de origem interna ou externa. Isto pode ser conseguido através da criação de condições para o efectivo escoamento das correntes de defeito para a terra. Desta forma consegue-se evitar, ou pelo menos atenuar, os efeitos nefastos causados pela aparição destas situações. É dentro deste contexto que os sistemas de terras assumem uma das suas importantes funções, a de permitir que se escoem através dos eléctrodos de terra, correntes

de defeito para a terra, assegurando-se desta forma não só a protecção dos equipamentos, mas principalmente a devida segurança das pessoas. Desta forma, os sistemas de terras representam uma melhoria na qualidade e continuidade de serviço, desempenhando um papel fundamental dentro dos sistemas de protecção.

Os sistemas de terras devem ser projectados para serem capazes de garantir o escoamento de uma forma segura e eficaz, de correntes de choque provenientes de descargas atmosféricas, ou da actuação da aparelhagem de manobra, assim como de correntes de curto-circuito. Sendo assim, é importante que um sistema de terras apresente uma baixa resistência de terra, pois desta maneira garante um melhor escoamento das correntes de defeito e conseqüentemente, um aumento do nível de protecção do ser humano e equipamentos.

Uma vez que parte importante do sistema de protecção depende dos eléctrodos de terra, interessa fazer um estudo dos factores que possam ter influência no comportamento e na resistência de terra dos respectivos eléctrodos. Importa então abordar temas tais como as características do solo, nomeadamente a sua resistividade e formas de melhoramento da mesma, e as características dos eléctrodos de terra (tipo de eléctrodo, dimensões, número).

1.2 - Motivação e Objectivos

Devido à crescente importância assumida pelos aparelhos electrónicos no nosso dia-a-dia, torna-se cada vez mais prioritário garantir uma melhor qualidade de serviço do sistema eléctrico de energia, de forma a assegurar o bom funcionamento destes aparelhos, protegendo-os contra eventuais curto-circuitos e evitando assim prejuízos para os seus utilizadores. Estes aparelhos estão sujeitos a diversas sobretensões que podem levar à sua avaria, sobretensões estas causadas por fenómenos de origem externa ou interna ao sistema, nomeadamente descargas atmosféricas, curto circuitos, ou simplesmente comutação de aparelhagem, as chamadas sobretensões de manobra. Para além disto, é fundamental garantir a segurança de pessoas e animais contra qualquer tipo de exposição a aparelhos que possam estar sob tensões defeituosas, causadas pelos fenómenos descritos atrás, evitando assim choques eléctricos que podem causar problemas de maior ao ser humano.

Uma das formas de garantir quer o bom funcionamento dos aparelhos eléctricos, quer principalmente a segurança das pessoas e animais, é projectando-se eficazmente sistemas de terras. Nesta dissertação será efectuado um estudo sobre eléctrodos de terra e sobre características dos solos, de forma a assegurar uma adequada resistência de terra, para que as pessoas que se encontrem nas proximidades de instalações eléctricas ligadas à terra, não estejam expostas ao perigo de electrocussão, bem como assegurar o correcto escoamento de correntes de defeito para a terra sem afectar os equipamentos ou a continuidade/qualidade de serviço. Será ainda elaborado um procedimento padrão na escolha dos eléctrodos de terra, bem como uma análise crítica das soluções normalizadas actualmente em vigor na Operadora da rede de distribuição de electricidade.

1.3 - Estrutura da Dissertação

O capítulo 1 destina-se à introdução ao trabalho. É apresentado o enquadramento no qual a dissertação se insere, definem-se os principais objectivos e descreve-se a organização dos conteúdos da dissertação.

No capítulo 2, apresenta-se a constituição geral dos eléctrodos de terra e as suas aplicações típicas. São ainda apresentados conceitos ligados à segurança do ser humano e por último, alguns dos critérios que os eléctrodos de terra têm de cumprir.

O capítulo 3 é inteiramente dedicado à resistividade do solo. São apresentados os factores que influenciam o valor da resistividade e os métodos existentes para se efectuar a sua medição.

No capítulo 4, apresentam-se algumas expressões para determinar a resistência de terra de eléctrodos de várias geometrias e disposições, fazendo-se referência aos mais usados pela Operadora da rede de distribuição de electricidade. São ainda considerados eléctrodos colocados em paralelo no solo bem como os efeitos de acoplamentos resistivos entre eles. Apresentam-se também diversos métodos de medição da resistência de terra e a influência de solos não homogêneos no valor dessa mesma resistência. Por último são indicadas algumas técnicas utilizadas para baixar o valor da resistência de terra dos eléctrodos, assim como métodos para baixar a resistividade do solo o que conseqüentemente, irá provocar uma diminuição na resistência de terra.

No capítulo 5, é feita uma análise crítica às soluções normalizadas actualmente em vigor na Operadora da rede de distribuição de electricidade. Apresenta-se ainda neste capítulo um procedimento padrão na escolha dos eléctrodos de terra, uma análise crítica das soluções normalizadas actualmente em vigor na Operadora da rede de distribuição de electricidade, assim como uma demonstração matemática sobre o tipo de interligação entre eléctrodos paralelos. Por fim são ainda apresentadas diversas experiências práticas com eléctrodos de terra para validação de resultados teóricos, bem como a implementação de uma terra de serviço e melhoramento da terra de protecção de um Posto de Transformação.

Por último, o capítulo 6 refere-se às principais conclusões, à contribuição desta dissertação, assim como a eventuais trabalhos futuros sobre o tema dos eléctrodos de terra.

Capítulo 2

Critérios de Segurança nos Sistemas de Terras

Neste capítulo será feita uma introdução aos sistemas de terras, onde será dada uma definição do que é um sistema de terras de um Posto de Transformação. Serão também abordados com particular destaque, conceitos ligados à segurança do ser humano e ainda alguns critérios que os eléctrodos de terra têm de cumprir.

2.1 - Sistema de Terras de um Posto de Transformação: Introdução

Um sistema de terras consiste numa ligação eléctrica de um sistema físico (eléctrico, electrónico ou corpos metálicos) ao solo e tem como principais funções assegurar a segurança do ser humano, a integridade dos equipamentos e o correcto funcionamento do sistema. Esta ligação é constituída basicamente por três componentes:

- Ligações eléctricas desde o Posto de Transformação até aos eléctrodos;
- Eléctrodos de terra (consiste num qualquer corpo metálico colocado no solo);
- Terra envolvente dos eléctrodos.

Estas três componentes constituem o Sistema de Terras e deverão ter as seguintes características:

- ✓ Condutores com capacidade de escoamento de elevadas correntes de defeito;
- ✓ Boa condutividade eléctrica;
- ✓ Uma baixa resistência de terra;

6 Critérios de Segurança nos Sistemas de Terras

- ✓ Uma boa resistência do eléctrodo à corrosão;
- ✓ Uma boa robustez mecânica dos componentes.

Um exemplo de um Sistema de terras pode ser visto na Figura 2.1, sendo o eléctrodo, um eléctrodo vertical.

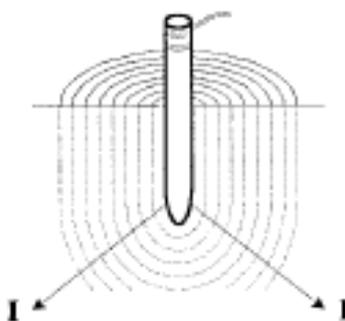


Figura 2.1 - Constituição genérica de uma ligação à terra.

O sistema de terras funciona como uma impedância cujo valor é dado por meio da relação entre a tensão que lhe é aplicada e a corrente que daí resulta.

De forma a ilustrar a natureza da referida impedância, considera-se uma porção de um eléctrodo representado tal como se indica na Figura 2.2:

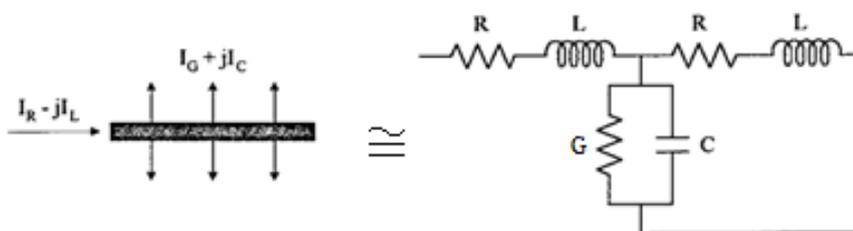


Figura 2.2 - Componentes da corrente no solo [1].

Onde:

- R é a resistência do circuito equivalente..... [Ω];
- L é a indutância do circuito equivalente..... [H];
- G é a condutância do circuito equivalente..... [Ω^{-1}];
- C é a capacitância do circuito equivalente..... [F];
- I_R e jI_L são as componentes da corrente que percorre o eléctrodo..... [A];
- I_G e jI_C são as componentes da corrente dissipada para o solo..... [A].

A corrente dissipada no solo é composta por quatro componentes, nomeadamente I_R , jI_L , I_G e jI_C (Figura 2.2) sendo que a corrente que é injectada no eléctrodo é parcialmente

dissipada para o solo (I_G e jI_C , Figura 2.2) e parcialmente transferida para o seu restante comprimento (I_R e jI_L , Figura 2.2). A corrente que percorre o eléctrodo é responsável pelas perdas internas no condutor, para além de estabelecer na região envolvente ao eléctrodo, um campo magnético em torno dos caminhos da corrente tanto no seu interior como no exterior, podendo assim o circuito equivalente ser representado por meio de uma resistência e uma indutância em série [1]. O campo eléctrico no solo (solo de resistividade ρ e permitividade relativa ϵ_r) determina o fluxo de corrente condutiva e capacitiva que se escoia para o solo ao longo do eléctrodo em qualquer instante. A energia associada ao fluxo das correntes pode ser representada por meio de uma condutância e uma capacitância colocadas em paralelo no circuito considerado, neste caso particular como representação de uma porção do eléctrodo.

Muitas vezes não se refere impedância de terra mas sim resistência de terra, o que significa que os efeitos reactivos podem ser desprezados e assim o circuito equivalente aproxima-se de um conjunto de resistências colocadas em paralelo. O valor da resistência de terra R_T é dado pela relação entre a tensão V aplicada ao eléctrodo de terra e a corrente I daí resultante:

$$R_T = \frac{V}{I} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde:

- R_T é a resistência de terra do eléctrodo..... [Ω];
- V é a tensão aplicada ao eléctrodo..... [V];
- I é a corrente que atravessa o eléctrodo resultante da relação $\frac{V}{R_T}$ [A].

De seguida apresentam-se as funcionalidades que um sistema de terras pode assumir, nomeadamente um sistema de terra de serviço ou um sistema de terra de protecção.

2.2 - Sistema de Terras de um Posto de transformação: Funcionalidades

Um sistema de terras de um Posto de Transformação (PT) (MT/BT) pode assumir uma variada gama de configurações, quer a nível de geometria como de dimensão, mas as suas aplicações estão sempre associadas a dois factores fundamentais:

- Terra de serviço - Desempenho do sistema ao qual o sistema de terras está ligado;
- Terra de protecção - Questões de segurança de pessoas e bens.

A terra de serviço de um PT refere-se ao uso do solo como condutor de retorno do sistema eléctrico, desempenhando funções directamente ligadas ao bom desempenho do sistema eléctrico de energia. A terra de serviço tem como função estabelecer um potencial de referência, de forma a garantir por exemplo que o neutro dos sistemas monofásicos tenha

uma resistência igual a zero e potencial nulo. Como exemplo de terra de serviço, tem-se a ligação à terra dos pontos neutros ou dos condutores neutros das redes de distribuição de energia eléctrica em baixa tensão. A terra de protecção de um PT funciona como um importante factor de segurança, pois permitem que haja um eficaz escoamento de correntes indesejáveis (geradas pelo próprio sistema ou com origem externa) para a terra. Consiste em ligar aos eléctrodos de terra do sistema de terra de protecção todas as partes metálicas da instalação e das massas dos aparelhos de utilização normalmente sem tensão, mas que possam eventualmente ficar sob tensão na sequência de um defeito de isolamento. Têm como objectivo limitar as tensões perigosas que possam ser aplicadas a uma pessoa que venha a ficar em contacto com esses elementos.

É ainda possível de se aplicar a Terra Única, que consiste em interligar a terra de serviço com a terra de protecção num PT. A terra única é possível caso a resistência de terra do sistema de terras tenha um valor igual ou inferior a 1 Ohm [12].

Para além dos sistemas de terras de um PT, consideram-se ainda os sistemas de terras relativos à protecção contra descargas atmosféricas, que provêm sempre de um sistema de terras (por exemplo postes de betão e postes metálicos).

Distingue-se ainda a forma como um determinado sistema eléctrico é ligado ao sistema de terras, existindo basicamente dois tipos de práticas:

- Sistema directamente ligado à terra - Alguns pontos do sistema eléctrico são ligados directamente à terra, procurando-se um caminho de mínima impedância à passagem da corrente de defeito para o solo. Essa mesma corrente sensibiliza os dispositivos de protecção a prontamente isolarem a parte com defeito do sistema;
- Sistema ligado à terra através de uma impedância - Neste caso é ligada uma impedância entre o sistema eléctrico e o sistema de terras, procurando com isso limitar o valor da corrente escoada.

De seguida serão abordados conceitos ligados à segurança que os sistemas de terras devem garantir, desde correntes máximas admissíveis para o corpo humano, assim como as equações das tensões de passo e de toque.

2.3 - Segurança dos Sistemas de Terras

Para as condições de segurança serem garantidas, é importante aquando de um projecto de um sistema de terras atender à equação de electrocussão, sendo a sua forma geral do tipo [1]:

$$I_B = F(p, f, t) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:

- I_B é a máxima corrente permitida pelo corpo humano em [A], que não provoca a morte a mais que uma determinada percentagem de pessoas com características equivalentes. É também denominada como corrente máxima de não fibrilação ventricular;

- f é a frequência da corrente..... [Hz];
- t é a duração do defeito..... [s];
- p é um ou vários parâmetros que caracterizam o caminho seguido pela corrente através do corpo.

2.3.1 - Amplitude e Duração da Corrente

Os efeitos da corrente eléctrica sobre o corpo humano são tanto mais graves, quanto maior for o valor da corrente eléctrica num determinado tempo de exposição, ou quanto maior for o tempo de exposição para um mesmo valor da corrente eléctrica.

Na Figura 2.3 são representadas as zonas de efeitos fisiológicos da passagem de uma corrente alternada de 50 Hz no corpo humano em função do tempo.

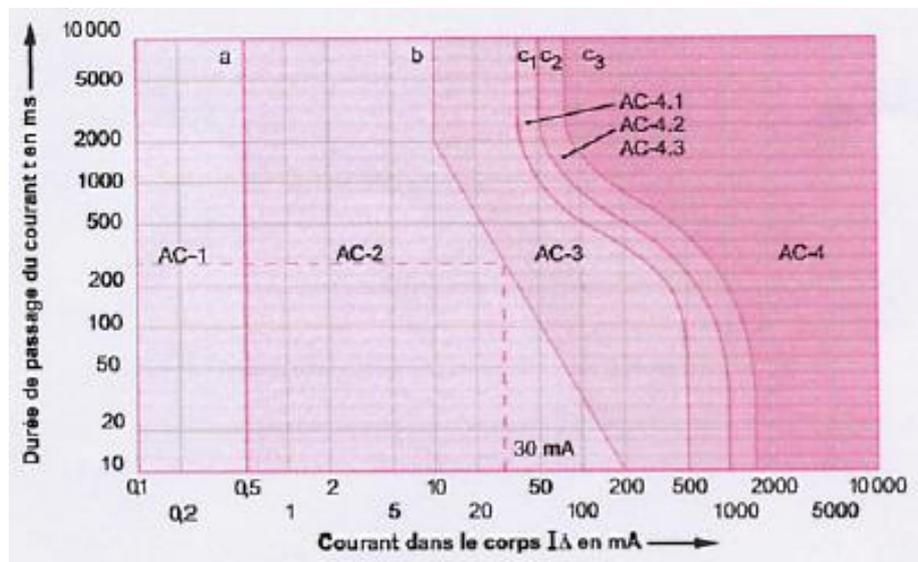


Figura 2.3 - Zonas dos efeitos fisiológicos da passagem de uma corrente alternada 50-60 Hz no corpo humano em função da duração e da intensidade da corrente [1, 2].

- ✓ Zona (AC-1) - Praticamente não há reacção à passagem da corrente eléctrica. O valor de 0,5mA foi considerado como limiar da percepção, qualquer que seja o tempo;
- ✓ Zona (AC-2) - Usualmente não há efeitos fisiológicos perigosos;
- ✓ Zona (AC-3) - Usualmente não são expectáveis danos orgânicos. Possibilidade de contracção muscular, paragem respiratória, taquicardia e distúrbios cardíacos. Todos os efeitos são reversíveis com o fim da corrente, excepto no caso de falta de ar no cérebro por um tempo prolongado;
- ✓ Zona (AC-4) - Probabilidade de fibrilação ventricular: até cerca de 5%, curva C_1 ; até cerca de 50%, curva C_2 ; superior a 50% para além da curva C_3 .

Para se garantir o nível de segurança de um sistema de terras, deve conhecer-se a mais elevada corrente tolerável para o corpo humano (denominada por corrente de fibrilação e

10 Critérios de Segurança nos Sistemas de Terras

determinada a partir da equação de electrocussão) e compará-la com as correntes medidas ou calculadas sob condições expectáveis de defeito.

Existem várias equações de electrocussão (Eq. 2.3, Eq. 2.4, Eq. 2.5 e Eq. 2.6) que conduzem a resultados aproximados, relacionando todas as correntes de fibrilação do corpo com a duração do choque. As mesmas não distinguem quais os pontos de aplicação da corrente, sendo ainda implicitamente assumido que essa corrente é sinusoidal e tem frequência industrial (50-60Hz).

i - Equação de Dalziel

A Equação Eq. 2.3 é a mais utilizada e recomendada pelo guia IEEE [3, 4], tendo por forma:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t}}, \text{ Com } k = \sqrt{S_B} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Em que:

- I_B é o valor máximo da corrente admissível sem que ocorra fibrilação ventricular..... [A];
- t é o tempo da duração do choque..... [s];
- k é uma constante estatística dependente do grau de segurança pretendido;
- S_B é o valor empírico de energia constante suportável por uma pessoa de determinado peso.

ii - Equação de Osypka

$$I_B = \frac{d}{t} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

A corrente máxima sem que ocorra fibrilação ventricular I_B [A] é inversamente proporcional à duração do choque eléctrico t (excepto para durações superiores a 1s onde a corrente permaneça constante) [1]. A variável d é uma constante estatística dependente do grau de segurança pretendido.

iii - Equação de Geddes

$$I_B = \frac{a}{(t-b)+c} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

A Equação Eq. 2.5 [1] baseia-se em considerações fisiológicas atendendo ao conceito de tecidos irritáveis, sendo a corrente I_B [A] também aqui inversamente proporcional à duração do choque eléctrico t [s]. Na Equação Eq. 2.5 aparecem também as variáveis a , b e c , que simbolizam constantes estatísticas dependentes do grau de segurança pretendido.

iv - Equação de Biegelmeier

$$\begin{cases} I_B = A & t \leq 0,2s \\ I_B = B & t > 2s \\ I_B = \frac{C}{t} & 0,2 < t < 2s \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

A Equação Eq. 2.6 baseia-se no conceito de tecido irritável [1]. A equação proposta por este autor considera que a corrente de fibrilação I_B [A] é descontínua com o tempo. Nas várias expressões aparecem também as variáveis A , B e C , que são constantes estatísticas dependentes do grau de segurança pretendido.

A Figura 2.4 mostra a corrente de fibrilação em função do tempo de duração do choque.

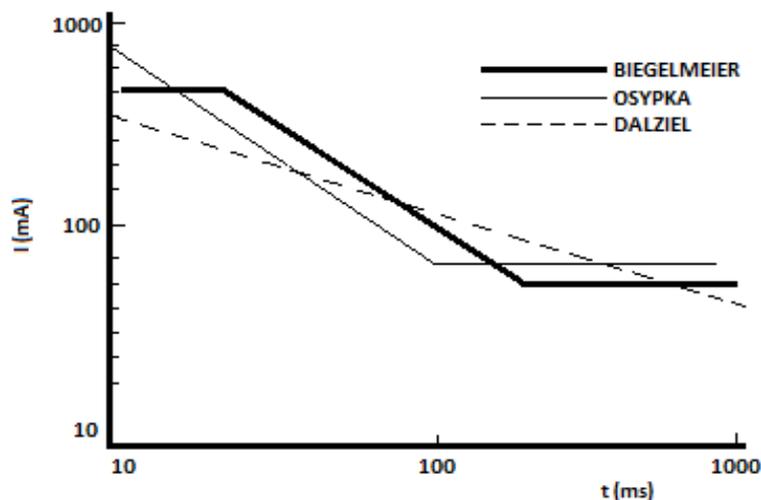


Figura 2.4 - Corrente de fibrilação em função da duração do tempo de choque de acordo com Dalziel, Osypka ou Biegelmeier [1].

2.3.2 - Impedância do Corpo Humano

Em [1] a corrente que atravessa o corpo humano depende basicamente da diferença de potencial (d.d.p.) aplicada, da área de contacto do corpo, da pressão de contacto, da humidade da superfície de contacto, da duração do contacto e da impedância apresentada pela parte do corpo que é percorrida pela corrente, sendo a mesma constituída pela impedância interna do corpo e pela impedância da pele. Os efeitos no corpo humano são mais prejudiciais aquando da passagem de uma corrente alternada, em comparação com a

12 Critérios de Segurança nos Sistemas de Terras

passagem de uma corrente contínua. Os valores característicos para a resistência interna do corpo rondam os 500-600 Ω , variando o seu valor de acordo com o percurso que a corrente percorre no corpo. Já para a resistência da pele é mais difícil encontrar uma gama de valores, uma vez que esta varia com a tensão aplicada, com o estado de hidratação e o estado de revestimento, podendo-se considerar que apresenta um valor de resistência nula para um valor de tensão superior a 1000V (tensão de ruptura). Verifica-se ainda que o valor da resistência do corpo diminui com o aumento da área e pressão de contacto, assim como com o aumento da humidade na superfície de contacto. Contudo, considera-se o valor de 1000 Ω como o valor médio da resistência do corpo.

A variação da resistência do corpo humano em função da tensão que lhe é aplicada está representada na Figura 2.5.

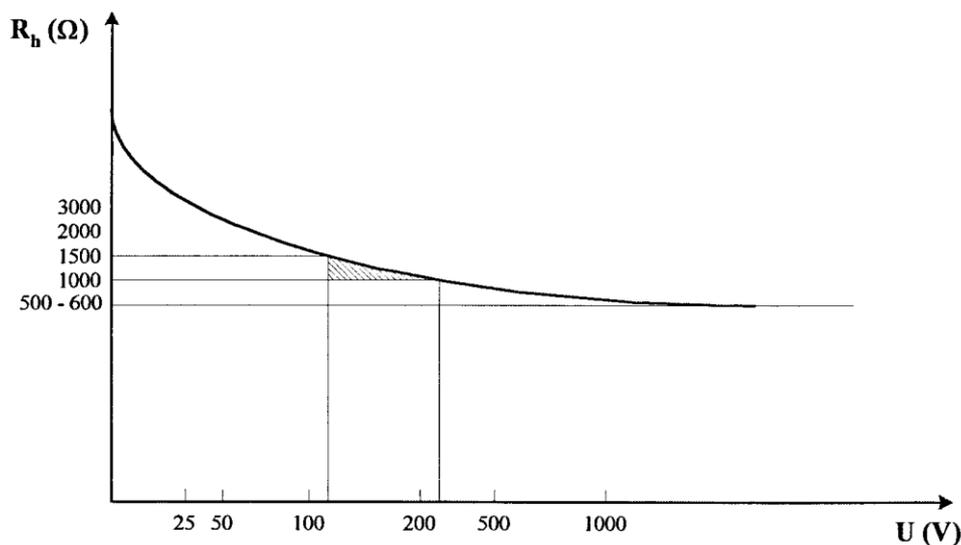


Figura 2.5 - Resistência do corpo humano, em função da tensão [1].

2.3.3 - Tensões de Choque

Nesta Sub-secção 2.3.3 são definidas diversas tensões a que uma pessoa pode ficar sujeita quando em contacto com uma parte metálica sob tensão de defeito de um PT. Relacionando o valor da d.d.p. a que um ser humano fica sujeito, com a resistência que apresenta para essa d.d.p. e comparando os valores da corrente que nesta situação percorrerá o corpo dessa pessoa, com aqueles definidos nas Sub-secções 2.3.1 i a 2.3.1 iv, pode concluir-se do grau de segurança apresentado pelo sistema de terras.

É assim possível fazerem-se diversos estudos, de forma a projectarem-se sistemas de terras que proporcionem que os níveis de segurança exigíveis se mantenham dentro dos limites aceitáveis.

i - Tensão Transferida

Em [1, 3, 4] define-se como tensão transferida, a elevação de potencial da malha referida ao infinito, simbolizando neste caso o potencial a que ficaria submetida uma pessoa posicionada a grande distância da malha, se tivesse contacto com uma parte metálica eventualmente ligada com os eléctrodos de terra, durante o fluxo de corrente pelos mesmos.

ii - Tensão de Toque

Define-se como tensão de toque [1, 3, 6] a máxima d.d.p. entre os membros superiores e os membros inferiores a que ficaria submetido um ser humano, eventualmente presente na região, que tivesse contacto com uma parte metálica ligada aos eléctrodos durante o fluxo da corrente de defeito pelo sistema de terras (consideram-se ambos os pés afastados 1 metro da estrutura tocada). Interessa neste caso calcular o valor máximo da Tensão de Toque Tolerável U_t , pelo que se considera a Figura 2.6:

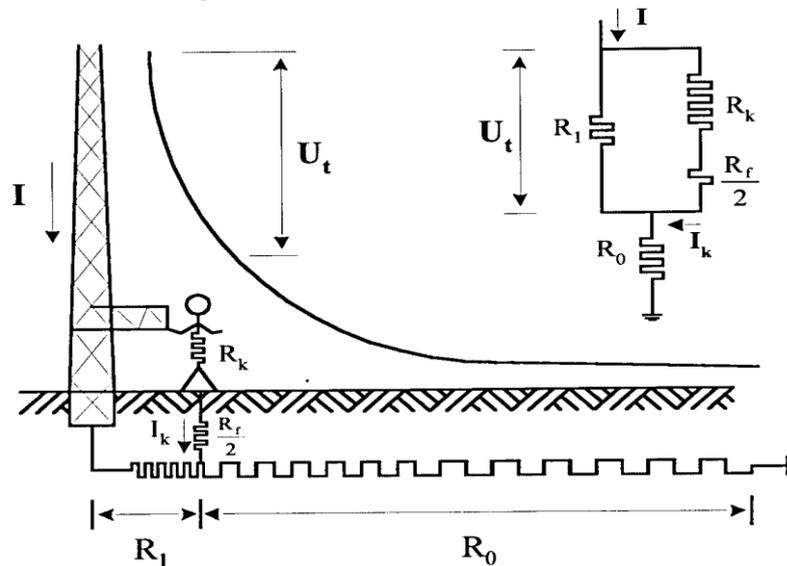


Figura 2.6 - Tensão de Toque [1, 5].

Considerando que a resistência entre a mão e o ponto em tensão é desprezável, que R_k é igual 1000Ω e R_f é a resistência do calçado/solo cujo valor depende do tipo de calçado usado e da resistividade do solo [1], pela Figura 2.6 pode-se retirar a Equação Eq. 2.7 da Tensão de Toque:

$$U_t = \left(R_k + \frac{R_f}{2} \right) * I_k \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Onde:

- U_t é a tensão de toque a que um pessoa fica sujeita quando em contacto com uma parte metálico sob tensão..... [V];
- R_k é o valor da resistência do corpo humano..... [Ω];
- R_f é a resistência do calçado/solo..... [Ω];
- I_k é o valor máximo da corrente admissível no corpo humano, sem que ocorra fibrilação ventricular..... [A].

14 Critérios de Segurança nos Sistemas de Terras

Como $R_f = 3 * \rho$ e $R_k = 1000\Omega$ conclui-se que:

$$U_t = \left(1000 + \frac{3*\rho}{2}\right) * I_k \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Onde:

- ρ é a resistividade do solo..... [$\Omega.m$].

Considerando um valor máximo da corrente admissível no corpo humano I_k [A], sem que ocorra fibrilação ventricular, valor esse que pode ser calculado por exemplo pela Equação de Dalziel (Eq. 2.3), retira-se a Tensão de Toque Tolerável U_t [V] para um solo de resistividade ρ [$\Omega.m$].

iii - Tensão de Passo

Define-se como Tensão de Passo [1, 3, 6] a máxima d.d.p. entre os pés (arbitra-se uma distância entre os mesmos de 1 metro), a que ficaria submetida uma pessoa eventualmente presente na região onde estão instalados os eléctrodos de terra, durante um fluxo de corrente pelos mesmos.

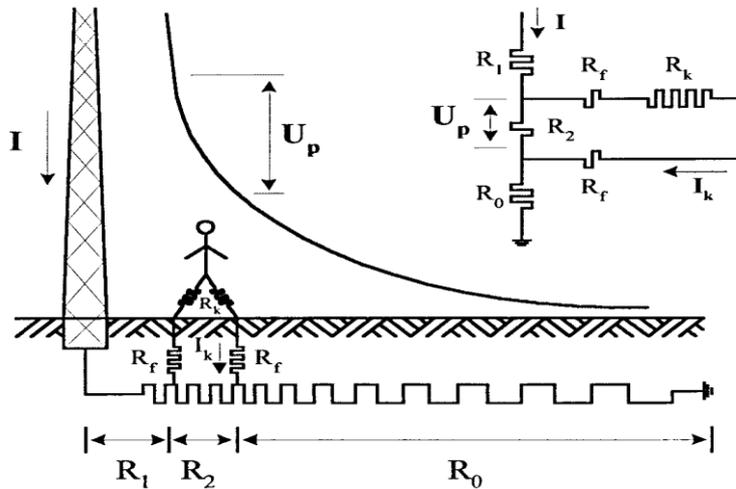


Figura 2.7 - Tensão de Passo [1, 5].

Pela Figura 2.7 deduz-se a Equação Eq. 2.9:

$$U_p = (R_k + 2R_f) * I_k \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Onde:

- U_p é a tensão de passo tolerável para uma pessoa..... [V];
- R_k é o valor da resistência do corpo humano..... [Ω];
- R_f é a resistência do calçado/solo..... [Ω];

- I_k é o valor máximo da corrente admissível no corpo humano, sem que ocorra fibrilação ventricular..... [A].

Como $R_F = 3 * \rho$ e $R_k = 1000 \Omega$, tem-se que:

$$U_p = (1000 + (6 * \rho)) * I_k \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Onde:

- ρ é a resistividade do solo..... [$\Omega.m$].

Considerando um valor máximo da corrente admissível no corpo humano I_k [A] sem que ocorra fibrilação ventricular, retira-se a Tensão de Passo Tolerável U_p [V] para um solo de resistividade ρ [$\Omega.m$].

2.3.4 - Critérios de Segurança

É agora possível caracterizar e definir os critérios de segurança a que determinado sistema de terras tem de obedecer, baseados nos limites admissíveis da Tensão de Toque e de Passo em determinadas condições do tempo [1]:

- I. Determinação da corrente máxima que pode fluir nos eléctrodos de terra, considerando-se normalmente o nível de curto-circuito fase-terra;
- II. Determinação dos Potenciais de Passo e de Toque máximos, gerados por tal corrente na região dos eléctrodos de terra;
- III. Determinação dos limites toleráveis da corrente em duas condições:
 - a. Para correntes de curta duração - Corresponde ao valor máximo tolerado até ao instante da actuação da protecção, variando logicamente o seu valor de instalação para instalação;
 - b. Para correntes de longa duração - Corresponde ao valor máximo de corrente que não promove a actuação da protecção;
- IV. Determinação dos valores máximos toleráveis (a partir de um modelo de impedância para o corpo) de Tensão de Passo e de Toque, considerando os valores limites de correntes calculados;
- V. Verificar se os Potenciais de Toque e de Passo, que seriam gerados pelo fluxo da corrente máxima nos eléctrodos de terra, não ultrapassam os valores máximos toleráveis para tais tensões, nas duas condições de duração da corrente;
- VI. Actuação na configuração dos eléctrodos de terra até que tais limites sejam respeitados.

2.4 - Resumo

Neste capítulo ilustrou-se a constituição geral dos eléctrodos de terra e as funcionalidades de um sistema de terras. Foram apresentados ainda conceitos ligados à segurança do ser humano, tais como Tensão de Passo e de Toque, assim como intensidade máxima de corrente e respectiva duração admissível para o corpo humano. Mostraram-se ainda alguns dos critérios que os eléctrodos de terra têm de cumprir, de forma a garantir que os limites admissíveis da Tensão de Toque e de Passo sejam respeitados.

Capítulo 3

Resistividade do Solo

3.1 - Resistividade do Solo: Introdução

No projecto de dimensionamento de um sistema de terras, dever-se-ão ter em conta todos os factores que influenciam directamente a resistência de terra. Estes factores são:

- Dimensões e forma dos eléctrodos;
- Resistividade do solo;
- Factores que influenciam a resistividade do solo:
 - Tipo de Solo;
 - Humidade do solo;
 - Concentração e tipo de sais dissolvidos na água;
 - Compacticidade do solo;
 - Granulometria do solo;
 - Temperatura do solo;
 - Estrutura geológica - Anisotropia - Estratificação do solo.

Sendo assim, torna-se necessário caracterizar tudo o que influencia a variação da resistividade do solo, pois irá influenciar também a resistência de terra do sistema de terras a instalar.

A resistividade de um solo pode definir-se como sendo a resistência eléctrica R [Ω], medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta $l = 1\text{m}$, área das faces $A = 1\text{m}^2$), preenchido com a terra do respectivo solo [1, 4, 7].

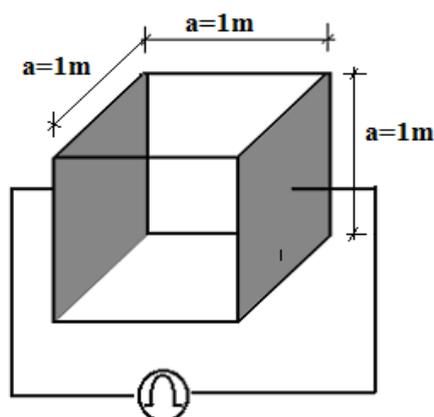


Figura 3.1 - Cubo de 1m de aresta com duas faces de metal [5].

Considera-se o solo como sendo um mau condutor, principalmente se o mesmo se encontrar totalmente seco uma vez que a condução do solo é predominantemente electrolítica. De seguida apresenta-se a Tabela 3.1, onde se pode comparar as diferenças entre a resistividade do solo e a resistividade de alguns condutores [1].

Tabela 3.1 - Resistividade característica [1].

Condutor	Resistividade [$\Omega \cdot m$] (20°C)
Prata	1,6E-8
Cobre	1,7E-8
Alumínio	2,8E-8
Solos mais comuns	5 a 20 E3

De seguida mostram-se os principais factores que determinam a resistividade do solo e que consequentemente, influenciam o valor da resistência de terra.

3.2 - Factores que Determinam a Resistividade do Solo

A resistência de terra de um determinado sistema de terras, depende consideravelmente da resistividade do solo no local onde o sistema se encontra instalado. Interessa assim caracterizar todos os factores que influenciam o valor da resistividade do solo e que consequentemente influencia o valor da resistência de terra.

- (i) Tipo de Solo - Não é possível atribuir valores exactos para a resistividade de um determinado tipo de solo, uma vez que num mesmo tipo de solo considerado existente em locais diferentes, a sua resistividade pode variar

consideravelmente [4]. Pode-se no entanto caracterizar a variação da resistividade dentro de determinados valores, valores que se encontram representados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Variação do valor da resistividade dos solos mais comuns [8].

Natureza dos terrenos	Resistividade [Ω.m]
Terreno pantanoso	1 a 30
Lama	20 a 100
Húmus	10 a 150
Solo arenoso	50 a 1000
Turfa húmida	5 a 100
Argila plástica	50
Mármore e argilas compactas	100 a 200
Mármore do Jurássico	30 a 40
Areia argilosa	50 a 500
Areia silicosa	200 a 3000
Solo pedregoso nu	1500 a 3000
Solo pedregoso recoberto de relva ou erva curta	300 a 500
Calcários macios	100 a 300
Calcários compactos	1000 a 5000
Calcários fissurados	500 a 1000
Xistos	50 a 300
Micaxistos	800
Granito e grés, consoante a alteração geológica	1500 a 10000
Granito muito alterado	100 a 600
Betão com 1 de cimento e 3 de inertes	150
Betão com 1 de cimento e 5 de inertes	400
Betão com 1 de cimento e 7 de inertes	500

(ii) Humidade do solo - A condução no solo é feita basicamente por mecanismos electrolíticos. É assim necessária a existência em quantidade suficiente de água e sais para que se estabeleça a electrólise [4]. Contudo, não é necessariamente verdade que um solo contendo elevada taxa de humidade, tenha obrigatoriamente baixa resistividade. O caso de um solo contendo uma concentração de sais dissolvidos na água de valor muito baixo, ou no caso da água estar congelada, confere-lhe uma resistividade elevada. A humidade presente num determinado solo é extremamente variável com o tempo, devido a um certo

20 Resistividade do Solo

número de factores dos quais se destacam o clima, a temperatura, a época do ano, a natureza do solo e a existência de lençóis subterrâneos de água. Na Figura 3.2 mostra-se o gráfico com a relação entre a resistividade e a humidade para um solo arenoso, podendo as conclusões daí tiradas (relação resistividade - índice de humidade), serem extrapoladas para outros tipos de solos. De realçar que a resistividade varia de uma forma mais significativa para variações do índice de humidade que vão dos 0% aos 15%;

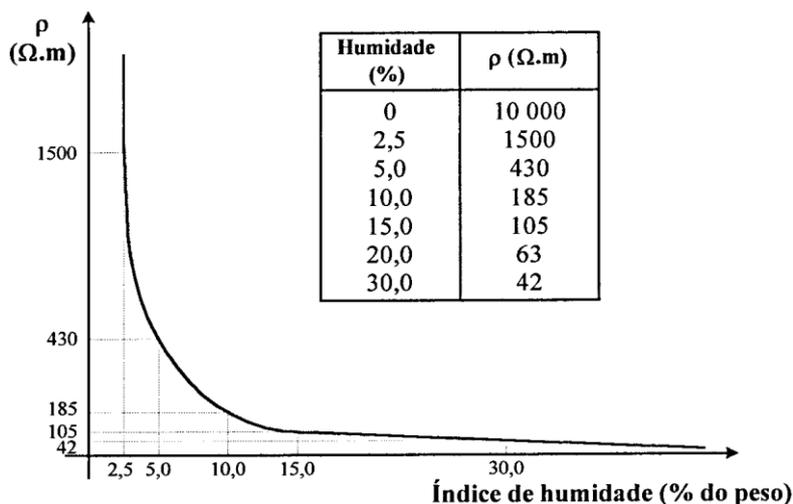


Figura 3.2 - Efeito da humidade na resistividade do solo [1].

(iii) Concentração e tipos de sais dissolvidos na água - Uma vez que a resistividade da água varia de acordo com os sais nela dissolvidos (condução electrolítica) e a resistividade do solo é dependente da quantidade de água retida, conclui-se que a resistividade do solo é influenciada pela quantidade e qualidade dos sais dissolvidos na água. Na Tabela 3.3 é relacionada a quantidade de sal adicionado a um solo arenoso de humidade 15% (percentagem em relação ao peso) e temperatura de 17 °C com a resistividade. Já a Figura 3.3 mostra o efeito do tipo de concentração de sais na resistividade do solo;

Tabela 3.3 - Relação entre a quantidade de sal adicionado e a resistividade alcançada pelo solo [1, 5].

Sal adicionado [% em peso]	Resistividade [$\Omega \cdot m$] - Solo arenoso
0	107
0,1	18
1	1,6
5	1,9
10	1,3
20	1,0

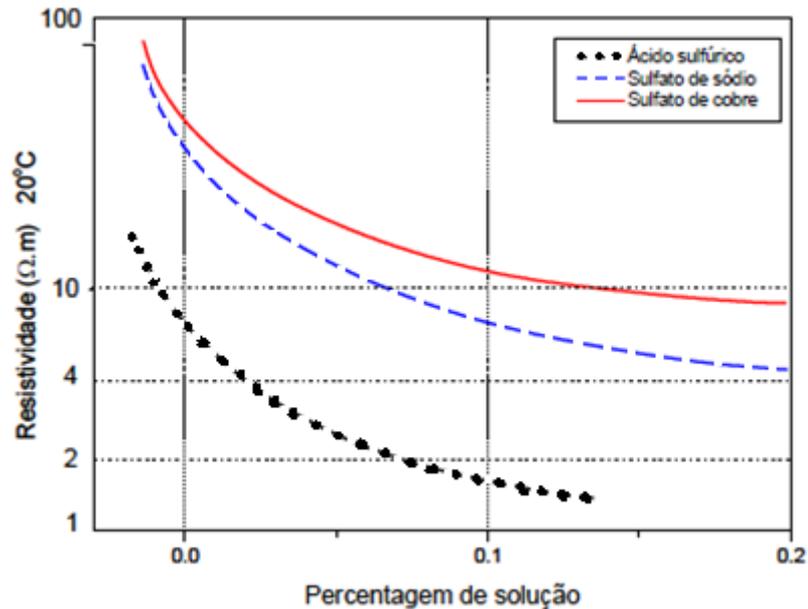


Figura 3.3 - Efeito do tipo de concentração de sais e ácido na resistividade do solo [5].

(iv) Compacticidade do solo - Um solo mais compacto tem uma continuidade física maior, logo valores de resistividade menores. Ao efectuar-se a instalação de um sistema de terras, deve-se esperar algum tempo depois de a vala ser fechada para se proceder à medição da resistência de terra, de forma a dar tempo ao solo de se estabilizar e permitir que os resultados obtidos sejam fiáveis. Ver Figura B.5 em Anexo B;

(v) Granulometria do solo - A Granulometria ou Análise Granulométrica dos solos é o processo que visa definir para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem em peso que cada fracção possui em relação à massa total da amostra em análise. Este factor influencia quer a capacidade de retenção de água nas camadas do solo, quer a sua continuidade física. Deste modo, uma Granulometria maior tende a aumentar a resistividade, pois por um lado existe menor capacidade de retenção de água, deixando-a escoar para camadas mais profundas e por outro, devido ao menor contacto entre os grãos, a continuidade física e consequentemente eléctrica é menor. É de realçar que se houver grãos de tamanhos diferentes, os grãos pequenos ocupam o lugar vago existente entre os grandes, permitindo assim por um lado uma boa continuidade eléctrica e por outro uma boa retenção da humidade;

(vi) Temperatura do solo - O efeito da temperatura do solo no valor da resistividade do mesmo pode ser visto sobre duas vertentes. Se a temperatura do

22 Resistividade do Solo

solo aumentar significativamente, aumentará também a capacidade de evaporação do mesmo, tornando o terreno mais seco e conseqüentemente com uma maior resistividade. Daí dever-se fazer uma medição anual da resistência de terra dos Postos de Transformação no verão, altura em que os valores irão ser mais elevados. Pelo contrário, se a temperatura baixar drasticamente ou seja, para valores negativos, a água irá transformar-se em gelo, o que fará aumentar significativamente o valor da resistividade do solo. A variação da resistividade em função da temperatura poderá ser vista na Tabela 3.4 e na Figura 3.4:

Tabela 3.4 - Relação Temperatura - Resistividade [4].

Temperatura [°C]	Resistividade [$\Omega.m$], Solo arenoso
+20	75
+10	99
0 ⁺ (água)	138
0 ⁻ (gelo)	300
-5	790
-15	3300

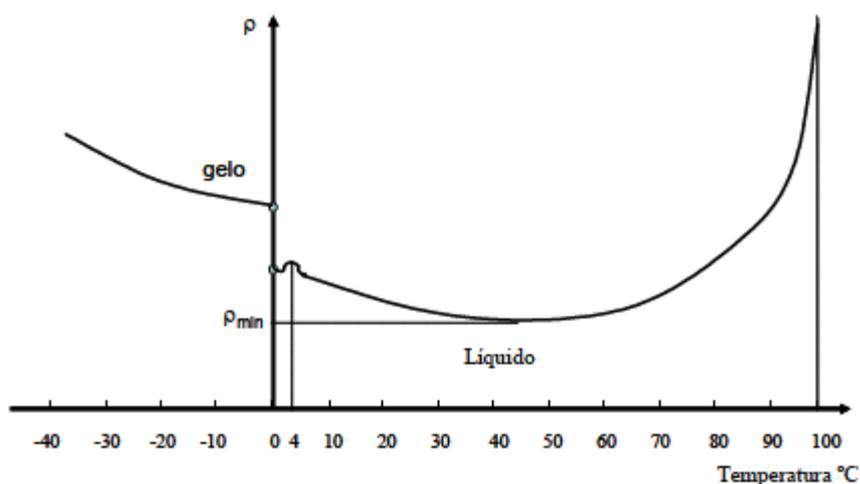


Figura 3.4 - Comportamento da água em função da temperatura [5].

(vii) Estrutura geológica - Anisotropia - Estratificação do solo - O solo é na realidade formado por diversas camadas estratificadas de formação distinta, encontrando-se todas sobrepostas e contendo resistividades diferentes [4]. Além disso, o solo apresenta características anisotrópicas quando camadas mais profundas afloram em determinados locais, ocasionando descontinuidade na superfície. A resistividade varia assim dependendo da direcção considerada, assumindo-se como resistividade do solo a resistividade média das diversas camadas que o compõem. Conclui-se ainda que em áreas onde predominam rochas muito antigas a resistividade é elevada, decrescendo substancialmente de valor

com a diminuição da idade das rochas. Observa-se na Figura 3.5 um exemplo de solo estratificado em quatro camadas, sendo a última camada de espessura considerada infinita.

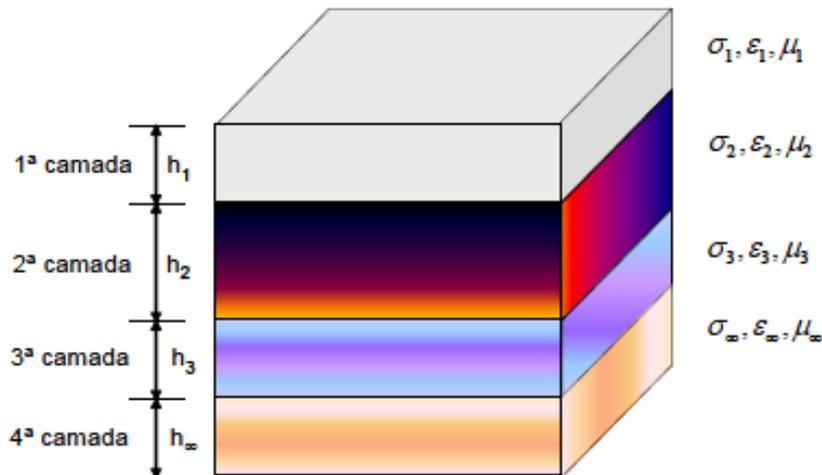


Figura 3.5 - Representação do solo estratificado em quatro camadas, onde a última camada é considerada infinita [5].

Identificou-se assim todos os factores a ter em conta no estudo da resistividade do solo, concluindo-se que o valor da resistividade de um solo depende principalmente do tipo do solo, da taxa de humidade do solo, da concentração e tipos de sais dissolvidos na água do solo assim como da temperatura do solo.

De seguida apresentar-se-á a resistividade característica do solo em Portugal Continental, verificando-se que o solo português tende para valores elevados de resistividade em grande parte do território.

3.3 - Resistividade Característica do Solo em Portugal

Apresenta-se na Figura 3.6, um mapa de Portugal Continental contendo a distribuição dos valores médios da resistividade do solo, de um modo bastante grosseiro e apenas para referência, sendo possível a partir do seu visionamento obter-se uma primeira ideia do valor da resistência de terra que poderá tomar um sistema de terras, antes de se efectuar a medição da resistividade no local onde o mesmo irá ser instalado [1]. Pode-se constatar a partir do mapa que as zonas do litoral são as que apresentam uma resistividade mais baixa, uma vez que são zonas húmidas, já os locais onde a resistividade é mais elevada situam-se nas zonas de maior temperatura (zonas mais secas) e nas zonas montanhosas.

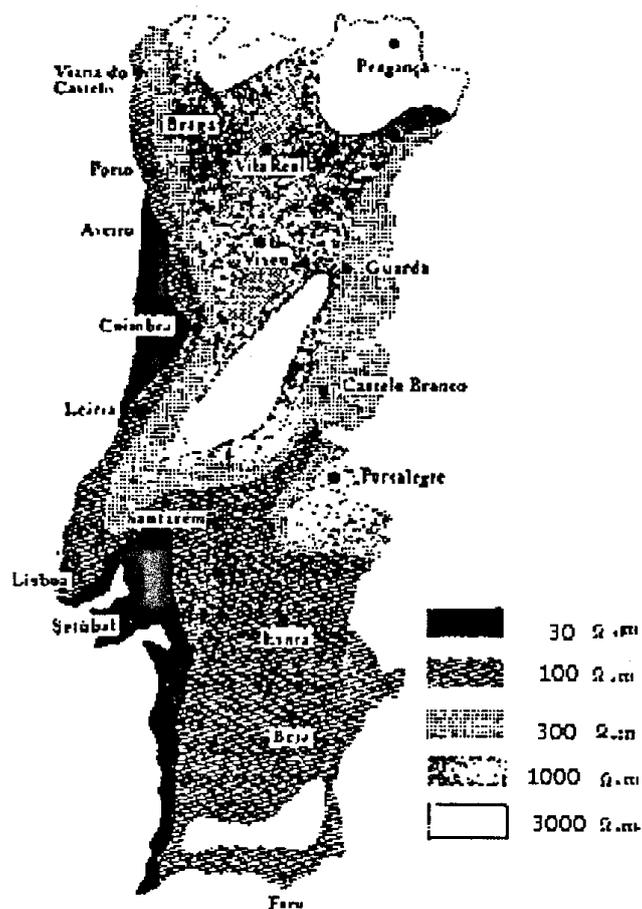


Figura 3.6 - Resistividade média do solo em Portugal [1].

Uma vez que através da Figura 3.6 não se consegue garantir qual o valor exacto da resistividade do solo numa determinada zona do território, deve-se proceder à medição da resistividade do solo no local onde o sistema de terras irá ser instalado, de forma a ser possível projectar-se eficazmente o sistema de terras em causa.

3.4 - Resistividade do Solo: Métodos de Medição

No projecto de um sistema de terras é necessário efectuar-se medições no local onde o sistema de terras irá ser implementado, de forma a retirar-se o valor da resistividade do terreno e assim escolher-se qual a melhor disposição de eléctrodos de terra a instalar. Para além disto, na medição da resistividade do solo deve-se ter em atenção a altura do ano e as condições meteorológicas sob as quais as medições estão a ser realizadas, para que a escolha do tipo de eléctrodos a instalar garanta o limite do valor da resistência de terra imposto pelo regulamento ao longo de todo o ano.

Pode-se fazer uma distinção entre duas formas diferentes de se realizar a medição da resistividade de um determinado solo [1]:

- Medição por amostragem - A medição da resistividade é feita no laboratório com uma amostra do solo do local considerado;
- Medição local - As medições são feitas no próprio local, com a ajuda de determinadas configurações de eléctrodos que injectam sinais electromagnéticos em regiões limitadas do solo.

É importante salientar que o solo normalmente não apresenta uma resistividade constante, podendo haver variação do seu valor de uma forma completamente aleatória (normalmente aparecem valores distintos da resistividade em camadas horizontais e/ou verticais). Assim, as resistividades do solo medidas por qualquer método, não representam o valor real da resistividade ρ (a menos que o solo seja homogéneo), mas sim o seu valor aparente ρ_a .

3.4.1 - Medição por Amostragem da resistividade do solo

O método de medição por amostragem baseia-se na medição da resistência, entre duas faces condutoras de um cubo de dimensões conhecidas e preenchido com uma amostra do solo recolhido a uma profundidade suficiente para se considerar imune a variações das condições ambientais, devendo a amostra estar firmemente compactada dentro do cubo. A Figura 3.7 ilustra de forma sucinta o processo de medição [1, 7].

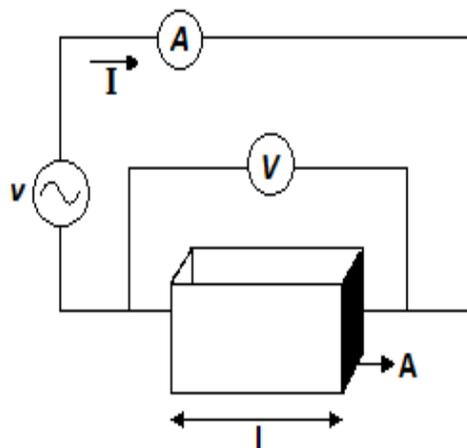


Figura 3.7 - Medição por amostragem da resistividade aparente de um solo.

A resistividade é então calculada pelas Equações Eq. 3.1, Eq. 3.2 e Eq. 3.3:

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde:

- v é a tensão aplicada ao cubo..... [V];
- R é a resistência obtida pela relação dos valores medidos da tensão V e da corrente I..... [Ω];
- V é a queda de tensão entre as duas faces..... [V];
- I é a corrente injectada no cubo..... [A];
- ρ é a resistividade do solo em análise..... [$\Omega \cdot m$];
- l é o comprimento de uma face do cubo..... [m];
- A é a área de uma das faces do cubo..... [m²].

O processo de medição por amostragem não é no entanto o mais correcto para se efectuar a medição da resistividade do solo, já que a ele estão inerentes erros devido à impossibilidade de se assegurar que a referida amostra é fidedigna das características exactas do local, mesmo no caso de haver um grande número de amostras recolhidas[1]. Isto deve-se às características anisotrópicas e heterogéneas que os solos geralmente apresentam e ao facto de na própria amostra haverem determinadas alterações, por exemplo a nível da compacticidade apresentada pelo solo no terreno, o que faz com que os resultados obtidos não sejam muito rigorosos. Este método é aplicado quase exclusivamente para pesquisa e caracterização da resistividade média de determinados tipos de solos e materiais.

3.4.2 - Medição Local da resistividade do solo

Os métodos apresentados a seguir nas Secções 3.4.2 i e 3.4.2 ii são usualmente os mais utilizados na determinação da resistividade aparente do solo, devido ao facto de se obterem valores bem mais fidedignos que o método descrito na Secção 3.4.1.

i - Método de Wenner

Para se medir a resistividade de um determinado solo a partir do método de Wenner, são necessárias serem cumpridas as seguintes condições [5, 9, 10]:

- ✓ 4 Eléctrodos verticais igualmente espaçados;
- ✓ Eléctrodos dispostos em linha recta;
- ✓ Eléctrodos enterrados à mesma profundidade.

Na Figura 3.8 é exemplificada a forma como este método é implementado.

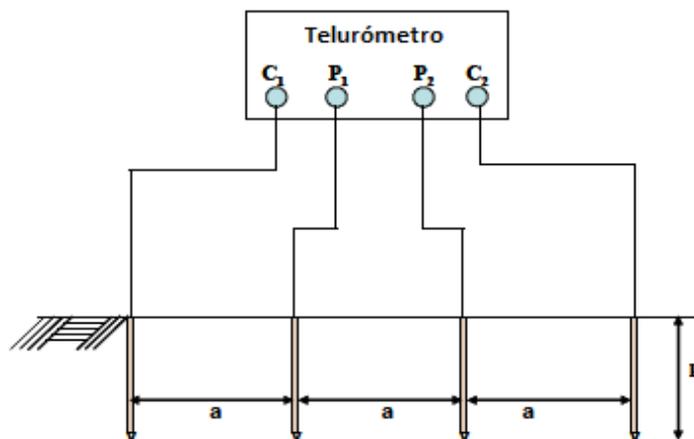


Figura 3.8 - Método de Wenner: circuito utilizado.

Pelos eléctrodos de corrente (eléctrodos externos) injecta-se a corrente contínua (de valor eficaz) e pelos eléctrodos de tensão (eléctrodos internos) mede-se a queda de tensão V [V] no solo, causada pela resistividade do solo [1]. Por sua vez, através da relação V/I entre a corrente injectada e a tensão medida, consegue-se determinar o valor da resistência R [Ω] entre os eléctrodos internos. Refira-se adicionalmente que existem aparelhos já providos de quatro terminais (dois de corrente e dois de tensão) que dão directamente o valor desta resistência, os chamados telurómetros, aparelho da Figura A.1 em Anexo A. O valor obtido pela resistência depende fundamentalmente da distância entre eléctrodos e da resistividade do solo. O valor da resistividade ρ_a de um solo em análise é dado pela Equação Eq. 3.4 [9, 10]:

$$\rho_a = 2 * \pi * a * R \text{ } [\Omega.m] \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Em que R é o valor medido pelo telurómetro [Ω] e a , a distância entre eléctrodos [m]. O telurómetro da Figura A.1 em Anexo A, para além do valor de R também facultamente o valor de ρ_a utilizando a Equação Eq. 3.4.

Em [9, 10, 11], quanto maior for o valor de a , maior é a profundidade de leitura da resistividade (normalmente entre $\frac{3}{4}$ de a e o valor de a). Para um solo homogéneo, o valor da resistividade é independente de a , mas como os solos são normalmente estratificados, ou seja, possuem diferentes camadas logo diferentes valores de resistividade, devem-se efectuar varias leituras da resistividade variando os valores de a , observando se o seu valor diminui ou aumenta com o aumento de a . Repare-se que para pequenos espaçamentos entre eléctrodos de medição, a corrente flui superficialmente, sendo esta mesma camada superficial do solo a responsável pelos valores obtidos. Quando o afastamento entre eléctrodos aumenta, aumenta a profundidade do caminho tomado pela corrente e é agora a parte do solo que se encontra a maior profundidade a responsável pelos valores obtidos. Pode-se assim construir uma curva de resistividade do solo em função da sua profundidade, verificando se a profundidade de enterramento de um eléctrodo irá ser importante para baixar os valores da sua resistência de terra.

Observe-se que por aplicação deste método quer para construção da curva da resistividade do solo em função da sua profundidade, quer para obtenção de várias medições da resistividade em vários pontos do terreno, é sempre necessária a deslocação dos quatro eléctrodos.

ii - Método de Schlumberger

O método de Schlumberger não é mais que uma reformulação do método de Wenner [1], surgido na constatação de que quando o afastamento entre os eléctrodos vai aumentando, os eléctrodos de tensão podem ficar dentro do patamar de potencial relacionado com os eléctrodos de corrente, comprometendo assim as medições que se pretendam efectuar. Com a aplicação deste método, os dois eléctrodos de corrente estão colocados em linha e centrados no mesmo ponto, mas os eléctrodos de tensão e os de corrente não são colocados equidistantes uns dos outros. Os eléctrodos de corrente estão equidistantes do ponto central a uma distância s , enquanto que os eléctrodos de tensão também estão equidistantes do referido ponto, mas agora a uma distância $a/2$, distância esta muito menor que s . A medição da resistividade através deste método, também pode ser realizada pelo aparelho da Figura A.1 em Anexo A e a sua aplicação é exemplificada na Figura 3.9.

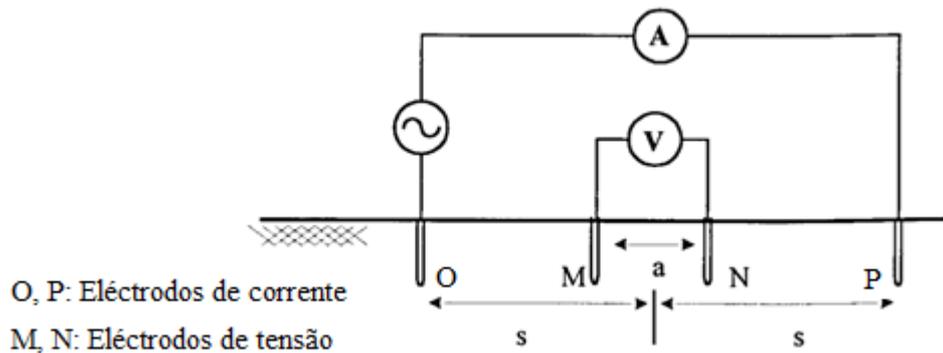


Figura 3.9 - Método de Schlumberger: circuito utilizado.

Onde:

- A é a corrente injectada nos eléctrodos de corrente O e P [A];
- V é a queda de tensão medida entre os eléctrodos de tensão M e N..... [V].

Pela Equação Eq. 3.5 obtém-se o valor da resistividade aparente através da implementação deste método:

$$\rho_a = \frac{\pi \left(s^2 - \left(\frac{a}{2} \right)^2 \right)}{a} * R \quad [\Omega.m] \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Onde:

- ρ_a é a resistividade aparente do solo..... [$\Omega.m$];
- R é o valor da resistência medida pelo aparelho..... [Ω];
- s é metade da distância entre os eléctrodos de corrente..... [m];
- a é a distância entre os eléctrodos de potencial..... [m].

Uma vez que o espaçamento entre os eléctrodos de corrente varia e os eléctrodos de tensão se mantêm inalterados, é possível obter o perfil em profundidade de um determinado solo.

iii - Comparação entre o Método de Wenner e o Método de Schlumberger

A principal diferença entre os 2 métodos, prende-se com o facto de ao utilizar-se o método de Wenner ser necessário mover-se os 4 eléctrodos para se efectuarem diferentes medições, enquanto no método de Schlumberger apenas é necessário mover-se os dois eléctrodos de corrente. Contudo, o método de Wenner é mais simples ao nível da disposição dos eléctrodos.

3.5 - Resumo

O capítulo 3 foi inteiramente dedicado à resistividade do solo. Foram apresentados os factores que influenciam o valor da sua resistividade e que conseqüentemente influenciam também o valor da resistência de terra. Apresentaram-se ainda diferentes métodos para se efectuar a medição da resistividade do solo, concluindo-se que o método de medição local apresenta resultados mais fiáveis que o método de medição por amostragem, devendo-se assim optar pela medição no local onde o sistema de terras irá ser instalado, aplicando-se o método de Wenner ou o método de Schlumberger

Capítulo 4

Resistência de Terra

No projecto de um sistema de terras, definem-se vários parâmetros que constituem o próprio sistema como sendo:

- ✓ Tipo de eléctrodo a instalar;
- ✓ Parâmetros do eléctrodo (Comprimento, secção, disposição);
- ✓ N° de eléctrodos.

É através do eléctrodo de terra que são escoadas correntes de defeito para a terra, podendo-se considerar esses defeitos como internos (curto-circuitos) ou externos (descargas atmosféricas). Na escolha do tipo de eléctrodos de terra para implementação de um determinado sistema de terras, deve-se ter em atenção as características do terreno (resistividade), bem como a resistência mecânica, eléctrica e a resistência à corrosão do eléctrodo.

A Resistência de Terra de um Eléctrodo agrupa não só a própria resistência do eléctrodo e das ligações eléctricas ao mesmo, mas também a resistência de contacto entre o eléctrodo e a terra adjacente ao mesmo e a resistência da terra da vizinhança do eléctrodo, nomeadamente a resistividade do solo. Deste modo o eléctrodo de terra, os condutores de terra e respectivas ligações, formam o sistema de terras. Para além disto os eléctrodos que constituem o sistema de terras devem:

- ✓ Ter resistência mecânica suficiente;
- ✓ Não ser danificados pelas correntes de defeito que os atravessam;
- ✓ Resistir à corrosão com o passar dos anos;
- ✓ Ter boa capacidade de condução;
- ✓ Ter um baixo valor da resistência de terra.

É imperativo que os eléctrodos de terra não permitam que a superfície do solo atinja valores de potencial que possam ser considerados perigosos para o ser humano. O perfil de

potencial no solo para um eléctrodo hemisférico de raio r encontra-se representado na Figura 4.1:

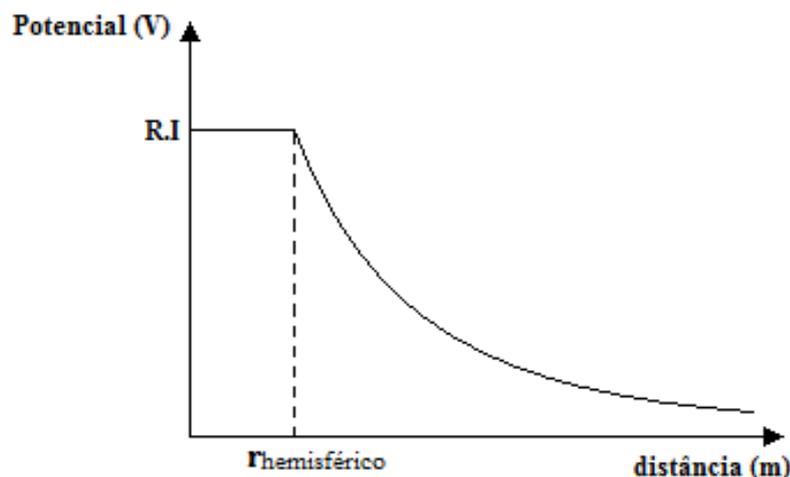


Figura 4.1 - Potencial no solo de um eléctrodo hemisférico em função da distância.

Neste capítulo analisar-se-á a secção utilizada dos condutores ligados aos eléctrodos de terra, os tipos de eléctrodos e suas equações para a determinação da resistência de terra, a influência de solos heterogéneos na determinação da resistência de terra, a interligação de eléctrodos de terra paralelos, os acoplamentos resistivos entre os eléctrodos, métodos de medição da resistência de terra e as técnicas de melhoria da resistência de terra.

4.1 - Limites para o Valor da Resistência de Terra

O valor da resistência de terra é fundamental para a análise dos defeitos de isolamento e para a eficácia dos sistemas de protecção de pessoas contra contactos indirectos. Pretende-se então que a resistência de terra dos eléctrodos seja tão baixa quanto possível, sendo que o valor ideal seria de 0Ω . Impuseram-se assim limites para o valor da resistência de terra, como se pode ver na Tabela 4.1 [12, 13]:

Tabela 4.1 - Valores máximos para a resistência de terra.

Instalação	Resistência de terra máxima [Ω]
Redes BT e IP	10 ou 20
Redes MT	20
Postos de transformação	20

Se a terra de protecção tiver uma resistência de valor inferior a 1Ω , pode a terra de serviço ser comum com a terra de protecção, designando-se neste caso como terra única [12].

4.2 - Secção Mínima dos Condutores do Sistema de Terras

No dimensionamento dos eléctrodos de terra deve-se ter em conta o dimensionamento dos condutores que ligam os eléctrodos de terra à instalação [7]. As secções mínimas dos condutores para cada tipo de eléctrodo de terra, já se encontram normalizadas e fazem parte dos regulamentos em vigor, no entanto foram calculadas através da Equação Eq. 4.1 indicada pelo Standard 80 do IEEE [3, 4]:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t \cdot \alpha r \cdot \rho r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K0 + Tm}{K0 + Ta}\right)}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

- A é a secção do condutor..... [mm²];
- I é o valor eficaz da corrente..... [A];
- Tm é a máxima temperatura admissível..... [°C];
- Ta é a temperatura ambiente..... [°C];
- Tr é a temperatura de referência para o material escolhido..... [°C];
- α_0 é o coeficiente de resistividade térmica a 0°;
- αr é o coeficiente de resistividade térmica à temperatura de referência;
- ρr é a resistividade do condutor de terra à temperatura de referência Tr..... [μΩ/cm³];
- $K0 = \frac{1}{\alpha_0}$ ou $K0 = \left(\frac{1}{\alpha r}\right) - Tr$;
- tc é o tempo da passagem da corrente..... [s];
- TCAP é o factor de capacidade térmica..... [J/cm³/°C].

Convém referir que a Equação Eq. 4.1 e o seu método de cálculo [3, 4], foi concebido para o cálculo da secção de condutores dos sistemas de terras das subestações, no entanto também se utiliza para o cálculo de secções mínimas para condutores de terra ou eléctrodos de terra em qualquer tipo de instalação.

Os documentos [3, 4] fornecem ainda uma tabela onde se pode consultar as constantes para preencher na Equação Eq. 4.1, Figura A.3 em Anexo A.

A Operadora da rede de distribuição de electricidade indica também em vários documentos internos a Equação Eq. 4.2 [6]:

$$A = \frac{I_f}{K} \sqrt{\frac{t_f}{\ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

- A é a secção..... [mm²];
- I_f é a corrente de defeito que circula no condutor..... [A];
- t_f é a duração da corrente I_f [s];
- K é a constante do material..... [A.mm⁻².s^{-1/2}];

34 Resistência de Terra

- θ_i é a temperatura inicial..... [°C];
- θ_f é a temperatura final..... [°C];
- β é a constante do material..... [°C].

São definidos valores máximos para θ_f , t_f e I_f , o que leva ao cálculo de A . É fornecida também a Tabela 4.2, onde podem ser consultadas as constantes para cada material.

Tabela 4.2 - Tabela com as constantes fornecidas pela Operadora da rede de distribuição de electricidade.

	Cobre	Alumínio	Aço
K (A mm-2s-1/2)	226	148	78
B (°C)	235	228	202

Como foi referido nesta Secção 4.2, as secções dos cabos já se encontram normalizadas, sendo essas de 25 mm² (mínimo) ou 35 mm², sejam eles cabos maciços ou multifilares, para eléctrodos horizontais e para condutores de ligação a eléctrodos verticais. A prática corrente na Operadora da rede de distribuição de electricidade é a utilização de cabos de cobre nu de 35 mm² multifilar para a execução do próprio eléctrodo e de cabo isolado VV de 35 mm² para a ligação do eléctrodo à instalação.

4.3 - Determinação da Resistência de Terra

A resistência de terra de um sistema de terras depende da configuração dos eléctrodos que o constituem. Nesta Secção 4.3 determinam-se as resistências de terra de diversas configurações de eléctrodos, considerando numa primeira fase o solo homogéneo. Começa-se por mostrar as configurações mais utilizadas pela Operadora da rede de distribuição de electricidade.

4.3.1 - Eléctrodo Vertical

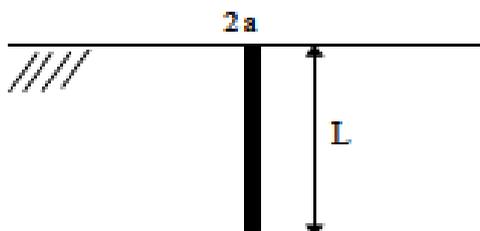


Figura 4.2 - Eléctrodo Vertical.

Normalmente os eléctrodos verticais são constituídos por [8]:

- ✓ Varetas de cobre com um diâmetro mínimo de 15 mm;

- ✓ Varetas de aço cobreado com um diâmetro mínimo de 15 mm e uma espessura de revestimento de cerca de 500 μm ;
 - ✓ Varetas de aço galvanizado com galvanização de pelo menos 120 μm .
- O seu comprimento L é normalmente de 2 metros.

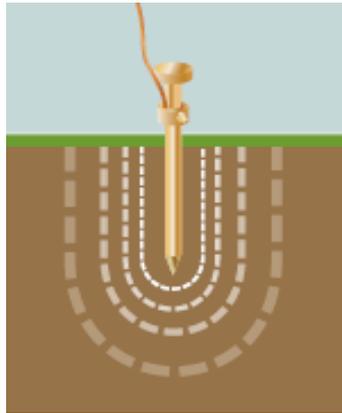


Figura 4.3 - Representação da zona de influência dos eléctrodos verticais.

A resistência de terra R [Ω] de um eléctrodo vertical de comprimento L [m] e raio a [m], pode ser obtida pela Equação Eq. 4.3 [14]:

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * L} \left(L n \frac{4 * L}{a} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Em que ρ é a resistividade do terreno..... [$\Omega \cdot \text{m}$].

Existe ainda a Equação Eq. 4.4 [15], em que r_0 é o raio do eléctrodo em metros e L o comprimento do eléctrodo também em metros, que fornece valores idênticos à Equação Eq. 4.3, gráfico da Figura A.4 em Anexo A.

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * L} \left(L n \frac{r_0 + L}{r_0} \right) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Observando as Equações Eq. 4.3 e Eq. 4.4, verifica-se que a variação do valor da resistência de terra do eléctrodo é mais dependente da variação do comprimento, do que da variação do diâmetro do eléctrodo, gráficos das Figuras A.5 e A.6 em Anexo A.

A resistência de terra de qualquer eléctrodo enterrado à superfície é sempre superior à resistência de terra do mesmo eléctrodo mas enterrado a uma maior profundidade, devido à distribuição da corrente para a zona superior dos eléctrodos não acontecer no caso de estarem enterrados à superfície. Pode-se ver na Figura 4.4, a distribuição de potencial V para um eléctrodo vertical enterrado à superfície (b) ou enterrado a uma profundidade h [m] (a):

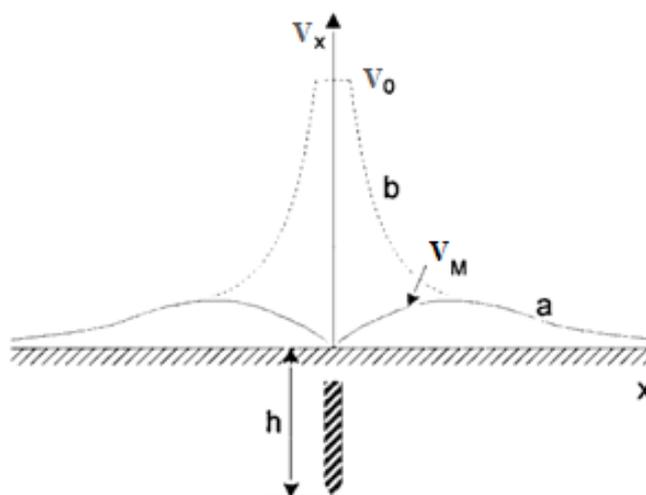


Figura 4.4 - Distribuição do Potencial em volta do eléctrodo com a cabeça enterrada (a) ou à superfície (b) [4].

i) Eléctrodo Vertical com Brocagem do Furo Artesiano

Quando a resistência de terra de um sistema de terras já instalado é demasiado elevada, a opção usada pela Operadora da rede de distribuição de electricidade é normalmente a da realização de um furo artesiano (10, 20 ou 30 metros de profundidade) para colocação de um eléctrodo vertical. Como para zonas mais profundas do terreno, encontram-se normalmente camadas com uma resistividade bastante inferior quando comparado com a camada à superfície, um eléctrodo colocado nesta zona irá ter um valor para a resistência de terra inferior que o inicialmente dado pelo sistema de terras já implementado. Para a montagem deste tipo de configuração, procede-se à abertura de um furo no solo de 6'' de diâmetro e 10 metros de profundidade, envolvendo o furo com um tubo de ferro galvanizado com 2 ½'', colocando-se de seguida o eléctrodo de terra dentro do tubo, preenchendo-se o espaço livre dentro do tubo com carvão vegetal para obtenção de uma melhor resistividade e consequentemente uma mais baixa resistência de terra. A ligação ao eléctrodo é feita através de cabo de cobre nu de 35 mm² desde o eléctrodo até a 0,8 metros da superfície, e por cabo isolado VV 35 mm² desde os 0,8 metros de profundidade até à instalação. Caso o valor medido da resistência de terra não seja satisfatório, furam-se mais 10 metros para nova medição e assim consecutivamente até um máximo de 30 metros de profundidade.

O eléctrodo vertical com brocagem do furo artesiano é uma solução cara, pelo que deve ser evitada a sua implementação.

4.3.2 - Eléctrodo Rectilíneo Enterrado Horizontalmente

A resistência de terra de um condutor rectilíneo R [Ω] de comprimento L [m] e diâmetro a [m], enterrado a pelo menos 1 metro da superfície de um solo de resistividade ρ [$\Omega \cdot m$] pode ser obtida pela Equação Eq. 4.5 [16]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi * L} * \ln\left(\frac{2 * L}{a}\right) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

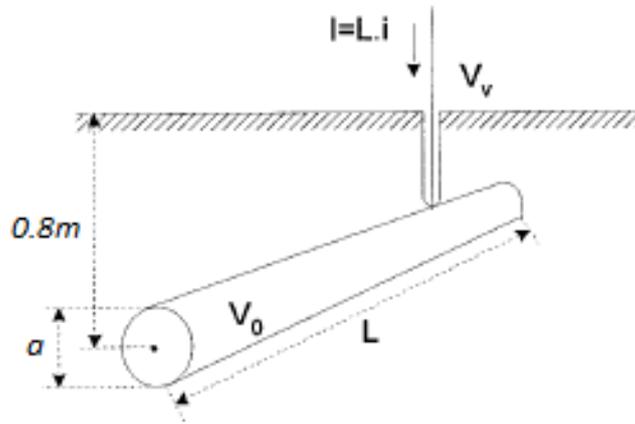


Figura 4.5 - Eléctrodo rectilíneo horizontal.

Segundo [16], o valor da resistência de terra aumenta para o dobro caso o eléctrodo esteja colocado à superfície.

O eléctrodo rectilíneo enterrado horizontalmente não é no entanto muito utilizado pela Operadora da rede de distribuição de electricidade, devido à necessidade de abertura de grandes valas, sendo normalmente mais utilizadas as disposições descritas nas seguintes Secções 4.4.2 i, 4.4.2 ii e 4.4.2 iii, no que aos eléctrodos horizontais diz respeito.

i) Serpentina Simples

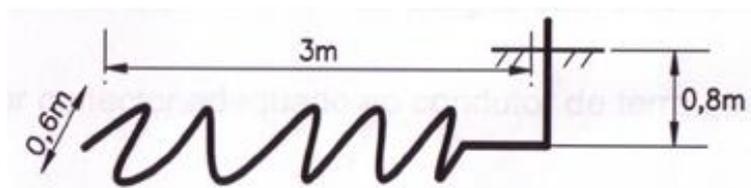


Figura 4.6 - Serpentina simples [13].

A Equação aproximada da resistência de terra R [Ω] para a disposição em serpentina [13], com $L = 10$ metros e confirmada experimentalmente no Capítulo 5, é a Equação Eq. 4.6:

$$R = 0,2 * \rho \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Em que ρ é a resistividade do terreno [$\Omega.m$]. A disposição em serpentina é conhecida pela economia de espaço, pois necessita apenas de uma vala de 3 metros de comprimento e 0,6 metros de largura, com profundidade mínima de 0,8 metros.

ii) Serpentina Dupla

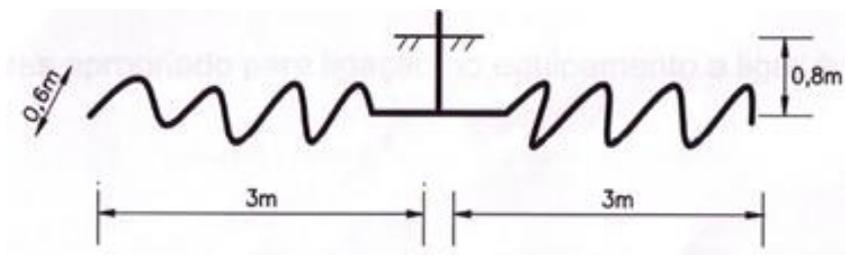


Figura 4.7 - Serpentina dupla [13].

Para uma serpentina dupla, que difere da anterior por ter o dobro do comprimento ($L = 20$ metros), a resistência de terra R [Ω] é obtida pela aplicação da Equação Eq. 4.7 [13]:

$$R = 0,15 * \rho \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Em que ρ é a resistividade do terreno..... [$\Omega.m$].

iii) Serpentina Dupla Longa

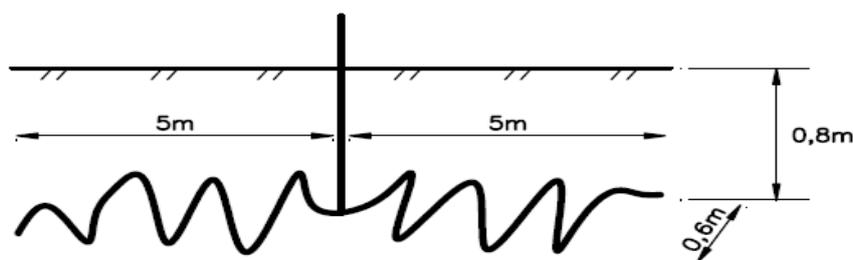


Figura 4.8 - Serpentina dupla longa [13].

No caso de uma serpentina dupla longa, o comprimento do eléctrodo é igual a 30 metros e a resistência de terra R [Ω], é obtida pela Equação Eq. 4.8 [13]:

$$R = 0,08 * \rho \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Em que ρ é a resistividade do terreno..... [$\Omega.m$].

4.3.3 - Eléctrodo de Braços Radiais

Existem várias disposições para eléctrodos de braços radiais. No entanto a mais utilizada pela Operadora da rede de distribuição de electricidade é a disposição Estrela com três braços. As resistências de terra para as respectivas disposições, onde ρ é a resistividade do terreno [$\Omega.m$], L o comprimento de um dos braços do eléctrodo [m], d o diâmetro do eléctrodo [m] e h a profundidade de enterramento [m] são as seguintes:

- Dois braços a 180° [4]:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{2 * L} \left(\log \left(\frac{4 * L}{d} \right) + \log \left(\frac{L}{h} \right) - 0,250 \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.9})$$

- Dois braços a 90° [4]:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{2 * L} \left(\log \left(\frac{4 * L}{d} \right) + \log \left(\frac{L}{h} \right) - 0,103 + 0,19 \frac{h}{L} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.10})$$

- Estrela com três braços [4]:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{2 * L} \left(\log \left(\frac{4 * L}{d} \right) + \log \left(\frac{L}{h} \right) + 0,465 - 0,18 \frac{h}{L} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.11})$$

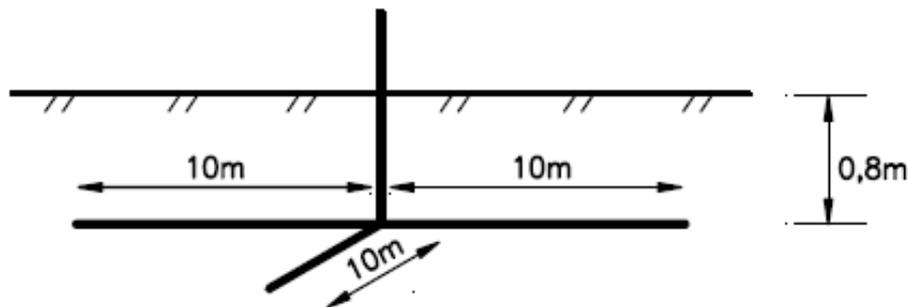


Figura 4.9 - Disposição Estrela com 3 braços a 120° [13].

Para a disposição Estrela com três braços representada na Figura 4.9, com L igual a 10 metros, existe ainda a Equação Eq. 4.12 [13] para o cálculo da resistência de terra. As Equações Eq. 4.11 e Eq. 4.12 fornecem aproximadamente o mesmo valor, gráfico da Figura A.8 em Anexo A:

$$R = 0,06 * \rho \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.12})$$

- Estrela com quatro braços [4]:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{2 * L} \left(\log \left(\frac{4 * L}{d} \right) + \log \left(\frac{L}{h} \right) + 1,265 - 0,93 \frac{h}{L} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.13})$$

- Estrela com seis braços [4]:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{2 * L} \left(\log \left(\frac{4 * L}{d} \right) + \log \left(\frac{L}{h} \right) + 2,98 - 1,36 \frac{h}{L} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Os eléctrodos tipo Estrela oferecem bons resultados ao nível do valor da resistência de terra R [Ω]. São abertas valas onde o condutor é estendido horizontalmente de forma rectilínea (cabo de cobre nu de 35 mm²), pelo que é necessária uma grande disponibilidade de área para a sua implementação. Através da observação do gráfico da Figura A.9 em Anexo

A, conclui-se que à medida que o número de braços aumenta a resistência de terra diminui, no entanto a sua diminuição é praticamente inconsequente a partir dos 3 braços.

Mostrar-se-á nas Secções 4.4.4, 4.4.5, 4.4.6, 4.4.7 e 4.4.8, outros tipos de configurações de eléctrodos menos utilizados pela Operadora da rede de distribuição de electricidade.

4.3.4 - Eléctrodo Hemisférico

O eléctrodo hemisférico é o eléctrodo de terra mais simples em termos de configuração [1, 7]. A corrente escoada I [A] flui para o solo com direcção radial, fazendo com que as superfícies equipotenciais geradas sejam semi-esferas concêntricas, tal como a Figura 4.10 indica:

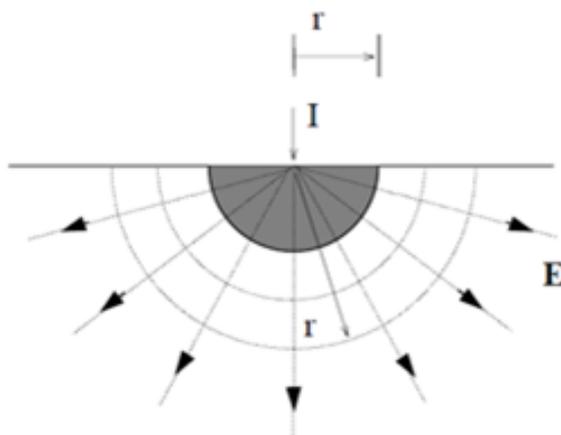


Figura 4.10 - Eléctrodo hemisférico enterrado em solo homogêneo [7].

Para determinar o valor da resistência de terra do eléctrodo hemisférico num solo homogêneo de resistividade ρ [$\Omega \cdot m$], é necessário partir-se da Equação Eq. 4.15 do campo eléctrico:

$$E = \rho * \frac{I}{A} \quad [\Omega \cdot A/m] \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Sabe-se que a área de meia esfera é igual a:

$$A = 2 * \pi * r^2 \quad [m^2] \quad (\text{Eq. 4.16})$$

A diferença de potencial entre dois pontos no solo distando $r = r_0$ e $r = r_1$, em relação ao centro do eléctrodo de raio r é igual a:

$$\int_{V_0}^{V_1} -dV = \int_{r_0}^{r_1} \frac{I\rho}{2*\pi*r^2} dr \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Resultando em:

$$V_0 - V_1 = \frac{I\rho}{2*\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Para se determinar o valor do potencial à distância r_0 do centro do eléctrodo, é necessário calcular a diferença de potencial entre V_0 e V_1 , considerando agora a distância r_1 infinita ($V_1 = 0$):

$$V_0 - 0 = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{\infty} \right) \Leftrightarrow V_0 = \frac{I \rho}{2 \cdot \pi \cdot r_0} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Generalizando, o potencial V [V] a uma distância do centro $r = r_0$ é:

$$V_{r_0} = \frac{I \rho}{2 \cdot \pi \cdot r_0} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Na Figura 4.11, encontra-se representada a variação de potencial em relação à distância ao centro do eléctrodo [4]:

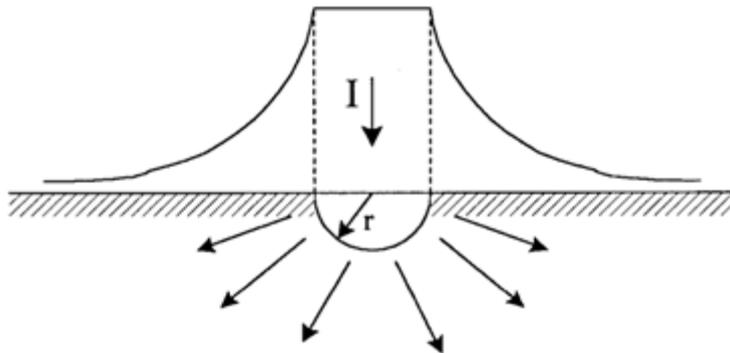


Figura 4.11 - Distribuição do potencial na superfície de um solo homogêneo para um eléctrodo hemisférico [4].

A resistência de terra para um eléctrodo hemisférico é obtida assim pela Equação Eq. 4.21:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.21})$$

Em que ρ é a resistividade do terreno [$\Omega \cdot m$] e r o raio do eléctrodo [m].

No entanto, o eléctrodo hemisférico é na prática pouco utilizado devido à sua forma maciça, levando a uma má utilização do cobre.

4.3.5 - Eléctrodo Esférico Enterrado com Ligação Isolada

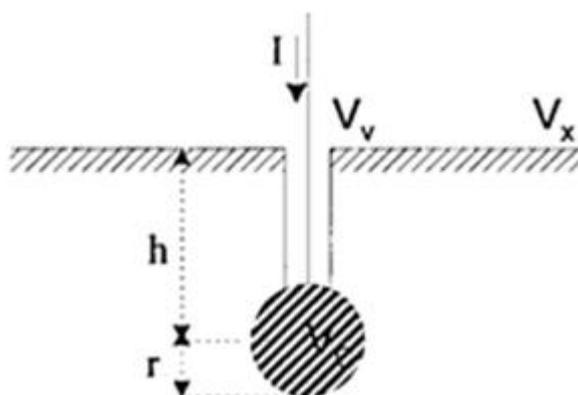


Figura 4.12 - Eléctrodo esférico enterrado num solo homogéneo [4].

Considerando o caso do eléctrodo ser esférico de raio r , enterrado a uma profundidade h num solo homogéneo e sabendo que $A = 4 * \pi * r^2$ [m²], a resistência de terra é dada pela Equação Eq. 4.22 [1, 4, 7]:

$$R = \frac{\rho}{4 * \pi * r} \left(1 + \frac{r}{2 * h} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.22})$$

Em que ρ é a resistividade do terreno [$\Omega \cdot m$], r o raio do eléctrodo [m], e h a profundidade de enterramento [m].

4.3.6 - Eléctrodo Chapa Circular

Uma chapa circular de cobre de raio r [m], com ligação isolada e enterrada num solo homogéneo de resistividade ρ [$\Omega \cdot m$] a uma profundidade h [m], tem uma resistência de terra dada pela Equação Eq. 4.23 [1, 4, 7]:

$$R = \frac{\rho}{8 * r} \left(1 + \frac{r}{(2,5 * h) + r} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.23})$$

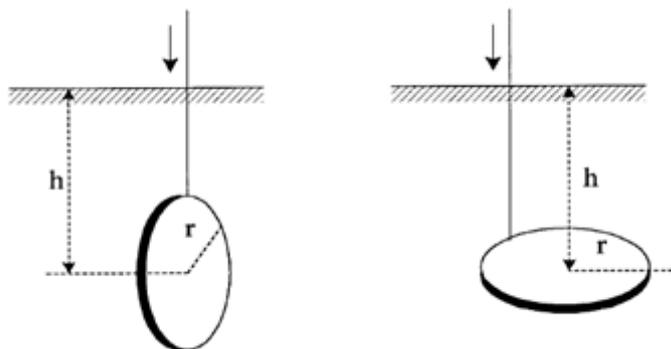


Figura 4.13 - Eléctrodo chapa circular num solo homogéneo [1].

4.3.7 - Eléctrodo Chapa Vertical

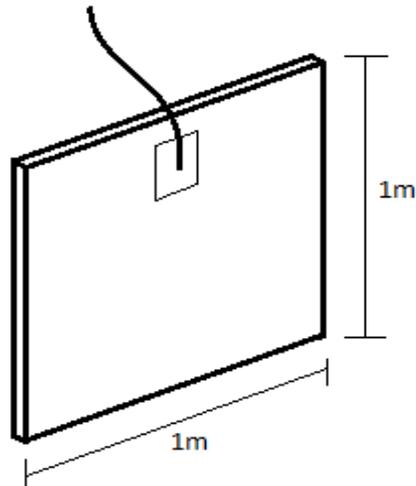


Figura 4.14 - Eléctrodo Chapa Vertical.

Neste tipo de eléctrodo, a superfície de contacto com o solo não deve ser inferior a 1 m² [8]. Utilizam-se normalmente chapas quadradas 1m*1m enterradas de forma a que o bordo superior fique a uma profundidade superior a 0,8 metros. A espessura das chapas não deve ser inferior a 2 mm se forem de cobre ou a 3 mm se forem de aço galvanizado. Para garantir um melhor contacto das duas faces com o solo, as chapas devem ser maciças (não perfuradas) e devem ser enterradas verticalmente. A resistência de terra de um eléctrodo deste tipo pode ser calculada pela Equação Eq. 4.24 [8]:

$$R = 0,8 * \frac{\rho}{P} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

Em que:

- R é a resistência de terra do eléctrodo..... [Ω];
- ρ é a resistividade do terreno..... [$\Omega.m$];
- P é o perímetro da chapa..... [m].

4.3.8 - Eléctrodo em Anel

A resistência de terra de um anel circular de raio r [m], constituído por um condutor de diâmetro d [m] e enterrado na horizontal a uma profundidade h [m] num solo homogéneo, é obtida a partir da Equação Eq. 4.25 [1, 4, 7]:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{2 * \pi * r} \left[\log \frac{16 * r}{d} + \log \frac{4 * r}{h} \right] \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.25})$$

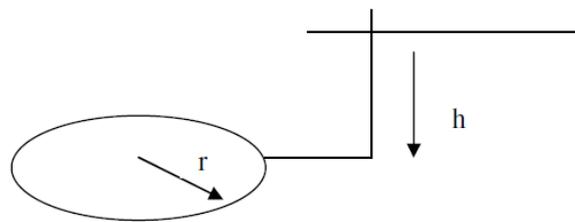


Figura 4.15 - Eléctrodo em anel [1].

4.3.9 - Influência de Solos Não Homogêneos na Determinação da Resistência de Terra

Nas equações da resistência de terra apresentadas na Secção 4.3, considerou-se que o solo era homogêneo. No entanto existem locais onde o solo não é homogêneo, pois são locais com solos compostos por camadas de diferentes resistividades que terão influência no valor da resistência de terra, o que pode levar a que os valores obtidos na prática para a resistência de terra sejam diferentes dos estimados pelas equações da Secção 4.3.

Na Figura 4.16 são mostradas as variações sofridas pelas linhas de escoamento da corrente e pelas linhas equipotenciais, em solos onde as relações entre as resistividades das diferentes camadas ρ_1 e ρ_2 variam.

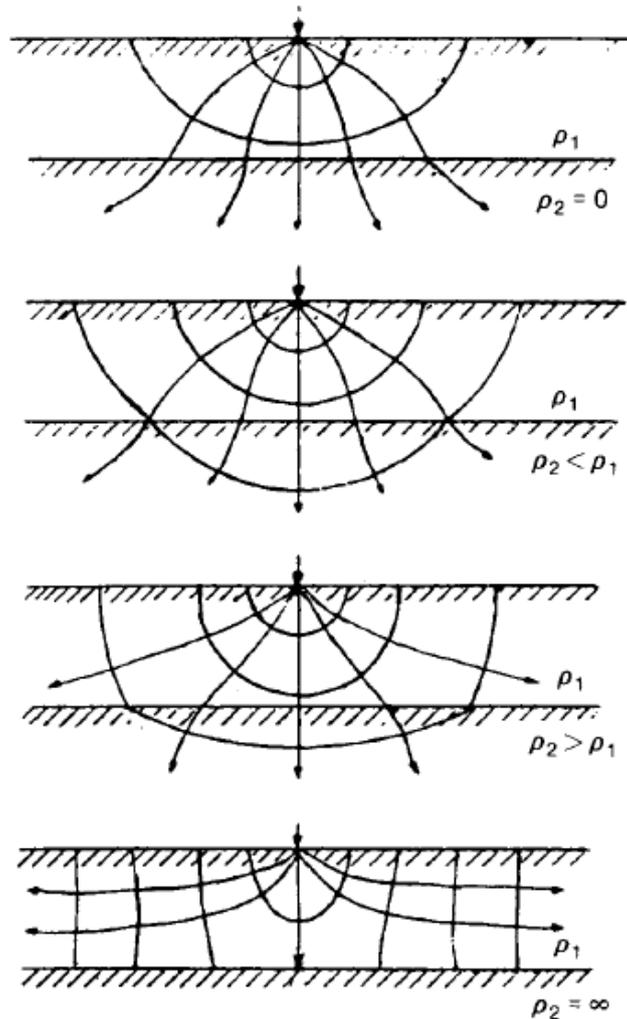


Figura 4.16 - Linhas equipotenciais e de escoamento da corrente em torno de um eléctrodo de terra, para diferentes valores da resistividade do subsolo [4].

- Subsolo mais condutor que a superfície ($\rho_2 < \rho_1$)

Se um eléctrodo de pequenas dimensões é colocado à superfície de um solo com estas características, as correntes nele injectadas escoam-se a maior profundidade devido à menor oposição feita à passagem da corrente pela camada do subsolo. Isto resulta numa diminuição da resistência e numa diminuição mais rápida do potencial em torno do eléctrodo;

- Subsolo com maior resistividade que a superfície ($\rho_2 > \rho_1$)

No caso de um eléctrodo colocado à superfície de um solo com estas características, as correntes escoam-se com muito mais dificuldade para o interior do solo, devido ao facto do subsolo ter agora maior resistividade. As correntes escoam-se assim ao longo da camada à superfície, até distâncias tanto maiores quanto maior for ρ_2 , resultando deste facto um

aumento da resistência de terra e uma diminuição menos rápida do potencial em torno do eléctrodo.

4.3.10 - Eléctrodos de Terra Paralelos

É imperativo alcançar-se um valor reduzido para a resistência de terra, verificando-se que o mesmo é muito difícil ou mesmo impossível de se alcançar com um único eléctrodo, devido à alta resistividade apresentada pelo solo. A solução para a obtenção de um valor da resistência de terra dentro dos limites impostos pelo regulamento, passa pela interligação de vários eléctrodos dispostos de diversas formas, de acordo com o projecto em questão.

Em [3, 4], a colocação de vários eléctrodos no solo em paralelo, a uma pequena distância uns dos outros ou em grande número numa determinada zona do solo, visando a diminuição da resistência de terra, provoca um aumento individual da resistência de um eléctrodo, devido ao acréscimo das dificuldades sentidas no escoamento das correntes parciais. Neste caso os eléctrodos centrais são aqueles que mais sentirão essas dificuldades e as correntes dirigir-se-ão mais para os eléctrodos da periferia. Os acoplamentos resistivos entre os eléctrodos são reduzidos, se os eléctrodos forem colocados em pequeno número no solo e a distâncias consideráveis uns dos outros em relação às suas dimensões. Constata-se ainda que praticamente nada se ganha na redução da resistência de terra, a partir de certa percentagem de eléctrodos colocados em paralelo no solo.

i - Dois Eléctrodos Hemisféricos Ligados por Cabo Isolado

Consideram-se dois eléctrodos hemisféricos de raio r_a [m] e r_b [m] em paralelo. Os eléctrodos estão separados por uma distância D [m], sendo escoada uma corrente I_a [A] pelo eléctrodo A e uma corrente I_b [A] pelo eléctrodo B, conforme se pode ver pela Figura 4.17:

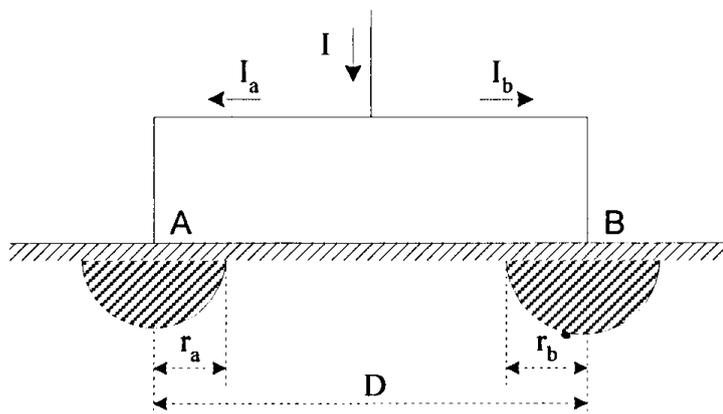


Figura 4.17 - Dois eléctrodos hemisféricos colocados em paralelo num solo homogéneo.

Uma vez que os eléctrodos são iguais, o respectivo potencial V [V] em cada eléctrodo pode ser representado pelas Equações Eq. 4.26 e Eq. 4.27:

$$V_A = \frac{\rho}{2*\pi} \left(\frac{I_a}{r_a} + \frac{I_b}{D} \right) \quad (\text{Eq. 4.26})$$

$$V_B = \frac{\rho}{2*\pi} \left(\frac{I_a}{D} + \frac{I_b}{r_b} \right) \quad (\text{Eq. 4.27})$$

Onde,

$$V_A = V_B = V_0 \quad (\text{Eq. 4.28})$$

E

$$I_a + I_b = I \quad (\text{Eq. 4.29})$$

Das Equações Eq. 4.26, Eq. 4.27, Eq. 4.28 e Eq. 4.29, onde ρ é a resistividade do solo [$\Omega \cdot m$], podem-se deduzir as correntes I_a e I_b , bem como a resistência global $R = \frac{V_0}{I}$ [Ω]. Neste caso como ($r_a = r_b = r$):

$$I_a = I_b = \frac{I}{2} \quad (\text{Eq. 4.30})$$

$$R = \frac{1}{2} * \frac{\rho}{2*\pi*r} \left(1 + \frac{r}{D} \right) \quad (\text{Eq. 4.31})$$

Pela Equação Eq. 4.31, percebe-se que quanto maior for a distância entre os eléctrodos, menor irá ser a respectiva resistência de terra global dos eléctrodos (relação $\frac{r}{D}$).

ii - Dois Eléctrodos Verticais Ligados por Cabo Isolado

Considera-se o caso de dois eléctrodos verticais (varetas), interligados através de cabo isolado VV 35 mm². Segundo [14], a resistência de terra R [Ω] é obtida pela Equação Eq. 4.32:

$$R = \frac{\rho}{4*\pi*L} \left(\text{Ln} \left(\frac{4*L}{a} \right) - 1 + \text{Ln} \left(\frac{2*L + \sqrt{s^2 + 4*L^2}}{s} \right) + \frac{s}{2*L} - \frac{\sqrt{s^2 + 4*L^2}}{2*L} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.32})$$

Onde:

- ρ é a resistividade do terreno..... [$\Omega \cdot m$];
- s é a distância entre os eléctrodos..... [m];
- L o comprimento dos eléctrodos..... [m];
- a o raio do eléctrodo..... [m].

Através da Equação Eq. 4.32, a resistência R [Ω] depende da distância s [m] entre os dois eléctrodos, pelo que é importante saber qual a distância entre eléctrodos que deve ser aplicada. Com a aplicação da Equação Eq. 4.32 para diversos valores de s , chega-se à conclusão que a distância entre dois eléctrodos deve ser no mínimo igual ao comprimento de um eléctrodo, gráfico da Figura A.7 em Anexo A.

O valor da resistência de terra de dois eléctrodos verticais em paralelo interligados por cabo isolado, é cerca de 60% do valor da resistência de apenas um desses eléctrodos, como se verifica pela Figura 4.25 e se comprova através da aplicação da Equação Eq. 4.3 e Equação Eq. 4.32 para um e dois eléctrodos verticais respectivamente. Existe portanto uma perda de

eficiência de cerca de 20% em cada eléctrodo, devido ao acoplamento resistivo entre eles e a uma maior dificuldade no escoamento das correntes.

iii - Dois Eléctrodos Verticais Ligados por Cabo de Cobre Nu de Secção 35mm^2

Neste caso o próprio cabo que faz a ligação entre as varetas funciona como um eléctrodo, podendo ser representado pelo cabo rectilíneo horizontal, ou seja, deixa-se de ter dois eléctrodos verticais em paralelo e passa-se a ter um único eléctrodo em forma de π , composto por duas varetas e um cabo rectilíneo horizontal. Apesar de a resistência individual das varetas e do cabo aumentar com esta disposição, devido à existência de acoplamento resistivo entre os eléctrodos, o que dificulta o escoamento da corrente pelos eléctrodos para a terra, o valor da resistência de terra da combinação das duas disposições é inferior, comparado com o caso de duas varetas em paralelo ligadas por cabo isolado, tal como se comprova na Secção 5.2.

iv - Eléctrodos de Terra em Paralelo em Solos Heterogéneos

Considera-se um solo estratificado em duas camadas horizontais, quando a camada à superfície tem resistividade ρ_1 e a camada do subsolo resistividade ρ_2 .

Caso de $\rho_2 < \rho_1$:

Sendo os eléctrodos colocados em paralelo na camada à superfície, observa-se que as interferências mútuas são pequenas. Isto acontece devido ao valor da resistividade no subsolo ser menor que na superfície, fazendo assim com que as correntes se escoem mais em profundidade do que lateralmente;

Caso de $\rho_2 > \rho_1$:

No caso da camada do subsolo ter uma resistividade superior à camada da superfície, as correntes tendem a fluir mais lateralmente, sentindo-se assim os seus efeitos a uma maior distância de cada eléctrodo considerado. Assim sendo, são necessários menos eléctrodos para saturar um determinado terreno, o que se deve à existência de acoplamentos resistivos que são traduzidos numa maior dificuldade no escoamento das correntes para o solo.

v - Influência da Proximidade dos Eléctrodos de Terra de Retorno da Corrente

Os eléctrodos de retorno da corrente são especialmente usados na medição das grandezas no local, como por exemplo na medição da resistência de terra de um sistema de terras e na medição da resistividade do solo. Contudo, existe um problema associado a estas medições, já que se o eléctrodo a medir e o eléctrodo de terra de retorno da corrente estiverem a uma curta distância, podem existir acoplamentos entre os eléctrodos e assim a probabilidade da ocorrência de leituras erradas é grande.

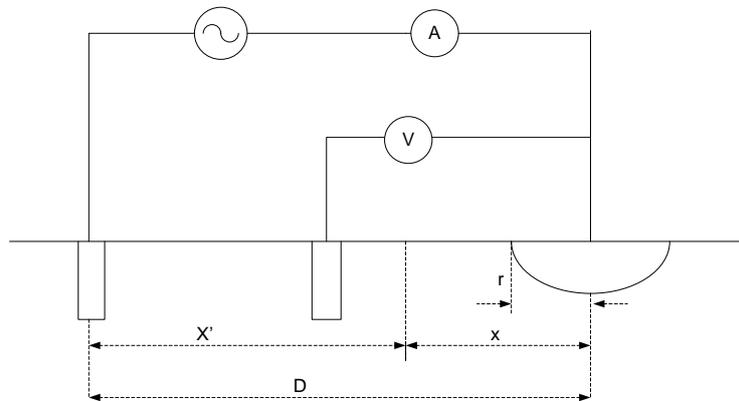


Figura 4.18 - Circuito genérico utilizado para medição da resistência de um Electrodo de Terra.

A Figura 4.18 representa a montagem utilizada para a realização da medição da resistência de terra num determinado solo. Considerando que neste caso essa medição é realizada num solo homogéneo e que o electrodo de terra a medir e o electrodo de retorno da corrente estão a uma distância D [m], então o potencial V [V] à distância x [m] do primeiro e x' [m] do segundo é dado por:

$$V = \frac{\rho * I}{2 * \pi * x} - \frac{\rho * I}{2 * \pi * x'} = \frac{\rho * I}{2 * \pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x'} \right) \quad [\text{V}] \quad (\text{Eq. 4.33})$$

Em que I [A] é a corrente injectada no electrodo a medir e no electrodo de retorno da corrente e ρ a resistividade do solo [$\Omega \cdot \text{m}$]. Note-se que se $x=x'$ o valor do potencial é nulo, sendo aqui à priori o lugar ideal para a colocação do electrodo auxiliar de potencial. Se o electrodo a medir for equivalente a um electrodo hemisférica de raio r , o potencial V_0 [V] representa-se pela Equação Eq. 4.34 (tomando-se para ponto de referência a superfície hemisférica):

$$V_0 = \frac{\rho * I}{2 * \pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D} \right) \quad [\text{V}] \quad (\text{Eq. 4.34})$$

(V_0) é o valor medido pelo voltímetro (v na Figura 4.18), admitindo que o electrodo auxiliar de potencial está colocado efectivamente num ponto cujo potencial é 0 V. O valor da resistência R' [Ω] (resistência medida) é assim:

$$R' = \frac{V_0}{I} = \frac{\rho}{2 * \pi * r} \left(1 - \frac{r}{D} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.35})$$

Em vez do valor teórico R [Ω] (considerando o electrodo de terra de retorno colocado no infinito):

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * r} \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4.36})$$

vi - Acoplamento Resistivo entre Electrodos de Terra Paralelos

O comportamento de vários electrodos colocados em paralelo no solo é idêntico àquele que caracteriza o paralelo das várias resistências, pelo que a resistência do conjunto dos

eléctrodos é regida de acordo com as regras das resistências colocadas em paralelo [1]. Devido a morfologia e à constituição do terreno, que tendem a limitar o espaço para a implementação do sistema de terras, ocorre um efeito de acoplamento resistivo entre os eléctrodos. Os eléctrodos ao serem colocados no solo próximos uns dos outros fazem com que a capacidade de dispersão da corrente no solo diminua. Realça-se ainda, que o acoplamento resistivo entre eléctrodos vizinhos pode ocorrer quando os eléctrodos estão ou não interligados.

- Eléctrodos Não Interligados

Quando os eléctrodos não estão interligados, a corrente escoada por cada eléctrodo está directamente relacionada com a corrente que é escoada pelo outro. Nesta situação, a corrente escoada por cada eléctrodo diminui de valor relativamente à que seria escoada se todos os eléctrodos estivessem a uma distância tal uns dos outros, que se pudessem considerar desprezáveis os efeitos mútuos. O mesmo é dizer que a resistência de cada eléctrodo aumenta, devido à existência de acoplamentos resistivos entre os eléctrodos. Assim, não é possível admitir uma resistência de terra separadamente de cada um dos eléctrodos, excepto se for possível admitir como desprezável a circulação de corrente entre os mesmos;

- Eléctrodos Interligados Em Paralelo

Neste caso, como os eléctrodos são interligados em paralelo, a tensão é idêntica em todos. Já as várias correntes poderão ou não ser iguais, dependendo das características locais (heterogeneidades do solo) ou geometria de cada um dos eléctrodos colocados em paralelo. No entanto, tal como no caso em que os eléctrodos não se encontram interligados, verifica-se que o valor individual da resistência de cada um dos eléctrodos de terra aumenta, devido à existência de acoplamentos resistivos entre os eléctrodos.

Conclui-se ainda que:

- Um subsolo mais condutor que as camadas superficiais tende a reduzir os acoplamentos resistivos entre os eléctrodos. Se for mais resistente tende a aumentá-los;
- Se um dos eléctrodos de terra é de grandes dimensões, é praticamente impossível obter valores reduzidos de acoplamentos resistivos entre os eléctrodos.

4.4 - Métodos de Medição da Resistência de Terra

4.4.1 - Princípio de Medição de um Sistema de Terras

A Figura 4.19 exemplifica a forma de se realizar a medição da resistência de terra de um sistema de terras A [1]:

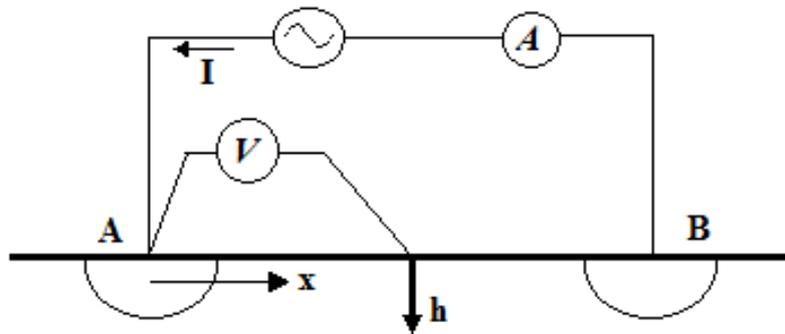


Figura 4.19 - Circuito utilizado para obtenção do perfil do potencial do solo [1].

Tal como se pode observar na Figura 4.19, a corrente injectada no solo é alternada de forma a tentar minimizar os efeitos galvânicos junto à superfície dos eléctrodos, os quais podem implicar medições erradas. Além disso, os eléctrodos de corrente A e B são colocados a uma distância tal, de forma a ser possível desprezar-se os possíveis efeitos de acoplamentos resistivos entre os eléctrodos. A injeção de corrente é feita nos eléctrodos A (onde se quer medir a resistência de terra) e B. A resistência de terra de A, é determinada pela razão dos valores medidos no voltímetro e no amperímetro. No entanto, existe a dúvida acerca do local de colocação do eléctrodo auxiliar de potencial h, pois pretende-se que o voltímetro indique unicamente o valor de potencial do sistema de terras A. É necessário encontrar-se um ponto de potencial 0, de forma a permitir que o eléctrodo h seja lá colocado e assim a leitura do voltímetro indique o real valor do potencial em A, para uma leitura correcta da resistência de terra. De maneira a encontrar-se esta zona no solo, o eléctrodo de potencial h vai-se deslocando ao longo do trajecto AB, permitindo assim medir-se o valor do potencial num ponto x entre A e B, relativamente a A. É assim possível traçar-se a curva dos potenciais medidos, de forma a obter-se o gráfico da Figura 4.20:

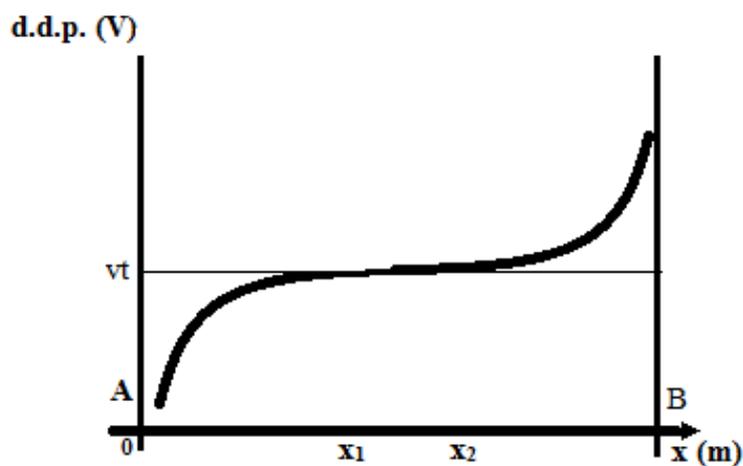


Figura 4.20 - Perfil do potencial na superfície do solo.

Entre o eléctrodo A e x_1 , os potenciais (em relação ao ponto A) vão crescendo embora de uma forma cada vez menor, uma vez que é nas fatias do solo mais próximas do eléctrodo A que a queda de tensão é superior, pois aí a área disponível para a corrente fluir é menor. A região entre x_1 e x_2 é denominada como patamar de potencial nulo, uma vez que aí a queda de tensão é desprezável (a diferença de potencial entre as extremidade é inferior a 2% da queda de tensão entre A e x_1), dado que a área de condução é muito ampla e consequentemente a densidade de corrente muito pequena. A partir de x_2 o potencial volta a crescer, agora de uma forma cada vez maior, pois aproxima-se cada vez mais do eléctrodo auxiliar de corrente B.

Na Figura 4.21, mostra-se a variação do perfil do potencial na superfície do solo, em função da redução da distância entre eléctrodos de corrente A e B.

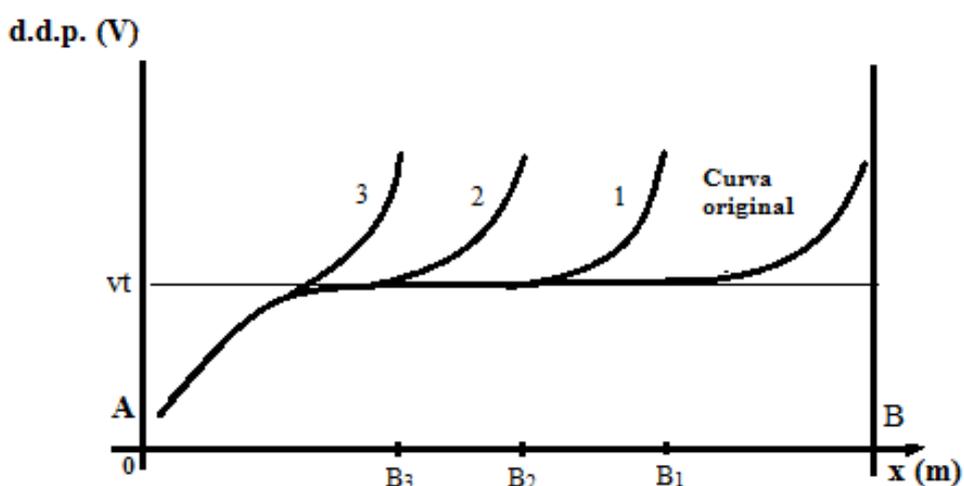


Figura 4.21 - Variação do perfil do potencial em função da distância entre eléctrodos de corrente [1].

Observe-se através da Figura 4.21, que a diminuição da distância entre eléctrodos de corrente A e B provoca a diminuição sucessiva do patamar. Este facto é descrito pelas diversas curvas representadas na Figura 4.21, sendo especialmente notado na curva 3 em que o eléctrodo auxiliar de corrente B (representado por B3) se encontra muito perto de A. Neste caso o patamar deixa mesmo de existir, devido à interferência entre os dois eléctrodos resultante dos acoplamentos resistivos mútuos.

Posto isto, conclui-se que é importante colocar o eléctrodo auxiliar de corrente a uma distância considerável, de forma a poder-se criar um patamar de potencial nulo. Uma distância considerada aceitável, é colocar-se o eléctrodo auxiliar de corrente a 30 ou 40 metros do sistema de terras a medir, colocando-se de seguida o eléctrodo de potencial na zona de patamar de potencial nulo, de forma a que o valor obtido pela resistência de terra seja o correcto [17].

4.4.2 - Método da Queda de Potencial

O método da queda de potencial é um método de medição em linha. Para se proceder à medição da resistência de terra através deste método, é necessário desligar-se o eléctrodo de

terra a medir ou o sistema de terras da instalação. Para aplicação do método da queda de potencial, realiza-se a seguinte montagem como ilustra a Figura 4.22:

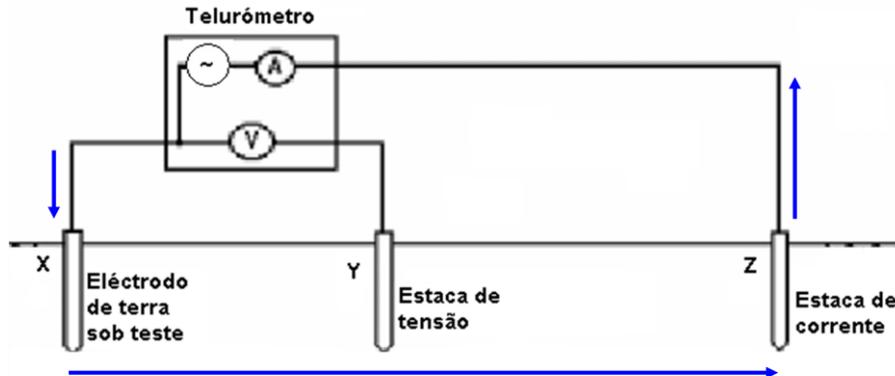


Figura 4.22 - Circuito utilizado para medição da resistência de terra através do método da queda de potencial.

O telurómetro da Figura 4.22 requer três ligações para a realização da medição da resistência de terra. Este aparelho de medição injecta uma corrente alternada no solo através do eléctrodo de terra sob teste (X) e o eléctrodo auxiliar (ou estaca) de corrente (Z). De seguida mede a queda de tensão entre o eléctrodo de terra (X) e a estaca de tensão ou eléctrodo de potencial (Y). Por último e mediante a lei de Ohm, calcula a resistência entre X e Y. Para realização do ensaio da Figura 4.22, a estaca de corrente (Z) é colocada a 30 metros do eléctrodo de terra sob teste (X) [17]. Posteriormente, mantendo-se a estaca de corrente (Z) fixa, desloca-se a estaca de tensão (Y) pela linha entre X e Z para verificar se há variação da resistência no trajecto.

i - Regra dos 62%

Ao aplicar-se o método da queda de potencial, tem de se ter em atenção se o eléctrodo de tensão Y (Figura 4.22) se encontra dentro da zona de patamar nulo. Normalmente esta zona encontra-se distanciada do eléctrodo X, a cerca de 62% (Figura 4.23) da distância entre os eléctrodos X e Z (Figura 4.22) [17].

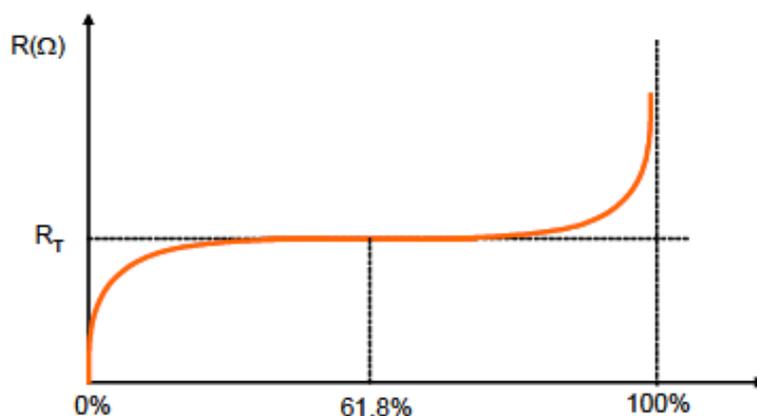


Figura 4.23 - Variação do potencial pelo método da queda de potencial [5].

Aplicando-se a regra dos 62%, coloca-se o eléctrodo de tensão Y (Figura 4.22) a 18,6 metros (62% de 30 metros) de distância do eléctrodo X (Figura 4.22), efectuando-se assim a medição da resistência de terra desse mesmo eléctrodo. Deverão ser feitas três leituras para a medição da resistência, uma com o eléctrodo de tensão Y a 18,6 metros (62%) de distância do eléctrodo X, outra a 19,2 metros (62% + 2%) e outra a 18 metros (62% - 2%). Se os valores obtidos para as três leituras forem diferentes, significa dizer que na zona em que se encontra colocado o eléctrodo de tensão Y o potencial não será nulo. Existe assim a necessidade de se afastar mais o eléctrodo de corrente Z (Figura 4.22) e repetir os ensaios até os valores das três medições serem praticamente iguais.

4.4.3 - Método Selectivo

O método selectivo é uma variante do método da queda de tensão para a medição da resistência de terra. O esquema utilizado para a medição da resistência de terra pode ser visualizado na Figura 4.24:

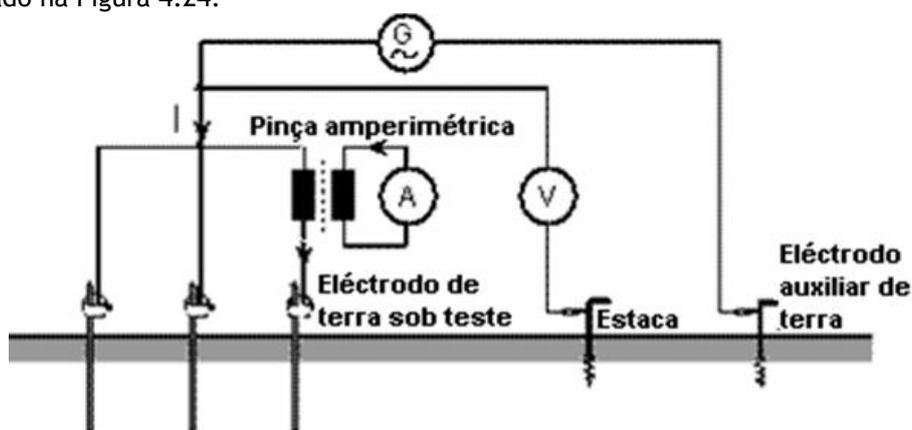


Figura 4.24 - Esquema de medição da resistência de terra pelo método selectivo.

O método selectivo utiliza um transformador de corrente (pinça amperimétrica) para medir a corrente de ensaio no eléctrodo de terra sob teste, sem a necessidade de o desligar da instalação, contrariamente ao método da queda de potencial.

4.4.4 - Método de Medição sem Eléctrodos Auxiliares

O método de medição sem eléctrodos auxiliares é um método mais prático e cómodo, pois permite medir a resistência de terra da instalação, sem a necessidade de desligar o sistema de terras e sem utilizar nenhum eléctrodo auxiliar de medição.

Para a realização da medição da resistência de terra, utiliza-se uma pinça de tensão que gera uma tensão no condutor de terra com uma determinada frequência de ensaio e utiliza-se ainda, uma pinça amperimétrica para medir a corrente resultante. A forma como se efectua esta medição encontra-se explícita na Figura A.2 em Anexo A.

Para além dos métodos descritos nas Secções 4.4.2, 4.4.3 e 4.4.4, existem ainda outros métodos para a medição da resistência de terra. No entanto esses métodos não vão ser tratados nesta dissertação, devido à sua difícil implementação e principalmente à pouca fiabilidade dos resultados. Dentro destes métodos alternativos encontram-se o método do triângulo (método de Kolrausch) e o método directo (dois terminais).

4.5 - Considerações sobre os Métodos de Medição da Resistência de Terra e da Resistividade do Solo

Ressalta dos métodos já apresentados nas Secções 4.4 e 3.4 para a medição quer da resistência de terra de um sistema de terras, quer da resistividade do solo, uma diferença ao nível das respectivas implementações práticas. Essa diferença pode ser traduzida ao nível do diferente número de terminais usados em cada um dos casos, bem como das diferentes formas de se efectuar a sua medição.

Para se efectuar a medição da resistência de terra de um determinado sistema de terras, podem-se aplicar métodos que utilizem eléctrodos auxiliares para a sua medição, como métodos que usam pinças amperimétricas e de tensão. Na medição da resistência de terra é apenas necessária a existência de três terminais, o terminal constituído pelo próprio sistema onde é injectada a corrente e onde se pretende medir a resistência de terra, o terminal constituído por um eléctrodo auxiliar de corrente colocado num ponto distante, por onde o circuito da corrente se fecha e finalmente um eléctrodo auxiliar de tensão colocado sobre o patamar de potencial nulo, que tem como função a medição da d.d.p. entre esse ponto e o sistema de terras sob teste. O valor da resistência de terra é obtido através da relação entre a tensão e a corrente medida.

Na medição da resistividade do solo é necessário evitar a detecção da queda de tensão nos eléctrodos de corrente, sendo por isso indispensável o uso de quatro terminais, dois para

a injeção de corrente e dois para a medição da queda de tensão no solo. É assim possível detectar apenas a corrente e a queda de tensão no solo, uma vez que se os eléctrodos de corrente forem colocados nas extremidades e medir-se a d.d.p. entre os dois eléctrodos internos, o valor medido está livre do efeito dos eléctrodos de corrente, já que a queda de tensão nos eléctrodos de potencial é desprezável em relação à queda de tensão nos eléctrodos de corrente [1].

4.6 - Técnicas de Melhoria da Resistência de Terra

Na escolha do tipo de eléctrodo de terra para uma determinada instalação deve-se ter em atenção a resistividade do terreno, bem como a resistência mecânica, eléctrica e corrosiva do eléctrodo. A resistência de terra do eléctrodo para além de depender da sua forma, dimensão e disposição, depende fundamentalmente do valor da resistividade do solo. Muitas vezes é necessário melhorar (baixar) a resistividade do solo no local onde o sistema de terras irá ser instalado, pois observa-se que a resistividade é de tal maneira elevada que nenhuma disposição de eléctrodos irá satisfazer o limite máximo de 20Ω para a resistência de terra. Existem assim técnicas que actuam na variação da resistividade do solo nas proximidades do eléctrodo de forma a baixar o seu valor, assim como técnicas que actuam na forma e disposição dos eléctrodos. Vejam-se algumas técnicas para obtenção de um baixo valor da resistência de terra:

- Aumento do número de eléctrodos verticais [15] - A resistência de terra pode ser substancialmente diminuída com a aplicação de mais do que um eléctrodo vertical, devendo-se garantir no entanto que os eléctrodos estejam suficientemente afastados, de forma a serem minimizados os efeitos de resistência mútua. A Figura 4.25 apresenta a variação da resistência de terra à medida que aumenta o número de eléctrodos verticais colocados em paralelo. Verifica-se que após um certo número de eléctrodos colocados em paralelo, a resistência de terra diminui muito pouco;

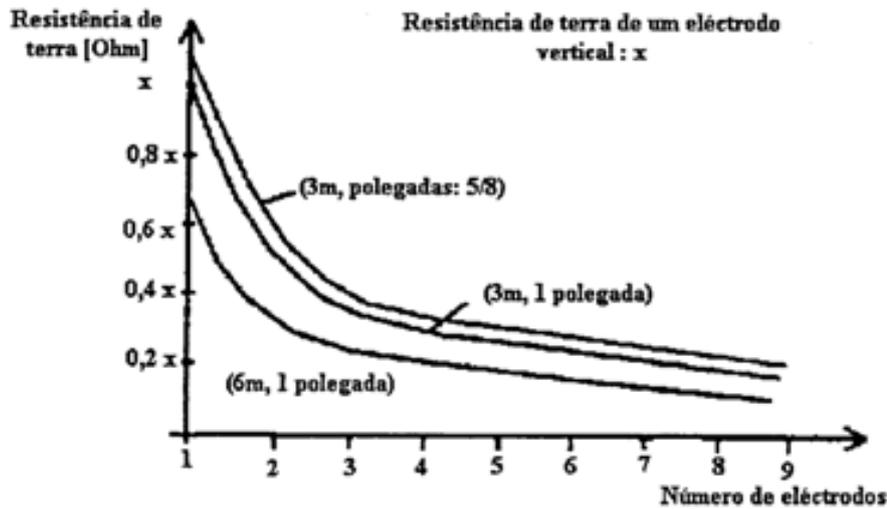


Figura 4.25 - Resistência de terra em função do número de electrodos verticais colocados em paralelo e em função do comprimento (em metros) e do diâmetro (em polegadas: $l_{pol}=0,0254m$) dos electrodos [1].

- Aumento do comprimento e do diâmetro dos electrodos - Através da Figura 4.25, conclui-se que a resistência de terra diminui significativamente com o aumento do comprimento dos electrodos [18] (gráfico da Figura A.5 em Anexo A) e não tanto com o aumento do seu diâmetro (gráfico da Figura A.6 em Anexo A). O mesmo se deve ao facto de a área de contacto entre o electrodo e a terra aumentar. Uma das formas de aumentar o comprimento do electrodo no caso dos electrodos verticais é a utilização de vários electrodos. O processo consiste em introduzir no terreno uma vareta em cima da outra, previamente unidas, até se conseguir atingir uma profundidade e um comprimento do electrodo que forneça a resistência de terra desejável. O sistema de execução consiste em utilizar varetas como as que se apresentam na Figura 4.26, colocando na sua parte dianteira uma ponta de penetração de um material de grande dureza e na sua parte final um batente sobre o qual actuará um martelo ou qualquer outro dispositivo de penetração, evitando assim a deformação da vareta [8]. Uma vez introduzida uma vareta, desenrosca-se o batente e coloca-se uma nova vareta, colocando-se no extremo livre desta uma união e assim sucessivamente;

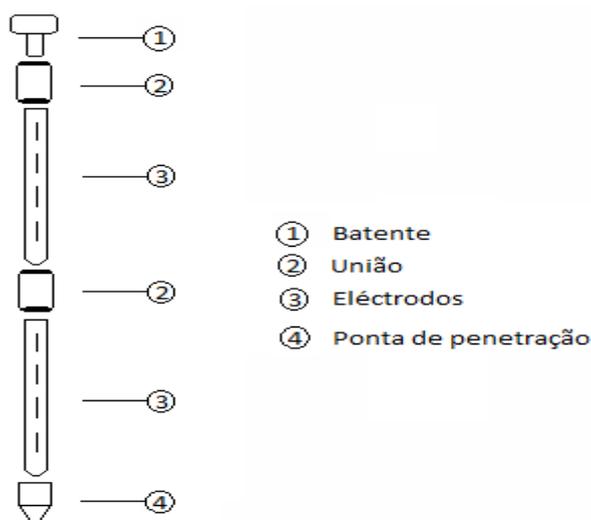


Figura 4.26 - Sistema de colocação de vários electrodos verticais em profundidade.

- Maior profundidade de colocação dos electrodos - Este processo é particularmente eficiente para o caso de electrodos verticais colocados em solos, onde se verifique que a resistividade nas camadas inferiores do solo é menor, conseguindo-se deste modo um menor valor da resistência de terra. A Figura 4.27 mostra a variação da resistência de terra à medida que a profundidade de enterramento do electrodo aumenta;

Resistência de terra (Ohm)

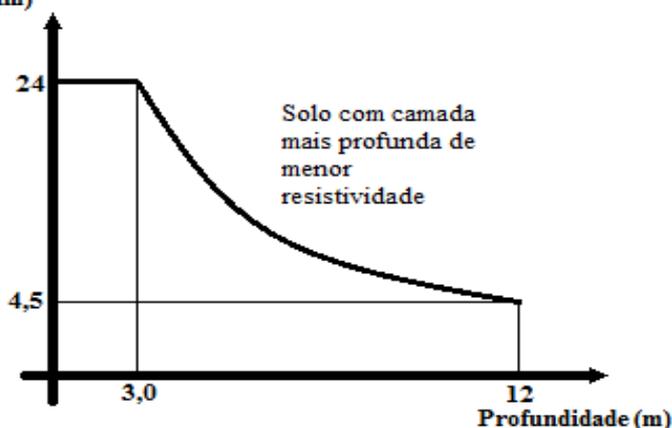


Figura 4.27 - Resistência de terra de um electrodo vertical em função da profundidade de colocação do mesmo, para um solo com uma camada inferior de menor resistividade.

- Tratamento químico do solo - Adicionando-se água salgada [19] ou unicamente sal [20, 3], consegue-se diminuir significativamente a resistividade do solo e com isso a resistência de terra (Figura 4.28). No entanto, deve-se ter o cuidado por um lado, de evitar que os sais estejam em contacto directo com o electrodo, de forma a evitar a corrosão do mesmo e por outro, manter-se uma vigilância à variação do valor da resistência, pois com o passar do tempo esse valor tem

tendência a aumentar devido à dispersão do sal no solo. A utilização de cloreto de sódio, magnésio ou sulfato de cobre para aumentar a condutividade do solo envolvente ao eléctrodo, é uma técnica que diminui a resistência de terra dos eléctrodos. Contudo, nem sempre é possível de ser aplicada devido ao elevado índice poluente destes materiais [3];

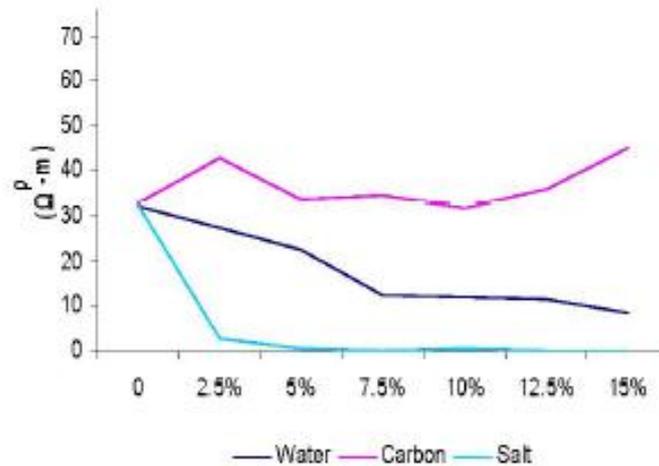


Figura 4.28 - Variação da resistividade do solo em função da percentagem de água, carvão e sal [20].

- Tratamento físico do solo - Consiste em envolver o eléctrodo em material condutor de baixa resistividade, nomeadamente em bentonite. Em [18, 3], adicionando água à bentonite forma-se um material de baixa resistividade, cerca de $2,5 \Omega.m$. Envolver-se o eléctrodo de terra em bentonite melhora-se a superfície de contacto com o eléctrodo, logo diminui-se a resistência de terra do eléctrodo. Para além disto, a bentonite ainda protege os eléctrodos contra a corrosão. No entanto a bentonite necessita de água para manter as suas características, pelo que não deve ser aplicada em locais muito secos, pois provocaria um aumento da resistência de terra.

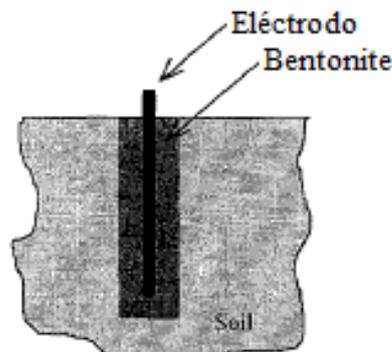


Figura 4.29 - Exemplo da técnica de envolver o eléctrodo em Bentonite para baixar a sua resistência de terra [18].

4.7 - Resumo

Neste capítulo abordaram-se temas tais como a secção utilizada pelos condutores nos sistemas de terras. Apresentaram-se os tipos de eléctrodos de terra e as suas equações para a determinação da resistência de terra em solos homogéneos. Analisou-se ainda a influência de solos heterogéneos na determinação da resistência de terra assim como os acoplamentos resistivos entre os eléctrodos. Mostraram-se também os métodos existentes para a medição da resistência de terra e os cuidados a ter durante a sua medição. Para finalizar, apresentaram-se técnicas de melhoria da resistência de terra.

Capítulo 5

Eléctrodos de Terra: Implementações Práticas

No capítulo 5 demonstrar-se-á o tipo de interligação entre eléctrodos de terra verticais paralelos, cabo isolado ou cabo nu, através da fundamentação matemática para as duas configurações e ainda através de demonstração prática. Fazer-se-á também referência à implementação de uma terra de serviço e melhoramento da terra de protecção de um Posto de Transformação. Realizar-se-á ainda experiências sobre diferentes disposições de eléctrodos, retirando-se as respectivas medições e conclusões, salientando-se alguns dados relevantes. Por fim fazer-se-á uma análise crítica às soluções normalizadas actualmente em vigor na Operadora da rede de distribuição de electricidade, assim como a elaboração de um procedimento padrão no projecto de um sistema de terras.

5.1- Sistema de Terras Combinando Eléctrodos Verticais com o Cabo Rectilíneo

Para o sistema da Figura 5.1, que combina os eléctrodos verticais com o cabo rectilíneo horizontal, o valor da resistência de terra é inferior à resistência de cada componente (apenas 4 eléctrodos interligados por cabo isolado ou apenas cabo rectilíneo horizontal). No entanto, a resistência de terra é ainda assim superior ao paralelo das duas componentes, devido à resistência mútua entre os eléctrodos.

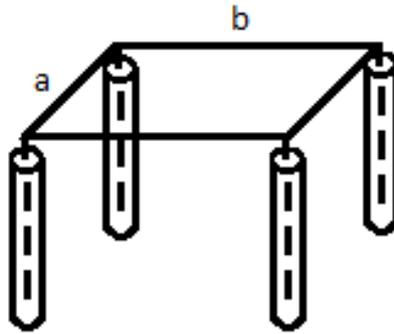


Figura 5.1 - 4 Eléctrodos verticais interligados por cabo nu.

A resistência total da combinação da Figura 5.1 é dada pela Equação Eq. 5.1 [4]:

$$R_t = \frac{R_1 * R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - (2 * R_{12})} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Em que:

R_1 é a resistência do cabo rectilíneo horizontal..... [Ω];

R_2 é a resistência dos eléctrodos verticais..... [Ω];

R_{12} é a resistência mútua entre as duas componentes..... [Ω].

Pela Equação Eq. 5.1 retira-se o tipo de interligação entre eléctrodos verticais, cabo isolado ou cabo nu. Através da Equação Eq. 5.1 verifica-se se o valor da resistência de terra dos eléctrodos verticais interligados por cabo isolado (R_2) é inferior ou superior, ao valor da resistência de terra dos eléctrodos verticais interligados por cabo de cobre nu de 35 mm2 (R_t).

R_1 , R_2 e R_{12} são variáveis obtidas pelas Equações Eq. 5.2, Eq. 5.3 e Eq. 5.4 respectivamente:

$$R_1 = \left(\frac{\rho}{\pi * l_1}\right) * \left(\ln\left(\frac{2 * l_1}{h}\right) + K_1 \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}}\right) - K_2\right) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$R_2 = \left(\frac{\rho}{2 * n * \pi * l_2}\right) * \left(\ln\left(\frac{8 * l_2}{d_2}\right) - 1 + (2 * K_1) \left(\frac{l_2}{\sqrt{A}}\right) (\sqrt{n} - 1)^2\right) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$$R_{12} = \left(\frac{\rho}{\pi * l_1}\right) * \left(\ln\left(\frac{2 * l_1}{l_2}\right) + K_1 \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}}\right) - K_2 + 1\right) \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Onde:

ρ é o valor da resistividade do solo..... [$\Omega.m$];

l_1 é o comprimento total do cabo rectilíneo..... [m];

l_2 é o comprimento do eléctrodo vertical..... [m];

h é a profundidade a que o cabo rectilíneo está enterrado..... [m];

h' igual a $\sqrt{d_1 * h}$ para o cabo enterrado a h , ou $0,5 * d_1$ para cabo à superfície.....

[m];

A é a área que a malha ocupa, igual a, $a * b$ (Figura 5.1)..... [m²];

n é o número de eléctrodos verticais colocados na área A ;

- K_1, K_2 constantes dadas pelas Figuras A.10 e A.11 em Anexo A;
- d_1 é o diâmetro do cabo rectilíneo..... [m];
- d_2 é o diâmetro dos eléctrodos verticais..... [m];
- a é a largura da malha..... [m];
- b o comprimento da malha..... [m].

Os valores das resistências de terra para diferentes valores das variáveis podem ser vistos na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Valores de resistência de terra para a malha de terra.

ρ	l_1	l_2	d_1	d_2	h	h'	$a=b$	A	n	K_1	K_2	R_1	R_2	R_{12}	R_t
500	12	2	0,015	0,015	0	0,01	3	9	4	1,37	5,65	104,8	77,6	44,0	65,6
500	12	2	0,015	0,015	1	0,12	3	9	4	1,15	4,78	67,6	74,7	43,8	57,3
500	8	2	0,015	0,015	1	0,12	2	4	4	1,15	4,78	93,4	82,3	57,7	72,2

Através da Tabela 5.1, a resistência total do conjunto eléctrodo vertical e cabo rectilíneo R_t formando a malha de terra, é sempre inferior à resistência individual de cada componente (R_1 ou R_2). Com o aumento da profundidade de enterramento da malha, a diminuição da resistência de terra é mais acentuada para o cabo rectilíneo, visto que o mesmo escoas as correntes predominantemente de forma vertical e quando se encontra à superfície, apenas consegue escoar as correntes para a sua zona inferior. Já o eléctrodo vertical escoas a corrente para as suas zonas laterais, pelo que a diferença é praticamente insignificante com o aumento da profundidade. Veja-se a Figura 5.2:

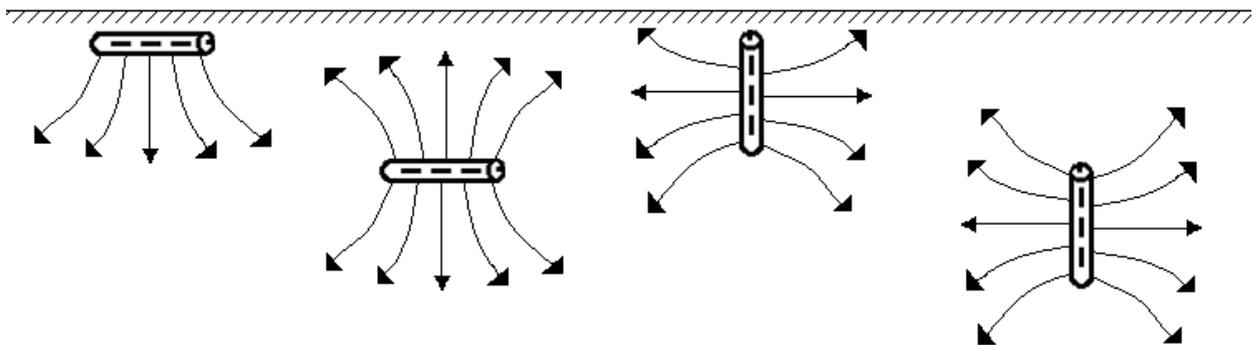


Figura 5.2 - Distribuição da corrente no solo para diferentes profundidades e diferentes disposições.

A resistência de terra (R_2) refere-se apenas à resistência de terra dos eléctrodos verticais, sem influência do cabo rectilíneo horizontal, isto é o mesmo que dizer que R_2 é a resistência de terra dos eléctrodos verticais interligados por cabo isolado. Já R_t é a resistência de terra dos eléctrodos verticais interligados por cabo nu. Comparando o valor de R_2 com o de R_t , verifica-se que o valor obtido por R_t é sempre menor que o de R_2 . Conclui-se assim que

implementando-se um sistema de terras com eléctrodos verticais paralelos, os mesmos devem ser interligados por cabo de cobre nu de 35 mm² e não por cabo isolado.

5.2 - Comparação entre a Interligação de duas Varetas com Cabo Isolado ou Cabo Nu

O estudo do tipo de interligação entre eléctrodos de terra tipo vareta é indispensável, pois os resultados para o valor da resistência de terra nas duas situações diferem consideravelmente, pelo que é importante conhecer qual o tipo de interligação, cabo isolado ou cabo de cobre nu que fornece os melhores resultados

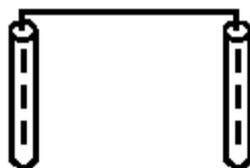


Figura 5.3 - 2 Eléctrodos Verticais paralelos.

Nesta Secção 5.2 ilustra-se uma comparação entre a interligação de dois eléctrodos de terra tipo vareta com cabo isolado ou cabo nu. Consideram-se assim duas varetas de 2 metros de comprimentos, separadas por 3 metros de distância e uma resistividade do terreno ρ de 500 Ω .m.

O valor da resistência de terra para o caso em que a interligação é feita através de cabo isolado, pode ser obtido pela aplicação da Equação Eq. 4.32. No caso de a interligação ser feita através de cabo de cobre nu, a equação a aplicar é a Equação Eq. 5.1. As Figuras A.10 e A.11 em Anexo A fornecem as constantes K_1 e K_2 , constantes que dependem da área ocupada pela malha e da profundidade de enterramento da malha necessárias para aplicação da Equação Eq. 5.1. As constantes K_1 e K_2 apenas são válidas para o caso da Secção 5.1, em que o cabo horizontal forma um quadrado ou noutro caso, um rectângulo. Visto que no caso de duas varetas paralelas isso não acontece, é necessário encontrar valores válidos para as constantes K_1 e K_2 .

O valor da resistência de terra de duas varetas interligadas por cabo isolado, para uma resistividade de 500 Ω .m é demonstrado através da Equação Eq. 4.32, valor de $R = 143 \Omega$. Este mesmo valor é obtido pela Equação Eq. 5.3, sabendo que $R_2 = R$. Uma vez que R_2 depende da constante K_1 , o valor de K_1 terá que ser tal de forma a que o valor de R_2 seja igual a 143 Ω . Assim, o valor tomado por K_1 terá de ser igual a 0,38. Para a aplicação da Equação Eq. 5.1, tem de se conhecer também o valor de R_1 e R_{12} (Equação Eq. 5.2 e Equação Eq. 5.4). O valor de R_1 depende não só de K_1 como de K_2 . O valor de K_1 já é sabido falta encontrar o de K_2 . O valor de R_1 representa a resistência de terra do cabo rectilíneo horizontal e este mesmo valor pode ser obtido pela Equação Eq. 4.5, obtendo-se o valor de 154 Ω para um valor de resistividade ρ de 500 Ω .m. Sendo assim, altera-se o valor de K_2

mantendo $K_1 = 0,38$, de forma a que o valor de R_1 seja igual a 154Ω . Isto consegue-se com $K_2 = 6,35$.

Os resultados para as situações em que duas varetas são interligadas através de cabo isolado ou cabo nu, podem ser vistos na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Dados para o cálculo da resistência de terra de dois eléctrodos verticais.

ρ	l_1	l_2	d_1	d_2	h	h'	A	n	K_1	K_2	R_1	R_2	R_{12}	R_t
500	3	2	0,015	0,015	1	0,12	0,045	2	0,38	6,35	154,68	143,27	59,56	104,09

Pela Tabela 5.2, verifica-se que para uma resistividade ρ de $500 \Omega.m$, o valor da resistência de terra R_t para a situação em que as duas varetas são interligadas através de cabo de cobre nu é igual a $104,09 \Omega$, valor bem inferior ao caso em que as duas varetas são interligadas através de cabo isolado, R_2 . As constantes da Tabela 5.2 encontram-se descritas na Secção 5.1.

Confirma-se assim que a ligação entre eléctrodos verticais paralelos deve ser feita através de cabo de cobre nu de 35 mm^2 .

5.2.1 - Comparação Prática de duas Varetas Interligadas por Cabo Isolado ou por Cabo Nu

Depois de efectuado o estudo teórico sobre qual o tipo de ligação entre eléctrodos verticais na Secção 5.2, mais concretamente entre dois eléctrodos de terra tipo vareta, efectuou-se a respectiva experiência no terreno, verificando se os valores teóricos se confirmavam na prática.

Começou-se assim por se efectuar a medição da resistividade do solo no local onde se iria efectuar a experiência, utilizando o método de Wenner demonstrado na Secção 3.4.2 i, Figura B.1 em Anexo B. Os resultados alcançados podem ser vistos na Tabela 5.3, em que a é a distância entre estacas de medida em metros.

Tabela 5.3 - Medição da resistividade do terreno.

a [m]	R [Ω]	ρ [$\Omega.m$]
1,5	99,9	941
2,5	29,5	463
3,5	20,4	449

Pela Tabela 5.3, a resistividade do solo neste local diminui de $941 \Omega.m$ para $463 \Omega.m$, aumentando a profundidade de medição de 1,5 para 2,5 metros. Tendo em conta estes valores e uma vez que os eléctrodos iriam ser colocados a 1 metro de profundidade ficando enterrados até 2,5 metros, considera-se a resistividade média deste local de $450 \Omega.m$. Num

caso real em que se fosse implementar um sistema de terras neste terreno, os eléctrodos de terra deveriam ser colocados a uma profundidade mínima de 1,5 metros, pois a resistividade é significativamente menor nas camadas inferiores do terreno. Medida a resistividade do terreno, efectuou-se a medição para os diferentes casos, utilizando eléctrodos verticais de 1,5 metros de comprimento e 0,015 metros de diâmetro e cabos de 35 mm² de secção, obtendo-se os resultados da Tabela 5.4:

Tabela 5.4 - Valores da resistência de terra, para os diferentes casos.

Tipo	R [Ω]	
	Valor teórico	Valor prático
1 vareta	271 (Eq. 4.3)	265
2 varetas interligadas por cabo isolado	160 (Eq. 4.32)	154
2 varetas interligadas por cabo nu	121 (Eq. 5.1)	124

Pela Tabela 5.4, constata-se que os valores práticos são praticamente iguais aos teóricos.

Depois de efectuada esta experiência confirma-se assim na prática a conclusão tirada na Secção 5.2, ou seja, a ligação entre eléctrodos verticais deve ser feita através de cabo de cobre nu de 35 mm². Ver Figura B.2 em Anexo B.

5.2.2 - Comportamento de dois Eléctrodos Verticais Ligados por Cabo de Cobre Nu com a Adição de Sal

Depois de efectuada a medição do valor da resistência de terra de duas varetas interligadas por cabo de cobre nu, obtendo-se o valor de 124 Ω , adicionou-se 2 Kg de sal ao cabo de cobre nu, verificando-se as alterações no valor medido da resistência de terra. Apenas o cabo horizontal foi envolvido em sal, fechando-se parcialmente de seguida a vala, obtendo-se um novo valor da resistência de terra de 109 Ω . Repare-se que com a adição de sal apenas ao cabo de cobre nu, com o sal com uma área de ocupação quase insignificante comparado com a área envolvente aos eléctrodos, obteve-se uma diminuição de 15 Ω (12%) no valor da resistência de terra do conjunto duas varetas interligadas por cabo de cobre nu. Comprova-se assim que a adição de sal à área envolvente aos eléctrodos de terra, reduz significativamente o valor da resistividade do solo e consequentemente o valor da resistência de terra dos eléctrodos.

No entanto, com a adição de sal deve-se proceder à protecção dos eléctrodos, pois o sal é um material corrosivo provocando uma deterioração dos eléctrodos ao longo do tempo. Esta protecção pode ser feita tal como se mostra na Secção 4.6, envolvendo os eléctrodos de terra em bentonite [3].

5.3 - Terra de Serviço de um Posto de Transformação

Para a implementação da terra de serviço de um posto de transformação seguiram-se os seguintes passos:

1. Medição da resistividade do terreno;
2. Implementação da Terra de serviço;
3. Experiências de medições para diversas disposições, durante a implementação.

Detalham-se assim de seguida, todos os passos para a implementação da terra de serviço no PT, mostrando-se desde logo algumas conclusões tiradas durante a implementação.

i) Medição da Resistividade do Terreno

Para a medição da resistividade do terreno começa-se por escolher o local onde a terra de serviço irá ser implementada, sabendo que a mesma deve obrigatoriamente distar 20 metros da terra de protecção. Para se efectuar esta medição utiliza-se o aparelho (telurómetro) da Figura A.1 em Anexo A, em que é possível escolher um entre dois métodos: método de Wenner e método de Schlumberger. O método de Wenner deve ser o escolhido pois é de implementação mais simples, tal como demonstrado na Secção 3.4.2 i. Para a aplicação deste método utilizam-se 4 eléctrodos verticais, iguais e igualmente espaçados e em todos os ensaios os eléctrodos são enterrados à mesma profundidade, efectuando-se assim várias medidas para diferentes distâncias entre eléctrodos. Nota ainda para o facto de o aparelho utilizado aplicar a Equação Eq. 3.4 em $[\Omega.m]$ para o cálculo da resistividade:

Tabela 5.5 - Medição da resistividade do terreno.

Ensaio	a [m]	R [Ω]	ρ [$\Omega.m$]
1	1,5	78,9	743,6
2	2,5	46,7	733,5
3	3,5	32,6	716,9
4	5,0	21,4	672,3

Na Tabela 5.5 constata-se que a resistividade diminui ligeiramente à medida que a distância entre eléctrodos aumenta, o que significa que para camadas do terreno mais profundas a resistividade diminui. É ainda possível considerar que este terreno até uma profundidade de +/- 5 metros, tem uma resistividade média de 716,6 $\Omega.m$

ii) Implementação da Terra de Serviço

Depois de efectuada a medição da resistividade do terreno no local onde se iria implementar a Terra de serviço, partiu-se para a execução da mesma, Figura B.3 e B.4 em Anexo B. Nesta Sub-secção 5.3 ii não houve a possibilidade de se estudarem todas as alternativas sobre qual a disposição de eléctrodos de terra a implementar, de forma a

respeitar o valor final da resistência de terra de 20Ω , uma vez que a Operadora da rede de distribuição de electricidade já tinha definido a colocação de 6 eléctrodos verticais.

Pela aplicação da equação de uma vareta simples, Equação Eq. 4.3, tem-se que $R = 340 \Omega$ e através da Figura 4.25 constata-se que a resistência de terra para 6 varetas é aproximadamente igual a 27% do valor da vareta única, ou seja $R = 92 \Omega$, valor que ultrapassa largamente o limite de 20Ω . Restava assim comprovar se na prática os valores teóricos se confirmavam. A disposição final na execução da Terra de serviço foi a de 8 eléctrodos verticais interligados por cabo de cobre nu de 35 mm^2 e ainda, ligado a este mesmo cabo uma serpentina simples. A escolha deste tipo de disposição é explicada na Secção 5.3 iii).

iii) Experiências de Medições para Diversas Disposições Durante a Implementação

Uma vez no terreno, a primeira experiência que se efectuou foi, depois de aberta a vala com 1 metro de profundidade, aplicar 5 eléctrodos verticais banhados a cobre, de 2 metros de comprimento, de raio 0,75 centímetros e espaçados 3 metros entre eles, interligando-os com cabo isolado VV 35 mm^2 e posteriormente com cabo de cobre nu de 35 mm^2 , comparando as diferenças das duas aplicações. O valor da resistência de terra foi medido com o mesmo aparelho utilizado na medição da resistividade do terreno, aparelho este que aplica o método da queda de potencial, método descrito na Secção 4.4.2. Aplicou-se assim a regra dos 62%, em que se tinha o eléctrodo de corrente colocado a 30 metros e o eléctrodo de tensão a 18,6 metros (62%) dos eléctrodos de terra a medir (efectuaram-se as mesmas medições mas para a distância de 40 metros entre os eléctrodos de terra a medir e o eléctrodo de corrente, verificando-se que os valores não sofriam alterações). Posteriormente realizaram-se mais duas medições para + e - 2%, assumindo-se como valor final o valor médio das 3 medições, tendo em atenção que as 3 medições forneciam valores aproximadamente iguais. Os resultados, respeitando as regras descritas atrás, podem ser vistos na Tabela 5.6:

Tabela 5.6 - Resistência de terra de 5 eléctrodos verticais.

Interligação entre os 5 eléctrodos	R [Ω]
Cabo isolado	182
Cabo nu	113

Como se pode ver na Tabela 5.6, interligando os eléctrodos com cabo nu obtém-se um valor para a resistência de terra muito inferior ao caso em que os eléctrodos são interligados através de cabo isolado, tal como foi demonstrado nas Secções 5.1 e 5.2.

Posto isto, decidiu-se interligar os eléctrodos verticais com cabo de cobre nu de 35 mm^2 e obtiveram-se os seguintes valores da resistência de terra de acordo com o número de eléctrodos verticais, Tabela 5.7:

Tabela 5.7 - Resistência de terra para diferentes números de eléctrodos verticais.

Número de eléctrodos	R [Ω]
4	140

5	113
6	83
7	67
8	50

Tal como se previa, foi necessário aplicar mais eléctrodos verticais, pois o valor da resistência de terra para 6 eléctrodos era de 83Ω , valor próximo do valor teórico de 92Ω . Colocando-se 8 eléctrodos verticais, o valor da resistência de terra continuava a ser bastante elevado. A solução encontrada foi a de colocar uma serpentina simples interligada juntamente com os 8 eléctrodos. Procedeu-se assim à sua implementação, obtendo-se os valores da Tabela 5.8 para a serpentina simples e para a interligação final:

Tabela 5.8 - Resistência de terra para diferentes eléctrodos de terra.

Tipo de aplicação	R [Ω]
Serpentina	142
Serpentina + 8 eléctrodos verticais	39

Pela Tabela 5.7 e 5.8 conclui-se que o valor da resistência de terra para uma serpentina simples é aproximadamente igual ao valor de 4 eléctrodos verticais interligados por cabo de cobre nu de 35 mm^2 . O valor prático da serpentina, 142Ω , é aproximadamente igual ao valor teórico desta mesma disposição obtido pela Equação Eq. 4.6, 143Ω .

Tem-se assim um valor final da resistência de terra para a terra de serviço de 39Ω . Este valor apesar de ultrapassar o limite de 20Ω é considerado aceitável, uma vez que o mesmo irá ser melhorado pela rede de baixa tensão, pois nas redes aéreas o neutro é ligado à terra de 300 em 300 metros e na rede subterrânea em todos os armários e em todas as colunas, o neutro é igualmente ligado à terra através de um eléctrodo vertical, o que provoca um melhoramento da resistência de terra da terra de serviço. Para além disto deve-se tomar atenção para o facto de que este valor foi medido com a vala aberta, o que implica um valor superior ao real.

Ao longo de uma semana efectuaram-se mais algumas medições. Compara-se na Tabela 5.9, os valores obtidos para as diferentes medições:

- Antes de a vala ser fechada;
- Depois de a vala ser fechada;
- Passado uma semana de chuva.

Tabela 5.9 - Resistência de terra para diferentes medições.

Tipo	R [Ω]
a)	39

b)	24
c)	17,9

Na Tabela 5.9 verifica-se que o valor da resistência de terra diminui consideravelmente depois de a vala ser fechada. Isto deve-se ao facto de o cabo rectilíneo escoar as correntes de defeito predominantemente de forma vertical e quando a vala se encontra aberta, o cabo apenas consegue escoar as correntes para a sua zona inferior, Figura 5.2. Depois de a vala ser fechada, o cabo já consegue escoar as correntes para a sua zona superior o que provoca uma diminuição no valor da resistência de terra. Deixando-se passar alguns dias, a terra fica mais compacta diminuindo a sua resistividade e consequentemente a resistência de terra dos eléctrodos. Pela Tabela 5.9 comprova-se também que um mesmo terreno encontrando-se húmido tem uma melhor (menor) resistividade comparativamente ao caso de estar seco, diminuindo a resistência de terra da ligação.

Depois de efectuada a leitura da resistência de terra para o caso c), conclui-se que o valor diminuiu para valores inferiores ao limite de 20Ω , cumprindo assim o regulamento aplicado ao sistema de terras de um posto de transformação.

5.4 - Terra de Protecção do Posto de Transformação

A terra de protecção do posto de transformação já se encontrava concluída contrariamente à terra de serviço. A disposição que tinha sido adoptada foi a de 8 eléctrodos verticais interligados por cabo de cobre nu de 35 mm^2 . Porém, ao ser medido o valor da resistência de terra da terra de protecção deparou-se com o facto de que este valor ultrapassava o limite de 20Ω imposto pelo regulamento, sendo o mesmo de 25Ω . Teve-se então de se proceder ao seu melhoramento com a agravante de o valor monetário a pagar pela Operadora da rede de distribuição de electricidade já ter atingido o seu limite. Era assim necessário melhorar a resistência de terra da terra de protecção mas sem gastar dinheiro. A solução encontrada foi a de utilizar material condutor dos armazéns da Operadora da rede de distribuição de electricidade. Utilizaram-se então 3 postes metálicos de iluminação pública que se encontravam danificados, logo sem possibilidade de utilização para o efeito da iluminação e ainda uma chapa de cobre de dimensões $0,7 \text{ m}^2$.

Uma vez no terreno voltou-se a medir o valor da resistência de terra antes da abertura da vala, obtendo-se um valor de $24,5 \Omega$. Abriu-se assim uma vala ao lado da terra de protecção, na direcção contrária à terra de serviço para não violar os 20 metros de distância, onde se colocaram os postes metálicos juntamente com a chapa de cobre, interligados com os 8 eléctrodos através de um cabo de cobre nu de 35 mm^2 . Depois de fechada a vala realizou-se nova medição para o valor da resistência de terra.

Tabela 5.10 - Resistência de terra antes e depois do melhoramento.

Aplicação	R [Ω]
Antes do melhoramento	24,5
Depois do melhoramento	18,9

Pela Tabela 5.10, o valor da resistência de terra baixou para valores dentro do limite imposto de 20Ω . Contudo é possível verificar que a diminuição apesar de neste caso ter sido satisfatória, foi pouco relevante, baixando cerca de 6Ω .

Conclui-se assim que a solução de implementar um sistema de terras sem se efectuar previamente um estudo rigoroso da resistividade do terreno pode levar a resultados inesperados, uma vez que depois das terras implementadas o valor da resistência pode não ser satisfatório, provocando um aumento no custo da implementação.

5.5 - Comparação do Valor da Resistência de Terra para Diferentes Eléctrodos

De seguida mostrar-se-á os valores da resistência de terra para diferentes eléctrodos, através de várias experiências realizadas no terreno. Os eléctrodos em causa são uma chapa de cobre de $0,7\text{m}^2$, uma e duas varetas verticais em paralelo de 1,5 metros de comprimento. Os eléctrodos em teste foram ligados através de um cabo de cobre nu de 35mm^2 de 10 metros de comprimento. O cabo foi estendido ao longo da vala, tendo-se ligado numa extremidade do cabo o aparelho de medição e na outra extremidade o eléctrodo em teste. Começou-se por medir a resistência de terra da chapa de cobre, estando esta colocada dentro da vala a 1 metro de profundidade. Posteriormente retirou-se a chapa de cobre e no sítio da mesma colocou-se um eléctrodo vertical de 1,5 metros de comprimento, medindo-se a respectiva resistência de terra. Por fim, colocou-se a três metros deste eléctrodo outro eléctrodo vertical interligando-os com o mesmo cabo nu, retirando-se o valor da resistência de terra do conjunto. Os resultados alcançados podem ser vistos na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resistência de terra para diferentes eléctrodos.

Aplicação	R [Ω]
Cabo + Chapa de cobre $0,7 \text{m}^2$	135
Cabo + Eléctrodo vertical	167
Cabo + 2 Eléctrodos verticais	158

A Tabela 5.11 mostra que uma chapa de cobre enterrada horizontalmente oferece melhores valores em relação a duas varetas enterradas verticalmente. Isto deve-se ao facto de uma chapa de cobre ter uma área de contacto com a terra muito superior ao eléctrodo vertical, escoando melhor as correntes de defeito. Nota ainda para o facto de que todas estas medições foram realizadas com a vala aberta, ou seja, o valor da aplicação Cabo + Chapa de cobre $0,7 \text{m}^2$ seria ainda inferior caso a vala tivesse fechada, pois a chapa de cobre tal como o

cabo, encontrava-se enterrada horizontalmente, logo escoam as correntes de defeito predominantemente de forma vertical, comparativamente ao caso dos eléctrodos verticais, que como se encontram na vertical escoam as correntes de forma lateral, logo o facto de a vala se encontrar fechada ou não, não irá ter tanta influência no valor da resistência de terra dos eléctrodos verticais. Esta explicação pode ser melhor interpretada com o auxílio da Figura 5.2.

5.6 - Soluções Normalizadas pela Operadora da Rede de Distribuição

A Operadora da rede de distribuição de electricidade aplica determinadas normas para a implementação de um sistema de terras [12, 13]. Pode-se descrever algumas destas normas como linhas de orientação no que à instalação destes sistemas diz respeito. Nesta Secção 5.6 será feita uma análise crítica a essas normas, de maneira a encarar-se o desafio do projecto de um sistema de terras de uma forma mais preparada, para um incremento na percentagem de sucesso na implementação destes mesmos sistemas.

5.6.1 - Limite do Valor da Resistência de Terra imposto pela DGEG

Uma das imposições da Direcção-Geral de Energia e Geologia é o valor da resistência de terra, limitado a um valor máximo de 20Ω . Apesar de este valor servir como referência aquando da implementação de um sistema de terras, o mesmo não deve ser visto como o valor ideal a alcançar. Sabe-se que para um correcto funcionamento do sistema eléctrico de energia e para uma protecção do ser humano, animais e bens mais eficaz, o valor da resistência de terra deve ser o mais baixo possível, sendo o ideal a obtenção de um valor de 0Ω . Deve ser este valor a servir de referência no projecto de um sistema de terras, garantindo-se assim um bom sistema de terras, para além de uma margem de erro superior no momento da aplicação prática do mesmo.

5.6.2 - Eléctrodos de Terra: Normalização

O comprimento dos eléctrodos verticais tem uma grande influência no valor da resistência de terra, pelo que o mesmo deve ser previamente estudado, podendo mesmo utilizar-se varetas sobrepostas (uma em cima da outra), Figura 4.26. Já o diâmetro dos eléctrodos verticais tem pouca influência no valor da resistência de terra, pelo que se utiliza o diâmetro padrão deste tipo de eléctrodos (14,2/15 mm).

Num sistema de terras em que se utilizem eléctrodos de terra verticais paralelos, o número de eléctrodos não deve ir além das 4 unidades, uma vez que a partir da aplicação de 4 eléctrodos o valor da resistência de terra não diminui de forma significativa, Figura 4.25. Para além disto, a distância entre os eléctrodos deve ser no mínimo igual ao comprimento dos eléctrodos. A Operadora da rede de distribuição de electricidade afirma que a interligação

entre eléctrodos de terra paralelos deve ser feita através de cabo isolado VV de 35 mm² [13]. No entanto, ao longo do trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação comprova-se que a interligação entre eléctrodos de terra paralelos deve ser feita através de cabo de cobre nu de 35 mm², obtendo-se neste caso melhores resultados no valor da resistência de terra.

Quanto aos eléctrodos de terra horizontais estudados nas Secções 4.3.2 e 4.3.3, deve-se dar preferência ao cabo rectilíneo horizontal pois esta disposição fornece valores mais baixos para a resistência de terra que as serpentinas. Só em caso de falta de espaço no local, se deve proceder à implementação de serpentinas, tendo em atenção que o valor limite da resistência de terra é respeitado. A utilização de eléctrodos em estrela proporciona melhores resultados da resistência de terra comparado com o cabo rectilíneo, mas no primeiro caso são necessários pelo menos 30 metros de cabo e caso haja espaço no local para colocar o cabo rectilíneo horizontal ao longo de 30 metros de vala, a situação já se inverte, ou seja, com os mesmos metros de cabo, o cabo rectilíneo horizontal é o que fornece uma mais baixa resistência de terra. Para qualquer tipo de disposição horizontal, os eléctrodos devem ser constituídos por cabo de cobre nu de 35 mm² de secção.

5.6.3 - Profundidade de Enterramento dos Eléctrodos de Terra

Neste item, a Operadora da rede de distribuição de electricidade afirma que a profundidade de enterramento deve estar compreendida entre 0,5 e 1 metro no caso de eléctrodos horizontais e a uma profundidade não inferior a 0,8 metros no caso de eléctrodos verticais [13].

No caso dos eléctrodos horizontais e uma vez que os mesmos escoam as correntes de defeito de forma predominantemente vertical, Figura 5.2, não se deve limitar o espaço superior a estes no que ao escoamento das correntes diz respeito, pelo que os mesmos devem estar enterrados a uma distância mínima de 1 metro de profundidade.

No caso dos eléctrodos verticais e uma vez que os mesmos escoam as correntes de defeito de forma lateral, a profundidade mínima de 0,8 metros é aceitável. Este valor mínimo de 0,8 metros tem como objectivo limitar o potencial à superfície, de forma a obter-se uma tensão de passo tolerável ao ser humano durante o fluxo da corrente pelos eléctrodos.

Os valores mínimos para a profundidade de enterramento não devem no entanto ser entendidos como regra no projecto de um sistema de terras. Deve ser efectuado um estudo prévio sobre a resistividade do terreno para camadas inferiores, retirando-se daí a profundidade de enterramento ideal para a obtenção de um valor da resistência de terra dentro dos limites.

5.6.4 - Tratamento Físico e Químico do Solo

Para solos de elevada resistividade torna-se necessário aplicar um tratamento físico e/ou químico do mesmo, de forma a que a resistividade diminua para valores dentro dos limites possíveis de se proceder à instalação dos eléctrodos de terra.

Um dos tratamentos consiste em transferir camadas de terra de solos de menor resistividade para o local onde se irá instalar o sistema de terras. Uma vez extraída a terra do local da instalação dos eléctrodos, coloca-se neste mesmo local a terra de menor resistividade, instalando-se de seguida os eléctrodos de terra completamente envolvidos nesta nova terra, fechando-se posteriormente a vala igualmente com a mesma terra de menor resistividade.

Outro dos tratamentos possíveis consiste em envolver os eléctrodos de terra em material condutor de baixa resistividade, nomeadamente em Bentonite ($2,5 \Omega.m$ de resistividade), Figura 4.29. Nota no entanto para o facto de a Bentonite não dever ser aplicada em terrenos muito secos, pois provoca um aumento da resistividade do mesmo. Uma vez colocado este material em terrenos não muito secos, encontrando-se desta forma os eléctrodos de terra também protegidos contra a corrosão e sendo possível aplicar-se o seguinte tratamento ao solo envolvente aos eléctrodos de terra, deverá adicionar-se uma certa quantidade de sal, até se obter um valor da resistência de terra dentro dos limites. A diminuição da resistividade do terreno em função da percentagem de sal adicionado, pode ser vista nas Figuras 5.4, 4.28 e na Tabela 3.3.

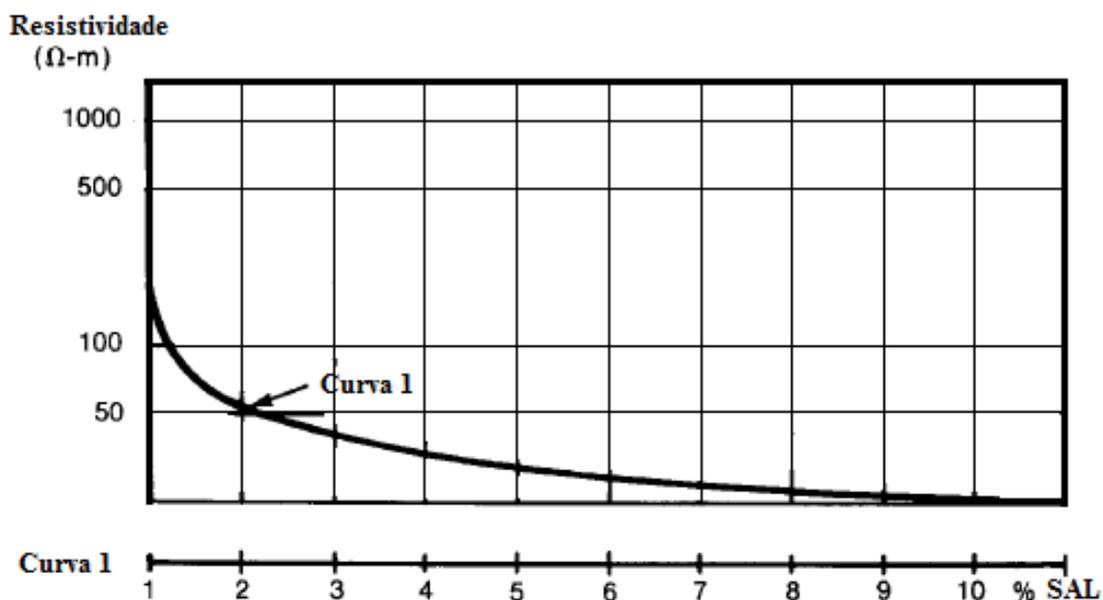


Figura 5.4 - Variação da resistividade do solo em função da percentagem de sal adicionado.

Se num determinado sistema de terras for utilizado o tratamento do solo com sal, o mesmo deve ser renovado anualmente, uma vez que o sal tende a dispersar-se no solo ao longo do tempo. Considerando que esta dispersão do sal no solo é mais acentuada durante a época de chuva, este tratamento anual deve ser feito após o inverno.

5.7 - Procedimento Padrão no Projecto de um Sistema de Terras

O projecto de um qualquer sistema de terras deve começar sempre pelo estudo da resistividade do terreno. Utilizando o telurómetro da Figura A.1 em Anexo A, medir-se-á a resistividade do solo no local onde o sistema irá ser implementado, verificando-se se o valor obtido se encontra dentro dos limites da Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Limites de resistividade para diferentes tipos de eléctrodos.

Tipo	L	ρ máximo [$\Omega.m$]	Tipo	L [m]	ρ máximo [$\Omega.m$]	
Vareta	2	42	Rectilíneo	10	155	
	4	75		15	210	
	6	105		20	260	
2 Varetas	2	90		25	315	
	4	160		30	360	
	6	220		40	460	
3 Varetas	2	130		50	550	
	4	270		10	335	
	6	450		12	390	
4 Varetas	2	150		15	470	
	4	320		Serpentina	10	100
	6	520		Serp. Dupla	20	135
R = 20 Ω				Serp. Dup. Longa	30	250

Nota: L é o comprimento dos eléctrodos em metros. O diâmetro considerado para os eléctrodos foi de 0,015 metros. No caso das varetas paralelas considerou-se as mesmas interligadas por cabo de cobre nu de 35 mm² separadas por uma distância igual ao seu comprimento.

Na Tabela 5.12 pode-se ver o valor limite da resistividade do solo (ρ máximo [$\Omega.m$]) para diferentes disposições de eléctrodos de terra, de forma a que a resistência de terra seja inferior a 20 Ω .

Caso o valor da resistividade do solo medido pelo telurómetro da Figura A.1 em Anexo A, não esteja dentro dos limites da Tabela 5.12, terá obrigatoriamente de se proceder ao tratamento físico e/ou químico do solo, caso contrário terá de se avançar para a solução do eléctrodo vertical com brocagem do furo artesiano. Se o valor da resistividade do solo se encontrar dentro dos limites da Tabela 5.12, optar-se-á pelos eléctrodos que respeitem o valor de 20 Ω para a resistência de terra, escolhendo-se o eléctrodo que satisfaça essa condição de forma mais económica. Por exemplo, um valor de 200 $\Omega.m$ para a resistividade do solo, num local em que seja possível aplicar-se todas as disposições, encontra-se através da Tabela 5.12 as seguintes soluções:

- ✓ 2 varetas em paralelo com 6 metros de comprimento;
- ✓ 3 varetas em paralelo com 4 e 6 metros de comprimento;

76 Eléctrodos de Terra: Implementações Práticas

- ✓ 4 varetas em paralelo com 4 e 6 metros de comprimento;
- ✓ Cabo rectilíneo horizontal com 15, 20, 25, 30, 40 e 50 metros de comprimento;
- ✓ Estrela com 10, 12 e 15 metros de comprimento;
- ✓ Serpentina Dupla Longa (30 metros de cabo).

De todas estas soluções, as soluções mais económicas seriam a de 2 varetas com 6 metros de comprimento e a de 3 varetas com 4 metros de comprimento, pois ambas as soluções implicam a utilização de 6 eléctrodos verticais de 2 metros de comprimento, assim como a solução cabo rectilíneo horizontal com 15 metros de comprimento. Dentro destas 3 soluções escolher-se-ia a mais económica tendo em conta os custos de cada solução. No entanto, deve-se ter em atenção também as soluções que embora menos económicas fornecem valores mais baixos para a resistência de terra, pois o valor ideal para a resistência de terra é de 0Ω e não de 20Ω . Esta relação entre o valor da resistência de terra e o custo da solução terá de ser equacionada aquando do projecto de um sistema de terras.

Encontrando-se o valor da resistividade do solo dentro dos limites da Tabela 5.12, o tratamento físico e químico do solo deverá ainda assim ser equacionado, pois poderá permitir um mais baixo valor da resistência de terra a um custo inferior.

5.8 - Resumo

Neste capítulo foram realizadas diversas experiências práticas sobre diferentes disposições de eléctrodos de terra. Mostrou-se a implementação de uma terra de serviço, assim como o melhoramento de uma terra de protecção de um Posto de Transformação (PT MT/BT). Demonstrou-se ainda qual o tipo de interligação entre eléctrodos de terra verticais paralelos. Realizou-se ainda uma análise crítica às soluções normalizadas actualmente em vigor na Operadora da rede de distribuição de electricidade, bem como a elaboração de um procedimento padrão no projecto de um sistema de terras.

Capítulo 6

Conclusões Finais e Trabalhos Futuros

Neste capítulo serão descritas as conclusões retiradas na identificação, abordagem e soluções do tema dos eléctrodos de terra abordado nesta dissertação.

Será ainda apresentada a contribuição do trabalho, no que ao dimensionamento de sistemas de terras diz respeito, desde equações da resistência de terra para as várias disposições, métodos de medição da resistividade do solo e da resistência de terra, a técnicas de melhoramento da resistividade do solo e da resistência de terra. Por fim, serão mostradas propostas de desenvolvimentos futuros nesta área.

6.1 - Conclusões Finais

A solução de não permitir que uma pessoa possa eventualmente ficar em contacto com tensões perigosas, passa por projectar eficazmente sistemas de terras. Define-se um determinado sistema de terras como eficaz, se o mesmo tiver uma resistência de terra próxima de zero, no limite, inferior a 20Ω . Interessava assim identificar todos os factores que influenciam o valor da resistência de terra de uma determinada instalação eléctrica, tais como a resistividade do solo e os tipos de eléctrodos de terra (disposição, dimensão e número).

Um solo tem características muito diversas, pelo que o valor da sua resistividade varia consideravelmente dependendo do tipo de solo. Existem solos homogéneos, não homogéneos, húmidos, secos, pelo que se torna extremamente importante estudar o solo no local onde um determinado sistema de terras irá ser instalado. Sendo assim é fundamental saber o valor da sua resistividade nesse mesmo local, logo, interessa aplicar-se métodos de medição da resistividade do solo que forneçam resultados fiáveis do seu valor. Ao longo desta dissertação abordaram-se diferentes métodos de se efectuar a medição da resistividade do solo,

confirmando-se que os mesmos fornecem valores credíveis. Concluiu-se também, que a resistividade do solo é tendencialmente elevada na maior parte dos diferentes tipos de solos. Foi necessário então estudarem-se várias técnicas de melhoramento da resistividade do solo, de forma a ser possível obter-se valores da resistência de terra dentro dos limites.

Para além do estudo da resistividade do solo, identificaram-se todos os tipos de eléctrodos de terra existentes, estabelecendo-se as equações para o valor da resistência de terra desses mesmos eléctrodos, bem como os factores que mais influenciam esse mesmo valor. Para além disto e tal como realizado na medição da resistividade do solo, apresentaram-se os diferentes métodos de medição da resistência de terra, identificando-se os que fornecem resultados mais fiáveis.

Interessava também comprovar-se na prática os resultados teóricos, pelo que se realizou uma série de experiências no terreno com eléctrodos de terras. Os resultados práticos corroboraram os teóricos, pelo que se identificou quais os eléctrodos que fornecem melhores valores para a resistência de terra.

Concluiu-se que questões relacionadas com os eléctrodos de terra, nomeadamente com o projecto de um sistema de terras são de elevada complexidade, muito por culpa das características do solo, características estas que influenciam o valor da resistividade do solo e consequentemente o valor da resistência de terra de uma instalação.

6.2 - Contribuição do Trabalho

Os sistemas de terras têm uma grande relevância dentro do sistema eléctrico de energia, pois funcionam como um importante factor de segurança e de protecção quer dos equipamentos eléctricos, quer do ser humano.

Este trabalho teve como objectivo discriminar todos os factores que têm influência no valor da resistência de terra e na qualidade de um sistema de terras. Um dos factores que tem grande preponderância no valor da resistência de terra é a resistividade do solo, pelo que se apresentou um conjunto de técnicas de melhoramento da resistividade do solo.

Apresentaram-se ainda diversos tipos de eléctrodos de terra, bem como as expressões para o cálculo da resistência de terra de cada um desses eléctrodos, assim como formas de se obter valores da resistência de terra mais baixos com a alteração das características dos eléctrodos de terra, nomeadamente nas suas disposições, dimensões, número e tipo de interligação entre eléctrodos de terra paralelos.

Foi realizada ainda uma análise crítica às soluções normalizadas actualmente em vigor na Operadora da Rede de Distribuição de Electricidade, refutando-se algumas dessas normas e destacando novas soluções com base no trabalho desenvolvido durante esta dissertação. Elaborou-se ainda um procedimento padrão no projecto de um sistema de terras de uma qualquer instalação eléctrica. Implementou-se também uma terra de serviço de um Posto de Transformação, bem como o melhoramento da terra de protecção desse mesmo PT, ilustrando-se o procedimento a seguir na implementação dessas mesmas terras.

Com base neste trabalho, é possível enfrentar-se o desafio do projecto de sistemas de terras de uma forma mais preparada, adquirindo-se através da sua leitura, conhecimentos para a implementação de sistemas de terras mais eficazes a um custo mais reduzido, pois foram apresentadas de uma forma clara, técnicas e procedimentos de dimensionamento e implementação de sistemas de terras.

6.3 - Trabalhos Futuros

Com base neste trabalho, é possível avançar-se para estudos mais aprofundados sobre algumas das questões abordadas nesta dissertação. Podem-se estudar novas técnicas de melhoramento da resistividade do solo, nomeadamente a aplicação de novos produtos não corrosivos que provoquem uma diminuição da resistividade do solo. Para além disto, é viável efectuarem-se ainda estudos sobre novas disposições de eléctrodos de terra, que forneçam melhores valores de resistência de terra.

Através desta dissertação, é possível ainda partir-se para o estudo de materiais de baixa resistividade para envolvimento dos eléctrodos, que os protejam não só contra a corrosão, assim como possibilitem que se obtenha melhores valores da resistência de terra. Um dos materiais abordados nesta dissertação foi a Bentonite. É exequível a partir deste material, a investigação de novos materiais idênticos a este e ainda, a realização de um estudo prático com este material, concluindo qual a preponderância da sua aplicação no comportamento dos eléctrodos de terra.

Referências

- [1] Teixeira, Fernando Jorge Teiga; “Modelização de Eléctrodos de Terra em Sistemas Eléctricos de Energia”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, FEUP, Porto, 2000.
- [2] <http://paginas.fe.up.pt/~arminio/> --> Luminotecnia e Instalações Industriais --> Apontamentos --> Efeitos da corrente eléctrica no corpo humano, acedido em Dez 2010.
- [3] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” IEEE Std 80-2000 , vol., no., pp.i-192, 2000; doi: 10.1109/IEEESTD.2000.91902.
- [4] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” ANSI/IEEE Std 80-1986 , vol., no., pp.0_1, 1986; doi: 10.1109/IEEESTD.1986.81070.
- [5] Tuma, Eduardo Tannus; “Proposta de um novo modelo para análise dos comportamentos transitório e estacionário de sistemas de aterramento, usando-se o método FDTD”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica; Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico; Belém-Pará-Brasil, 2005.
- [6] Pinto, Ernesto; “Projecto, Melhoria e Medição de Terras” Projecto/Seminário/Trabalho Final de Curso, FEUP, 2005.
- [7] Duarte, Fernando Daniel Santos; “Sistema Terra Em Linhas Aéreas: Desenvolvimento de Procedimento-Padrão Para A Escolha Dos Eléctrodos De Terra”, Dissertação realizada no âmbito do MIEEC, FEUP, Porto, 2010.
- [8] <http://paginas.fe.up.pt/~arminio/> --> Concepção de Instalações Eléctricas --> Apontamentos --> Sistemas de terra, acedido em Dez 2010.
- [9] Seedher, H.R.; Arora, J.K.; , "Estimation of two layer soil parameters using finite Wenner resistivity expressions," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.7, no.3, pp.1213-1217, Jul 1992; doi: 10.1109/61.141833.
- [10] Huina Yang; Jiansheng Yuan; Wei Zong; , "Determination of three-layer earth model from Wenner four-probe test data," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.37, no.5, pp.3684-3687, Sep 2001; doi: 10.1109/20.952690.
- [11] Lagace, P.J.; Vuong, M.H.; , "Graphical User Interface for Interpreting and Validating Soil Resistivity Measurements," Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on , vol.3, no., pp.1841-1845, 9-13 July 2006; doi: 10.1109/ISIE.2006.295852.

- [12] EDP Distribuição - Energia, S.A., "Guia Técnico de Terra - Ligações à terra", DRE-C11-040/N, 1ª parte, Julho 2005.
- [13] EDP Distribuição - Energia, S.A., "Guia Técnico de Terra - Eléctrodos de terra", DRE-C11-040/N, 2ª parte, Julho 2005.
- [14] Dwight, H. B.; , "Calculation of Resistances to Ground," American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the , vol.55, no.12, pp.1319-1328, Dec. 1936; doi: 10.1109/T-AIEE.1936.5057209.
- [15] Liew, A.C.; Darveniza, M.; , "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths," Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of , vol.121, no.2, pp.123-135, February 1974; doi: 10.1049/piee.1974.0022.
- [16] Verma, R.; Mukhedkar, D.; , "Impulse Impedance of Buried Ground Wire," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on , vol.PAS-99, no.5, pp.2003-2007, Sept. 1980; doi: 10.1109/TPAS.1980.319827.
- [17] Korasli, C.; , "Ground Resistance Measurement with Fall-of-Potential Method Using Capacitive Test Probes," Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2006. ESMO 2006. IEEE 11th International Conference on, vol., no., 15-19 Oct. 2006; doi: 10.1109/TDCLLM.2006.340749.
- [18] Bourg, S.; Sacepe, B.; Debu, T.; , "Deep earth electrodes in highly resistive ground: frequency behaviour," Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record. 1995 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.584-589, 14-18 Aug 1995; doi: 10.1109/ISEMC.1995.523625.
- [19] Georges, S.; Slaoui, F.; Lagace, P.J.; Do, X.D.; Fortin, J.; , "Evaluation of the effect of salt water and a counterpoise on the voltage profile of a HV power transmission line grounding system in a two layer with high resistivity soil," Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE , vol.2, no., pp.1016-1021 vol.2, 1999; doi: 10.1109/PSS.1999.787455.
- [20] Anggoro, B.; Sinisuka, N.I.; Pakpahan, P.M.; , "Resistivity and Dielectric Constant Characteristic of Soil If are Treated by Water, Salt and Carbon," Properties and applications of Dielectric Materials, 2006. 8th International Conference on , vol., no., pp.893-896, June 2006; doi: 10.1109/ICPADM.2006.284321.

Anexo A

Eléctrodos de Terra: Figuras

A.1 - Telurómetro

Aparelho utilizado nas medições da resistividade do solo e da resistência de terra dos eléctrodos.



Figura A.1 - Aparelho para medição da resistividade do solo e da resistência de terra.

O telurómetro da Figura A.1 disponibiliza a medição da resistividade do solo através do método de Wenner ou através do método de Schlumberger, métodos descritos na Secção 3.4.2. Quanto à medição da resistência de terra de um sistema de terras, o telurómetro da Figura A.1, utiliza o método da queda de potencial, método descrito na Secção 4.4.2.

A.2 - Método de Medida sem Eléctrodos Auxiliares

Pela Figura A.2, pode-se visualizar a forma como se efectua a medida da resistência de terra através do método de medida sem eléctrodos auxiliares, demonstrado na Secção 4.4.4.



Figura A.2 - Método de medida da resistência de terra sem eléctrodos de terra auxiliares.

A.3 - Figura com a Tabela das Variáveis da Equação Eq. 4.1

A tabela da Figura A.3 fornece as constantes para aplicação da Equação Eq. 4.1, equação pela qual se efectua o calculo das secções mínimas para os condutores dos sistemas de terras.

Descrição	Condutividade do material	ar factor a 20 °C (1/°C)	Ko a 0 °C (0 °C)	Temperatura de fusão-Tm (° C)	pr 20 °C (μΩ·cm)	TCAP Capacidade térmica [J / (cm ³ ° C)]
Cobre, recozido mole desenhado	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
Cobre, comercial rígido Desenhada	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
Cobre-vestido fio de aço	40.0	0.003 78	245	1084	4.40	3.85
Cobre-vestido fio de aço	30.0	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
Cobre-vestido haste de aço	20.0	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
Alumínio, CE grau	61.0	0.004 03	228	657	2.86	2.56
Alumínio, 5005 da liga	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.60
Alumínio, 6201 da liga	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.60
Alumínio revestido fio de aço	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
Aço, 1020	10.8	0.001 60	605	1510	15.90	3.28
Inoxidável-vestido haste de aço	9.8	0.001 60	605	1400	17.50	4.44
Zinco Revestido haste de aço	8.6	0.003 20	293	419	20.10	3.93
aço inoxidável, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.03

Figura A.3 - Tabela com as constantes a preencher na Equação Eq. 4.1.

A.4 - Eléctrodos de Terra: Resistência de Terra

Nesta Secção serão mostradas figuras com os gráficos de algumas configurações de eléctrodos de terra.

A.4.1 - Resistência de Terra: Eléctrodo Vertical

O gráfico da Figura A.4 ilustra a comparação entre a resistência de terra do eléctrodo tipo vareta para diferentes resistividades, através da Equação Eq. 4.3 e Eq. 4.4.

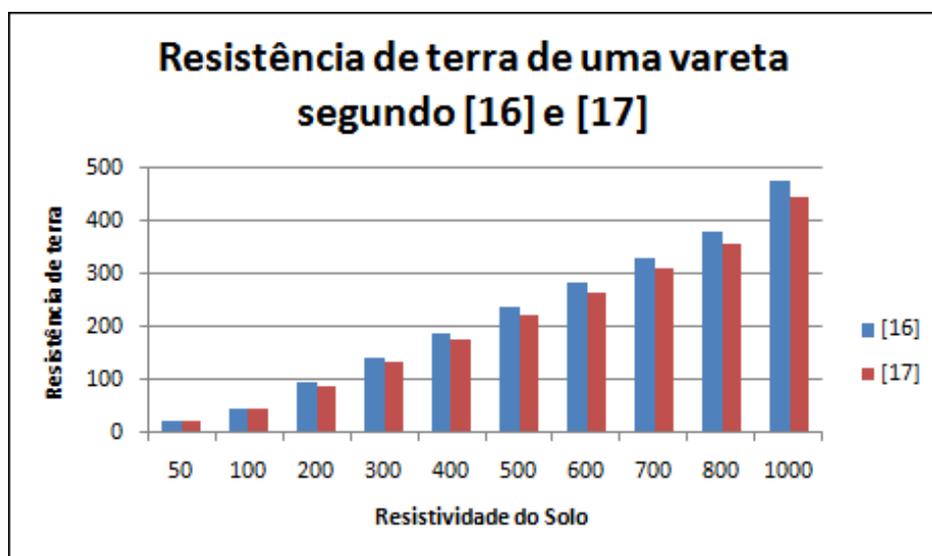


Figura A.4 - Resistência de terra do eléctrodo vertical tipo vareta.

O gráfico da Figura A.5 apresenta a resistência de terra do eléctrodo vertical em função do seu comprimento.

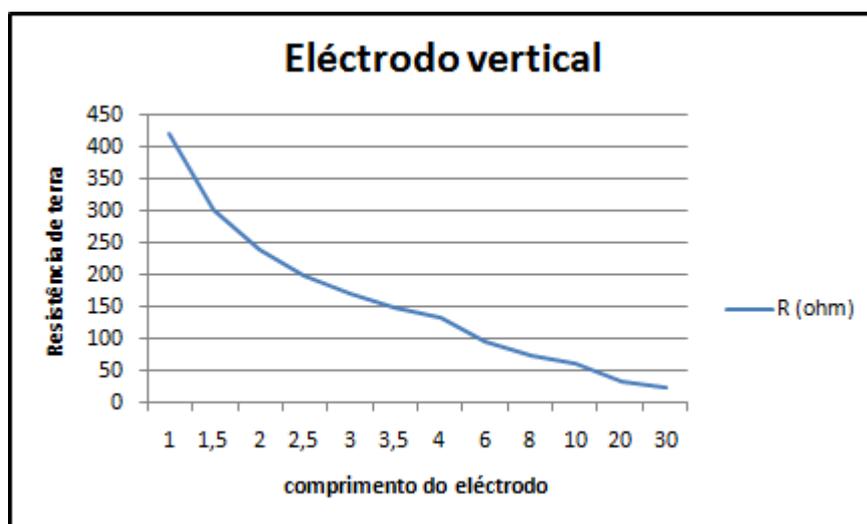


Figura A.5 - Resistência de terra do eléctrodo vertical em função do comprimento.

O gráfico da Figura A.6 apresenta a resistência de terra do eléctrodo vertical em função do seu diâmetro.

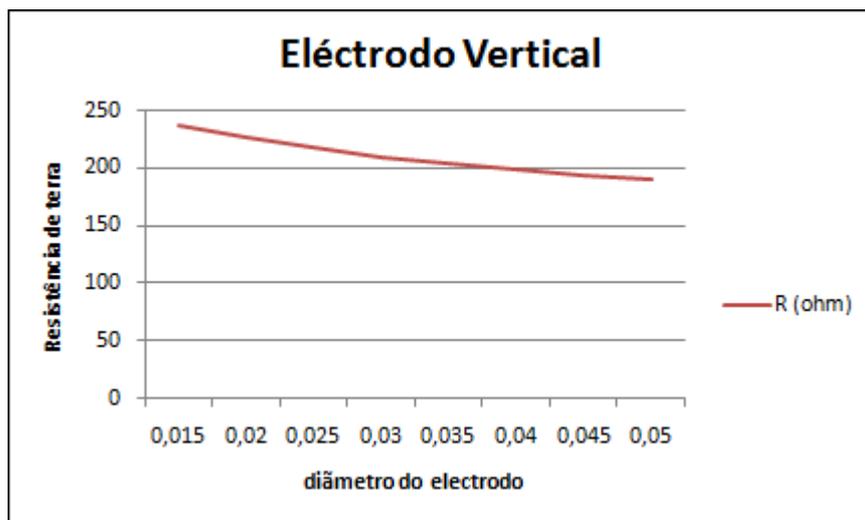


Figura A.6 - Resistência de terra do eléctrodo vertical em função do diâmetro.

Como se observa pelas Figuras A.5 e A.6, a diminuição da resistência de terra é mais dependente do comprimento do eléctrodo do que do diâmetro.

Pela Figura A.7, conclui-se que a distância entre eléctrodos de terra paralelos deve ser no mínimo igual ao comprimento de um eléctrodo. Os eléctrodos verticais da Figura A.7 eram 2 eléctrodos de 2 metros de comprimento.

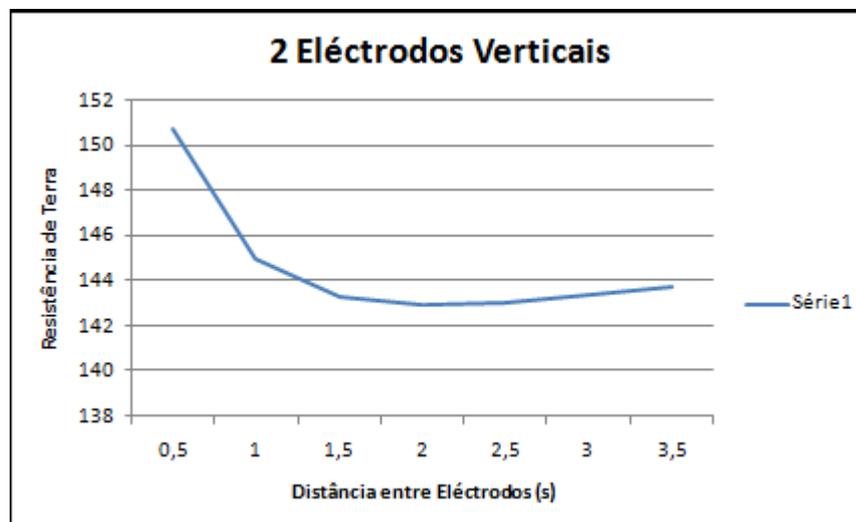


Figura A.7 - Resistência de terra de 2 eléctrodos verticais em paralelo, interligadas por cabo isolado vv 35 mm², em função da distância s entre os eléctrodos.

A.4.2 - Resistência de Terra: Eléctrodos Horizontais

A Figura A.8 ilustra a comparação da resistência de terra do eléctrodo horizontal tipo estrela, de acordo com as Equações Eq. 4.11 e Eq 4.12.

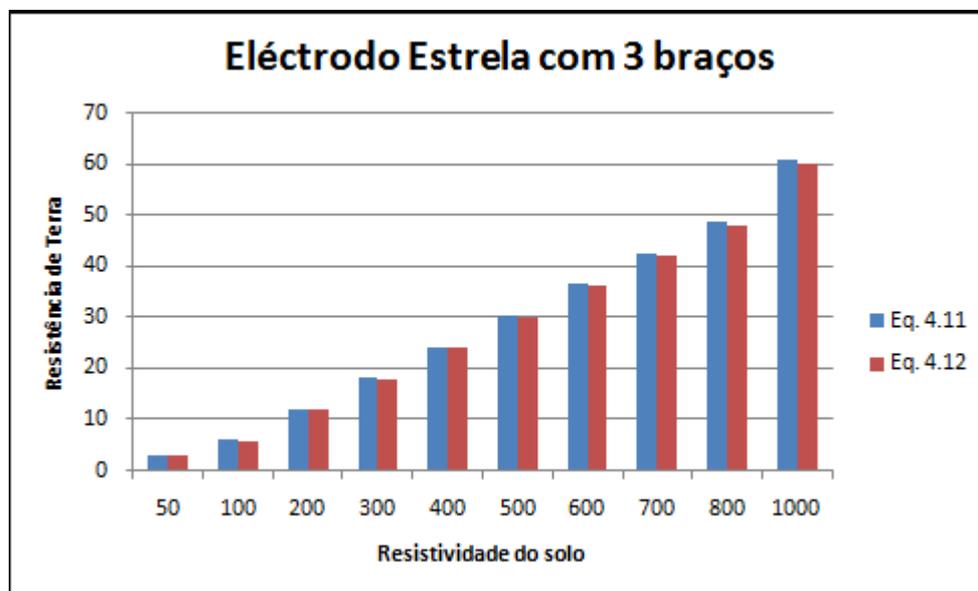


Figura A.8 - Resistência de terra do eléctrodo horizontal tipo estrela de acordo com as Equações Eq. 4.11 e Eq. 4.12.

A Figura A.9 mostra a diferença da resistência de terra do eléctrodo horizontal de braços radiais, em função do número de braços do eléctrodo. Comprova-se que a partir dos 3 braços, a resistência de terra tem uma diminuição reduzida.

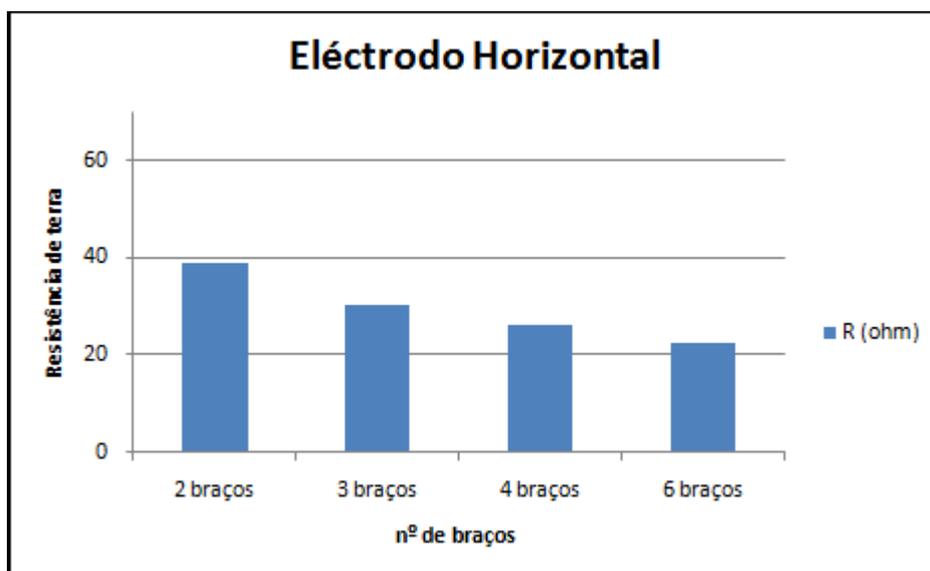


Figura A.9 - Resistência de terra do eléctrodo horizontal em função do número de braços.

A.5 - Figuras para as Constantes K_1 e K_2

As figuras A.10 e A.11 fornecem os valores de K_1 e K_2 das Equações Eq. 5.2, Eq. 5.3 e Eq. 5.4.

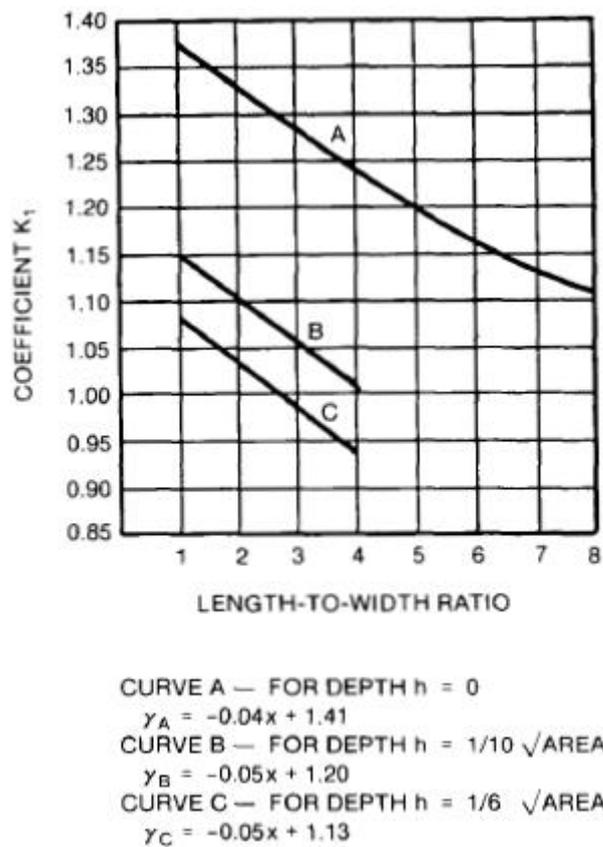
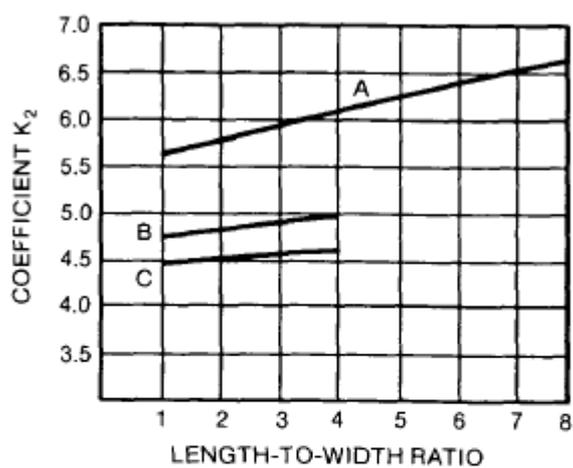


Figura A.10 - Gráfico de K_1 em função do rácio entre o comprimento e a largura da malha e a profundidade h [m].



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$

$$y_A = 0.15x + 5.50$$

CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$y_B = 0.10x + 4.68$$

CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$

$$y_C = -0.05x + 4.40$$

Figura A.11 - Gráfico de K_2 em função do rácio entre o comprimento e a largura da malha e a profundidade h [m].

Anexo B

Imagens das Experiências Práticas

Neste Anexo B são ilustradas algumas imagens tiradas das diversas experiências práticas que se efectuaram no terreno.



Figura B.1 - Medição da resistividade do solo através do método de Wenner.

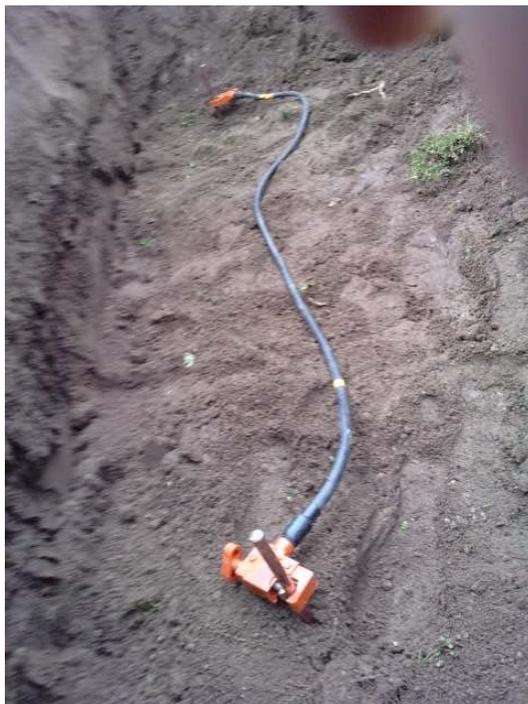


Figura B.2 - 2 eléctrodos verticais interligados por cabo isolado.



Figura B.3 - Eléctrodos verticais paralelos interligados por cabo de cobre nu 35 mm². Terra de serviço de um Posto de Transformação.



Figura B.4 - Pormenor da ligação do cabo rectilíneo horizontal ao eléctrodo vertical.



Figura B.5 - Terra de Protecção de um PT: Pormenor de a vala depois de fechada ficar com a terra pouco compactada.