



Nuno Miguel  
Gonçalves de Castro  
Dinis Mariano

**Sistemas de Terra e  
Protecção Contra Descargas  
Atmosféricas**

Estudo da Protecção contra Descargas  
Atmosféricas

Dissertação Apresentada para Cumprimento  
dos Requisitos Necessários à Obtenção do  
Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica  
e de Computadores sob a Orientação  
Científica do Professor Doutor Vitor Manuel de  
Carvalho Fernão Pires e Co-orientação do  
Professor Doutor Luis José Santos de Sousa  
Martins

Fevereiro de 2011

*Aos meus filhos, Rafael e Rodrigo, pelas horas da  
minha atenção a que os privei para me poder dedicar  
a este trabalho.*

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores científicos, Professor Doutor Vítor Manuel de Carvalho Fernão Pires e Professor Doutor Luís José Santos de Sousa Martins, todo o interesse, apoio e disponibilidade demonstrados ao longo de todo o percurso para a elaboração deste trabalho e sem os quais o mesmo nunca teria chegado a bom porto.

À minha esposa, cujo apoio incondicional demonstrado desde o início me permitiu ultrapassar todas as dificuldades sentidas.

E por fim, mas de todo o mais importante, aos meus dois filhos, pelas horas de brincadeira, diversão e cumplicidade em que foram privados da minha companhia para me poder dedicar ao desenvolvimento deste projecto.

# Resumo

Nos dias de hoje, é amplamente reconhecida a importância da ligação à terra de equipamentos ou sistemas, na protecção de bens e de vidas humanas, devendo a mesma ser efectuada de forma criteriosa e devidamente ponderada. Pelo facto de os sistemas de protecção terminarem no solo, estes devem contribuir para que o escoamento das correntes de defeito para o solo se faça da forma mais breve e directa possível, sem que exista perigo para as pessoas, animais e para a própria instalação em que o sistema esteja inserido. No dimensionamento de um projecto de terras e dos sistemas de protecção a ele associados, é necessário ter sempre em linha de conta os critérios de segurança regulamentares e os factores físicos com influência no seu desempenho, como seja o comportamento dos eléctrodos em diferentes situações ambientais e de índole construtiva. Este trabalho visou, essencialmente, a caracterização do comportamento apresentado pelos eléctrodos de terra de diferentes geometrias e tipologias de implementação, bem como o dimensionamento de sistemas de protecção contra descargas atmosféricas, através do desenvolvimento de uma aplicação que permite efectuar simulações em interface gráfico, recorrendo ao programa informático MATLAB<sup>®</sup> da MathWorks<sup>®</sup>.

**Palavras-chave:** Sistemas de terra, protecção contra descargas atmosféricas, aplicação de computação numérica e interface gráfico.

# Abstract

Nowadays, the importance of grounding equipments or systems is widely recognized, by providing the necessary protection of property and human lives, as it should be made in a discerning and criterious way. Due to the fact that protection systems end in the soil, they should contribute to drain the defective currents in the briefest and direct way as possible, without endangering people, animals and the installation itself. When designing the grounding system and the associated protection system, it is necessary to have always in account the electrical saphety regulations and the physical constraints with influence in its performance, as is the behavior of the electrodes in different environments and constructional aspects. The scope of this paper is to characterize the behavior of electrodes with different geometries and implementation topologies, as well as the design of lightning protection systems, by developing a software for simulations in a graphical interface, using the MATLAB<sup>®</sup> from MathWorks<sup>®</sup> software.

**Keywords:** Grounding systems, lightning protection, numerical computation and graphical interface software.

# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo .....	iv
Abstract.....	v
Índice .....	vi
Lista de Figuras .....	ix
Lista de Siglas e Acrónimos .....	xii
Capítulo 1 .....	1
Introdução.....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Motivação e objectivos .....	2
1.3. Estrutura do documento .....	2
Capítulo 2 .....	5
Considerações básicas sobre sistemas de terra.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Ligação à Terra de um Sistema .....	5
2.3. Funções dos Sistemas de Terra e Requisitos Fundamentais .....	7
2.4. Ligação dos Sistemas à Terra.....	8
2.5. Conceitos Importantes nas Ligações de Terra .....	9
2.5.1. Tensão de Contacto .....	9
2.5.2. Tensão de Toque.....	9
2.5.3. Tensão de Passo.....	9
2.5.4. Potencial Transferido.....	9
2.5.5. Ruído .....	9
2.6. Resistência de Terra em condições de Baixa Frequência.....	10
2.6.1. Resistividade do Solo .....	10
2.6.2. Resistência de Terra.....	10
Capítulo 3 .....	15
Estudo da legislação em vigor aplicável aos sistemas de terra.....	15
3.1. Introdução.....	15
3.2. Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão (RTIEBT) .....	15
3.2.1. Tipos de Sistemas de Distribuição .....	15
3.2.2. Ligações à Terra e Condutores de Protecção.....	16
3.2.3. Condutores de Protecção .....	18
3.2.4. Conservação e Continuidade Eléctrica dos Condutores de Protecção .....	19
3.2.5. Ligações à Terra por razões de Protecção .....	20
3.2.6. Ligações à terra por razões funcionais.....	20
3.2.7. Ligações à terra por razões combinadas de protecção e funcionais .....	20
3.2.8. Condutores de Equipotencialidade.....	21

3.2.9. Ligação à Terra de Instalações de Equipamentos de Tratamento da Informação .....	22
3.2.10. Ligação à Terra dos Descarregadores de Sobretensão das Instalações Telefónicas .....	23
3.3. Sistemas de Terra em Infra-estruturas de Telecomunicações (ITED e ITUR) .....	24
3.3.1. Manual ITED - Prescrições e Especificações Técnicas das Infra-estruturas de Telecomunicações em Edifícios .....	24
3.3.2. Manual ITUR – Infra-estruturas de Telecomunicações em Loteamentos, Urbanizações e Conjunto de Edifícios .....	31
Capítulo 4 .....	35
Imunidade ao Ruído e Compatibilidade Electromagnética .....	35
4.1. Introdução .....	35
4.2. Perturbações Electromagnéticas .....	35
4.2.1. Perturbações Conduzidas .....	36
4.2.2. Perturbações por Condução em Baixa Frequência .....	37
4.2.3. “Flicker” .....	37
4.2.4. Perturbações de Alta frequência por indução .....	39
4.2.5. Campos Magnéticos de Baixa-Frequência .....	40
4.2.6. Campos Magnéticos de Alta Frequência .....	40
4.3. Tipos de Acoplamentos Electromagnéticos .....	40
4.3.1. Acoplamento Impedante .....	41
4.3.2. Acoplamento Indutivo .....	42
4.3.3. Acoplamento Capacitivo .....	47
4.3.4. Acoplamento Radiante .....	50
4.3.5. Complexidade das EMI na prática .....	51
4.4. Sistemas de Terra e EMC .....	52
4.4.1. Malhas de ligação entre massas (loop’s) .....	52
4.4.2. Unicidade da rede de terra .....	53
Capítulo 5 .....	57
Propagação das correntes de defeito através dos eléctrodos para o solo .....	57
5.1. Introdução .....	57
5.2. Distribuição de correntes e potenciais no solo .....	57
5.3. Alterações produzidas pela alteração na geometria dos eléctrodos e pela não homogeneidade do solo .....	59
5.4. Simulação de curvas de distribuição de potencial à superfície e linhas equipotenciais em solos homogéneos .....	60
5.4.1. Distribuição do potencial à superfície do solo .....	60
5.4.2. Potencial à superfície e equipotenciais no solo para diversos tipos de eléctrodos, simulados em ambiente Matlab® .....	62
Capítulo 6 .....	67
Protecção contra descargas atmosféricas .....	67

6.1. Introdução.....	67
6.2. Classificação das Instalações segundo as normas ANSI e IEC.....	68
6.3. Filosofias de Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas.....	70
6.3.1. Sistema de Protecção tipo “Franklin” .....	70
6.3.2. Sistema de Protecção tipo “Gaiola de Faraday” .....	71
6.4. Modelização dos Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas com base nos Modelos de Distância à Descarga.....	72
6.4.1. Os modelos de Distância à Descarga .....	72
6.4.1.1. Equações de Young .....	73
6.4.1.2. Equações de Love.....	74
6.4.1.3. Equações de Brown-Whitehead-CIGRE .....	74
6.4.1.4. Equações de IEEE-1992 .....	74
6.4.1.5. Equações de IEEE-1995 .....	74
6.4.2. Utilização de cabos como protecção contra descargas atmosféricas .....	74
6.4.3. Utilização de mastros como protecção contra descargas atmosféricas .....	77
6.4.3.1. Mastro único .....	77
6.4.3.2. Dois mastros.....	78
6.4.3.3. Três mastros.....	80
6.4.3.4. Mais do que três mastros .....	83
6.5. Desenvolvimento de uma aplicação em ambiente Matlab® para determinação das zonas de protecção oferecidas por mastros e cabos .....	86
6.5.1. O Interface Gráfico de Utilizador (GUI) .....	86
6.5.2. Resultados das diversas simulações .....	87
6.5.2.1. Protecção com um único mastro ou cabo de guarda.....	87
6.5.2.2. Efeito do número de mastros na zona de protecção.....	88
6.5.2.3. Efeito do número de cabos na zona de protecção.....	89
6.5.2.4. Efeitos da aplicação dos diferentes modelos ao cálculo.....	90
6.5.2.5. Efeitos da aplicação de diferentes amplitudes de corrente.....	92
Capítulo 7 .....	95
Conclusões.....	95
Bibliografia .....	97
Anexo I.....	1
Anexo II.....	2
Anexo III.....	3



# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Constituição de uma ligação à terra [7] .....	6
Figura 2.2 – Componentes de corrente no solo e respectivo circuito equivalente [7] .....	7
Figura 2.3 – Modelo de solo homogéneo aproximado por fatias [7] .....	11
Figura 2.4 – Perfil de potencial no solo [16] .....	12
Figura 2.5 – Distribuição de potencial na superfície do solo [18] .....	13
Figura 3.1 – Ligações à terra e condutores de protecção [1] .....	18
Figura 3.2 – Ligações à terra nas instalações de equipamentos de tratamento da informação [1] .....	23
Figura 3.3 – Exemplo da resistência de dissipação de um eléctrodo de terra constituído por uma barra longitudinal, progressivamente crescente em função da profundidade [2] .....	25
Figura 3.4 – Eléctrodos de terra do tipo simples [2] .....	25
Figura 3.5 – Eléctrodos de terra do tipo combinado [2] .....	26
Figura 3.6 – Eléctrodos de terra do tipo malha [2] .....	26
Figura 3.7 – Eléctrodos de terra do tipo fundação [2] .....	27
Figura 3.8 – Forma de onda típica de uma descarga atmosférica [2] .....	27
Figura 3.9 – Esquema eléctrico e de terras [2] .....	30
Figura 4.1 – Acoplamento Impedante [11] .....	41
Figura 4.2 – Modelo Simplificado de Acoplamento Impedante [11] .....	42
Figura 4.3 – Acoplamento Indutivo: a) Modelo de campo; b) Circuito equivalente [11] .....	43
Figura 4.4 – a) Fontes do Campo Magnético; b) Circuito Eléctrico perturbado; [11] .....	43
Figura 4.5 – a) Campo Magnético; b) Indutância de acoplamento por unidade de comprimento do anel rectangular; [11] .....	44
Figura 4.6 – Circuito equivalente de um acoplamento indutivo [11] .....	45
Figura 4.7 – Estudo da função de transferência da corrente perturbadora [11] .....	45
Figura 4.8 – Acoplamento indutivo derivado de correntes trapezoidais lenta e rápida [11] .....	46
Figura 4.9 – Capacidade de blindagem de um anel de curto-circuito para diferentes valores da sua resistência interna [11] .....	47
Figura 4.10 – Acoplamento capacitivo: a) Modelo de campo; b) Circuito Equivalente; [11] .....	47
Figura 4.11 – Modelo de três linhas para um acoplamento capacitivo [11] .....	48
Figura 4.12 – Comportamento da frequência num acoplamento capacitivo [11] .....	49
Figura 4.13 – Sinais de acoplamento capacitivo para: a) sinusóide a 50Hz; b) variador de intensidade luminosa [11] .....	49
Figura 4.14 – Acoplamento capacitivo de dois cabos blindados [11] .....	50
Figura 4.15 – Blindagem de um impulso recorrendo a diferentes capacidades de acoplamento [11] .....	50
Figura 4.16 – Eficácia de blindagem de uma ranhura com vários comprimentos, em função da frequência [11] .....	51
Figura 4.17 – Aumento da imunidade às radiações e às interferências por condução, pelo	

aumento do número e diminuição da área dos “loop’s” de interligação das massas [14] .....	53
Figura 4.18 – Diferença de potencial entre as massas dos equipamentos devido à impedância dos cabos de terra [14].....	53
Figura 4.19 – Aumento do potencial entre equipamentos por efeito de um campo electromagnético [14] .....	54
Figura 4.20 – Ligação ao condutor de terra mais próximo [14] .....	54
Figura 4.21 – Ligação mais curta à terra mais próxima [14].....	55
Figura 5.2 – Distribuição aproximada das linhas de corrente e equipotenciais no solo [7].....	58
Figura 5.3 – Densidade de corrente e perfil do potencial no solo (em relação ao eléctrodo) [7]	58
Figura 5.7 – Equipotenciais no solo para um eléctrodo do tipo haste [7] .....	59
Figura 5.8 – Efeito da estratificação do solo no perfil de potencial da superfície [7].....	60
Figura 5.9 – Eléctrodo hemisférico apresentando os parâmetros necessários para calcular a resistência de terra e a distribuição do potencial à superfície em solo homogéneo [18] .....	61
Figura 5.10 – Janela de introdução de parâmetros (GUI) .....	63
Figura 5.11 – Distribuição do Potencial Relativo para um eléctrodo tipo Hemisférico .....	63
Figura 5.12 – Distribuição do Potencial Relativo para um eléctrodo tipo Haste Vertical.....	64
Figura 5.13 – Distribuição do Potencial Relativo para um eléctrodo tipo Haste Horizontal.....	64
Figura 5.14 – Distribuição do Potencial Relativo para um eléctrodo tipo 3 Hastes Horizontais em Estrela .....	65
Figura 5.15 – Distribuição do Potencial Relativo para o conjunto dos 4 tipos de eléctrodos .....	66
Figura 6.1 – Onda Combinada (Combo Wave) 1,2/50ms – 8/20ms [19].....	69
Figura 6.2 – Sistema de Protecção contra Descargas Atmosféricas tipo Franklin [8].....	71
Figura 6.3 – Tipos de captores Franklin [8].....	71
Figura 6.4 – Protecção por Gaiola de Faraday [8] .....	72
Figura 6.5 – Zona de protecção utilizando cabos de guarda [20].....	75
Figura 6.6 – A zona de protecção melhora com o aproximar dos cabos [20] .....	75
Figura 6.7 – Zona de protecção entre os cabos [20] .....	76
Figura 6.8 – Zona de protecção exterior aos cabos [20].....	77
Figura 6.9 – Zona de protecção exterior aos cabos [20].....	77
Figura 6.11 – Vista no plano da figura 6.10 [20] .....	78
Figura 6.12 – Zona de protecção entre dois mastros [20] .....	79
Figura 6.13 – Zona de protecção com dois mastros [20].....	80
Figura 6.14 – $R_c$ é a distância ao centro do triângulo originado pela disposição dos três mastros [20].....	81
Figura 6.15 – Cálculo de $R_c$ [20] .....	81
Figura 6.16 – Determinação de $y_{mc}$ [20].....	82
Figura 6.17 – No centro dos três mastros [20].....	82
Figura 6.18 – Diagrama tridimensional da zona de protecção entre os três mastros [20] .....	83
Figura 6.19 – Quatro mastros podem ser separados em dois conjuntos de três mastros [20] ..	83
Figura 6.20 – Casos especiais com quatro mastros [20].....	84

Figura 6.21 – Combinação de quatro mastros mostrando $y_{mc}$ [20] .....	84
Figura 6.22 – Determinação da zona de protecção no interior dos mastros [20].....	85
Figura 6.24 – Aspecto do GUI desenvolvido para a aplicação.....	87
Figura 6.25 – Zona de protecção oferecida por um mastro.....	87
Figura 6.26 – Zona de protecção oferecida por um cabo de guarda.....	88
Figura 6.27 – Zona de protecção oferecida por 3x2 mastros .....	88
Figura 6.28 – Zona de protecção oferecida por 4x3 mastros .....	88
Figura 6.29 – Zona de protecção oferecida por 5x7 mastros .....	89
Figura 6.30 – Zona de protecção oferecida por 6x10 mastros .....	89
Figura 6.31 – Zona de protecção oferecida por 2 cabos .....	90
Figura 6.32 – Zona de protecção oferecida por 3 cabos .....	90
Figura 6.33 – Zona de protecção oferecida por 5 cabos .....	90
Figura 6.34 – Zona de protecção oferecida por 8 cabos .....	90
Figura 6.35 – Modelo YOUNG, $y_{mc}=9,41m$ .....	91
Figura 6.36 – Modelo LOVE, $y_{mc}=5,07m$ .....	91
Figura 6.37 – Modelo Brown-Whitehead/CIGRE, $y_{mc}=0,05m$ .....	91
Figura 6.38 – Modelo IEEE-1995, $y_{mc}=0m$ .....	91
Figura 6.39 – Modelo YOUNG, $y_{mc}=9,41m$ .....	91
Figura 6.40 – Modelo LOVE, $y_{mc}=5,07m$ .....	91
Figura 6.41 – Modelo Brown-Whitehead/CIGRE, $y_{mc}=0,05m$ .....	92
Figura 6.42 – Modelo IEEE-1995, $y_{mc}=0m$ .....	92
Figura 6.43 – $I=10kA$ , $y_{mc}=5,07m$ .....	92
Figura 6.44 – $I=20kA$ , $y_{mc}=11,57m$ .....	92
Figura 6.45 – $I=30kA$ , $y_{mc}=13,69m$ .....	93
Figura 6.46 – $I=40kA$ , $y_{mc}=14,83m$ .....	93
Figura 6.47 – $I=10kA$ , $y_{mc}=5,07m$ .....	93
Figura 6.48 – $I=20kA$ , $y_{mc}=11,57m$ .....	93
Figura 6.49 – $I=30kA$ , $y_{mc}=13,69m$ .....	93
Figura 6.50 – $I=40kA$ , $y_{mc}=14,83m$ .....	93

# Lista de Siglas e Acrónimos

CIGRE	<i>Concílio Internacional em Grandes Sistemas Eléctricos</i>
EES	<i>Equipamentos electrónicos de elevada sensibilidade</i>
EMC	<i>Compatibilidade electromagnética</i>
EMI	<i>Interferência electromagnética</i>
GUI	<i>Interface Gráfico do Utilizador</i>
IEC	<i>Comité electrotécnico internacional</i>
IEEE	<i>Instituto dos Engenheiros Electrotécnicos e Electrónicos</i>
LAN	<i>Área de Rede Local</i>
SPD	<i>Dispositivo de protecção contra sobretensões</i>
PEN	<i>Terra de Protecção e Neutro</i>

# Lista de Símbolos

$\sigma$	<i>Condutividade</i>
$\rho$	<i>Resistividade eléctrica</i>
$\epsilon$	<i>Permissividade</i>
$\omega$	<i>Frequência angular</i>
$\omega L$	<i>Reactância indutiva</i>
$\omega C$	<i>Susceptância capacitiva</i>
$h$	<i>Altura</i>
$I$	<i>Intensidade de corrente</i>
$k_c$	<i>Coefficiente da distância da descarga atmosférica ao objecto a proteger</i>
$k_s$	<i>Coefficiente da distância da descarga atmosférica ao cabo ou mastro de protecção</i>
$l$	<i>Comprimento</i>
$n$	<i>Quantidade de mastros ou cabos</i>
$r_c$	<i>Distância da descarga atmosférica ao objecto a proteger</i>
$r_g$	<i>Distância da descarga atmosférica ao solo</i>
$r_s$	<i>Distância da descarga atmosférica ao cabo ou mastro de protecção</i>
$S_g$	<i>Distância entre dois cabos ou mastros de protecção</i>
$w$	<i>Largura</i>
$y$	<i>Altura do objecto a proteger</i>
$y_{mc}$	<i>Altura mínima de protecção</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Contextualização

O principal objectivo de um sistema de terra é o de garantir a segurança das pessoas e prevenir a ocorrência de danos nas instalações e equipamentos nelas presentes. Por inerência, o sistema de terra é também usado como referência de potencial nulo para interligação de equipamentos electrónicos de elevada sensibilidade, nomeadamente os de telecomunicações e das tecnologias de informação.

Historicamente, os primeiros esquemas de ligação à terra foram fruto de uma longa evolução, orientada pelo objectivo de proteger melhor as pessoas contra choques eléctricos e dos efeitos da passagem de corrente eléctrica pelo corpo humano.

A análise dos sistemas de terra presentes em qualquer instalação eléctrica, seja ela doméstica ou industrial, ou nas próprias redes eléctricas de distribuição ou de transmissão, reveste-se assim de crescente importância.

Em sistemas típicos, a diferença de potencial entre pontos diferentes da instalação pode dar origem a que circulem correntes em seres humanos ou equipamentos, com os consequentes danos que tal acarreta. Torna-se assim essencial a determinação dessa diferença de potencial em situação de defeito, seja este devido a um defeito, a uma sobretensão ou a uma descarga atmosférica, para deste modo poder minimizar o risco.

Em condições normais, é suficiente adoptar-se uma aproximação estática para baixas frequências ou regime estacionário, em que a ligação à terra deixa de ser vista como uma impedância complexa para se tornar apenas numa simples resistência ligada à terra. No entanto, estas aproximações só são válidas até um determinado valor de frequência, sendo por isso limitadas e dependendo do tamanho dos eléctrodos da malha de terra e das características eléctricas do solo.

Há no entanto determinadas situações em que as correntes eléctricas de elevada frequência se podem tornar importantes, sendo que, nestes casos, o risco de provocar danos nos equipamentos é muito superior ao risco de electrocussão de seres humanos.

Um sistema de terra equipotencial é um conceito teórico somente aplicável no caso estático. Na prática, a indução electromagnética faz com que a tensão entre dois pontos seja superior a zero. Estas desigualdades no potencial de referência são frequentemente causa de

distúrbios que podem provocar defeitos no funcionamento ou até mesmo a destruição de componentes em sistemas electrónicos de elevada sensibilidade que se encontrem ligados a este sistema de terra. Torna-se assim necessário efectuar estudos de compatibilidade electromagnética que vão exigir o conhecimento da distribuição espacial e temporal dos potenciais ao longo do sistema em caso de sobretensões ou descargas atmosféricas.

A protecção contra descargas atmosféricas assume assim também um papel de relevo no estudo e implementação de qualquer sistema de terra, uma vez que será este sistema o principal responsável por escoar para o solo as elevadas correntes envolvidas nestes fenómenos, sem que daí advenham riscos para as pessoas ou para as instalações e equipamentos a ele ligados.

## **1.2. Motivação e objectivos**

Com este trabalho, pretendeu-se estudar o comportamento apresentado pelos eléctrodos de terra de geometrias e tipologias de instalação diversas, bem como simular os volumes de protecção originados pelas diferentes tipologias de distribuição dos meios de protecção contra descargas atmosféricas, sejam eles mastros ou cabos esticados por cima das instalações a proteger.

Nos primeiros capítulos, é feita uma abordagem a diversos conceitos subjacentes ao estudo destas matérias, como sejam os conhecimentos básicos inerentes a qualquer sistema de terra, ao estudo da legislação em vigor e aos problemas de compatibilidade electromagnética.

A obtenção dos resultados, como sejam a distribuição dos potenciais no solo e à sua superfície e o cálculo das áreas de protecção produzidas por mastros e cabos de protecção contra descargas atmosféricas, foi conseguida através de simulações efectuadas com o programa Matlab<sup>®</sup> da MathWorks<sup>®</sup>, sendo que, para o último caso, foi necessário traduzir para a linguagem de programação toda a metodologia subjacente ao cálculo geométrico destes volumes.

## **1.3. Estrutura do documento**

Este trabalho encontra-se dividido em 7 capítulos, ordenados da forma que a seguir se identifica.

No capítulo 1 é feita uma abordagem inicial ao trabalho e o contexto no qual o mesmo se integra. São definidos os principais objectivos a alcançar e descreve-se a organização do documento elaborado.

No capítulo 2 é feita uma análise aos conceitos mais elementares presentes num sistema de terra, desde os critérios de dimensionamento, projecto e execução, aos critérios ligados à segurança de pessoas e bens.

No capítulo 3 são analisadas as normas e regulamentos nacionais aplicáveis aos sistemas



de terra, quer ao nível das instalações eléctricas quer ao nível das instalações de telecomunicações.

O capítulo 4 é dedicado ao estudo dos temas ligados à imunidade ao ruído e à compatibilidade electromagnética, em que se apontam quais as principais fontes de ruído e tipos de ruído produzidos, se define a capacidade dos equipamentos poderem funcionar em ambientes electromagneticamente ruidosos sem que sejam afectados por eles nem produzam interferências que venham a afectar outros equipamentos e os meios pelos quais se podem reduzir estas interferências numa instalação.

No capítulo 5 é analisada a forma como os potenciais se distribuem em solo homogéneo e qual o impacto à sua superfície quando eléctrodos de diferentes geometrias são percorridos por correntes de defeito. Com base nas equações que definem o comportamento desses mesmos eléctrodos e que se encontram na diversa bibliografia consultada, foram efectuadas simulações que descrevem essas distribuições, recorrendo ao programa Matlab<sup>®</sup>.

No capítulo 6 é desenvolvido o tema das descargas atmosféricas e dos meios utilizados na protecção contra estes fenómenos naturais. Com base em modelos geométricos e nas equações de distância à descarga, foi desenvolvida uma aplicação que corre em ambiente Matlab<sup>®</sup> e que permite determinar de forma expedita os volumes de protecção produzidos pelas diferentes topologias de distribuição dos meios de protecção contra descargas atmosféricas, sejam eles mastros ou cabos esticados por cima dos edifícios ou dos equipamentos a proteger e consoante a amplitude de corrente eléctrica envolvida nessa mesma descarga.



# Capítulo 2

## Considerações básicas sobre sistemas de terra

### 2.1. Introdução

A ligação à terra de instalações e equipamentos é um tema que atravessa as fronteiras de variadas disciplinas envolvidas no projecto e concepção dos edifícios modernos, sejam estes para fins industriais, comerciais ou até mesmo residenciais. É por isso de extrema importância que este tema seja visto como um todo, obrigando os engenheiros das diversas especialidades (civil, electrotécnica, instrumentação, tecnologias de informação, entre outras) a falarem amiúde entre si, de forma a tomarem conhecimento das necessidades das instalações pelas quais são responsáveis.

De um modo geral, um sistema de terra necessita dar resposta a três requisitos fundamentais:

- *Segurança*: condução das correntes de defeito da forma mais directa, rápida e eficiente para o solo, sem que surjam tensões de passo ou toque intoleráveis;
- *Protecção e funcionalidade de equipamentos*: protecção dos equipamentos electrónicos permitindo a sua interligação com uma baixa impedância e assim prevenindo o aparecimento de perturbações que interfiram com o seu correcto funcionamento;
- *Protecção contra descargas atmosféricas e curto-circuitos*: protecção das pessoas que estejam a ocupar o espaço, protecção contra danos directos tais como incêndios ou explosões derivados da queda directa de raios e sobreaquecimentos devidos a elevadas correntes de curto-circuito.

Apesar de os requisitos para cada um dos aspectos mencionados anteriormente serem, regra geral, especificados em separado, a sua implementação requer uma abordagem integrada dos sistemas envolvidos.

### 2.2. Ligação à Terra de um Sistema

Uma ligação de terra consiste em ligar electricamente e de modo propositado um sistema físico (eléctrico, electrónico ou um corpo metálico) ao solo. Este sistema compõe-se

essencialmente por três componentes, a saber: as ligações eléctricas que ligam um ponto do sistema aos eléctrodos, os eléctrodos propriamente ditos (qualquer corpo metálico enterrado no solo) e a terra que envolve os eléctrodos [7].

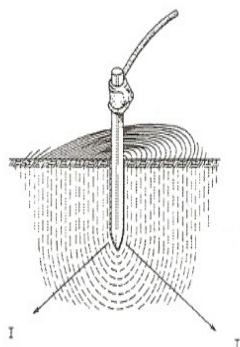


Figura 2.1 – Constituição de uma ligação à terra [7]

Os eléctrodos de terra podem ter configurações muito diversificadas. Existem algumas configurações típicas para os eléctrodos, onde se podem encontrar [7] [18]:

- *Eléctrodos de Terra de Superfície* sob a forma de fita ou cabo colocados horizontalmente em linha recta ou em anel;
- *Eléctrodos de Estaca Vertical* de comprimento suficiente para atravessarem camadas de solo com condutividades diferentes, usadas principalmente quando as camadas mais profundas do solo possuem menor resistividade;
- *Eléctrodos em Malha Reticulada*, normalmente construídos como uma grelha posicionada horizontalmente enterrada a pouca profundidade abaixo da superfície;
- *Eléctrodos de Fundação*, que são as partes metálicas das fundações embutidas em betão, que se encontram em contacto com a terra numa grande área;

De um modo geral, uma ligação à terra apresenta uma resistência, uma indutância e uma capacitância, cada qual influenciando na condução da corrente para a terra, e que normalmente se designa por Impedância de Terra, ou seja, a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente eléctrica através dos eléctrodos e expressa quantitativamente pela relação entre a tensão aplicada à terra e a corrente resultante [7] [24].

A figura seguinte representa, de um modo simplificado, uma ligação à terra através de um circuito equivalente, de forma a explicar a origem da sua configuração.

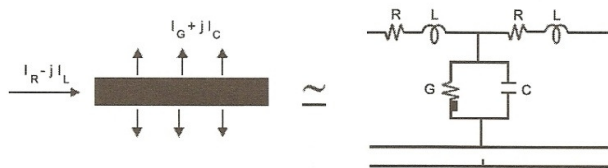


Figura 2.2 – Componentes de corrente no solo e respectivo circuito equivalente [7]

A corrente que flui pelo eléctrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o seu restante comprimento. Nesta última parcela, a corrente longitudinal, observam-se perdas internas e estabelece-se um campo magnético na região em torno dos caminhos de corrente no seu interior e exterior. O circuito equivalente respectivo pode traduzir-se por uma resistência e uma bobine em série.

Por outro lado, o campo eléctrico no solo (com resistividade  $\rho$  e permissividade  $\epsilon$ ) determina o fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A relação entre tais correntes não depende da geometria dos eléctrodos mas sim da relação  $\sigma/\omega\epsilon$ , onde  $\sigma$  representa a condutividade do solo e  $\omega$  a frequência angular. A energia associada ao fluxo dessas correntes transversais pode ser representada por uma condutância e um condensador colocados em paralelo no circuito equivalente [7] [24].

Todavia, para a generalidade das aplicações, não é feita referência à impedância de terra mas sim à sua resistência, uma vez que os efeitos reactivos são muito reduzidos e por isso desprezáveis.

## 2.3. Funções dos Sistemas de Terra e Requisitos Fundamentais

As funções essenciais de um sistema de terra são [7] [16] [22]:

- Protecção de pessoas e bens;
- Terra de Serviço em sistemas eléctricos de potência;
- Referência de potencial nulo em equipamentos electrónicos de elevada sensibilidade;
- Protecção contra Descargas Atmosféricas.

A Terra de Protecção permite a interligação de todas as partes metálicas que possam ser tocadas por pessoas ou animais. Em circunstâncias normais, não existe potencial nestes pontos, mas numa situação de falha, pode surgir uma tensão perigosa pela passagem de uma corrente de defeito. Uma das funções do sistema de terra é a protecção da vida contra a ocorrência de choques eléctricos, sendo o requisito fundamental que o potencial da terra “ $V_E$ ”,

perante uma corrente “ $i_E$ ” de curto-circuito, não exceda a tensão de contacto permitida “ $V_F$ ”, isto é:  $V_E \leq V_F$ .

A Terra de Serviço refere-se à necessidade de um dado sistema eléctrico necessitar de uma ligação ao sistema de terra de forma a assegurar o seu correcto funcionamento. Um exemplo típico é a ligação à terra do neutro de um transformador.

Com a Terra de Protecção contra Descargas Atmosféricas, pretende-se que esta conduza a corrente da descarga para o solo, da forma mais directa possível. As correntes de descarga podem atingir valores de pico “ $i_p$ ” muito elevados e provocar tensões elevadas nos eléctrodos, “ $V_E$ ”, que podem ser calculadas pela expressão [7] [16] [24]:

$$V_E \approx \sqrt{\left(L \frac{di_p}{dt}\right)^2 + (i_p R_p)^2} \quad (2.1)$$

em que L representa a indutância do eléctrodo de terra e condutores de descarga e  $R_p$  a resistência de impulso do eléctrodo de terra.

Dependendo da corrente de descarga e das propriedades do sistema de terra, o potencial  $V_E$  pode atingir valores muito elevados, da ordem das centenas ou milhares de kilovolt. Devido ao facto de estes valores serem muito mais elevados que as tensões de funcionamento, uma descarga atmosférica provoca sobretensões induzidas na rede, pelo que deve ser implementada a protecção total das instalações contra estas descargas através da instalação de pára-raios e descarregadores de sobretensão adequados [7] [24].

## 2.4. Ligação dos Sistemas à Terra

Existem três filosofias de ligação dos sistemas à terra, a saber [7]:

- Sistema Isolado – não existe qualquer ligação entre o sistema eléctrico e o solo. O nível máximo das sobretensões possíveis neste tipo de sistema é elevado e torna-se bastante difícil a localização de eventuais defeitos à terra. Este sistema é muito utilizado nas aplicações cuja tónica é a continuidade de serviço (hospitais, laboratórios, etc...);
- Sistema Solidamente Aterrado – o sistema eléctrico é ligado directamente à terra em diversos pontos, procurando obter-se um caminho de mínima impedância à passagem de uma eventual corrente de defeito para o solo. Esta é a forma mais habitual de ligação dos sistemas à terra;
- Sistema Ligado por Impedância – nesta situação, é propositadamente colocada uma impedância (resistência ou reactância) entre o sistema eléctrico e a terra, que procura limitar o valor da corrente de defeito, sem eliminar totalmente a ligação do sistema ao solo. O avanço da tecnologia digital na detecção de baixas correntes de defeito tem feito com que este tipo de ligação tenha cada vez mais adeptos.

## 2.5. Conceitos Importantes nas Ligações de Terra

### 2.5.1. *Tensão de Contacto*

É a diferença de potencial que pode aparecer acidentalmente devido a um defeito de isolamento entre duas partes metálicas acessíveis simultaneamente [7] [22].

### 2.5.2. *Tensão de Toque*

Representa a diferença de potencial entre mãos e pés que surge quando se toca num determinado equipamento com um defeito de isolamento. Em consequência, poderá surgir uma corrente eléctrica que fluirá pelo braço, tronco e pernas, cuja duração e intensidade poderão provocar falha cardíaca, queimaduras ou outras lesões graves ao organismo [7] [22].

### 2.5.3. *Tensão de Passo*

Devido ao fluxo de corrente de defeito que escoar para o solo, ocorre uma elevação do potencial em torno do eléctrodo de terra, cujo ponto máximo se encontra junto ao eléctrodo de terra. Se uma pessoa ou animal se encontrar de pé, em qualquer ponto dentro da região onde ocorre essa distribuição de potencial, entre os seus pés haverá uma diferença de potencial, a qual é geralmente definida para uma distância entre pés de um metro [7] [22].

### 2.5.4. *Potencial Transferido*

O termo Potencial Transferido refere-se à tensão em relação à terra que irá surgir nos condutores em consequência do aumento do potencial de terra junto ao eléctrodo do sistema eléctrico. Este aumento de potencial ocorre devido às correntes de defeito que fluem pela terra em direcção à fonte. Este potencial de transferência é tanto menor quanto menor for a resistência ou impedância de terra [7] [22].

### 2.5.5. *Ruído*

O ruído ocorre quando existe uma diferença de potencial entre a ligação de terra à qual a fonte de energia se refere e a ligação de terra à qual o equipamento se refere. Os equipamentos electrónicos são aqueles que normalmente apresentam uma maior sensibilidade em relação ao ruído e que pode afectar tanto os sinais analógicos como os digitais, uma vez que utilizam a ligação de terra como referência de potencial zero [7].

## 2.6. Resistência de Terra em condições de Baixa Frequência

Os Sistemas de Terra são, regra geral, dimensionados para fazer face a correntes de curto-circuito com frequências próximas da frequência fundamental dos sistemas de alimentação.

Nesta perspectiva, o sistema a montante deixa de ver a ligação de terra como uma impedância complexa, passando a vê-la como uma simples resistência, designada por Resistência de Terra “ $R_T$ ” [7] [18] [24].

A Resistência de Terra é directamente proporcional à resistividade do solo em que os eléctrodos estão colocados. A constante de proporcionalidade K diz apenas respeito aos efeitos geométricos dos eléctrodos (dimensão e forma) [7] [18] [24]:

$$R_T = K \cdot \rho \quad (2.2)$$

### 2.6.1. Resistividade do Solo

A resistividade do solo “ $\rho$ ” define-se como a resistência eléctrica “R” medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (1m de aresta “l” e 1m<sup>2</sup> de área das faces “A”) preenchido com este solo, medida em “ $\Omega \cdot m$ ” [7] [18] [24] [25]:

$$\rho = R \frac{A}{l} [\Omega \cdot m] \quad (2.3)$$

O solo, no seu estado natural, é um mau condutor de electricidade. Se estiver totalmente seco (ou gelado), comporta-se como um isolante. A sua estrutura não é homogénea mas sim formada por camadas de materiais diferentes.

Seguidamente são indicados os principais parâmetros que influenciam o valor da resistividade do solo [7] [18] [25]:

- *Tipos de Solo*
- *Humidade do Solo*
- *Concentração de Sais*
- *Temperatura do Solo*
- *Compacticidade do Solo*
- *Granulometria do Solo*
- *Estrutura Geológica e Estratificação do Solo*

### 2.6.2. Resistência de Terra

Para condições de baixa frequência, baixas correntes e valores baixos de resistividade do



solo, os efeitos capacitivo e de ionização do solo são desprezáveis e este comporta-se como se de uma resistência linear se tratasse.

Em aplicações de alta frequência, como as telecomunicações por exemplo, torna-se necessário considerar o efeito capacitivo, principalmente para solos com elevada resistividade, e também a influência da reactância indutiva ao longo dos condutores e eléctrodos. Estes efeitos estão também presentes para as ondas de corrente e tensão de impulso, como as associadas a descargas atmosféricas, cujas frequências são bastante elevadas [7] [24].

### 2.5.2.1. Natureza da Resistência de Terra

A resistência oferecida à passagem da corrente eléctrica através de um eléctrodo para o solo possui três componentes principais [7] [18] [25]:

- Resistência interna do eléctrodo e das ligações eléctricas ao mesmo;
- Resistência de contacto entre a superfície do eléctrodo e a terra adjacente ao mesmo;
- Resistência do solo circundante, componente fundamental e de maior peso na determinação do valor de resistência de terra e que depende, basicamente, da sua resistividade.

De modo a considerar-se a influência da resistência do solo circundante ao eléctrodo, pode recorrer-se a um modelo simplificado. Neste modelo, o solo é aproximado por um conjunto de fatias hemisféricas com a mesma espessura e resistividade, cuja área aumenta à medida que se afasta do eléctrodo ( $A=2\pi r^2$ ) [7] [18]:

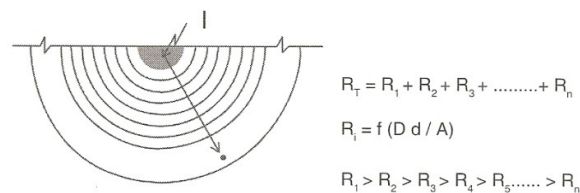


Figura 2.3 – Modelo de solo homogéneo aproximado por fatias [7]

Cada fatia de solo apresenta um certo valor de resistência. A soma da resistência de todas as fatias até uma distância infinita representa o valor da resistência de terra. Como a espessura é a mesma para todas as fatias, quanto mais próxima do eléctrodo está uma fatia, maior é a sua resistência, pois a área atravessada pela corrente é menor. Por outro lado, quando a distância ao eléctrodo é muito significativa, a área da fatia em consideração torna-se tão ampla que a sua resistência se torna desprezável. Assim, quem determina efectivamente o valor da resistência de terra é a terra mais próxima do eléctrodo, sendo muito reduzida a contribuição das fatias de solo mais distantes [7] [18] [25].

A corrente "I" que se distribui radialmente e que atravessa cada fatia em direcção ao infinito, é a mesma. Deste modo, a queda de tensão que ocorre em cada fatia vai decrescendo à

medida que se afasta do eléctrodo, pois a resistência da fatia também decresce, devido ao aumento da área atravessada. Admitindo-se que no infinito o potencial será nulo, o valor do potencial aumenta à medida que se aproxima do eléctrodo. Percebe-se ainda que tal crescimento do potencial possui derivada crescente, pois a contribuição em queda de tensão para a composição do potencial é tanto maior quanto mais próxima do eléctrodo se encontra a fatia [7] [18] [25].

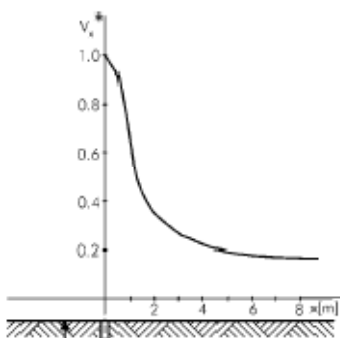


Figura 2.4 – Perfil de potencial no solo [16]

### 2.5.2.2. Determinação da Resistência de Terra

A resistência de terra é definida pela relação entre a elevação de potencial referida ao infinito e a corrente que a gerou. O desenvolvimento que a seguir se apresenta ilustra a determinação desta resistência para o caso de um eléctrodo hemisférico.

Em primeiro lugar, calcula-se o potencial num ponto x qualquer do solo, a uma distância  $r_x$  da fonte de corrente, devido ao fluxo dessa corrente em direcção ao infinito [7] [16] [18]:

$$V_{r_x} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r_x} I \quad (2.4)$$

Posteriormente, quando se considera o ponto x sobre a superfície do eléctrodo, pode determinar-se a elevação de potencial do eléctrodo em relação ao infinito, devido ao fluxo de corrente I [7] [16] [18]:

$$V_{electrodo} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r_{electrodo}} I \quad (2.5)$$

A partir de aqui, determina-se o valor da resistência de terra [7] [16] [18]:

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi \cdot r_{electrodo}} \quad (2.6)$$

A área da secção do solo atravessada pela corrente vai aumentando à medida que se afasta do eléctrodo, resultando na diminuição da resistência dessas secções e consequentemente, em menores quedas de tensão por unidade de comprimento. Deste modo, a maior parte da elevação de potencial fica localizada na zona circundante ao eléctrodo [7] [18]:

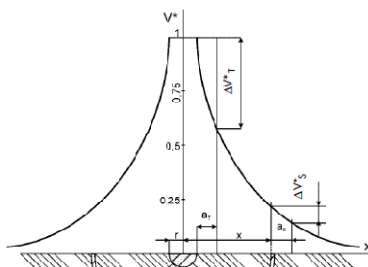


Figura 2.5 – Distribuição de potencial na superfície do solo [18]

A determinação da resistência de terra de outras configurações segue o mesmo procedimento básico. A diferença é devida à forma de distribuição da densidade de corrente no solo, que depende da forma e dimensão do eléctrodo. A integração do mesmo no percurso entre um ponto infinitamente afastado e a superfície do eléctrodo origina o potencial. Dividindo-se esse potencial pela corrente, obtém-se o valor da resistência [7] [18].

No anexo II apresentam-se expressões para o cálculo da resistência de terra de algumas configurações típicas.

### 2.5.2.3. Valores de Resistência de Terra para Conjuntos de Eléctrodos

Embora o aumento do número de eléctrodos resulte numa redução da resistência, tal redução não obedece a uma relação proporcional com o aumento do comprimento dos mesmos, devido a um efeito de acoplamento resistivo entre eles. Quando dois eléctrodos são colocados próximos no solo, passa a existir uma interferência entre ambos que influencia na capacidade de dispersão da corrente do conjunto. Esta influência denomina-se por resistência mútua entre eléctrodos e é definida como a elevação de potencial de um eléctrodo em relação à terra no infinito, devido ao fluxo de uma corrente unitária no outro eléctrodo [7] [24].

Ao determinar-se a resistência de terra de um sistema composto por vários eléctrodos (como uma malha, p. ex.), deve ter-se em linha de conta o paralelismo existente entre as resistências dos eléctrodos e também o efeito da resistência mútua entre eles.

No anexo III apresentam-se alguns dos tipos mais comuns de tipologias de conjunto de eléctrodos.

### 2.5.2.4. Técnicas mais comuns de melhoria da Resistência de Terra

Muitas vezes, após a instalação de um sistema de terra, chega-se à conclusão, através de medições, que o valor da resistência de terra obtido é superior ao desejado. Existem algumas técnicas que podem ser aplicadas com o intuito de diminuir este valor. Tais técnicas actuam, de um modo geral, modificando a resistividade do solo nas proximidades do eléctrodo, alterando as condições dos eléctrodos ou pela conjugação das duas [7] [16] [25]:

*- Aumento do número de eléctrodos em paralelo*

Por este meio consegue-se diminuir bastante a resistência. Contudo, os eléctrodos deverão estar suficientemente afastados para minimizar os efeitos da resistência mútua. A partir de um certo número de eléctrodos em paralelo, a resistência passa a diminuir pouco face ao número de eléctrodos necessários, deixando esta técnica de ser eficaz;

*- Aprofundamento dos eléctrodos*

Este método é bastante usado na aplicação de hastes verticais. Se o solo apresentar camadas mais profundas de menor resistividade, esta técnica revela-se bastante eficaz. A partir de um certo ponto, o valor da diminuição da resistência de terra deixa de ser relevante para grandes aumentos de profundidade;

*- Aumento da secção do eléctrodo*

Observa-se uma diminuição da resistência de terra para um aumento da área de secção do eléctrodo. Contudo, o que ocorre na maioria das vezes é o dimensionamento da secção do eléctrodo por questões de resistência mecânica ou em função da sua capacidade de condução de corrente, pois a variação no valor de resistência por variação da secção é pequena;

*- Tratamento químico do solo*

A adição de sais no solo circundante aos eléctrodos diminui a sua resistividade e, por conseguinte, o valor da resistência de terra. É necessário especial atenção para que os sais não entrem em contacto directo com os eléctrodos de forma a evitar a sua corrosão, bem como manter um controlo periódico do valor de resistência de terra que pode aumentar com o tempo devido à dispersão dos sais pelo solo;

*- Tratamento físico do solo*

Este método consiste em envolver o eléctrodo com material condutor, ampliando a sua superfície de contacto com o solo.

# Capítulo 3

## Estudo da legislação em vigor aplicável aos sistemas de terra

### 3.1. Introdução

Pretende-se, neste capítulo, aferir o estado da arte e a legislação em vigor aplicável no dimensionamento e construção dos sistemas de terra, efectuando para tal, uma breve análise das “Regras técnicas das instalações eléctricas de baixa tensão (RTIEBT)”, que contém o normativo aplicável ao sector eléctrico e dos manuais “ITED – Prescrições e especificações técnicas das infra-estruturas de telecomunicações em edifícios” e “ITUR – Infra-estruturas de telecomunicações em loteamentos, urbanizações e conjunto de edifícios”, aplicáveis ao sector das telecomunicações.

### 3.2. Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão (RTIEBT)

#### 3.2.1. Tipos de Sistemas de Distribuição

Os sistemas de distribuição devem ser determinados em função dos tipos de esquemas dos condutores activos e das ligações à terra.

##### 3.2.1.1. Esquema TN em Corrente Alternada

O esquema TN tem um ponto ligado directamente à terra, sendo as massas da instalação ligadas a esse ponto por meio de condutores de protecção. De acordo com a disposição do condutor neutro e do condutor de protecção, consideram-se os três tipos de esquemas TN seguintes:

- i. esquema TN-S: onde um condutor de protecção (distinto do condutor neutro) é utilizado na totalidade do esquema;
- ii. esquema TN-C-S: onde as funções de neutro e de protecção estão combinadas num único condutor numa parte do esquema;
- iii. esquema TN-C: onde as funções de neutro e de protecção estão combinadas num único condutor na totalidade do esquema.

### *3.2.1.2. Esquema TT em Corrente Alternada*

O esquema TT tem um ponto da alimentação ligado directamente à terra, sendo as massas da instalação eléctrica ligadas a eléctrodos de terra electricamente distintos do eléctrodo de terra da alimentação.

### *3.2.1.3. Esquema IT em corrente alternada*

No esquema IT, todas as partes activas estão isoladas da terra ou um ponto destas está ligado à terra por meio de uma impedância, sendo as massas da instalação eléctrica ligadas à terra.

## *3.2.2. Ligações à Terra e Condutores de Protecção*

### *3.2.2.1. Terras*

O valor da resistência do eléctrodo de terra deve satisfazer às condições de protecção e de serviço da instalação eléctrica. De acordo com as regras da instalação, as medidas de ligação à terra podem, por razões de protecção ou por razões funcionais, ser utilizadas em conjunto ou separadamente. A selecção e a instalação dos equipamentos que garantem a ligação à terra devem ser tais que:

- i. o valor de resistência dessa ligação esteja de acordo com as regras de protecção e de funcionamento da instalação e que permaneça dessa forma ao longo do tempo;
- ii. as correntes de defeito à terra e as correntes de fuga possam circular, sem perigo, nomeadamente no que respeita às solicitações térmicas, termomecânicas e electromecânicas;
- iii. a solidez e a protecção mecânica sejam garantidas em função das condições previstas de influências externas.

Devem ser tomadas as medidas adequadas contra os riscos de danos noutras partes metálicas, em consequência de fenómenos de corrosão electrolítica.

### *3.2.2.2. Eléctrodos de terra*

Podem ser usados como eléctrodos de terra os elementos metálicos seguintes:

- i. tubos, varetas ou perfilados;
- ii. fitas, varões ou cabos nus;
- iii. chapas;
- iv. anéis (de fitas ou de cabos nus) colocados nas fundações dos edifícios;
- v. armaduras do betão imerso no solo;
- vi. canalizações (metálicas) de água;

- vii. outras estruturas enterradas apropriadas.

Em regra, a melhor solução para os eléctrodos de terra, consiste na utilização de anéis colocados na base das fundações dos edifícios, estabelecidos durante a construção destes, que têm como principais vantagens não necessitarem de trabalhos suplementares de aterro, serem estabelecidos a uma profundidade que, em regra, permite salvaguardar as situações resultantes das variações climáticas sazonais, garantir um bom contacto com o solo, utilizar ao máximo, a área dos edifícios e reduzir, ao mínimo, o valor da resistência de terra que pode ser obtida com essa área, poderem ser usados desde o início da construção como eléctrodo de terra para as instalações do estaleiro.

É aconselhável ligar ao conjunto "eléctrodo de terra - condutores de equipotencialidade" os elementos condutores da construção, as armaduras do betão armado e os outros elementos metálicos, por forma a diminuir o valor global da resistência de terra das massas e a garantir uma equipotencialidade de todas as massas e de todos os elementos condutores simultaneamente acessíveis.

O tipo e a profundidade de enterramento dos eléctrodos de terra devem ser tais que a secagem do terreno e o gelo não provoquem o aumento do valor da resistência de terra para além do valor prescrito.

Os materiais usados e a execução dos eléctrodos de terra devem ser tais que estes suportem os danos mecânicos resultantes da corrosão.

Na concepção da ligação à terra deve-se atender ao eventual aumento da resistência devido a fenómenos de corrosão.

As canalizações metálicas de distribuição de água apenas podem ser usadas como eléctrodos de terra desde que haja acordo prévio com o distribuidor de água e sejam tomadas as medidas adequadas para que o responsável pela exploração da instalação eléctrica seja informado de quaisquer modificações introduzidas nessas canalizações de água.

Não devem ser usadas como eléctrodos de terra com fins de protecção as canalizações metálicas afectas a outros usos.

As bainhas exteriores de chumbo e os outros revestimentos exteriores metálicos dos cabos, que não sejam susceptíveis de sofrerem deteriorações devidas à corrosão excessiva, podem ser usadas como eléctrodos de terra.

### *3.2.2.3. Condutores de Terra*

Os condutores de terra devem satisfazer ao indicado em 3.2.3.5.

A ligação entre o condutor de terra e o eléctrodo de terra deve ser cuidadosamente executada e deve ser electricamente adequada. Quando forem utilizados ligadores, estes não devem danificar os elementos constituintes do eléctrodo de terra (por exemplo, os tubos) nem os condutores de terra.

### 3.2.2.4. Terminal Principal de Terra

Todas as instalações eléctricas devem ter um terminal principal de terra, ao qual devem ser ligados:

- i. os condutores de terra;
- ii. os condutores de protecção;
- iii. os condutores das ligações equipotenciais principais;
- iv. os condutores de ligação à terra funcional, se necessário.

Em edifícios de grande extensão ou com instalações complexas (em regra, com eléctrodo de terra em anel), pode ser conveniente, por questões funcionais, instalar mais do que um terminal principal de terra.

Nos condutores de terra, deve ser previsto um dispositivo instalado em local acessível e que permita a medição do valor da resistência do eléctrodo de terra das massas, podendo esse dispositivo estar associado ao terminal principal de terra. Este dispositivo deve ser, apenas, desmontável por meio de ferramenta e deve ser mecanicamente seguro e garantir a continuidade eléctrica das ligações à terra.

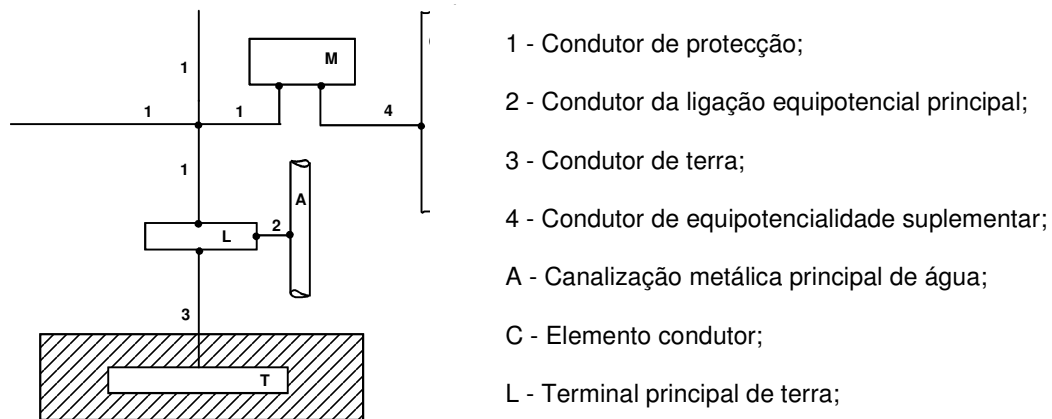


Figura 3.1 – Ligações à terra e condutores de protecção [1]

### 3.2.3. Condutores de Protecção

#### 3.2.3.1. Tipos de Condutores de Protecção

Podem ser usados como condutores de protecção:

- i. condutores pertencentes a cabos multicondutores;
- ii. condutores isolados ou nus que tenham o mesmo invólucro (conduta, calha, etc.) que os condutores activos;
- iii. condutores separados, nus ou isolados;
- iv. revestimentos metálicos (armaduras, écrans, bainhas, etc.) de alguns cabos.



- v. condutas metálicas ou outros invólucros metálicos para os condutores;
- vi. certos elementos condutores.

Quando a instalação tiver conjuntos de invólucros montados em fábrica ou canalizações pré-fabricadas, com invólucros metálicos, estes invólucros podem ser usados como condutores de protecção se forem satisfeitas, simultaneamente, as condições seguintes:

- i. tiverem continuidade eléctrica realizada por forma a estar protegida contra as deteriorações mecânicas, químicas e electroquímicas;
- ii. tiverem condutibilidade não inferior à que resultaria da aplicação das condições indicadas;
- iii. tiverem possibilidade de ligação de outros condutores de protecção em pontos de derivação predeterminados.

As bainhas metálicas (nuas ou isoladas) de certas canalizações, nomeadamente, as bainhas exteriores dos cabos com isolamento mineral, e certas condutas ou calhas, metálicas (de tipos em estudo), podem ser usadas como condutores de protecção dos circuitos correspondentes se satisfizerem, simultaneamente, às condições indicadas. As restantes condutas não podem ser usadas como condutores de protecção.

Podem ser usados como condutores de protecção os elementos condutores que satisfaçam, simultaneamente, às condições seguintes:

- i. terem continuidade eléctrica (garantida por construção ou por ligações apropriadas), por forma a estarem protegidos contra as deteriorações mecânicas, químicas e electroquímicas;
- ii. terem condutibilidade não inferior à que resultaria da aplicação das condições indicadas;
- iii. serem desmontáveis apenas se estiverem previstas medidas que compensem esse facto;
- iv. serem estudados e, se necessário, adaptados a esse fim.

Não podem ser usados como condutores de protecção as condutas de gás.

### *3.2.4. Conservação e Continuidade Eléctrica dos Condutores de Protecção*

Os condutores de protecção devem ser convenientemente protegidos contra as deteriorações mecânicas e químicas e contra os esforços electrodinâmicos.

As ligações, com excepção das realizadas em caixas cheias com materiais de enchimento ou em uniões moldadas, devem ser acessíveis para efeitos de verificação e de ensaio.

Nos condutores de protecção não devem ser inseridos quaisquer aparelhos, podendo, para a realização de ensaios, serem utilizadas ligações desmontáveis por meio de ferramentas.

Quando se utilizarem dispositivos destinados ao controlo da continuidade das ligações à terra, os eventuais enrolamentos desses dispositivos não devem ser inseridos nos condutores

de protecção.

As massas dos equipamentos a serem ligadas aos condutores de protecção não devem ser ligadas em série num circuito de protecção.

### *3.2.5. Ligações à Terra por razões de Protecção*

#### *3.2.5.1. Condutores de protecção associados a dispositivos de protecção contra as sobreintensidades*

Quando se utilizarem, na protecção contra os choques eléctricos, os dispositivos de protecção contra as sobreintensidades, os condutores de protecção devem ser incorporados na mesma canalização que os condutores activos ou colocados na sua proximidade imediata.

#### *3.2.5.2. Eléctrodos de terra e condutores de protecção para dispositivos de protecção sensíveis à tensão de defeito*

O eléctrodo de terra auxiliar deve ser electricamente independente de quaisquer outros elementos metálicos ligados à terra (tais como, os elementos metálicos da construção, as condutas metálicas e as bainhas metálicas de cabos), considerando-se satisfeita esta regra se a distância entre o eléctrodo de terra auxiliar e os referidos elementos não for inferior a um valor especificado (valor em estudo).

A ligação ao eléctrodo de terra auxiliar deve ser isolada, por forma a evitar os contactos com o condutor de protecção, com os elementos que lhe estiverem ligados ou com elementos condutores que possam estar (ou estejam de facto) em contacto com aqueles.

O condutor de protecção apenas deve ser ligado às massas dos equipamentos eléctricos cuja alimentação deva ser interrompida em consequência do funcionamento, em caso de defeito, do dispositivo de protecção.

### *3.2.6. Ligações à terra por razões funcionais*

As ligações à terra por razões funcionais devem ser realizadas por forma a garantir o funcionamento correcto do equipamento e a permitir um funcionamento correcto e fiável da instalação.

#### *3.2.7. Ligações à terra por razões combinadas de protecção e funcionais*

Quando a ligação à terra for feita, simultaneamente, por razões de protecção e por razões funcionais, devem-se-lhe aplicar fundamentalmente as regras relativas às medidas de

protecção.

### *3.2.7.1. Condutores PEN*

No esquema TN, quando, nas instalações fixas, o condutor de protecção tiver uma secção não inferior a 10 mm<sup>2</sup>, se de cobre, ou a 16 mm<sup>2</sup>, se de alumínio, as funções de condutor de protecção e de condutor de neutro podem ser combinadas desde que a parte da instalação comum não esteja localizada a jusante de um dispositivo diferencial.

No entanto, a secção de um condutor PEN pode ser reduzida a 4 mm<sup>2</sup> desde que o cabo seja do tipo concêntrico obedecendo à respectiva Norma e que as ligações que garantem a continuidade sejam duplicadas em todos os pontos de ligação no percurso do condutor periférico. O condutor PEN concêntrico deve ser utilizado a partir do transformador e deve ser limitado às instalações que utilizem acessórios adequados a este tipo de cabo.

O condutor PEN deve ser isolado para a tensão mais elevada susceptível de lhe ser aplicada, por forma a evitar as correntes vagabundas.

Se, num ponto qualquer da instalação, for feita a separação entre o condutor neutro e o condutor de protecção, não é permitido ligá-los de novo a jusante desse ponto. No local da separação devem existir terminais ou barras separados para o condutor neutro e para o condutor de protecção. O condutor PEN deve ser ligado ao terminal ou à barra destinada ao condutor de protecção.

## *3.2.8. Condutores de Equipotencialidade*

### *3.2.8.1. Condutor de equipotencialidade principal*

O condutor de equipotencialidade principal deve ter uma secção não inferior a metade da secção do condutor de protecção de maior secção existente na instalação, com o mínimo de 6mm<sup>2</sup>, podendo, contudo esse valor ser limitado a 25mm<sup>2</sup>, se de cobre, ou a uma secção equivalente, se de outro metal.

### *3.2.8.2. Condutores de ligação equipotencial suplementar*

Quando duas massas forem interligadas por meio de condutores de equipotencialidade suplementar, a secção desses condutores não deve ser inferior à menor das secções dos condutores de protecção ligados a essas massas.

No caso de condutores de equipotencialidade suplementar que interliguem uma massa com um elemento condutor, a sua secção não deve ser inferior a metade da secção do condutor de protecção ligado a essa massa.

Pode ser realizada uma ligação equipotencial suplementar por meio de elementos condutores não desmontáveis (tais como os vigamentos metálicos), por meio de condutores

suplementares ou ainda pela combinação destes dois tipos de elementos condutores.

Quando as canalizações de água no interior do edifício forem utilizadas para a ligação à terra ou como condutores de protecção, os contadores de água devem ser curto-circuitados por meio de um condutor de secção apropriada à sua função de condutor de protecção, de condutor de equipotencialidade ou de condutor de ligação à terra funcional, consoante o caso.

### *3.2.9. Ligação à Terra de Instalações de Equipamentos de Tratamento da Informação*

As regras particulares indicadas na presente parte das Regras Técnicas aplicam-se à ligação entre os equipamentos de tratamento da informação e às instalações fixas dos edifícios, quando o referido equipamento:

- i. tiver uma corrente de fuga de valor superior aos limites indicados na Norma EN 60950;
- ii. satisfizer às regras indicadas na Norma EN 60950.

Estas regras aplicam-se às instalações situadas a jusante do ponto de ligação do equipamento podendo, também, aplicar-se a instalações que não sejam de tratamento da informação desde que tenham correntes de fuga de valor elevado em consequência do cumprimento das regras de anti-parasitagem (como, por exemplo, os equipamentos de comando industrial e de telecomunicações).

#### *3.2.9.1. Definições*

##### ***Equipamento de tratamento da informação***

Equipamento eléctrico que, separadamente ou agrupado em sistemas, acumula, trata e memoriza dados. A introdução e a restituição dos dados podem, eventualmente, fazer-se por meios electrónicos.

##### ***Terra sem ruído***

Ligação à terra na qual o nível das interferências transmitidas a partir de fontes externas não causa defeitos de funcionamento inaceitáveis no equipamento de tratamento da informação ou em equipamento análogo que lhe esteja ligado.

##### ***Corrente de fuga elevada***

Corrente de fuga à terra cujo valor é superior ao limite especificado e medido de acordo com o indicado na Norma EN 60950, para os equipamentos ligados.

#### *3.2.9.2. Terras sem ruído*

As massas dos equipamentos de tratamento da informação devem ser ligadas ao terminal

principal de terra.

Esta regra aplica-se também aos invólucros metálicos dos equipamentos da classe II ou da classe III e aos circuitos de tensão reduzida funcional TRF, que, por razões funcionais, tenham necessidade de serem ligadas à terra.

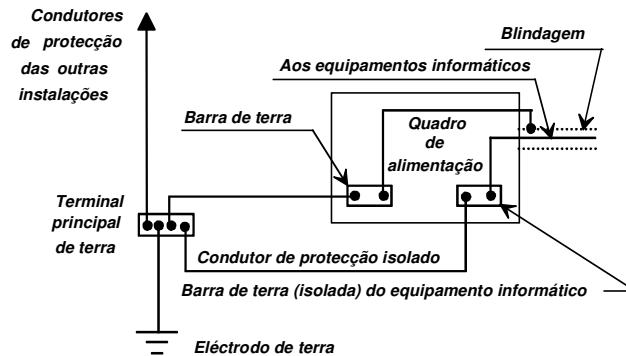


Figura 3.2 – Ligações à terra nas instalações de equipamentos de tratamento da informação [1]

Nos casos excepcionais, em que as regras de segurança indicadas forem verificadas mas em que o nível de ruído no terminal principal de terra da instalação não puder ser reduzido a um nível aceitável, a instalação tem de ser tratada como um caso especial.

As medidas de ligação à terra a utilizar devem conferir o mesmo nível de protecção que o conferido pelas regras indicadas nas presentes Regras Técnicas e essas medidas devem:

- i. garantir uma protecção adequada contra as sobreintensidades;
- ii. evitar o aparecimento de tensões de contacto excessivas no equipamento e garantir a equipotencialidade entre os equipamentos, os elementos condutores vizinhos e os outros equipamentos eléctricos, nas condições normais e nas condições de defeito;
- iii. cumprir as regras relativas às eventuais correntes de fuga elevadas e não invalidarem as restantes regras indicadas nas presentes Regras Técnicas.

### 3.2.10. Ligação à Terra dos Descarregadores de Sobretensão das Instalações Telefónicas

Os descarregadores de sobretensão das instalações telefónicas podem ser ligados aos eléctrodos de terra das massas das instalações eléctricas desde que sejam respeitadas simultaneamente as seguintes condições:

- i. a resistência do eléctrodo (apropriada ao valor da corrente de funcionamento diferencial estipulada) seja compatível com as condições exigidas para a ligação à terra dos descarregadores de sobretensão das instalações telefónicas.
- ii. o condutor de ligação à terra dos descarregadores de sobretensão das instalações telefónicas seja ligado directamente ao terminal principal de

terra do edifício por meio de um condutor que não seja identificado pela cor verde-amarela (esta interdição destina-se a evitar que este condutor possa ser utilizado como condutor de protecção das massas da instalação eléctrica).

Se as características e as disposições do eléctrodo de terras das massas da instalação eléctrica não forem adequadas às correntes resultantes de uma descarga atmosférica, deve ser utilizado um eléctrodo de terra especial para os descarregadores de sobretensão das instalações telefónicas, como pode ser o caso dos eléctrodos que não sejam anéis de fundação dos edifícios.

Os dois eléctrodos de terra devem, neste caso, ser interligados por um condutor de equipotencialidade de secção não inferior a  $6\text{mm}^2$ , se de cobre, ou de secção equivalente, se de outro material, identificado como condutor de protecção pela cor verde-amarela.

Quando for necessário estabelecer o eléctrodo de terra das massas numa instalação já existente, não é permitido usar, para esse fim, os eléctrodos de terra já existentes destinados à ligação à terra dos descarregadores de sobretensão das instalações telefónicas, devendo o eléctrodo satisfazer às condições expressas nas presentes Regras Técnicas.

### **3.3. Sistemas de Terra em Infra-estruturas de Telecomunicações (ITED e ITUR)**

#### *3.3.1. Manual ITED - Prescrições e Especificações Técnicas das Infra-estruturas de Telecomunicações em Edifícios*

##### *3.3.1.1. Constituição dos Eléctrodos de Terra*

A ligação entre os condutores e a terra é efectuada através dos designados eléctrodos de terra. Quanto às propriedades eléctricas de uma ligação à terra dependem, essencialmente, dos seguintes parâmetros:

- i. Impedância da terra;
- ii. Configuração do eléctrodo de terra.

Em circuitos de corrente alternada, deve ser considerada a impedância de terra, que é a impedância entre o sistema de terras e a terra de referência para uma determinada frequência de funcionamento. A reactância do sistema de terras é a reactância do condutor de terra e as partes metálicas do eléctrodo de terra. A baixas frequências, esta reactância é desprezável quando comparada com a resistência de terra.

A resistência de terra depende da profundidade a que o eléctrodo se encontra enterrado.

Este fenómeno deve-se ao facto do conteúdo da humidade do terreno ser mais estável, e em maior quantidade, nas camadas mais profundas do terreno. As camadas mais próximas da superfície são mais sensíveis às variações das estações do ano e podem inclusive sofrer a influência das geadas. A Figura seguinte apresenta a variação da resistência de terra para um eléctrodo do tipo barra. Através desta figura é possível verificar que a resistência de terra reduz com o aumento de profundidade do eléctrodo.

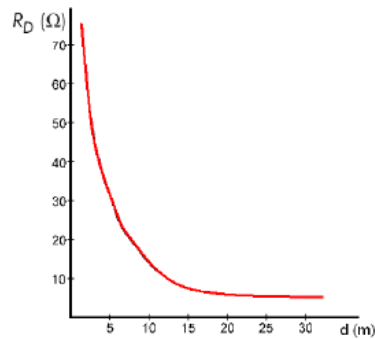


Figura 3.3 – Exemplo da resistência de dissipação de um eléctrodo de terra constituído por uma barra longitudinal, progressivamente crescente em função da profundidade [2]

Existem diversos tipos de eléctrodos de terra, nomeadamente:

- i. Eléctrodos simples (cabos nus, varetas, varões, tubos, chapas e perfis);
- ii. Combinado (associação de diversos tipos simples);
- iii. Malha (fitas metálicas formando uma malha);
- iv. Fundações (pilares metálicos interligados por estruturas metálicas).

Os eléctrodos de terra do tipo simples são colocados debaixo da superfície da terra a uma determinada profundidade. A sua colocação pode ser horizontal (linear, anel, etc.) ou vertical.



Figura 3.4 – Eléctrodos de terra do tipo simples [2]

Na colocação dos eléctrodos de terra simples devem ser observadas as regras seguintes:

➤ *Eléctrodos horizontais:*

Devem ser colocados debaixo da superfície da terra a uma profundidade de 0,6m a 1m. O comprimento dos elementos do eléctrodo deve ser muito superior à profundidade de enterramento. Com o aumento da profundidade do enterramento do eléctrodo diminuem as tensões de passo e as tensões de toque. Com o aumento da profundidade do enterramento do

eléctrodo também diminui, embora ligeiramente, a resistência de contacto com a terra.

➤ *Eléctrodos verticais:*

O topo do eléctrodo deve estar enterrado debaixo do solo, a uma profundidade típica de 1m. O comprimento típico situa-se entre os 3m e os 30m.

Normalmente devem ser montados através de um conjunto de varetas de comprimento de 1,5m, colocados sucessivamente uns sobre os outros.

Neste tipo de eléctrodos a resistência de terra é mais estável quando comparada com os horizontais. Contudo, apresenta uma distribuição do potencial de superfície desfavorável.

Uma vez que este sistema necessita de uma superfície de terra muito reduzida, é recomendado para as áreas com elevada densidade de edificações ou nas superfícies cobertas por asfalto ou cimento.

Os eléctrodos de terra do tipo combinado são constituídos por eléctrodos do tipo horizontal e vertical. Este tipo de eléctrodos permite reduzir a resistência à terra e melhorar a distribuição do potencial de superfície. O efeito de proximidade das várias varetas permite reduzir a resistência.

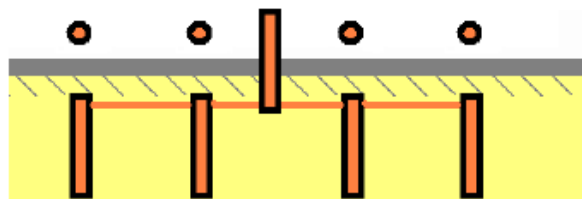


Figura 3.5 – Eléctrodos de terra do tipo combinado [2]

Os eléctrodos do tipo malha são constituídos por um conjunto de varetas ou fitas, colocadas horizontalmente no solo. Com a utilização das fitas obtém-se uma maior superfície de contacto com a terra, conseguindo-se deste modo uma terra mais adequada às altas frequências. Este tipo de eléctrodos favorece a distribuição de potencial, no entanto, é mais susceptível às mudanças da constituição do solo.

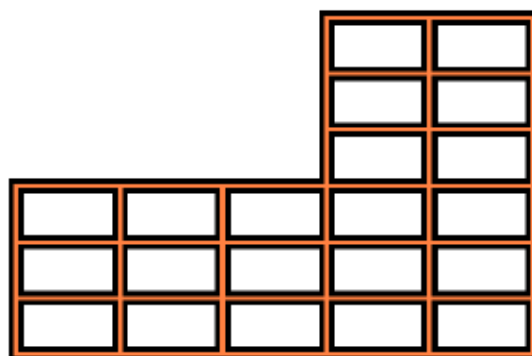


Figura 3.6 – Eléctrodos de terra do tipo malha [2]

O eléctrodo do tipo fundação é constituído por troços de metal condutor embebidos no cimento das fundações do edifício. Uma das vantagens deste tipo de eléctrodo é que as partes



metálicas não necessitam de uma protecção adicional anticorrosiva. Este tipo de eléctrodo é considerado como uma solução muito pratica para o sistema de terras do edifício.

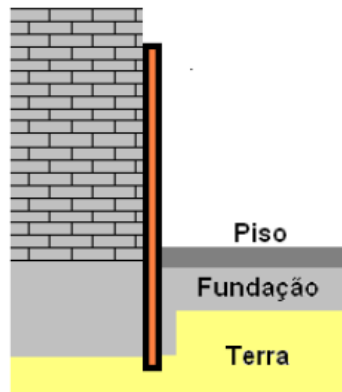


Figura 3.7 – Eléctrodos de terra do tipo fundação [2]

### 3.3.1.2. Considerações para a minimização dos efeitos das fontes de perturbação electromagnética

Existem diversas fontes de perturbação electromagnética que podem afectar a operação dos sistemas eléctricos e dos sistemas de telecomunicações. Os sistemas de terra são de extrema importância para a atenuação destes efeitos. Durante a fase inicial da construção de um edifício, a sua implementação não é dispendiosa. Contudo, uma vez o edifício construído, a substituição ou modificação do sistema de terras torna-se normalmente muito dispendiosa.

Das diferentes fontes de perturbação electromagnética, as descargas atmosféricas constituem uma das mais importantes que podem afectar os sistemas de telecomunicações. Deste modo, para a protecção dos sistemas de telecomunicações contra descargas atmosféricas deve efectuar-se uma análise dos seus efeitos.

Têm sido realizados diversos trabalhos experimentais no sentido de se poderem caracterizar as descargas de origem atmosférica. Através destes trabalhos verificou-se que as correntes originadas pelas descargas atmosféricas apresentam uma forma de onda do tipo impulso, conforme se pode verificar pela figura seguinte:

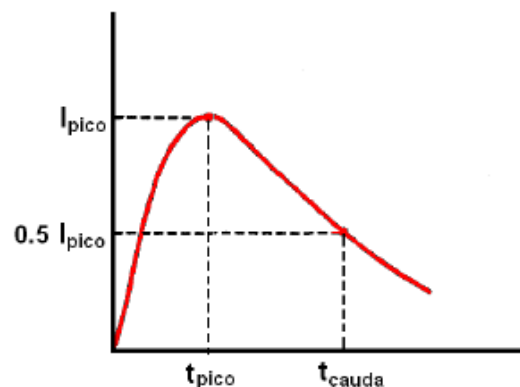


Figura 3.8 – Forma de onda típica de uma descarga atmosférica [2]

Os valores obtidos com origem no Comité da Protecção de Descargas Atmosféricas da Comissão Electrotécnica Internacional (*Technical Committee 81 de IEC*) demonstram que 50% das descargas atmosféricas apresentam uma corrente de pico de 33kA e 5% uma corrente superior a 85kA. A taxa de crescimento da corrente pode atingir valores superiores 65kA/ $\mu$ s. O rápido crescimento da corrente pode dar origem a uma tensão muito elevada, que poderá ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$V \approx \sqrt{\left(L \frac{di}{dt}\right)^2 + (Ri)^2} \quad (3.1)$$

onde  $L$  é a indutância dos condutores de descarga e do eléctrodo de terra [H] e  $R$  é a resistência do eléctrodo de terra [ $\Omega$ ].

Dependendo da corrente de descarga e das propriedades do sistema de terras, a tensão gerada por uma descarga atmosférica pode atingir valores muito elevados, por vezes muito superiores a tensão da rede eléctrica. Deste modo, para garantir a protecção das instalações é necessário utilizar descarregadores de sobretensões e uma estrutura de ligação a terra.

Outro dos factores que pode afectar os sistemas de telecomunicações é a tensão de referência dos respectivos equipamentos. Para que um equipamento, interligado com outros, possa funcionar correctamente, a tensão de referência deve ser estável para todos os equipamentos.

Para se obter uma tensão de referência estável, é necessário garantir que a impedância do circuito de terras seja muito reduzida. Deste modo, procura-se que a totalidade do sistema de terras, representado pelo condutor de terra, seja basicamente uma superfície equipotencial. Na pratica e extremamente difícil obter uma diferença de potencial entre todos os pontos de terra igual a zero. Contudo, essa diferença deve ser suficientemente baixa para não causar mau funcionamento ao equipamento.

A interferência electromagnética é outro dos fenómenos que pode afectar os sistemas de telecomunicações. Normalmente, os equipamentos eléctricos e electrónicos produzem alguma radiação electromagnética. Contudo, muitos destes equipamentos também são sensíveis a esses mesmos efeitos.

Um dos factores que permite atenuar esse fenómeno é o sistema de terras utilizado. No sentido de reduzir este tipo de interferência sobre os equipamentos é necessário reduzir as malhas de terra.

É de salientar que os cabos ligados às estruturas metálicas permitem que essas estruturas se comportem como condutores de terra paralelos. Assim, através desta ligação é possível reduzir a impedância da malha formada pelo cabo e pela rede de terras.

No passado foram utilizados sistemas de terra separados, tais como, terra para a rede eléctrica, terra para as descargas atmosféricas e terra de sinal. No entanto, o sistema de terras separado foi abandonado e as normas internacionais prescrevem agora um sistema de terras único.

### 3.3.1.3. Sistema de terras recomendado

Recomenda-se, para a rede de terras das telecomunicações, associada a rede de terras da instalação eléctrica do edifício, a seguinte estrutura:

- i. *Anel de terras*, constituído por cabo de cobre nu (secção  $\geq 25 \text{ mm}^2$ ) ou fita de aço galvanizado (secção  $\geq 100 \text{ mm}^2$ ), enterrado ao nível das fundações do edifício, e que será ligado a intervalos regulares à estrutura metálica das sapatas de modo a obter um anel com uma impedância de terra não superior a  $1\Omega$ . Esta ligação à estrutura metálica das sapatas deve ser efectuada de modo a que a distância máxima entre ligações não exceda os 10 m;
- ii. *Vareta, tubo ou chapa*, para interligação com o anel de terras através de soldadura aluminotérmica. As dimensões mínimas (diâmetro x comprimento) destes eléctrodos devem ser:
  - Varetas em cobre ou aço,  $\Phi 15\text{mm} \times 2\text{m}$ ;
  - Tubos em cobre  $\Phi 20\text{mm} \times 2\text{m}$ ;
  - Tubos em aço  $\Phi 55\text{mm} \times 2\text{m}$ .
  - As chapas em aço devem ter dimensões mínimas de espessura de 2mm e superfície de contacto com a terra de  $1\text{m}^2$ .
  - Em cada um dos vértices das fundações do edifício poderá ser colocado um eléctrodo deste tipo.
  - Para além do pressuposto anterior, em edifícios ocupando áreas do solo relativamente elevadas (superiores a  $1000\text{m}^2$ ), devem ser colocados eléctrodos ligados nos pontos correspondentes às ligações à estrutura metálica das sapatas das fundações.
- iii. *Condutores de terra*, com origem no eléctrodo, que ligarão ao terminal principal de terra do edifício, através de um ligador amovível, e deste aos barramentos de terra dos armários de telecomunicações. As secções mínimas serão de  $25\text{mm}^2$  se em cobre. Na ligação das prumadas ao anel poderá ser colocado um eléctrodo de terra do tipo vareta, ligado por soldadura aluminotérmica;
- iv. *Condutores de protecção e de equipotencialidade*, a sua secção não será inferior a  $6 \text{ mm}^2$ , se de cobre, ou de secção equivalente, se de outro material. Destinam-se a efectuar a ligação dos condutores de terra à estrutura do edifício. Esta ligação poderá existir em cada piso do edifício. Efectuam também a ligação entre a rede de terras das telecomunicações com a rede geral de terra do edifício.

### 3.3.1.4. Protecção contra descargas atmosféricas

Esta protecção será efectuada através do sistema de pára-raios do edifício caso exista. No caso de tal não existir, os sistemas de antenas devem estar preparados para este tipo de protecção. Nesta situação, as antenas devem ser ligadas directamente ao anel de terras. Neste ponto de ligação poderá ser colocado um eléctrodo de terra do tipo vareta, ligado por soldadura

aluminotérmica.

Na figura seguinte é apresentado um esquema geral do sistema de terras para um edifício. O regulamento de instalações eléctricas não considera algumas das propostas aqui referidas para o sistema de terras das telecomunicações, nomeadamente:

- Não é obrigatório, em moradias, uma malha de terras;
- Nos edifícios é previsto uma malha de terras. No entanto, não se entra em consideração com a resistividade do terreno, pelo que a ligação à estrutura não é condicionada por este fenómeno. Assim, não é obrigatória a ligação de um eléctrodo de terra em cada um dos vértices das fundações do edifício, também não se considerando obrigatória a ligação a todos os pilares do edifício.

### 3.3.1.5. Esquema Eléctrico e de Terras

A figura seguinte representa um edifício ITED, ao nível do esquema eléctrico e de terras, que deve ser seguido como uma obrigatoriedade mínima:

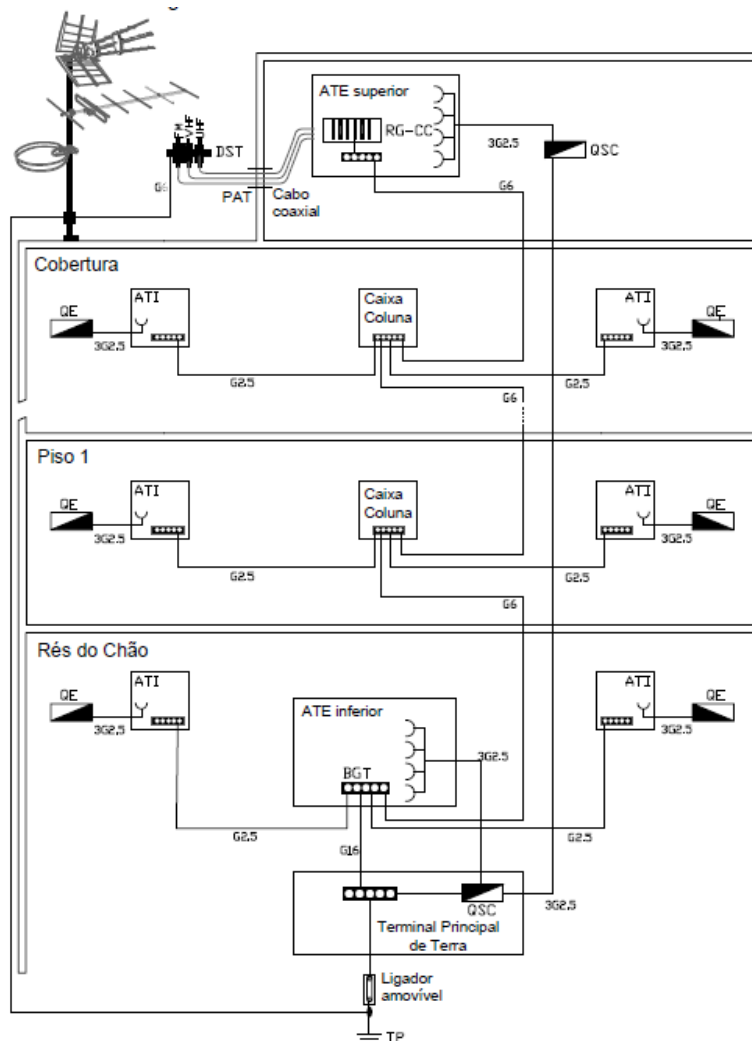


Figura 3.9 – Esquema eléctrico e de terras [2]

## LEGENDA DO ESQUEMA ELÉCTRICO E DE TERRAS

Gx – Condutor de protecção com “x” mm<sup>2</sup> de secção;

3G 2,5 – 3 condutores de cobre de 2,5mm<sup>2</sup> de secção cada, sendo um de protecção;

DST – Descarregador de sobretensão para cabos coaxiais;

BGT – Barramento Geral de Terras das ITED;

QE – Quadro de Entrada de fogo;

■●●●● - Terminal de equipotencialidade;

☒ - Tomada de corrente a 230V/50Hz;

ATE – Armário de Telecomunicações de Edifício;

ATI – Armário de Telecomunicações Individual.

## NOTAS

- i. A ligação do mastro das antenas à terra é obrigatória, de acordo com o estabelecido no ponto 559.4 das Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão (RTIEBT), aprovadas pela Portaria n.º 949-A/2006.
- ii. O DST garante uma tensão de escorvamento para a terra, inferior à tensão admitida para o equipamento instalado no ATE-superior. A ligação do DST à terra deve ser efectuada directamente ao mastro das antenas.
- iii. O ligador amovível das ITED (normalmente entre o BGT e o TPT) é facultativo.
- iv. O circuito eléctrico dos ATE será proveniente dos quadros de serviços comuns, quando existam.
- v. O dimensionamento dos condutores de protecção é entendido como mínimo.

### *3.3.2. Manual ITUR – Infra-estruturas de Telecomunicações em Loteamentos, Urbanizações e Conjunto de Edifícios*

#### *3.3.2.1. Terras de Protecção*

De forma a garantir a segurança de pessoas e bens e qualidade de serviço, as redes de telecomunicações devem garantir um escoamento fácil de todas as perturbações a nível eléctrico e radioeléctrico.

De uma forma abrangente, devem ser seguidas as indicações constantes das Normas Europeias aplicáveis, nomeadamente as constantes da EN50310 (aplicação de terras equipotenciais com equipamentos de tecnologia de informação) e as previstas nas Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão (RTIEBT), aprovadas pela Portaria n.º 949-A/2006 de 11 de Setembro, as quais estabelecem alguns conceitos e critérios para a definição das redes de terras de protecção e de equipotencialização das instalações eléctricas em edifícios, com vista à protecção das pessoas contra contactos indirectos.

As condições a seguir referidas devem ser consideradas como recomendações mínimas, sem prejuízo da adopção de outras soluções tecnicamente mais evoluídas.

Nessas Regras são estabelecidas condições que conduzem à definição de critérios para ligação à terra de outro tipo de instalações, como é o caso das instalações de equipamentos informáticos. Indirectamente, podem estabelecer-se critérios para a ligação à terra das Instalações de Telecomunicações.

As ITUR devem estar protegidas contra perturbações provocadas por descargas eléctricas atmosféricas, assim como contra a influência electromagnética das linhas de transporte de energia de alta e baixa tensão, que podem provocar o aparecimento de potenciais estranhos, quer por contacto directo, quer por indução.

A protecção é conseguida com a colocação de órgãos de protecção, também objecto de referência nas RTIEBT, e o modo de ligação à terra dos descarregadores de sobretensão, que têm como objectivo interromper o circuito e escoar para a terra as correntes provocadas pelas descargas eléctricas.

A protecção de pessoas contra contactos indirectos é assegurada pela ligação à terra de todas as massas metálicas normalmente sem tensão, embora associada à utilização de aparelhos de corte automático sensíveis à corrente diferencial – residual, instalados nos quadros.

A ligação das massas à terra deve ser efectuada pelo condutor de protecção incluído em todas as canalizações e ligado ao circuito geral de terras através dos quadros. Os condutores de protecção serão sempre de cor verde/amarelo, do tipo dos condutores activos e de secção igual à dos condutores de neutro.

Será ainda de evidenciar que as Regras Técnicas também apresentam critérios para a ligação à terra dos equipamentos de tratamento da informação com as instalações fixas dos edifícios. De algum modo estes critérios podem ser condicionantes para a ligação à terra dos equipamentos de telecomunicações.

Estas regras aplicam-se às instalações situadas a jusante do ponto de ligação do equipamento, podendo, também, aplicar-se a instalações que não sejam de tratamento da informação desde que tenham correntes de fuga de valor elevado (estas, ao circularem nos condutores de protecção e nos eléctrodos de terra, podem ocasionar aquecimentos excessivos, degradações locais ou perturbações) em consequência do cumprimento das regras de anti-parasitagem (por exemplo, os equipamentos de telecomunicações).

As Regras Técnicas apresentam também critérios para terras sem ruído. Consideram nomeadamente que uma terra sem ruído é uma ligação à terra na qual o nível das interferências transmitidas a partir de fontes externas não causa defeitos de funcionamento inaceitáveis no equipamento de tratamento da informação ou em equipamento análogo.

A ligação entre os condutores e a terra é efectuada através dos designados eléctrodos de terra.

Quanto às propriedades eléctricas de uma ligação à terra, dependem essencialmente dos seguintes parâmetros:

- Impedância da terra;
- Configuração do eléctrodo de terra.

Em circuitos de corrente alternada, deve ser considerada a impedância de terra, que é a impedância entre o sistema de terras e a terra de referência para uma determinada frequência de funcionamento. A reactância do sistema de terras é a reactância do condutor de terra e as partes metálicas do eléctrodo de terra. A baixas frequências esta reactância é desprezável quando comparada com a resistência de terra.

A resistência de terra depende da profundidade a que o eléctrodo se encontra enterrado. Este fenómeno deve-se ao facto do conteúdo da humidade do terreno ser mais estável, e em maior quantidade, nas camadas mais profundas do terreno. As camadas mais próximas da superfície são mais sensíveis às variações das estações do ano e podem inclusive sofrer a influência das geadas.

### *3.3.2.2. Protecção das instalações*

As ITUR terão obrigatoriamente um sistema de terras de protecção, de acordo com a regulamentação em vigor, que incluirá todos os armários, dispositivos activos e passivos, e sistemas de antenas, os quais devem ser dimensionados e calculados, constando do projecto.

Numa infra-estrutura de telecomunicações de urbanização, deve existir um “sistema de terras de urbanização”, em que todos os sistemas de terra independentes de cada edifício poderão encontrar-se interligados entre si, provocando entre eles pequenas diferenças de potencial, que podem ser solucionadas com um isolamento galvânico, segundo o estipulado na norma EN 60728-11:2005 (correspondência à IEC 60728-11). Devem ainda ser estudadas, projectadas e seguidas outras soluções, presentes na norma anterior, que garantam a protecção das instalações de telecomunicações.

Será ainda importante acrescentar que as malhas de terra dos cabos devem estar ligadas ao sistema de terras implementado, favorecendo o escoamento de correntes parasitas de fuga, para a terra. Os sistemas de distribuição devem sempre ser projectados e construídos de maneira a que não existam tensões prejudiciais ou perigosas na parte condutora externa de qualquer cabo ou em partes metálicas externas de qualquer equipamento mesmo que seja passivo, devendo ser seguidas também as directrizes CEM para instalação IEC/TR 61000-5-2:1997 e a IEC 60364-5-54:2002 (diferentes sistemas de terras em instalações eléctricas de edifícios).

As recomendações para a instalação de cabos e dispositivos, com ligação à terra, que estão previstas na directriz IEC 61000-5-2, são importantes para o controlo de RF em sistemas de telecomunicações. Com a evolução tecnológica e sofisticação constante dos sistemas electrónicos, é sempre necessário efectuar estudos e implementações de soluções, para controlar o ambiente electromagnético envolvente.





# Capítulo 4

## Imunidade ao Ruído e Compatibilidade Electromagnética

### 4.1. Introdução

Nos últimos anos, a Comunidade Europeia tem despertado para a crescente importância da compatibilidade electromagnética dos equipamentos ou EMC [11]. De acordo com a directiva europeia EU 89/336/EEC e sucessivas emendas, qualquer instalação eléctrica terá que respeitar os standards internacionais de emissão e susceptibilidade às EMC. Para que seja possível implementar uma instalação eléctrica fiável, rentável e compatível com os requisitos básicos de EMC, torna-se necessário efectuar uma análise prévia e elaborar um plano de compatibilidade electromagnética ainda na fase embrionária do projecto. A execução da instalação eléctrica deverá ser supervisionada e executada por pessoal devidamente qualificado em EMC.

Neste capítulo pretende-se dar uma perspectiva dos conceitos físicos subjacentes às interferências electromagnéticas e dos princípios que levam à sua mitigação, com vista ao entendimento das medidas necessárias para se conseguir uma instalação certificada em EMC.

### 4.2. Perturbações Electromagnéticas

Os problemas de EMI (“Electromagnetic Interference” – Interferência Electromagnética) acontecem geralmente quando um equipamento altamente sensível a ruídos eléctricos estranhos (vulgo “interferências”), é colocado num ambiente sujeito a perturbações electromagnéticas. Como tornar os equipamentos imunes a elas é difícil e as fontes de ruído são numerosas e inevitáveis, torna-se necessário ter em linha de conta a distribuição física dos equipamentos sensíveis bem como os cabos de interligação de aparelhos e fontes. Este é o principal meio de assegurar um grau satisfatório de imunidade para a maioria dos equipamentos electrónicos de elevada sensibilidade (EES), também vulgarmente conhecidos como equipamentos de tecnologias de informação (TI) [12] [14].

De um modo geral, todos os componentes de um edifício ou instalação que sejam condutores de cargas eléctricas, desempenham um papel nas interferências electromagnéticas, quer como fontes da interferência quer como receptores. Para além dos condutores eléctricos instalados, existem também tubagens metálicas, a estrutura de ferro do próprio edifício, fachadas metálicas, entre outros, que também são parte relevante do sistema

de EMC.

Uma instalação inadequada em conjunto com uma instalação do tipo TN-C, permite que os sinais de ruído se espalhem por todo o edifício e até mesmo a instalações adjacentes.

De acordo com a directiva de EMC da União Europeia 89/336/EEC (corrigida pelas directivas 91/263/EEC, 92/31/EEC, 93/68/EEC e 93/97/EEC), qualquer instalação eléctrica em edifícios tem que respeitar os standards internacionais de susceptibilidade e emissão de EMI. As entidades responsáveis pelo desenho, projecto e construção, passam também a ser responsáveis pela compatibilidade electromagnética do edifício, de acordo com o descrito na directiva [11].

Há dois modos de interferência electromagnética [14]:

- i. conduzida por cabos, fios, etc.,
- ii. irradiada por indução estacionária (campos magnéticos ou electrostáticos) e/ou ondas electromagnéticas (rádio).

As intensidades das perturbações electromagnéticas são dadas por quatro parâmetros: dois para o modo de condução (Volt e Ampére) e dois para o modo de radiação: V/m (Campo Eléctrico [E]) e A/m (Campo Magnético [H]).

A frequência é um dos principais factores que caracterizam uma onda electromagnética e em EMC, as soluções adoptadas são diferentes conforme se trate de baixa ou de alta frequência.

#### 4.2.1. *Perturbações Conduzidas*

A energia eléctrica, seja a desejada, seja na forma de ruído, propaga-se ao longo dos condutores de dois modos, o modo diferencial e o modo comum [13] [14].

##### ***Modo diferencial***

O modo diferencial é o modo normal de condução de corrente por um circuito de dois condutores. Este modo é também conhecido como modo normal, modo simétrico ou modo série.

No modo diferencial, a corrente flui por um condutor em exacta oposição de fase à corrente do outro condutor, ou seja, circulam em direcções opostas em cada instante. A tensão é medida entre os dois condutores.

As perturbações no modo diferencial são as mais severas em baixas frequências ( $\leq 9\text{kHz}$ ). Nas redes eléctricas de potência, são numerosas as perturbações de modo diferencial, podendo citar-se, entre outras, interrupções de curta ou longa duração, flutuações de tensão, “flicker”, instabilidade de fase, harmónicas e picos de tensão. O efeito de uma perturbação electromagnética depende largamente da sua duração. As permanentes ou mantidas afectam principalmente os aparelhos analógicos enquanto as de curta duração são mais perigosas para os aparelhos digitais.

### ***Modo comum***

O modo comum é essencialmente devido a perturbações e é também conhecido como modo paralelo, longitudinal ou assimétrico. As correntes de modo comum passam por todos os condutores de um cabo na mesma direcção. O percurso de retorno de tais correntes é pela terra ou pela blindagem dos cabos. Uma diferença de potencial em modo comum é medida entre as massas e o valor de potencial médio de todos os condutores do cabo do circuito em causa. Esse potencial pode estar presente sem que exista passagem de corrente.

As perturbações electromagnéticas podem acoplar-se a cabos no modo comum, particularmente em alta frequência, pois estes actuam como antenas.

### ***4.2.2. Perturbações por Condução em Baixa Frequência***

As perturbações em baixa frequência incluem todos os tipos de interferência cuja frequência se encontre abaixo dos 9kHz. O valor de 9kHz é um limite superior convencional, abaixo do qual os fenómenos eléctricos podem ser analisados em termos simples, usando as técnicas de circuitos eléctricos lineares baseados em indutâncias e capacitâncias. Por definição, uma perturbação em baixa frequência existe por um tempo relativamente "longo" (centenas de ms) e o seu nível de energia pode ser considerável e facilmente medido.

A impedância de um cabo em baixa frequência é praticamente equivalente à sua resistência. A indutância linear de um condutor de pequena secção para vários kHz ou em cabos de grandes secções para 50Hz é da ordem de  $1\mu\text{H/m}$  e a sua impedância aumenta linearmente com a frequência. Este facto é importante quando se consideram as harmónicas de frequência numa rede.

### ***4.2.3. "Flicker"***

Este fenómeno refere-se à existência de pequenas mas repetitivas quedas de tensão que são causadas por cargas elevadas que solicitam altas correntes por breves e repetidos períodos.

A impedância da rede é principalmente a do cabo e a do transformador AT/BT, sendo esta tão menor quanto maior for a potência (kVA) do transformador.

O "flicker" tem um efeito fisiológico desagradável para as pessoas que trabalham em ambientes com lâmpadas incandescentes, mas sem nenhum efeito sobre os aparelhos e circuitos electrónicos.

Os limites dos parâmetros padronizados para um medidor de "flicker" são descritos nas normas IEC 1000-3-3 e 1000-4-15.

### ***Cavas e flutuações da tensão***

Uma flutuação da tensão é uma mudança rápida da tensão da fonte não superior a  $\pm 10\%$  (geralmente o limite aceitável ao nível da distribuição) durante a operação normal.

Uma "cava" é uma brusca queda de tensão, causada principalmente pela manobra de cargas que no instante da ligação, requerem uma corrente maior que o valor normal nominal da rede. Estas "cavas" são transitórias, mas são mais severas que os classificados como "flicker". A sua duração varia de 10ms a aproximadamente 1s. A "cava" de tensão é geralmente devida a um curto-circuito em algum ponto do sistema na mesma rede. Quanto mais perto for o defeito, maior será a "cava".

### ***Desequilíbrios***

Para definir um sistema sinusoidal que esteja num estado não equilibrado, os valores de corrente e tensão em cada fase são considerados, no caso geral, como a soma de três vectores. Os três componentes de cada fase são conhecidos como:

- componente de sequência positiva;
- componente de sequência negativa;
- componente de sequência zero.

Um sistema equilibrado é composto somente de componentes de sequência positiva. Um sistema assimétrico é dito desequilibrado e nele estão presentes as componentes de sequências positiva, negativa e zero.

Uma causa comum de desequilíbrio é a de diferentes níveis de carga nas três fases. Cargas desequilibradas resultam em tensões desequilibradas aplicadas a motores trifásicos. Ocorrem então perdas crescentes nos rotores dos motores e no caso de desequilíbrios muito grandes, os motores podem ser destruídos por sobreaquecimento.

### ***Variações de frequência***

A rede eléctrica europeia comporta-se, na prática, como um sistema infinito em relação à estabilidade da frequência, no qual mudanças de carga não afectam sensivelmente a frequência. Em pequenos sistemas privados e especialmente quando se trata de geradores, onde a inércia é pequena e o sistema de regulação é geralmente rudimentar, a frequência irá variar (dentro de limites razoáveis) cada vez que a carga mudar abruptamente.

### ***Harmónicas***

Qualquer carga não linear solicita à rede uma corrente não sinusoidal. Uma corrente deste tipo possui uma componente sinusoidal com a frequência da rede que é conhecida como componente fundamental, em conjunto com outras componentes sinusoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental. Estas últimas são conhecidas como componentes harmónicas.

A distorção da forma de onda da tensão é onerosa para os equipamentos. Ela é definida em percentagem e é proporcional ao conteúdo harmónico da corrente e à impedância da rede. Um efeito da distorção é aumentar as perdas por aquecimento dos motores. Num sistema de processamento de dados, pode ser considerada normal uma distorção de 5%. Todos os componentes electrónicos podem suportar uma distorção global de 8%.

#### ***4.2.4. Perturbações de Alta frequência por indução***

Em alta frequência, os fenómenos de interferência tornam-se consideravelmente mais complicados. Os condutores de potência tornam-se antenas eficientes e os campos electromagnéticos, ainda que fracos, produzem interferência considerável, todos os cabos são afectados e alguns podem mesmo entrar em ressonância. Os fenómenos em alta frequência são severos, frequentes e difíceis de analisar. A indutância dos cabos é um problema mais importante em alta frequência do que em baixa frequência. A indutância linear de uma estrutura condutora praticamente recta é de aproximadamente  $1\mu\text{H/m}$ .

Além disso, uma interligação de comprimento que exceda  $1/30$  de um comprimento de onda, torna-se praticamente incapaz de assegurar uma equipotencialidade entre duas massas interligadas. Acima de  $1/30$ , um condutor torna-se uma antena radiante mas, sendo radiante, ele deixa de se comportar como um condutor equipotencial.

##### ***Pulsos de Alta Frequência***

A gama de frequências que apresenta as maiores dificuldades, tanto na radiação como na protecção contra a energia radiada, encontra-se na banda de 30 a 300MHz. A maioria dos arcos eléctricos, faíscas e descargas electrostáticas geram pulsos que são conduzidos em modo comum e irradiados. O espectro de radiação cobre a banda de VHF mencionada acima.

A amplitude dos pulsos de corrente pode atingir dezenas de Ampère. Os circuitos digitais são particularmente sensíveis a esses pulsos. Um método altamente recomendável de conseguir uma protecção satisfatória e a compatibilidade electromagnética de uma instalação é respeitar a imunidade padronizada pela norma IEC 1000-4-4.

##### ***Perturbações mantidas (longa duração)***

Conversores de frequência, controladores de velocidade electrónicos, pontes de Graetz e escovas de motores com comutadores também geram perturbações de alta frequência em modo comum. O valor de pico dessas perturbações pode atingir e mesmo superar 1A.

Para fontes de grande interferência, é recomendado formar uma malha de interligações equipotenciais de todas as massas nas vizinhanças do equipamento perturbado, em particular, todas as condutas e calhas metálicas.

A propagação da energia eléctrica não é só confinada aos condutores. Ela pode ser feita no espaço, sem um material de suporte. Essa propagação é referida como de campos, ondas

electromagnéticas ou ainda, ondas Hertzianas. Elas têm uma componente “E” de campo eléctrico em V/m e uma componente “H” de campo magnético em A/m. Estes campos radiantes, quando encontram um condutor (que funciona como antena receptora), dão origem a pequenas forças electromotrizes e correntes no material condutor, ou seja, na forma de uma perturbação conduzida. É possível proteger os equipamentos contra estes campos por meio de uma gaiola de Faraday ou, frequentemente, por filtros passa-baixo.

#### *4.2.5. Campos Magnéticos de Baixa-Frequência*

Nas baixas frequências, só os campos magnéticos podem causar problemas. Seja impulsivo ou mantido, o campo “H” é geralmente produzido junto ao equipamento afectado. O campo magnético em baixa frequência não se propaga mas mantém-se nas proximidades da sua origem e a sua intensidade decresce rapidamente com a distância.

É muito difícil a blindagem magnética de um campo magnético de frequências inferiores a 10kHz. A solução mais fácil é colocar o equipamento afectado fora do alcance do campo perturbador. Usar uma blindagem com chapa grossa pode reduzir a intensidade do campo por um factor de ordem de 10.

#### *4.2.6. Campos Magnéticos de Alta Frequência*

Em altas frequências, os campos “E” e “H” formam ondas electromagnéticas indivisíveis no espaço.

Os transmissores de rádio têm potência radiante variando desde vários mW para os aparelhos de controlo via rádio, a vários MW de pico para os sistemas de radar.

Uma corrente de modo comum de alta frequência num cabo produz sempre uma onda radiada. O inverso também é verdadeiro, isto é, uma onda de alta frequência atingindo um cabo, produz neste uma corrente de modo comum.

O efeito de antena de cabos conduzindo correntes de alta frequência por acoplamento em modo comum constitui o principal problema em EMC.

### **4.3. Tipos de Acoplamentos Electromagnéticos**

Um modelo simplificado do mecanismo subjacente às interferências electromagnéticas, consiste numa fonte causadora da interferência, um mecanismo ou meio de acoplamento e o dispositivo afectado [11].

O acoplamento estabelece-se através da corrente quando condutores comuns de diferentes circuitos são partilhados pelos campos eléctrico, magnético ou electromagnético. Os receptores

da interferência poderão ser qualquer tipo de aparelhos ou qualquer parte da instalação eléctrica. Naturalmente que a totalidade das interações electromagnéticas entre as diversas instalações num mesmo edifício representam uma combinação deveras complexa destas interações elementares.

Adicionalmente, qualquer receptor de EMI pode também actuar como fonte e vice-versa.

Existem quatro tipos diferentes de EMI elementares:

- Acoplamento Impedante
- Acoplamento Indutivo
- Acoplamento Capacitivo
- Acoplamento Radiante

O fenómeno perturbador dominante em edifícios é devido ao acoplamento indutivo, seguido pelo capacitivo e pelo impedante. O acoplamento radiante, de um modo geral e até à data, não tem sido dominante, uma vez que as forças do respectivo campo se encontram abaixo dos valores máximos permitidos. No entanto, o aumento do uso de equipamentos de radiotransmissão pode levar a um incremento do fenómeno EMI derivado desta fonte no futuro.

### 4.3.1. Acoplamento Impedante

O acoplamento galvânico ocorre quando circuitos diferentes utilizam linhas comuns ou impedâncias de acoplamento. Isto acontece, por exemplo, quando circuitos diferentes utilizam a mesma fonte de tensão.

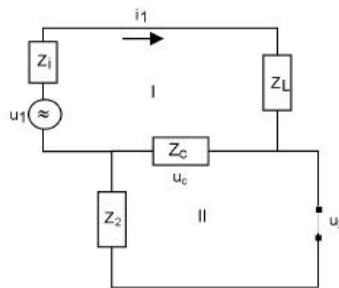


Figura 4.1 – Acoplamento Impedante [11]

O circuito I é parte integrante da rede de distribuição eléctrica e o circuito II parte da rede de transferência de dados. A tensão imposta em  $u_2$  devido à impedância comum de acoplamento  $Z_c = R_c + j\omega L_c$  para a menor  $Z_c \ll Z_i + Z_L$ , é dada por:

$$u_c = Z_c \cdot i_1 \approx \frac{u_1}{Z_i + Z_L} Z_c \quad (4.1)$$

A impedância da linha partilhada é composta pelos componentes resistivo e indutivo,  $Z_c(\omega) = R_c + j\omega L_c$ . Enquanto a componente resistiva do acoplamento mantém a mesma importância para todas as frequências, a parte indutiva aumenta a sua importância para altas

frequências.

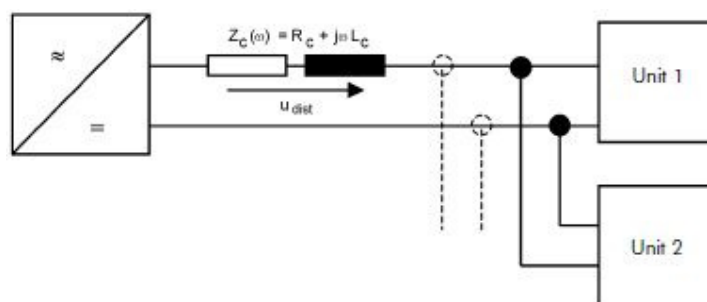


Figura 4.2 – Modelo Simplificado de Acoplamento Impedante [11]

A tensão de perturbação  $u_{dist}$ , que se desenvolve ao longo de  $Z_c$  é imposta no sinal do equipamento “Unit 2” e depende da corrente  $i(t)$  e da sua variação no tempo  $di(t)/dt$ . Num modelo simplificado, esta tensão de perturbação pode ser estimada por:

$$u_{dist} = u_{R,dist} + u_{L,dist} = R_c \cdot i(t) + L_c \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (4.2)$$

Se atribuirmos valores reais ao modelo: ( $l=2m$ ,  $L_c=1\mu H/m$ ,  $R_c=1\Omega$ ,  $i=1A$  e  $di/dt=1A/100ns$ ), obtém-se os seguintes valores para a perturbação:

$$u_{R,dist} = R_c \cdot i(t) = 1V \quad (4.3)$$

$$u_{L,dist} = L_c \cdot \frac{di(t)}{dt} = 20V \quad (4.4)$$

$$u_{dist} = u_{R,dist} + u_{L,dist} = 21V \quad (4.5)$$

Para altas frequências, a indutância própria das linhas desempenha o papel mais importante. Pelas leis de Kirchhoff, os sinais de perturbação podem espalhar-se por toda a instalação e até mesmo afectar instalações vizinhas. Para minimizar o acoplamento galvânico, é necessário evitar interligações entre sistemas independentes e, nos casos em que estas interligações forem imprescindíveis, manter a sua indutância própria o mais baixa possível.

### 4.3.2. Acoplamento Indutivo

Uma corrente externa  $i_1(t)$  a variar no tempo, produz um campo magnético  $B(t)$  que induz uma tensão perturbadora  $u_{dist}(t)$  num circuito vizinho. Num modelo de circuito equivalente, esta situação pode ser representada pelo acoplamento de ambos os circuitos através de uma indutância de acoplamento  $M$ . A tensão  $u_{dist}(t)$  dá origem a uma corrente de modo comum  $i_2(t)$ , que ela própria gera um campo magnético para enfraquecer o campo externo. A corrente  $i_2(t)$  é imposta às correntes do sistema perturbado e pode originar o mau funcionamento deste.

O acoplamento de campos magnéticos de sistemas diferentes pode ser modelado através de um circuito equivalente de indutâncias mútuas dos circuitos acoplados:



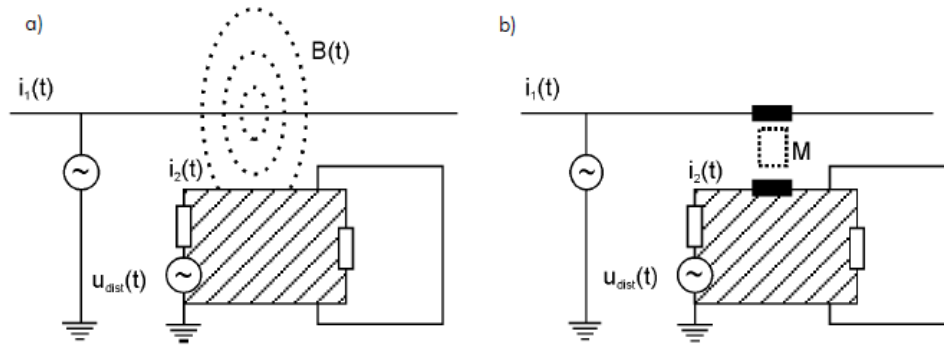


Figura 4.3 – Acoplamento Indutivo: a) Modelo de campo; b) Circuito equivalente [11]

A força do acoplamento depende, principalmente, de três parâmetros a saber: a força da corrente perturbadora, a distância à fonte e ao receptor e a frequência do campo. O sinal perturbador fica mais forte e significativo se as correntes dos circuitos externos forem fortes, se as correntes de uma linha de ida e retorno não estiverem balanceadas (como num sistema TN-C), se os circuitos estiverem muito próximos e cobrirem uma grande área ou se os sinais do circuito externo variarem rapidamente no tempo e, como tal, possuírem conteúdo de alta frequência.

No entanto, o acoplamento indutivo pode ser útil no controlo das perturbações. Se a instalação de caminhos de cabos e de cabos coaxiais for feita de modo adequado (ligações curtas de baixa impedância mesmo em altas frequências), o acoplamento indutivo pode resguardar os cabos de campos magnéticos externos, especialmente em altas frequências.

### ***Dependência geométrica do acoplamento indutivo***

A sensibilidade do acoplamento indutivo ao tipo de rede eléctrica e à geometria da instalação pode ser demonstrada pelo exemplo seguinte. Se considerarmos dois circuitos, uma linha única e uma linha de ida e retorno, e calcularmos a influência de ambos os sistemas num circuito, modelado por um anel rectangular à distância  $r$ :

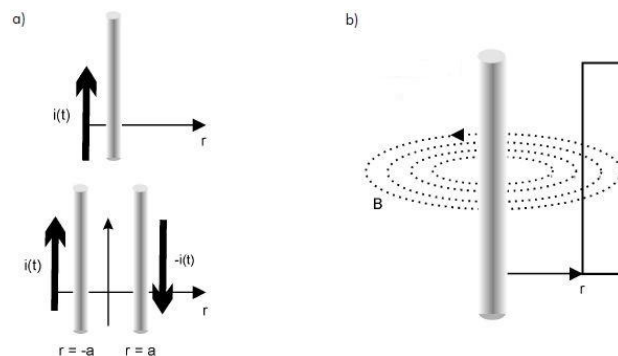


Figura 4.4 – a) Fontes do Campo Magnético; b) Circuito Eléctrico perturbado; [11]

O campo magnético para cada uma das configurações é dado por:

$$B_1(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i(t)}{r}, \quad B_2(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{2a \cdot i(t)}{(r-a)(r+a)} \quad (4.6)$$

em que

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{Vs}{Am} \right]$$

O campo magnético é proporcional à corrente  $i(t)$ . No entanto, enquanto o campo da linha simples decresce de modo inversamente proporcional à distância, o campo da linha de ida e retorno decresce de modo inversamente proporcional ao quadrado da distância para grandes distâncias. Isto leva a uma diferente dependência da distância do acoplamento para cada modelo da rede.

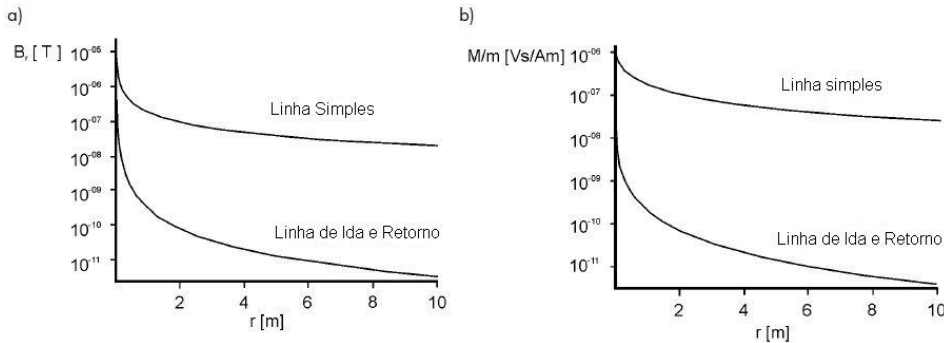


Figura 4.5 – a) Campo Magnético; b) Indutância de acoplamento por unidade de comprimento do anel rectangular; [11]

O campo magnético da linha balanceada de ida e retorno é de ordem de magnitude duas vezes inferior e cai mais depressa que o da linha simples. O mesmo se passa com a indutância de acoplamento. A dependência da indutância de acoplamento da área do anel é muito semelhante ao apresentado na figura 4.5 b).

Este exemplo permite tirar algumas ilações sobre regras básicas a adoptar numa instalação eléctrica que cumpra as directivas de EMC: manter a área de qualquer instalação eléctrica o menor possível, maximizar a distância a linhas que transportem correntes elevadas, separar as linhas de transmissão eléctrica dos cabos de sinal e recorrer a instalações do tipo TN-S. Nos sistemas TN-C, podem surgir correntes desequilibradas, que provoquem um campo eléctrico de linha simples que transporta essa corrente desequilibrada. Para a mesma geometria de instalação, uma corrente desequilibrada origina um campo magnético de grandeza duas vezes superior no sistema TN-C do que num sistema TN-S.

#### **Dependência da frequência do acoplamento indutivo**

O comportamento em frequência do acoplamento indutivo dá-nos valiosas indicações do

modo como podem ser implementadas as instalações eléctricas por forma a assegurar-se a melhor protecção contra perturbações externas de alta frequência.

Na figura seguinte apresenta-se o circuito equivalente de um pequeno anel de indutância própria  $L_2$  e resistência  $R_2$ , influenciado por uma linha externa que transporta uma corrente  $i_1(t)$  com uma indutância de acoplamento  $M$ .

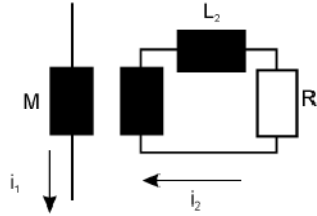


Figura 4.6 – Circuito equivalente de um acoplamento indutivo [11]

Se considerarmos correntes com uma dada frequência  $\omega$ ,  $i_{1,2}(t) = i_{1,2}(\omega)e^{j\omega t}$ , a função de transferência da corrente perturbadora  $i_1(\omega)$  e a corrente induzida  $i_2(\omega)$  para o modelo simplificado podem ser calculadas através da seguinte equação:

$$i_2 = \frac{sM}{R_2 + sL_2} i_1, \quad s = j\omega, \quad j^2 = -1 \quad (4.7)$$

Para que melhor se compreenda o que esta fórmula representa numa instalação real, considere-se um anel de comprimento  $l=0,3\text{m}$  e largura  $w=0,1\text{m}$  à distância  $d=2\text{mm}$  afastado da linha de corrente perturbadora, com uma resistência interna  $R_2=50\Omega$ , indutância própria  $L_2=0,9\mu\text{H}$  e indutância mútua  $M=0,2\mu\text{H}$ . A magnitude da corrente perturbadora por unidade da corrente externa  $i_2(\omega)/i_1(\omega)$  é a que se ilustra a seguir:

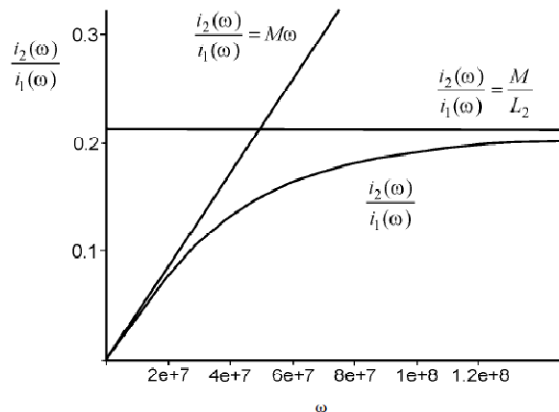


Figura 4.7 – Estudo da função de transferência da corrente perturbadora [11]

A corrente perturbadora  $i_2$  aumenta com a corrente externa  $i_1$  e a sua frequência. Para baixas frequências, aumenta proporcionalmente a  $\omega$ , enquanto que para altas frequências  $i_2$  atinge o seu valor de saturação. Este valor de saturação é limitado pela razão  $M/L_2$ . Por forma a minimizar os efeitos de EMI, uma instalação que respeita as directivas de EMC deve

minimizar a indutância mútua  $M$  e maximizar a indutância própria  $L_2$  do circuito acoplado.

Uma vez que as perturbações rápidas possuem um maior e mais elevado conteúdo de alta frequência, elas produzem maiores perturbações, como se pode avaliar pela figura seguinte onde se mostra a corrente de perturbação calculada resultante de uma corrente de forma trapezoidal, representando um sinal digital:

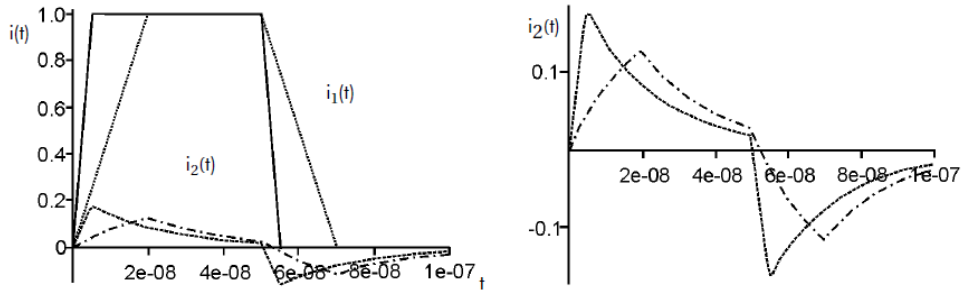


Figura 4.8 – Acoplamento indutivo derivado de correntes trapezoidais lenta e rápida [11]

Pode ver-se pela figura que a corrente perturbadora atinge mais de 10% da corrente externa lenta e mais de 15% da amplitude da rápida. Estes valores elevados resultam dos tempos curtos de elevação dos sinais digitais. São esperados valores elevados semelhantes, provenientes de um qualquer processo de comutação electrónica.

Até este ponto, olhou-se para o anel de curto-circuito como um receptor de EMI. Nesta situação, as propriedades eléctricas têm de ser optimizadas para minimizar a corrente perturbadora  $i_2(t)$ . A propriedade da corrente induzida  $i_2(t)$  de gerar um campo magnético que enfraqueça o campo externo pode também ser usada para proteger sistemas eléctricos ou electrónicos de elevada sensibilidade.

Neste caso, os parâmetros eléctricos do anel de curto-circuito têm de ser escolhidos por forma a optimizar a corrente  $i_2(t)$  geradora do campo inverso e minimizar a rede de fluxo magnético através do anel. Exemplos práticos desta aplicação são as bainhas metálicas dos cabos, caminhos de cabos, etc. A rede de fluxo magnético através da área do circuito equivalente modelado pode ser calculada como sendo:

$$\Phi_{loop}(i_2) = \frac{MR_2}{R_2 + sL_2} i_1, \quad s = j\omega, \quad j^2 = -1 \quad (4.8)$$

A rede de fluxo magnético é minimizada para valores pequenos de  $R_2$ . A capacidade de protecção às interferências aumenta drasticamente com a diminuição da resistência do anel de curto-circuito  $R_2$ .

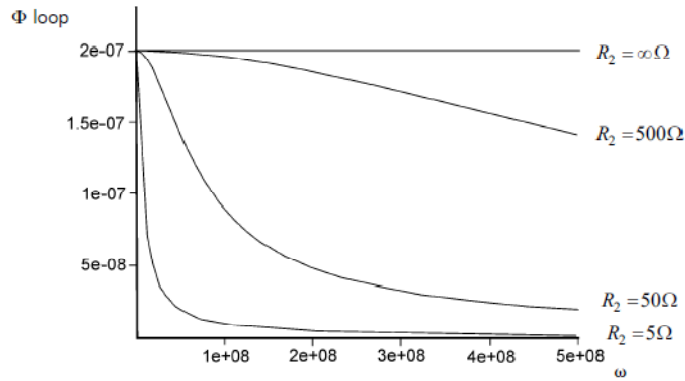


Figura 4.9 – Capacidade de blindagem de um anel de curto-circuito para diferentes valores da sua resistência interna [11]

Deste resultado podem retirar-se algumas regras de instalação. Todas as ligações nas instalações de blindagem contra EMI, tem que ter uma baixa resistividade em alta frequência. Devido ao efeito de superfície, a resistência de qualquer condutor eléctrico aumenta com a frequência do sinal. Assim sendo, a geometria dos condutores deve ser escolhida de forma a minimizar a resistência aparente em alta frequência. A geometria óptima dos condutores será em fita, sólida ou maleável, em que a área de superfície é larga e a espessura é fina. Os condutores standard de secção circular não são os ideais.

### 4.3.3. Acoplamento Capacitivo

O campo eléctrico a variar no tempo de um sistema externo produz cargas a variar no tempo no sistema perturbado. O fluxo das correntes de deslocamento pode ser modelado num circuito equivalente por condensadores em paralelo que ligam os dois sistemas e provocam as tensões de perturbação.

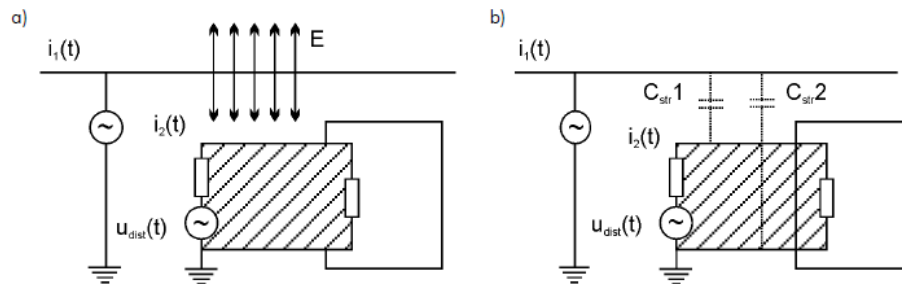


Figura 4.10 – Acoplamento capacitivo: a) Modelo de campo; b) Circuito Equivalente; [11]

De um modo semelhante ao acoplamento indutivo, o acoplamento capacitivo aumenta se os dois circuitos estiverem próximos, se a diferença de tensão dos dois circuitos for grande ou se os sinais no circuito externo estiverem a variar rapidamente no tempo e portanto, possuírem um elevado conteúdo de alta frequência.

Como exemplo, pode considerar-se os condutores de um circuito de uma fonte de alimentação e os cabos de uma rede de dados local, que se encontram adjacentes e paralelos entre si numa distância de 10m em caminho de cabos. Se a corrente no cabo de potência tiver uma forma de onda sinusoidal pura a 50Hz e 230V, o sinal perturbador no cabo de dados pode atingir uma amplitude de 10V, o que até pode ser aceitável. No entanto, se a corrente no cabo de potência possuir componentes de alta frequência gerados por cargas não lineares, o sinal perturbador no cabo de dados pode atingir uma amplitude de mais de 90V, o que pode levar a uma fraca performance ou até mesmo mau funcionamento de uma rede local (LAN).

Se os requisitos de cablagem e respectiva blindagem forem correctamente projectados e a instalação for levada a cabo de forma criteriosa, este tipo de perturbações podem ser evitadas ou pelo menos atenuadas para níveis toleráveis.

Para apresentar os aspectos mais importantes do acoplamento capacitivo, considera-se novamente o modelo simplificado que pode ser resolvido analiticamente. O modelo consiste em dois circuitos que utilizam, para simplificação do mesmo, um retorno comum. O circuito equivalente deste sistema é o seguinte:

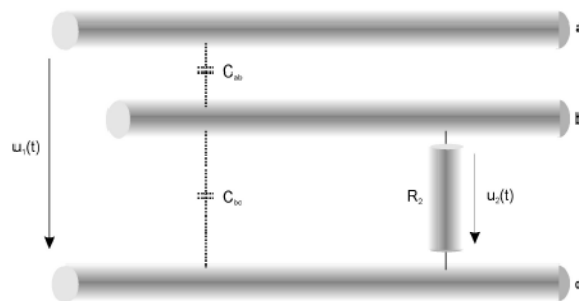


Figura 4.11 – Modelo de três linhas para um acoplamento capacitivo [11]

As linhas a e c fazem parte do sistema externo e as linhas b e c fazem parte do sistema perturbado. Se considerarmos tensões com uma dada frequência  $\omega$ ,  $u_{1,2}(t) = u_{1,2}(\omega)e^{j\omega t}$ , a relação entre a tensão perturbadora  $u_1(\omega)$  e a tensão de acoplamento  $u_2(\omega)$  é dada por:

$$u_2 = \frac{sR_2 C_{ab}}{1 + sR_2(C_{ab} + C_{bc})} u_1, \quad s = j\omega, \quad j^2 = -1 \quad (4.9)$$

Se escolhermos os parâmetros  $R_2=1k\Omega$ ,  $C_{ab}=C_{cb}=100pF$ , o que é razoável para cabos paralelos de 1mm de espessura à distância de 5mm num comprimento de 10m, e uma tensão externa de 230V. O comportamento da dependência da frequência da tensão de acoplamento capacitivo  $u_1$  é o indicado a seguir:

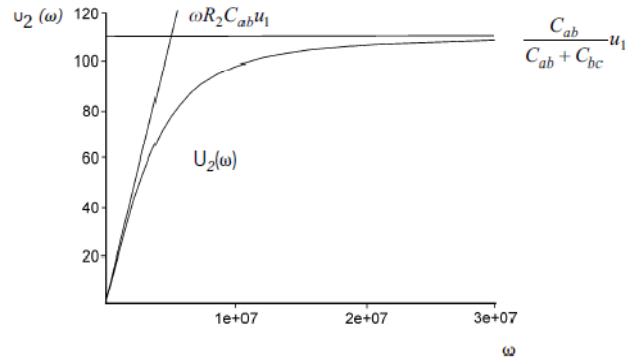


Figura 4.12 – Comportamento da frequência num acoplamento capacitivo [11]

O comportamento do acoplamento capacitivo é muito semelhante ao do acoplamento indutivo. A tensão perturbadora  $u_2$  aumenta para as baixas frequências linearmente com a frequência do sinal perturbador e atinge a saturação em altas frequências.

Mais uma vez, sinais perturbadores rápidos que contêm grandes componentes de alta frequência vão influenciar massivamente o circuito perturbado.

A figura seguinte mostra a tensão de acoplamento de uma onda sinusoidal normal a 220V, 50Hz e um variador de intensidade luminosa fase-ângulo. A onda sinusoidal normal produz um sinal perturbador sinusoidal com uma amplitude de cerca de 7mV, que pode ser negligenciado, em contraste com o processo de comutação de um variador que origina uma tensão de pico de 110V.

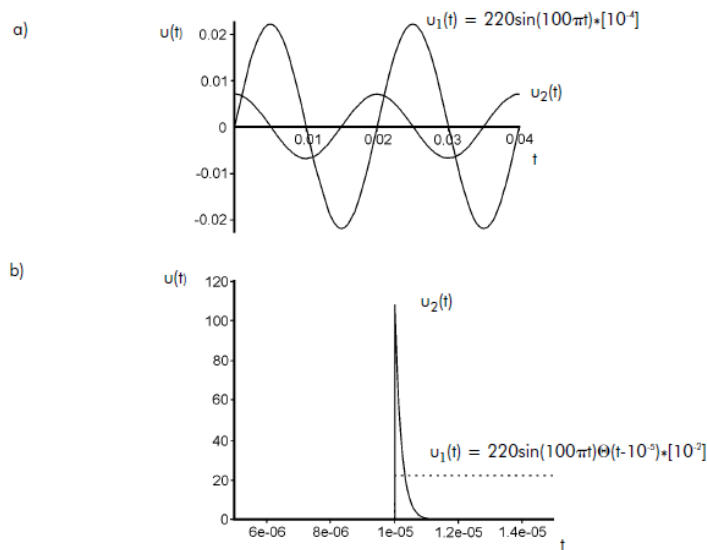


Figura 4.13 – Sinais de acoplamento capacitivo para: a) sinusóide a 50Hz; b) variador de intensidade luminosa [11]

O acoplamento capacitivo pode ser reduzido recorrendo a cabos blindados. O modelo de um par de cabos blindados é o seguinte:

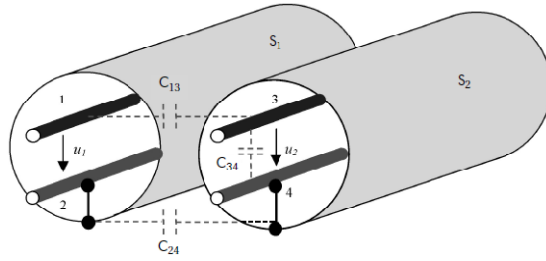


Figura 4.14 – Acoplamento capacitivo de dois cabos blindados [11]

As blindagens condutoras  $S_1$  e  $S_2$  encontram-se ligadas num único ponto ao sistema. O comportamento da frequência da tensão afectada  $u_2$  é a mesma que na equação anterior, em que  $C_{ab}$  deverá ser substituído por  $C_1 = C_{13}C_{24}/(C_{13}+C_{24})$  e  $C_{bc}$  por  $C_{34}$ . A tensão máxima que poderá ser acoplada ascende a  $u_2 = \frac{1}{1 + C_{34}/C_{13} + C_{34}/C_{24}} u_1$ , o que mostra que uma boa ligação capacitiva  $C_{34}$  entre o condutor e a blindagem melhora a eficácia desta. Para diversos acoplamentos capacitivos, a eficácia de um cabo blindado a um impulso transitório rápido é a que se apresenta a seguir:

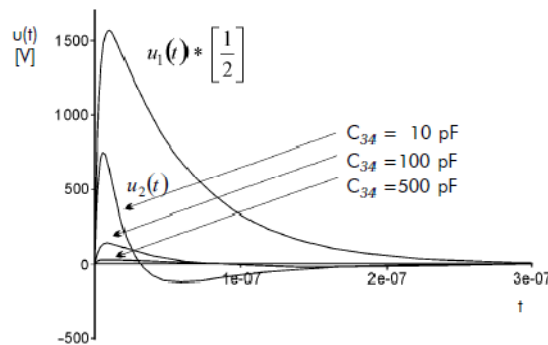


Figura 4.15 – Blindagem de um impulso recorrendo a diferentes capacidades de acoplamento [11]

#### 4.3.4. Acoplamento Radiante

Os campos electromagnéticos deslocam-se no espaço à velocidade da luz  $c=2,998 \times 10^8$  m/s, e podem influenciar as instalações eléctricas na sua vizinhança.

Se perturbações na rede eléctrica ou na rede de dados possuírem componentes de alta frequência, outros elementos da instalação podem funcionar como antenas e irradiar os campos electromagnéticos.

O Dipolo de Hertz pode ser usado como modelo simplificado para estimar a magnitude dos campos irradiados. Todas as partes condutoras da instalação eléctrica podem funcionar como antenas, incluindo cabos, aberturas e ranhuras em carcaças de equipamentos e placas de circuito impresso.

Como exemplo, pode observar-se uma descarga electrostática do corpo humano numa



placa de metal. O arco da descarga electrostática não só transporta uma corrente de valor significativo como produz um campo electromagnético, que pode facilmente atingir os 0,5 a 4 kV a uma distância inferior a 1m. Estes campos electromagnéticos podem perturbar o sistema eléctrico dentro de um espaço inadequado, através das propriedades de antena dos diversos elementos condutores.

Estes elementos condutores começam a irradiar quando a sua dimensão linear exceder aproximadamente metade do comprimento de onda. O comprimento de onda e a frequência de uma onda electromagnética estão relacionados através da velocidade da luz pela relação  $\lambda=c/f$ .

Na prática, os encapsulamentos nunca podem ser totalmente fechados. Aberturas tais como, portas para conectores, grelhas de ventilação e fendas ao redor das portas são inevitáveis. Estas aberturas reduzem a blindagem de um encapsulamento.

A quantidade de fugas devidas a descontinuidades no encapsulamento depende, de um modo geral, de três factores: a máxima dimensão linear da abertura, a impedância de onda e a frequência da fonte.

Para ranhuras de comprimento  $l=\lambda/2$ , a eficácia da blindagem é dada por:

$$S = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2l} \right) \quad (4.10)$$

Diminuir o comprimento da ranhura por um factor de 2, aumenta a blindagem em 6dB. A figura seguinte apresenta a eficácia da blindagem para diversas frequências de acordo com o comprimento da ranhura:

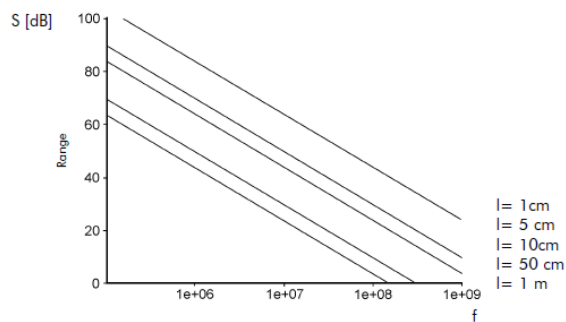


Figura 4.16 – Eficácia de blindagem de uma ranhura com vários comprimentos, em função da frequência [11]

De um modo prático, o comprimento máximo das ranhuras deverá ser inferior a 1/20 do comprimento de onda para garantir uma eficácia de blindagem de pelo menos 20dB.

#### 4.3.5. Complexidade das EMI na prática

Numa situação de EMI na prática, todos os acoplamentos elementares apresentados anteriormente, coexistem numa complexa combinação.

Qualquer sistema unitário, encontra-se envolvido numa rede de outros sistemas que, em conjunto, formam um sistema de inter-relacionamentos complexos mútuos de EMI. Para garantir o perfeito funcionamento de todo o sistema, deve ser gerada e avaliada uma matriz de EMC durante o processo de planeamento, quer para novas instalações quer para alterações em instalações existentes.

## 4.4. Sistemas de Terra e EMC

Para a protecção de componentes e equipamentos electrónicos sensíveis, é fortemente recomendado que as correntes de modo comum que entrem no edifício através de cabos externos, sejam direccionadas à terra no ponto de entrada. O simples isolamento galvânico não é geralmente suficiente. Torna-se necessária a instalação de dispositivos não lineares limitadores de tensão.

A instalação de dispositivos de protecção contra sobretensões precisa ser efectuada com a menor impedância comum possível entre o circuito externo e o circuito a ser protegido. O comprimento do condutor em série com o limitador de tensões precisa ser conseqüentemente o mais curto possível. A tensão residual "vista" pelo equipamento protegido é então independente da impedância de terra [9] [12] [14].

A maioria dos defeitos de funcionamento dos dispositivos electromagnéticos é erradamente considerado como sendo devido a problemas de software ou erros humanos, quando são na verdade devidos a um nível insuficiente de equipotencialidade entre as unidades interligadas (sondas, cartões, comandos, etc.). A equipotencialidade dos equipamentos é um objectivo funcional. Desde que as interferências circulem pelas massas e não pelos circuitos, não serão perigosas.

Por outro lado, se as massas não estiverem no mesmo potencial e forem ligadas em "estrela" (modo radial), as correntes das interferências irão circular pelos caminhos disponíveis, isto é, pelos cabos de sinal. Interligar as massas com condutores formando uma malha fechada de baixa impedância de interligação do sistema é a única maneira económica de assegurar um nível satisfatório de equipotencialidade. Instalar todos os equipamentos sensíveis dentro de sistema em Gaiola de Faraday seria tecnicamente ideal, mas geralmente não é justificável economicamente.

Ligações de terra em "estrela", garantem a segurança das pessoas, quando as normas relevantes são respeitadas, mas não a operação satisfatória de uma instalação que inclua equipamentos electrónicos sensíveis.

O melhor meio de assegurar uma operação satisfatória e duradoura de uma instalação é estabelecer um elevado grau de equipotencialidade.

### 4.4.1. Malhas de ligação entre massas (loop's)

As massas de todos os equipamentos que trocam dados entre si devem ser interligadas por

condutores de terra para reduzir a diferença de potencial entre elas, que pode ser significativa. Um método para incrementar a equipotencialidade é interligar as massas, havendo ou não troca de informações entre os equipamentos respectivos. A área de uma malha de terra precisa ser reduzida ao mínimo possível, para reduzir ao máximo os efeitos de interferência causados pelos campos perturbadores. Por outro lado, é de boa prática sempre, aumentar o número e reduzir a área dos "loop's" entre massas.

Quanto mais esta política for aplicada, mais efectivo será o grau de equipotencialidade, tanto em baixa como em alta frequência. É sempre benéfico ligar as massas a uma malha de condutores de massa de interligação, independentemente da natureza dos equipamentos em causa.

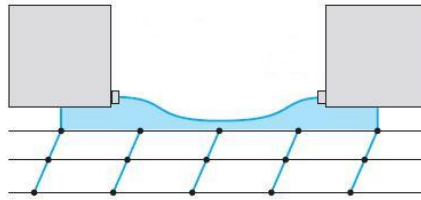


Figura 4.17 – Aumento da imunidade às radiações e às interferências por condução, pelo aumento do número e diminuição da área dos "loop's" de interligação das massas [14]

#### 4.4.2. Unicidade da rede de terra

A rede de terra precisa ser única para ser equipotencial. Há três métodos de interligar as massas que preservam essa unicidade:

1 – *Ligações de terra em "estrela"*: cada equipamento tem o seu próprio cabo de terra; todos os cabos de terra vão para uma única barra de terra. A justificação desta filosofia é muito simples: quando um equipamento escoar uma corrente de fuga para a terra, todos os restantes equipamentos permanecem no mesmo potencial de terra. Mas potencial de "terra" não tem significado físico na prática, pois todos os potenciais são relativos entre si e o conceito de zero absoluto (ou "terra no infinito") torna-se abstracto. [12] [14]

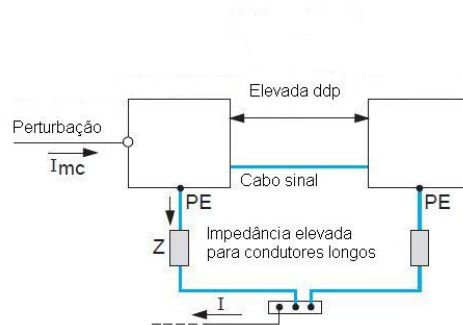


Figura 4.18 – Diferença de potencial entre as massas dos equipamentos devido à impedância dos cabos de terra [14]

Considera-se em geral que a configuração em estrela do sistema de terra elimina o problema da impedância comum, quando na realidade acontece o contrário. Na verdade, este sistema aumenta a impedância comum, isto é, forma um ponto comum de acoplamento entre equipamentos que se encontrem interligados.

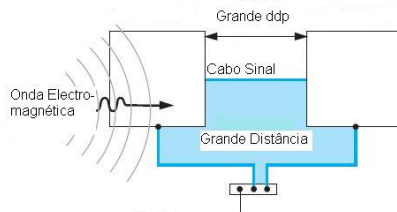


Figura 4.19 – Aumento do potencial entre equipamentos por efeito de um campo electromagnético [14]

Um campo electromagnético devido, por exemplo, a uma descarga atmosférica, induzirá uma tensão na ligação de terra, maior do que em qualquer outro método de ligação à terra.

2 - *Ligação ao condutor de terra mais próximo*: um único condutor de terra, associado a vários equipamentos. Usando este esquema, os anéis de massa têm uma área pequena e a impedância comum entre equipamentos interligados é menor que num esquema de ligação em estrela.

O risco de usar o mesmo condutor de terra para ligar dois sistemas, um "ruidoso" e outro sensível, não é desprezável. Ainda que a baixa impedância dos condutores de terra e o bom nível de imunidade à interferência em baixa frequência de modo comum limite os riscos, as correntes de alta frequência geradas por fontes altamente poluidoras (como conversores de potência) não podem ser bem dissipadas por um único cabo de terra. Nestes casos, é necessário instalar condutores de terra suplementares e formar de uma rede em malha.

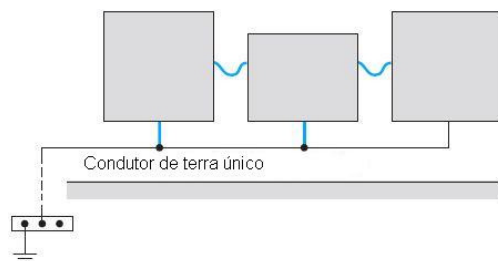


Figura 4.20 – Ligação ao condutor de terra mais próximo [14]

3 - *A ligação mais curta à terra mais próxima*: este terceiro método de ligação à terra mais próxima é melhor que os descritos anteriormente. É baseado numa ligação das massas em malha. As áreas dos anéis de terra são reduzidas ao mínimo e o grau de equipotencialidade das massas é excelente.

A interligação das massas em malha é ainda mais importante quando a área coberta pela instalação é grande, com longos cabos de interligação, ou quando os equipamentos se encontram divididos entre vários andares.

A interligação das massas em malha não reduz a necessidade de alimentar os equipamentos sensíveis por circuitos distintos daqueles que são utilizados para alimentar cargas poluidoras.

Os comprimentos dos condutores de terra são muito importantes pois, em alta frequência, a sua impedância é geralmente muito elevada. Por exemplo, um condutor de terra com 100m de comprimento é incapaz de conduzir correntes de frequências superiores a 100kHz. Por si só, os condutores de terra não são suficientes para garantir a CEM de uma instalação. São também necessários condutores adicionais e interligações curtas entre as massas.

No entanto, ainda que longos e curto-circuitados numa ponta por massas interligadas em malha, os cabos de terra funcionam correctamente em baixa frequência para protecção das pessoas. Não deve ser retirada nenhuma interligação entre as massas e nenhum condutor de protecção, ainda que pareça que os mesmos se tenham tornado redundantes.

Não deve haver nunca mais do que um sistema de terra por instalação (ou por local), semelhante ao sistema de massas que deve ser único e ligado ao único sistema de terra. Se este critério não for adoptado, aparecerão problemas de CEM pelas inevitáveis ligações entre instalações adjacentes (entradas de controle, vídeo, alarmes, segurança, etc.).

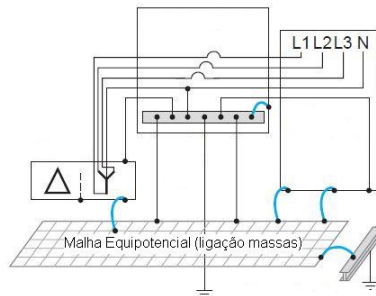


Figura 4.21 – Ligação mais curta à terra mais próxima [14]

O efeito atenuante é um dos factores chaves em EMC, sendo eficaz e não muito caro. De modo a trocar sinais em boas condições, isto é, limitando as interferências captadas pelos cabos de sinal, é importante reduzir o acoplamento de modo comum. Qualquer estrutura metálica, próxima a, isto é, em contacto e em paralelo ao longo de um cabo de sinal, pode proporcionar dois efeitos favoráveis:

- i. Uma interligação das massas em malha mais eficaz (mais fechada);
- ii. Um efeito atenuante (blindagem).

Deve ter-se em consideração que qualquer cabo é potencialmente uma excelente antena de banda larga. Um método simples, eficiente e barato de reduzir a sua capacidade de irradiar, consiste em instalar o cabo tão próximo quanto possível de uma estrutura metálica ao longo do seu comprimento, por exemplo, junto a uma esteira, calha metálica, viga mestra, etc.

O efeito atenuante de uma massa condutora colocada próxima de um cabo de sinal pode ser explicado do seguinte modo: na ocorrência de uma perturbação em onda electromagnética, é induzida uma corrente na massa condutora. Esta corrente gera, pela lei de Lenz, um campo

magnético que actua em sentido oposto ao campo que produziu a corrente. Um cabo de sinal próximo à massa será afectado pela diferença entre os dois campos, denominado campo residual, que é evidentemente de intensidade muito inferior à do campo original. Um cabo de sinal muito próximo, de ponta a ponta, a uma massa condutora, é menos exposto ao tipo mais severo de perturbação que é a de modo comum.

Os efeitos atenuantes podem ser mais eficazes se as massas forem dispostas de modo a envolver, sempre que possível, os cabos a serem protegidos. Deste modo, uma blindagem metálica entrelaçada, incorporada nos cabos de sinal e interligada às massas, protege os condutores envolvidos contra frequências acima de 1MHz, com um factor de atenuação superior a 300. É difícil e caro blindar todas interligações numa instalação, mas é fácil escolher percursos para os cabos que proporcionem uma boa atenuação.

# Capítulo 5

## Propagação das correntes de defeito através dos eléctrodos para o solo

### 5.1. Introdução

O papel de um sistema de terra, como já anteriormente abordado, é o de escoar para o solo as correntes de defeito, seja qual for a sua origem. Estas correntes fluem para o solo sob a forma de correntes de fuga que se distribuem ao longo do(s) eléctrodo(s) de terra enterrados nesse mesmo solo. Se dividirmos o eléctrodo de terra em pequenos segmentos com comprimentos idênticos e considerando que a resistividade do solo é uniforme em toda a sua extensão, a corrente que flui em cada segmento é uniformemente distribuída pelo solo à frequência original. No entanto, no caso de solos com camadas de diferentes composições, a corrente que flui em cada segmento varia com a resistividade do solo em cada camada [17].

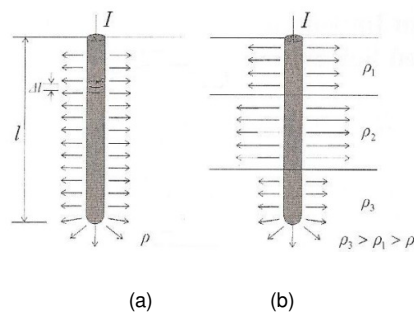


Figura 5.1 – Fluxo de corrente pelo eléctrodo em solo homogêneo (a) ou heterogêneo (b) [17]

### 5.2. Distribuição de correntes e potenciais no solo

Ao ser injectada no solo, a corrente tende a dispersar-se em todas as direcções, percorrendo caminhos que são determinados pelas características do meio. A figura 5.2 representa o modo como a corrente circula entre dois eléctrodos colocados no solo.

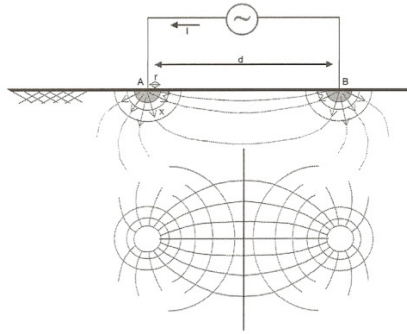


Figura 5.2 – Distribuição aproximada das linhas de corrente e equipotenciais no solo [7]

Considere-se inicialmente, o estabelecimento de uma diferença de potencial entre dois eléctrodos hemisféricos enterrados num solo homogéneo, colocados a uma distância "d" muito superior aos seus raios  $r$ .

A corrente  $I$  flui para o solo através do eléctrodo A, espalhando-se radialmente em todas as direcções e concentrando-se, da mesma forma, à medida que se aproxima do outro eléctrodo. A densidade de corrente  $J$  a uma distância  $x$  do centro do hemisfério e o campo eléctrico no solo, de acordo com a figura 5.3, são dados respectivamente por:

$$J = I/2\pi r^2 ; \vec{E} = \rho \vec{J} ; (\vec{J} = \sigma \vec{E}) \quad (5.1)$$

Por outro lado, para que se obtenha a diferença de potencial  $\Delta V$  do ponto  $x$  em relação ao potencial do eléctrodo, como na figura 5.3, basta calcular o integral de linha da intensidade de campo entre a superfície do eléctrodo e o ponto  $x$ :

$$V_{r_{eléctrodo}} - V_{r_x} = - \int_{r_x}^{r_{eléctrodo}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (5.2)$$

$$\int_{r_x}^{r_{eléctrodo}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\rho}{2\pi} I \left( \frac{1}{r} \right) \Big|_{r_x}^{r_{eléctrodo}} \quad (5.3)$$

$$V_{r_{eléctrodo}} - V_{r_x} = \frac{\rho}{2\pi} I \left( \frac{1}{r_{eléctrodo}} - \frac{1}{r_x} \right) \quad (5.4)$$

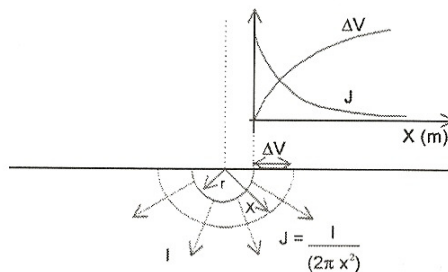


Figura 5.3 – Densidade de corrente e perfil do potencial no solo (em relação ao eléctrodo) [7]



Da expressão anterior, pode determinar-se a diferença de potencial entre o eléctrodo hemisférico e um ponto  $x$  muito distante (tendendo para infinito):

$$V_{r_{el\acute{e}ctrodo}} = \frac{\rho}{2\pi} I \left( \frac{1}{r_{el\acute{e}ctrodo}} \right) \quad (5.5)$$

Este ponto afastado é tido como referência de potencial, sendo-lhe atribuído o potencial zero e a denominação "terra no infinito" [7] [18].

O valor da resistência sentida pela corrente que flui do eléctrodo é fornecido pela razão entre o potencial deste (referido ao infinito) e a corrente. A interligação dos pontos com o mesmo potencial no solo gera superfícies equipotenciais, de formato hemisférico, com centro nos eléctrodos, conforme mostrado nas figuras 5.2 e 5.3.

### 5.3. Alterações produzidas pela alteração na geometria dos eléctrodos e pela não homogeneidade do solo

Quando se utilizam eléctrodos de formato diferente, os caminhos percorridos pela corrente nas proximidades do eléctrodo modificam-se. A corrente é sempre ortogonal às superfícies equipotenciais. Estas adquirem um formato semelhante ao do eléctrodo e são ampliadas à medida que se afastam do mesmo, tendendo a abaular-se até se tornarem hemisféricas. Assim, a grandes distâncias do eléctrodo, a distribuição de correntes e potenciais no solo deve aproximar-se daquelas que ocorrem para o caso do eléctrodo hemisférico. Até mesmo para uma malha constituída por vários eléctrodos, pode considerar-se essa distribuição se as dimensões da malha forem reduzidas em relação às distâncias consideradas [7] [18].

Na figura 5.7 estão representadas as superfícies e linhas equipotenciais, bem como a curva do perfil de potencial, para um eléctrodo do tipo haste vertical :

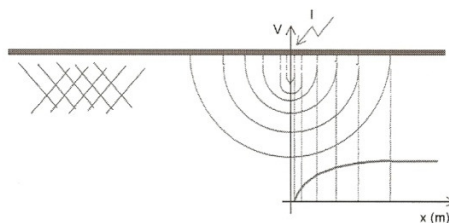


Figura 5.7 – Equipotenciais no solo para um eléctrodo do tipo haste [7]

As heterogeneidades do solo podem alterar sensivelmente os caminhos de corrente e por conseguinte, a distribuição de potenciais na sua superfície. Por exemplo, um corpo condutor de

longas dimensões enterrado pode concentrar a corrente que passa no solo, alterando as linhas de potencial. A estratificação do solo em camadas de resistividade diferente pode fazer com que os caminhos de corrente sejam mais superficiais ou mais profundos, de acordo com a resistividade das camadas, conforme ilustrado na figura 5.8. Esta mostra as linhas de corrente, as equipotenciais e o perfil de potencial na superfície do solo, quando se aplica uma diferença de potencial entre dois eléctrodos hemisféricos de raios diferentes, sendo o diâmetro do eléctrodo *A* de 10m e o de *B* de 1m. Os dois eléctrodos encontram-se enterrados, a uma distância de 1000m entre si:

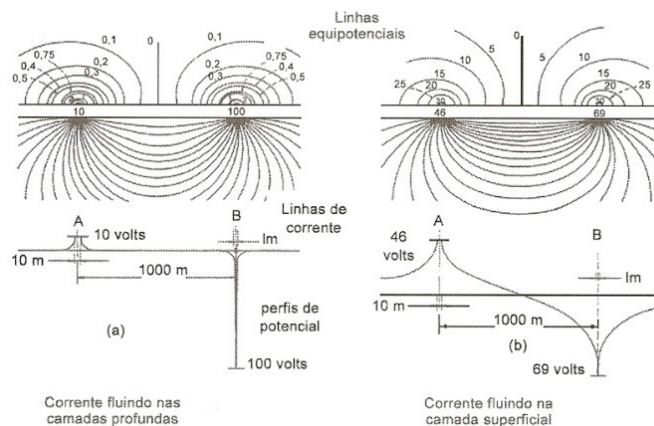


Figura 5.8 – Efeito da estratificação do solo no perfil de potencial da superfície [7]

## 5.4. Simulação de curvas de distribuição de potencial à superfície e linhas equipotenciais em solos homogêneos

### 5.4.1. Distribuição do potencial à superfície do solo

A tensão no solo, bem como a distribuição do potencial à sua superfície durante o escoamento da corrente de defeito para terra são parâmetros importantes para a eficaz protecção de pessoas e bens. As relações básicas apresentam-se na figura 5.9:

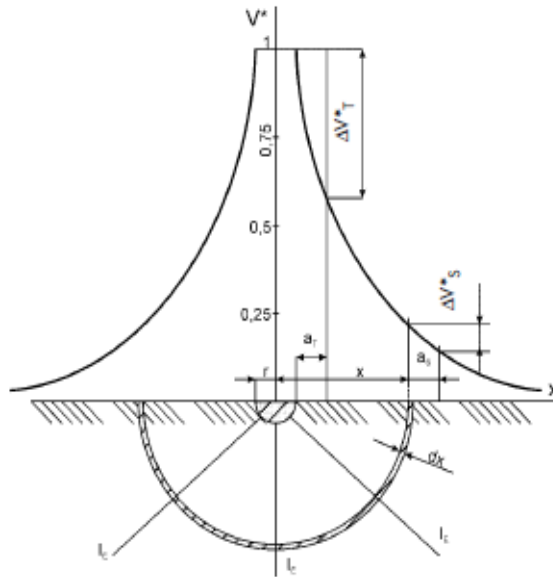


Figura 5.9 – Eléctrodo hemisférico apresentando os parâmetros necessários para calcular a resistência de terra e a distribuição do potencial à superfície em solo homogêneo [18]

em que se encontram representadas as seguintes grandezas:

$r$	Raio do eléctrodo	$V^*$	Valor relativo da distribuição de potencial
$x$	Distância a partir do centro do eléctrodo	$\Delta V^*_T$	Tensão de toque
$a_T$	Distância de toque	$\Delta V^*_S$	Tensão de passo
$a_S$	Distância de passo		

O potencial de qualquer ponto localizado à distância  $x$  desde o centro do eléctrodo, em que flui a corrente  $I_E$ , pode ser formulado pela seguinte equação [18]:

$$V_x = \frac{\rho I_E}{2\pi x} \quad (5.6)$$

Que representa o potencial à superfície do solo, sendo o seu valor relativo dado por:

$$V_x^* = \frac{V_x}{V_E} \quad (5.7)$$

em que  $V_E$  representa o potencial do eléctrodo, que é igual ao potencial da terra assumindo que o potencial da terra de referência é zero. O potencial do eléctrodo de terra pode assim ser descrito como:

$$V_E = I_E R_E = \frac{\rho I_E}{2\pi r} \quad (5.8)$$

A diferença de potencial entre dois pontos à superfície da terra, um à distância  $x$  e outro à

distância  $x+a_s$ , em que  $a_s$  é igual a 1m, representa a tensão de passo  $\Delta V_s$ , ou seja, o potencial à superfície que existe entre os dois pés de uma pessoa que se encontre localizada nessa posição:

$$V_s = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x+a_s} \right) \quad (5.9)$$

e o seu valor relativo:

$$V_s^* = \frac{V_s}{V_E} \quad (5.10)$$

em que  $x \geq r$ .

Relação semelhante pode ser estabelecida para quaisquer outras distâncias  $x$  e  $a$ . No caso particular em que  $x=r$  e  $a=a_T=1m$ , a equação (5.9) permite efectuar o cálculo da tensão de toque, ou seja, a tensão entre a mão e o pé de alguém que se encontre em contacto com o eléctrodo ou parte metálica a ele ligado:

$$V_T = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r+a_T} \right) \quad (5.11)$$

e o seu valor relativo:

$$V_T^* = \frac{V_T}{V_E} \quad (5.12)$$

#### *5.4.2. Potencial à superfície e equipotenciais no solo para diversos tipos de eléctrodos, simulados em ambiente Matlab<sup>®</sup>*

Para melhor se poder compreender os fenómenos enunciados anteriormente, como sejam a distribuição do potencial à superfície do solo em torno do eléctrodo de terra, bem como as linhas equipotenciais que são geradas nesse mesmo solo, foi desenvolvida uma aplicação em ambiente Matlab<sup>®</sup> que permite efectuar diversas simulações para quatro diferentes tipos de eléctrodos, mediante a introdução de alguns parâmetros.

As curvas de potencial à superfície obtidas nas simulações, referem-se ao potencial relativo  $V_x^*$ . O interesse não reside em obter-se o valor absoluto do potencial, o que pode ser feito facilmente de forma analítica pela aplicação directa das expressões, mas sim perceber-se de que modo o potencial se distribui ao longo de uma determinada distância  $x$ , podendo daí tirar-se algumas ilações relativas às tensões de toque e de passo a que um ser humano pode estar sujeito quando se encontra a certa distância do eléctrodo de terra.

A aplicação desenvolvida corre mediante a introdução de parâmetros numa janela (GUI), a qual se apresenta na figura seguinte:

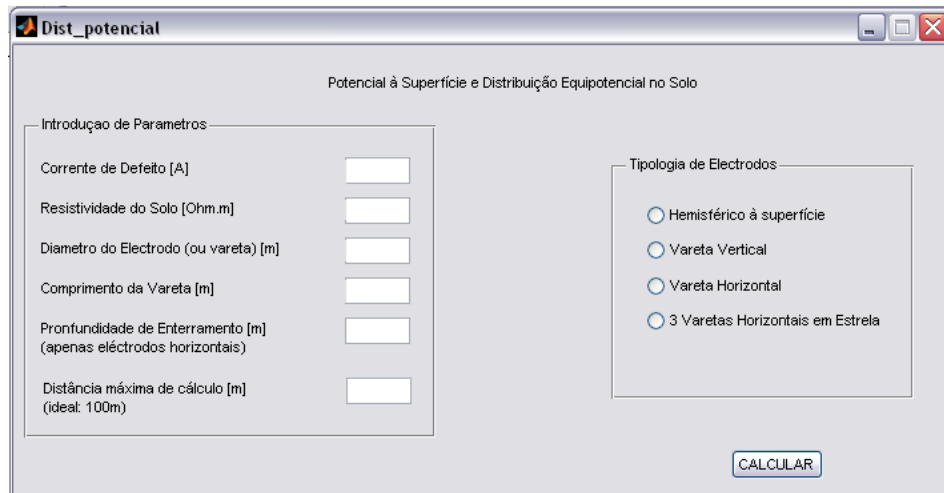


Figura 5.10 – Janela de introdução de parâmetros (GUI)

- *Eléctrodo Hemisférico à Superfície*

Distribuição de potenciais obtida para um eléctrodo do tipo hemisférico à superfície, com um diâmetro de 0,85m.

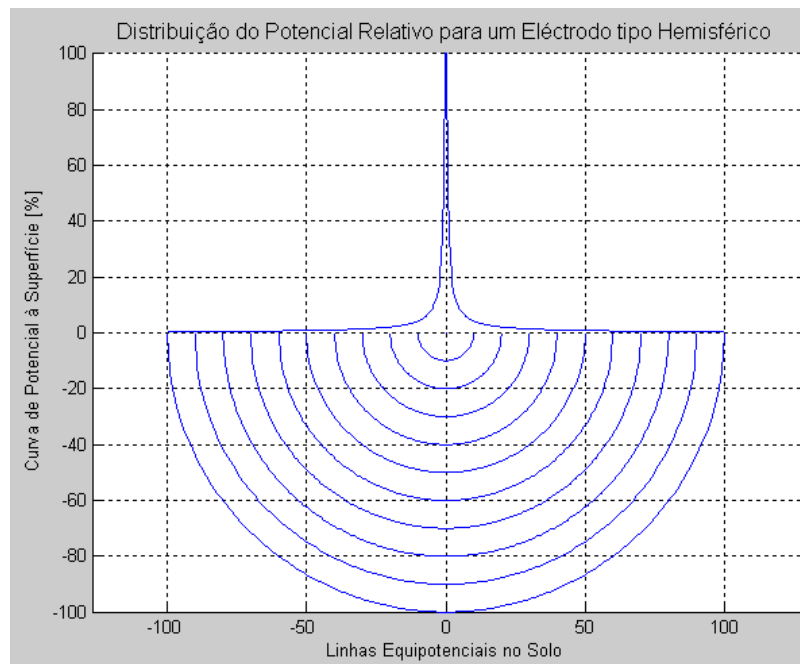


Figura 5.11 – Distribuição do Potencial Relativo para um eléctrodo tipo Hemisférico

- *Eléctrodo tipo Haste Vertical*

Distribuição de potenciais obtida para um eléctrodo do tipo Haste Vertical, com um comprimento de 5m e um diâmetro de 0,25m.

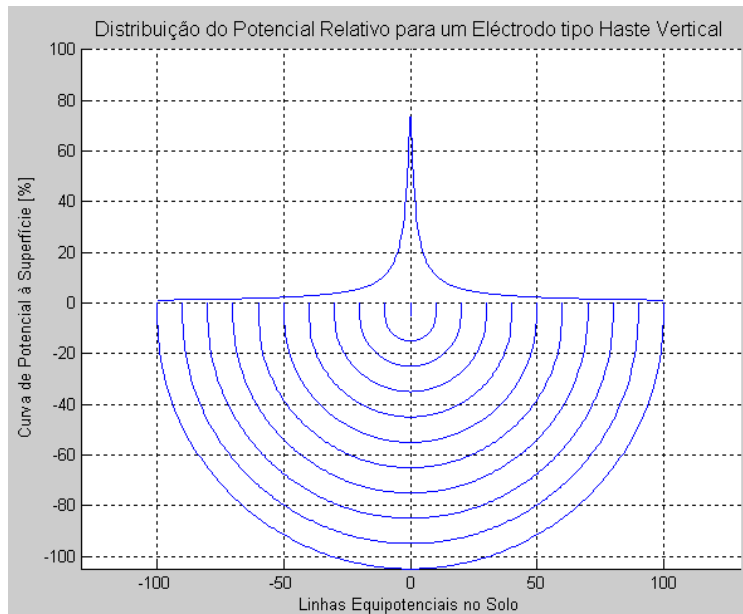


Figura 5.12 – Distribuição do Potencial Relativo para um eléctrodo tipo Haste Vertical

- *Eléctrodo tipo Haste Horizontal em profundidade*

Distribuição de potenciais obtida para um eléctrodo do tipo Haste Horizontal, enterrado à profundidade de 5m, com um comprimento de 5m e um diâmetro de 0,25m.

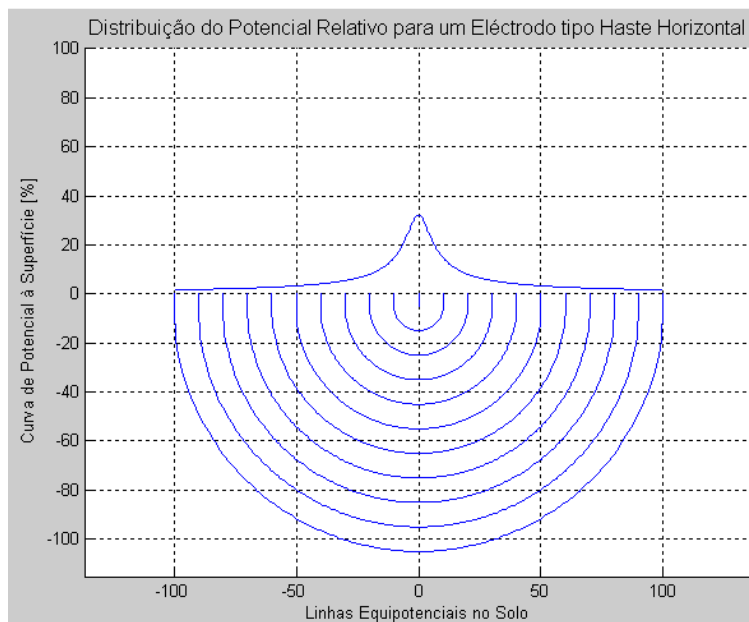


Figura 5.13 – Distribuição do Potencial Relativo para um eléctrodo tipo Haste Horizontal

- *Eléctrodo tipo 3 Hastes Horizontais em Estrela em profundidade*

Distribuição de potenciais obtida para um eléctrodo do tipo 3 Hastes Horizontais, em Estrela, enterrado à profundidade de 5m, com um comprimento de 5m cada haste e um diâmetro de 0,25m.

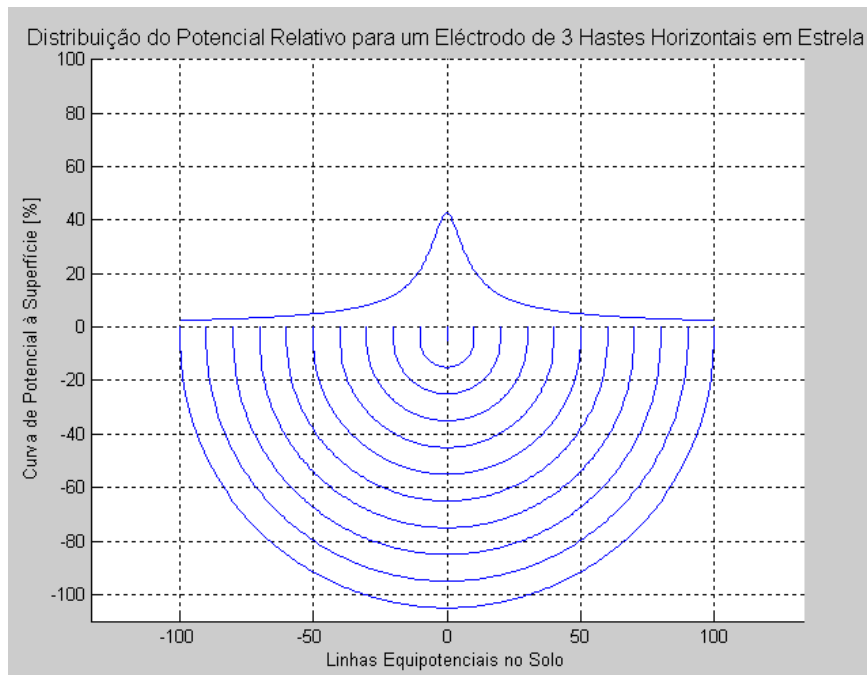


Figura 5.14 – Distribuição do Potencial Relativo para um eléctrodo tipo 3 Hastes Horizontais em Estrela

Juntando as 4 curvas de distribuição do potencial à superfície num mesmo gráfico, obteve-se a figura seguinte:

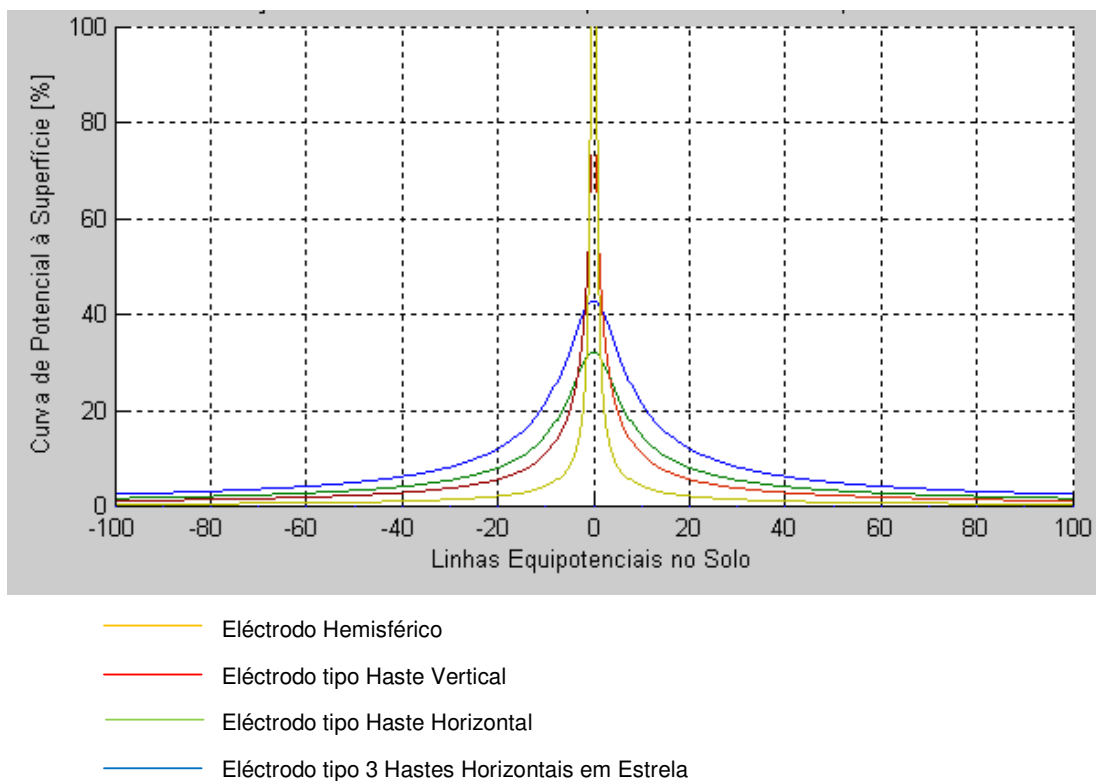


Figura 5.15 – Distribuição do Potencial Relativo para o conjunto dos 4 tipos de eléctrodos

Pela observação da figura acima, verifica-se que as curvas de distribuição de potencial vão-se suavizando à medida que se passa do eléctrodo hemisférico para a haste vertical, haste horizontal e o eléctrodo de 3 hastes horizontais em estrela, sendo este o que apresenta o perfil de distribuição mais suave. Em concreto, isto significa que as tensões de toque e de passo a que um ser humano está sujeito quando situado nas imediações do eléctrodo no momento em que as correntes de defeito fluem para o solo, serão tanto mais elevadas quanto mais acentuada for a curva de distribuição do potencial à superfície.

Pode assim dizer-se que um ser humano estará muito menos exposto ao risco no caso do eléctrodo de 3 hastes horizontais em estrela do que no caso do eléctrodo hemisférico.



# Capítulo 6

## Protecção contra descargas atmosféricas

### 6.1. Introdução

A incidência directa de descargas atmosféricas sobre estruturas ou edifícios, pode provocar danos e outras consequências mais graves em virtude da potência dissipada pelo fluxo de corrente em partes da estrutura. Em alguns casos, a incidência directa numa estrutura pode dar origem ao fluxo de correntes destrutivas através de elementos condutores existentes no local, inclusive em instalações eléctricas e electrónicas.

Um sistema de protecção contra descargas atmosféricas tem por objectivo básico evitar a incidência directa de raios na estrutura protegida, através da constituição de pontos preferenciais de incidência para as descargas que eventualmente possam atingir a estrutura na ausência do sistema. Para realizar este objectivo, além de captar a descarga, o sistema de protecção deve ser capaz de direccionar o fluxo de corrente associado directamente para o solo, segundo percursos definidos, constituídos pelos condutores do sistema de protecção.

No decorrer deste fluxo de corrente, não deverão surgir diferenças de potencial entre equipamentos ou partes de um mesmo equipamento, não deverão surgir no solo diferenças de potencial que causem tensões de passo perigosas para as pessoas e não deverão surgir entre as partes metálicas e o solo, diferenças de potencial que provoquem tensões de toque ou descargas laterais que possam por em perigo a vida das pessoas. Para que sejam satisfeitas estas condições, procura-se equipotencializar todos os referenciais de modo que não surjam diferenças de potencial perigosas.

O princípio básico de um sistema de protecção contra descargas atmosféricas consiste na definição de pontos ou corpos de destaque na estrutura, que possuam uma muito maior probabilidade de iniciarem a constituição de canais ascendentes quando um meio precursor de descarga se aproxima da estrutura. Tais corpos, ligados directamente ao solo por condutores metálicos, devem também constituir caminhos de baixa impedância para a corrente de descarga no percurso desta em direcção ao solo, evitando o fluxo da corrente por outras partes condutoras da estrutura ou edifício.

Um sistema de protecção contra descargas atmosféricas é composto por diversos elementos com funções distintas. Os captadores, são elementos metálicos que constituem pontos preferenciais de incidência. Os condutores de distribuição de corrente direccionam o fluxo da

corrente de descarga para o sistema de ligação à terra, que por sua vez é constituído por eléctrodos metálicos enterrados no solo para a dispersão da corrente de descarga nesse meio. A configuração física destes elementos depende da filosofia e tipo de sistema de protecção.

## **6.2. Classificação das Instalações segundo as normas ANSI e IEC**

Existem diversas representações e teorias para representar e explicar a formação das cargas e o modelo das nuvens. A representação mais comum é a bipolar, em que a nuvem é representada por um enorme dipolo com as cargas positivas na parte superior e as negativas na inferior [8] [19] [22].

Quando há uma descarga terra-nuvem que neutraliza a base da nuvem, as cargas positivas do topo da nuvem vão neutralizar as cargas negativas da terra fechando o circuito eléctrico. Enquanto a descarga ascendente possui uma secção muito pequena e uma elevada densidade ( $\text{kA/cm}^2$ ), a corrente descendente ocupa uma secção muito grande mas de densidade muito baixa (fracção de  $\text{A/m}^2$ ).

A descarga terra-nuvem no modelo usado é a descarga de retorno: inicialmente tem-se uma descarga dentro da nuvem e em seguida uma descarga descendente nuvem-terra de intensidade baixa (líder descendente). Quando essa descarga se aproxima da terra, as cargas desta vão-se agrupando, aumentando o campo eléctrico e dando origem a pequenas descargas ascendentes (líderes ascendentes). O encontro de um ou mais líderes ascendentes com o líder descendente forma um caminho ionizado entre a nuvem e a terra pelo qual escoará uma corrente de grande intensidade denominada corrente de retorno. Estas descargas são também denominadas de raios negativos, crendo-se que 90% das descargas à terra são deste tipo [19]. Quando as nuvens são mais baixas podem ocorrer descargas originadas na parte superior destas, que contêm as cargas positivas. Estas descargas são, regra geral, de maior intensidade que as anteriores e são denominadas de raios positivos.

Os raios negativos terra-nuvem, pela sua maior frequência, são os mais estudados e os modelos existentes de protecção de estruturas ou linhas de transmissão têm por base estas descargas.

No que diz respeito à intensidade e duração das correntes dos raios, são considerados dois tipos básicos: elevada intensidade (dezenas de kA) e curta duração (dezenas de nanossegundos) e baixa intensidade (dezenas de A) e longa duração (centenas de milissegundos).

Baseando-se em levantamentos feitos em vários laboratórios espalhados pelo hemisfério norte e um no hemisfério sul, foram construídos gráficos e tabelas através dos quais é possível exprimir cada parâmetro dos raios em função da sua grandeza e da respectiva probabilidade.

Segundo a norma ANSI C62.41-1991, os ambientes das instalações em que podem estar os equipamentos são divididos em categorias de localização, A, B ou C, com solicitações

crescentes de A para C. Basicamente, o ambiente A refere-se aos ramais, o B aos quadros de distribuição e o C às entradas. Além da localização é também considerada a exposição às descargas: baixa, média ou alta, sendo acrescentado um índice às categorias: A1, A2 ou A3 respectivamente.

Para cada situação, com base em levantamentos estatísticos, são dadas estimativas das tensões e correntes com base em duas formas de onda padronizadas:

***Onda Amortecida (Ring Wave) 0,5ms – 100kHz***

É uma onda sinusoidal exponencialmente amortecida que atinge o valor de pico em 0,5ms e depois oscila com a frequência de 100kHz. Esta onda representa o deslocamento de um impulso unidireccional de tensão aplicado na entrada da instalação.

***Onda Combinada (Combo Wave) 1,2/50ms – 8/20ms***

É a onda produzida por um gerador de impulso que em aberto fornece um impulso de tensão com a forma 1,2/50 e em curto-circuito fornece uma onda de corrente da forma 8/20.

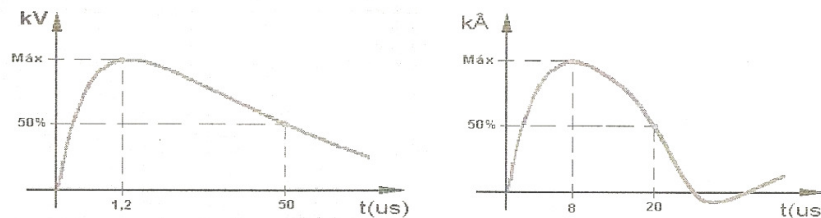


Figura 6.1 – Onda Combinada (Combo Wave) 1,2/50ms – 8/20ms [19]

A norma IEC 664-1 divide as instalações em quatro categorias, desde a entrada (I), quadro de distribuição (II) e ramais (III). A categoria IV refere-se aos equipamentos que serão ligados após a categoria III e que deverão ter uma protecção adicional, com redução da tensão por um dispositivo de protecção contra sobretensões.

A IEC 664-1 fornece tabelas com os valores das tensões mais utilizadas e as tensões que deverão ser suportadas pelos equipamentos nas diversas categorias. A tendência é introduzir o conceito de zonas de protecção da compatibilidade electromagnética, também chamada de protecção topológica. Em cada interface entre as zonas, deverão ser instalados dispositivos de protecção contra sobretensões (SPD), dimensionados de acordo com a tensão e corrente que poderão vir a atingir.

Os equipamentos, por sua vez, deverão ser especificados pelas tensões e correntes suportáveis e não apenas pelas tensões como actualmente.

## 6.3. Filosofias de Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas

Fundamentalmente existem duas filosofias distintas de protecção contra descargas atmosféricas, a protecção através de captos tipo Franklin em mastro e a protecção por Gaiola de Faraday.

Ambos os sistemas apresentam os mesmos componentes básicos, a saber:

- *Captos* – consistem em elementos metálicos que constituem os pontos de incidência preferenciais;
- *Condutores de distribuição* – direccionam o fluxo de corrente da descarga para o solo que incluem também os condutores de descida;
- *Sistema de terra* – eléctrodos metálicos enterrados no solo para dispersão da corrente por esse meio.

A principal diferença entre os dois tipos de sistemas reside no princípio de actuação destes, que determina configurações diferentes para os seus componentes.

A definição quanto ao tipo de sistema a adoptar é ditada, sobretudo, pela geometria da edificação. Esta fornece indicações ao projectista quanto à facilidade de implementação de cada um dos sistemas, à sua eficiência e ao seu custo. Muitas vezes, são os factores de ordem estética a influenciar a decisão, pois o impacto visual do sistema de protecção pode, em alguns casos, comprometer aspectos arquitectónicos do edifício.

Um aspecto comum a ambos os sistemas é a expectativa de um baixo valor de resistência de terra, por forma a garantir o seu correcto funcionamento.

### 6.3.1. Sistema de Protecção tipo “Franklin”

Este sistema fundamenta-se na interceptação de eventuais canais descendentes que se aproximem da estrutura por meio de canais ascendentes iniciados a partir dos captos do sistema de protecção. Tais captos são normalmente constituídos por corpos metálicos longos e elevados, posicionados nas partes altas da estrutura de forma a proteger todos os pontos da edificação. Os captos são ligados a condutores que distribuem a corrente pelos condutores de descida e que por sua vez ligam ao sistema de terra no solo.

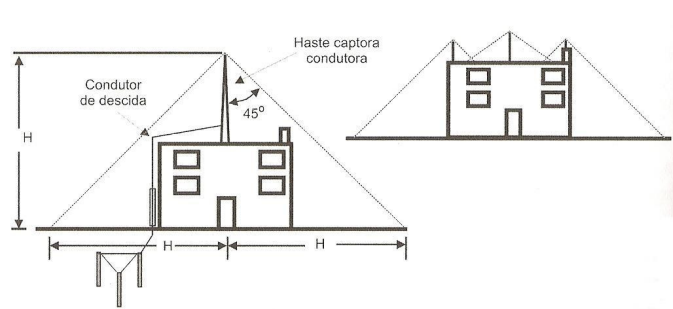


Figura 6.2 – Sistema de Protecção contra Descargas Atmosféricas tipo Franklin [8]

Este sistema pode ser composto por um ou mais captores, por cabos estendidos na parte superior da estrutura ou por hastes oblíquas posicionadas nas extremidades do edifício a proteger.

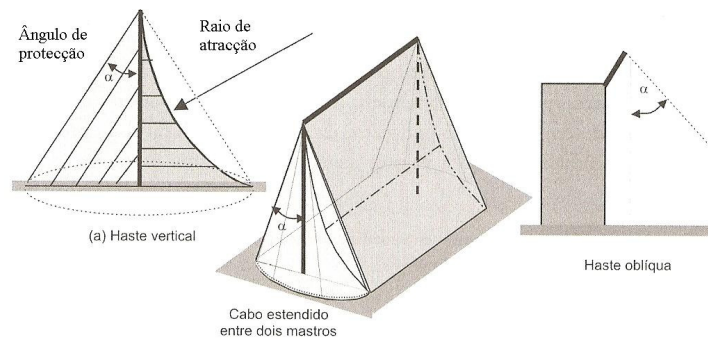


Figura 6.3 – Tipos de captores Franklin [8]

Na figura 6.3 são apresentadas diversas opções de configuração e é indicada a zona de protecção determinada pela posição dos captores. O formato da ponta captora não é importante mas sim a posição da sua extremidade.

Regra geral, na adopção desta técnica de protecção, utiliza-se um número reduzido de descidas, embora seja aconselhável o recurso a pelo menos duas baixadas (condutores de descida).

Pelas suas características, este tipo de sistema tem aplicação preferencial em estruturas altas e delgadas como edifícios com altura muito superior às dimensões da base.

A configuração do sistema de terra associado a este tipo de protecção pode ser variada, mas é muito habitual o recurso à configuração em triângulo, também conhecida por “pata de galo”, ligada a cada uma das baixadas.

### 6.3.2. Sistema de Protecção tipo “Gaiola de Faraday”

Baseada nas experiências desenvolvidas por Faraday, a filosofia de protecção com o seu

nome fundamenta-se na observação que ao constituir uma gaiola metálica envolvendo um corpo, este último fica isento do percurso de correntes transitórias, desde que sejam observados determinados cuidados com relação à dimensão dos reticulados da gaiola. A filosofia assume a blindagem do corpo envolvido quanto à incidência e ao percurso da corrente de descarga.

A implementação desta filosofia requer a constituição de uma gaiola condutora envolvendo toda a estrutura.

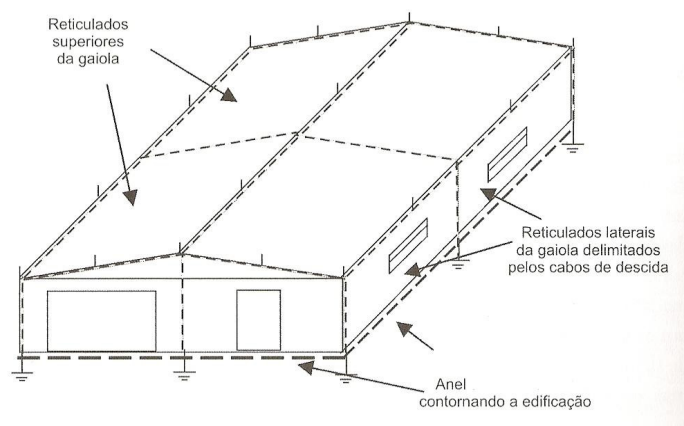


Figura 6.4 – Protecção por Gaiola de Faraday [8]

Cada descida é ligada ao sistema de terra no solo, habitualmente composto por um anel metálico periférico enterrado. Opcionalmente, poderão ser instaladas hastes verticais ao longo do anel, desde que se respeite uma distância entre hastes nunca inferior ao seu comprimento de forma a minimizar os efeitos de resistência mútua.

Note-se que a protecção por este método não assegura que o campo seja nulo em todo o interior da estrutura como em geral se admite. De facto, quando a gaiola é atingida por um raio, o campo só será nulo se a corrente se distribuir uniformemente por todos os condutores da mesma e ainda assim, apenas no seu centro. Deve existir uma preocupação com as vizinhanças dos condutores da gaiola pois em torno deles haverá um campo magnético que poderá induzir tensões em condutores paralelos a eles. De qualquer modo, o risco para as pessoas é praticamente nulo.

## 6.4. Modelização dos Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas com base nos Modelos de Distância à Descarga

### 6.4.1. Os modelos de Distância à Descarga

O modelo geométrico representativo da última fase de uma descarga atmosférica foi

desenvolvido com o intuito de mostrar que o ângulo de protecção deverá diminuir à medida que aumenta a altura dos edifícios a serem protegidos.

O valor exacto do ângulo de protecção depende da equação de distância à descarga atmosférica. Actualmente, encontram-se em uso cinco equações diferentes, conhecidas por: Young, Brown-Whitehead-CIGRE, Love, IEEE-1992 (Comité de Transmissão e Distribuição) e IEEE-1995 (Comité das Subestações).

Na protecção de linhas de transmissão, as alturas dos cabos de guarda e dos condutores de fase não são significativamente diferentes, pelo que se assume que a distância de uma descarga a um cabo de guarda ou aos condutores de fase é a mesma. No entanto, na protecção de edifícios, esta assumpção pode não ser verdadeira, isto é, a altura do objecto a proteger pode variar desde o nível do solo até muito próximo da altura do cabo de protecção. Deste modo, a distância da descarga ao objecto a proteger deverá ser igual à distância da descarga ao solo para objectos de pouca altura, mas pode aumentar para um valor igual ao da distância da descarga ao cabo de protecção para objectos com altura aproximada a este.

Assim sendo, deverão ser consideradas três distâncias à descarga: a distância da descarga ao cabo ou mastro de protecção  $r_s$ , a distância da descarga ao objecto ou edifício a proteger  $r_c$  e a distância da descarga ao solo  $r_g$ . Em síntese:

$$r_s = y_s \cdot r_g \quad (6.1)$$

$$r_c = y_c \cdot r_g \quad (6.2)$$

Na equação de Young, apenas é necessário um pequeno ajuste e nas equações de Love e IEEE-1995 não é necessária qualquer alteração uma vez que todas as distâncias à descarga se consideram iguais. No entanto, nas equações de Brown-Whitehead e IEEE-1992, é necessário efectuar uma alteração significativa, como demonstrado nos capítulos seguintes.

#### 6.4.1.1. Equações de Young

$$r_g = 271^{0,32} \quad (6.3)$$

$$y_s = \frac{444}{462 - y} \text{ para } h \geq 18\text{m, caso contrário } y_s = 1 \quad (6.4)$$

$$y_c = \frac{444}{462 - y} \text{ para } h \geq 18\text{m, caso contrário } y_c = 1 \quad (6.5)$$

em que  $I$  representa a amplitude da corrente de descarga em kA,  $r_g$ ,  $r_s$  e  $r_c$  são distâncias em metros,  $h$  é a altura do cabo ou mastro de protecção em metros e  $y$  é a altura do objecto ou edifício a proteger, também em metros.

#### 6.4.1.2. Equações de Love

$$r_g = 10I^{0,65} \quad (6.6)$$

$$y_s = y_c = 1 \quad (6.7)$$

#### 6.4.1.3. Equações de Brown-Whitehead-CIGRE

$$r_g = 6,4I^{0,75} \quad (6.8)$$

$$y_s = 1 + \frac{h - 18}{108} \text{ para } h \geq 18\text{m, caso contrário } y_s = 1 \quad (6.9)$$

$$y_c = 1 + \frac{y - 18}{108} \text{ para } h \geq 18\text{m, caso contrário } y_c = 1 \quad (6.10)$$

#### 6.4.1.4. Equações de IEEE-1992

$$r_g = 9,0I^{0,65} \quad (6.11)$$

$$y_s = \frac{1}{0,36 + 0,17 \ln(43 - h)}, \quad \text{para } h \geq 30\text{m considerar } h = 30 \quad (6.12)$$

$$y_c = \frac{1}{0,36 + 0,17 \ln(43 - y)}, \quad \text{para } h \geq 30\text{m considerar } y = 30 \quad (6.13)$$

#### 6.4.1.5. Equações de IEEE-1995

$$r_g = 8I^{0,65} \quad (6.14)$$

$$y_s = y_c = 1 \quad (6.15)$$

### 6.4.2. Utilização de cabos como protecção contra descargas atmosféricas

Nas figuras 6.5 e 6.6 encontra-se representada a zona de protecção oferecida por dois cabos de protecção. Na figura 6.5, o afastamento entre cabos é tal que dá origem a duas zonas de protecção distintas, enquanto que na figura 6.6 as zonas de protecção cruzam-se, originando uma só.

A obtenção destas zonas é feita desenhando um arco de raio  $r_s$ , com centro no cabo de protecção, até que este intersecte a distância da descarga ao solo  $r_g$ . Com centro nesta intersecção, desenha-se um arco desde o cabo de protecção até intersectar o solo. Isto representa a zona de protecção e qualquer objecto dentro dela encontra-se protegido contra descargas atmosféricas [20] [22].



O valor de  $a$  é obtido através da seguinte expressão:

$$a = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (6.16)$$

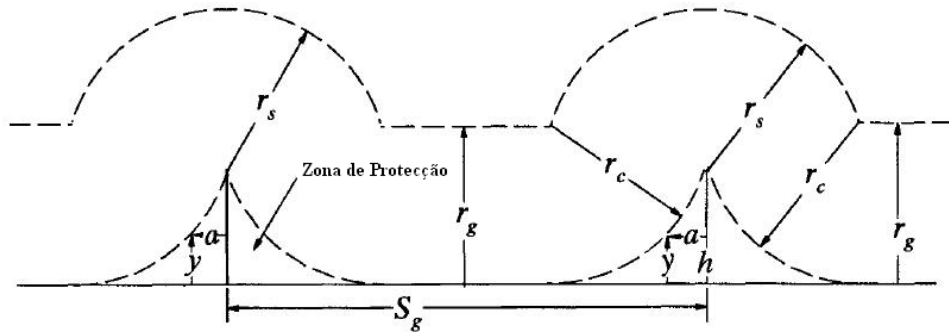


Figura 6.5 – Zona de protecção utilizando cabos de guarda [20]

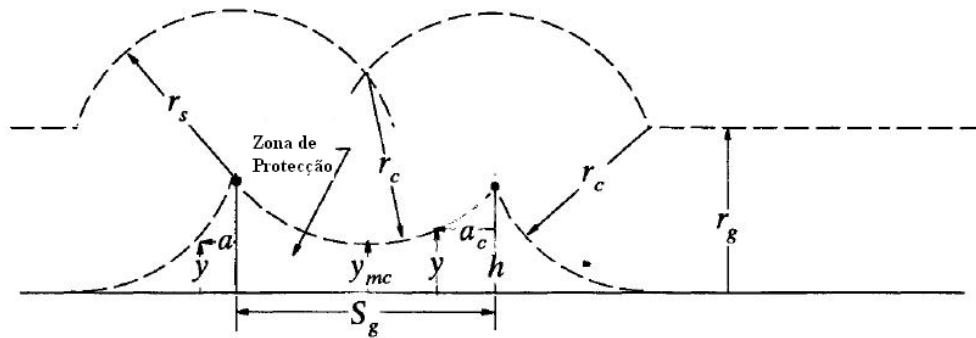


Figura 6.6 – A zona de protecção melhora com o aproximar dos cabos [20]

À medida que os cabos de protecção se aproximam, os dois arcos com centro nos cabos encontram-se num dado ponto que fica acima da linha horizontal que representa a distância da descarga ao solo  $r_g$ . Deste modo, uma descarga que se aproxime do sistema entre os cabos de protecção, vai atingir os arcos que saem dos cabos antes de atingir a linha horizontal da distância de descarga ao solo, ou seja, todas as descargas vão terminar nos cabos de protecção e nenhuma atingirá o solo. Agora, a zona de protecção é descrita através de um único arco de raio  $r_c$  com centro na intersecção dos arcos que saem dos cabos, como representado na figura 6.6. Olhando para esta representação, é fácil perceber a melhoria que é introduzida na zona de protecção.

Esta zona de protecção entre os cabos pode ser descrita pelas distancias  $a_c$  ou  $R_{PC}$ , calculadas pelas expressões:

$$R_{PC} = \sqrt{r_c^2 - (h - y + \sqrt{r_s^2 - R_c^2})^2} \quad (6.17)$$

$$a_c = R_c - R_{PC} \quad (6.18)$$

em que  $R_c$  é metade da distância horizontal  $S_g$  entre os cabos.

A altura mínima de protecção  $Y_{mc}$  ocorre a meio da distância entre os dois cabos e pode ser obtida fazendo  $R_{PC}=0$  na equação (6.17) ou directamente através da figura 6.7.

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \quad (6.19)$$

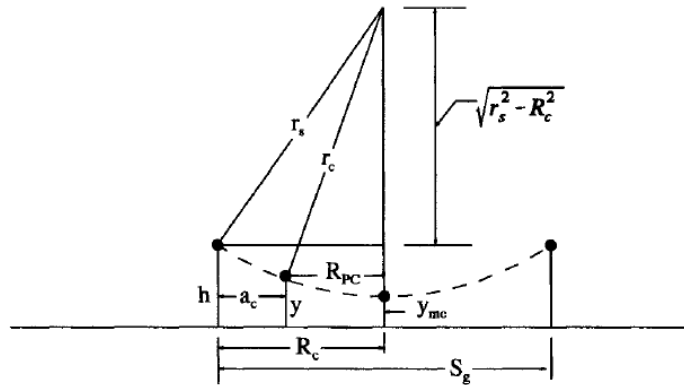


Figura 6.7 – Zona de protecção entre os cabos [20]

A zona de protecção para o exterior dos cabos de protecção pode ser descrita pela expressão (6.16), convenientemente separada em dois componentes,  $a_0$  e  $R_{PO}$ , como representado na figura 6.8:

$$R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (6.20)$$

$$a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (6.21)$$

$$a = a_0 - R_{PO} \quad (6.22)$$

Para  $y=0$  e  $r_c=r_g$ ,  $R_{PO}=0$  e, portanto,  $a_0$  é a distância  $a$  para  $y=0$  e a altura de protecção é zero em  $a_0$ .

A equação (6.20) pode ser usada para determinar a altura necessária de um cabo de protecção para um dado valor de  $y_{mc}$ . Rearranjando a equação (6.19),

$$h = y_{mc} + r_c - \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \quad (6.23)$$

Para encontrar a altura correcta do cabo, torna-se necessário efectuar diversas iterações uma vez que  $r_s$  depende de  $h$ .

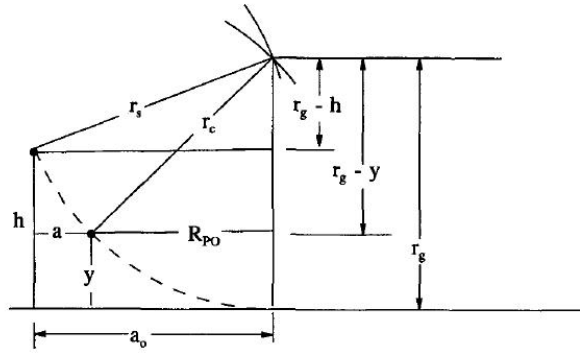


Figura 6.8 – Zona de protecção exterior aos cabos [20]

Se forem usados mais do que dois cabos de protecção, as respectivas zonas de protecção são encontradas pelo uso sequencial das equações para o cálculo com apenas dois cabos. A zona de protecção para um único cabo pode ser descrita pelas equações (6.20) a (6.22).

### 6.4.3. Utilização de mastros como protecção contra descargas atmosféricas

#### 6.4.3.1. Mastro único

A zona de protecção gerada por um único mastro pode ser descrita pelas mesmas equações (6.20) a (6.22), usadas para o cálculo de um único cabo de protecção. No entanto neste caso, as grandezas  $a$  e  $a_0$  são raios de círculos como se pode ver na figura 6.9:

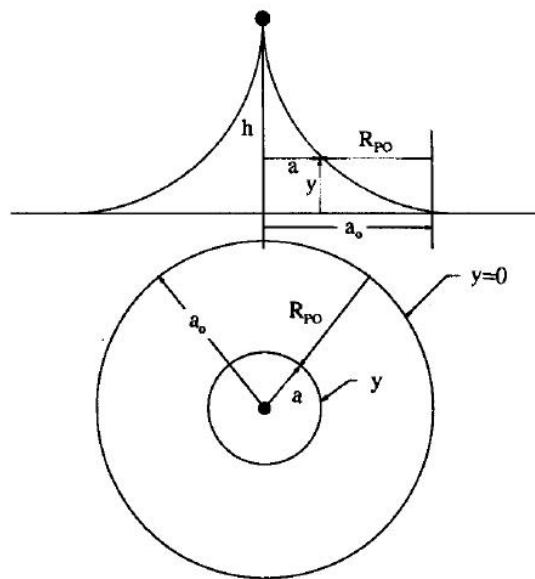


Figura 6.9 – Zona de protecção exterior aos cabos [20]

### 6.4.3.2. Dois mastros

A grande dificuldade na análise das zonas de protecção geradas por dois ou mais mastros, reside na visualização do problema e na sua representação tridimensional. Na figura 6.10 pretende-se representar que, acima de cada mastro, existe uma porção do espaço representada pelo raio  $r_s$  desde o topo do mastro. Cada uma destas porções de uma esfera, é terminada pela distância da descarga ao solo  $r_g$ . Se os dois mastros estão suficientemente perto um do outro, as duas esferas vão intersectar-se. Um aspecto importante a ter em conta é que, ao contrário do que acontece no caso de dois cabos de protecção, o efeito da terra encontra-se presente.

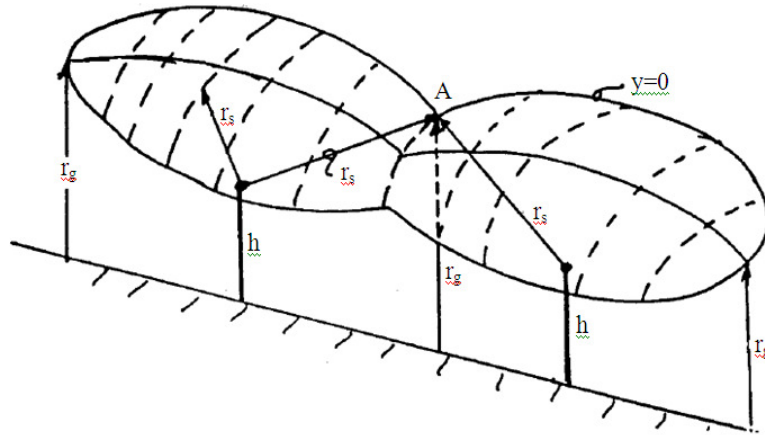


Figura 6.10 – Vista tridimensional da protecção acima dos mastros [20]

A intersecção crítica, o ponto A, é ilustrada na figura 6.10, onde os dois raios  $r_s$  desde os mastros, encontram  $r_g$ . Este ponto pode ser descrito como a condição em que  $y=0$ . A figura 6.11 representa uma vista no plano deste caso. Os dois círculos de raio  $a_0$  encontram-se a meio caminho entre os mastros.

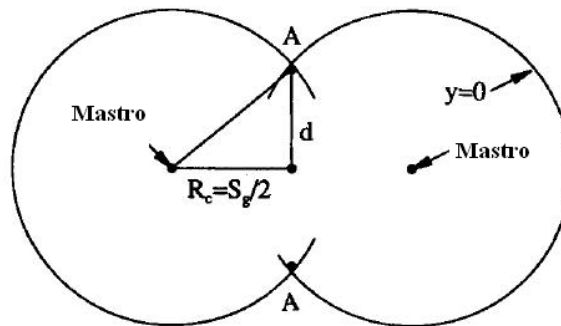


Figura 6.11 – Vista no plano da figura 6.10 [20]

A figura 6.12 também ilustra a intersecção crítica A em conjunto com as distâncias à descarga.

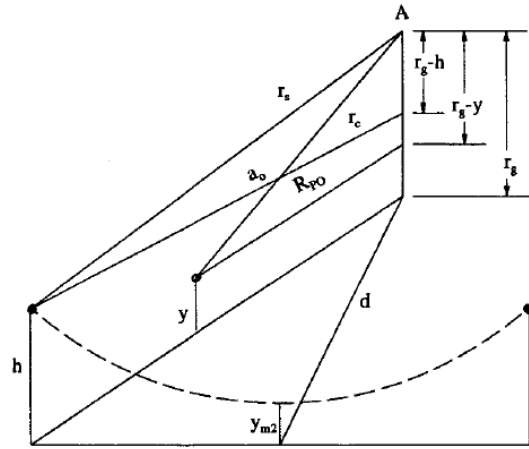


Figura 6.12 – Zona de protecção entre dois mastros [20]

Deste diagrama obtém-se,

$$a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (6.24)$$

que é idêntico ao  $a_0$  para um único mastro e para o lado exterior dos cabos de protecção. Se  $h > r_g$ , então  $a_0 = r_s$ . Também pela figura 6.11 vem

$$d = \sqrt{a_0^2 - R_c^2} \quad (6.25)$$

em que  $R_c$  é metade da distância entre os mastros. Combinando as duas equações anteriores,

$$h = r_g - \sqrt{r_s^2 - R_c^2 - d^2} = r_g - \sqrt{r_s^2 - a_0^2} \quad (6.26)$$

De maior importância é o raio de protecção  $R_{PO}$ , que se deduz da figura 6.12:

$$R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (6.27)$$

Note-se que esta equação descreve um arco centrado no ponto A na figura 6.12. Se  $y > r_g$ , então  $R_{PO} = r_c$ . A altura mínima de protecção  $y_{m2}$ , que ocorre a meio caminho entre os mastros, obtém-se da equação (6.27) fazendo  $R_{PO} = d$ . Então, com recurso à equação (6.25),

$$y_{m2} = r_g - \sqrt{r_c^2 - a_0^2 + R_c^2} \quad (6.28)$$

A zona de protecção resultante com dois mastros é a que se ilustra na figura 6.13. Note-se que, para a esquerda ou para a direita dos mastros, a zona de protecção é idêntica à que se obtém para o caso de um mastro único, sendo que apenas entre os mastros a zona de protecção sofre alterações.

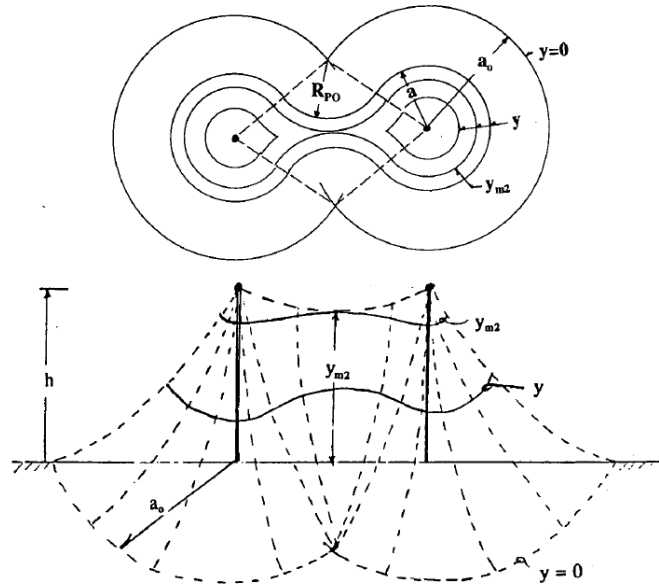


Figura 6.13 – Zona de protecção com dois mastros [20]

A zona de protecção é descrita por linhas de altura constante  $y$ . Ao longo destas linhas de protecção de altura isométrica, um objecto encontra-se protegido se a sua altura for igual ou inferior a  $y$ .

A zona de protecção é descrita por círculos ou arcos de círculo. O procedimento para a sua obtenção é o seguinte:

- i. Desenhar círculos de raio  $a_0$  a partir de cada mastro. Estes círculos descrevem o limite da zona de protecção para  $y=0$ ;
- ii. Tomando a intersecção  $A$  como centro, desenhar arcos com raio  $R_{PO}$ ;
- iii. Usando os mastros como centro, desenhar arcos ou círculos parciais de raio  $a$ , tendo em atenção que  $a = a_0 - R_{PO}$ ;
- iv. A intersecção dos arcos dos passos referidos em ii. e iii. completam a zona de protecção para a altura  $y$ .

#### 6.4.3.3. Três mastros

Assumindo mastros de igual altura nos vértices de um triângulo como se apresenta na figura 6.14, as três distâncias à descarga  $r_s$  de cada um dos mastros, intersectam-se no meio do triângulo de modo a que a distância horizontal a cada mastro seja  $R_c$ . O valor de  $R_c$ , apresentado na figura 6.15 é:

$$R_c = \frac{ac}{2h_b} = \frac{a}{2\sin\alpha} \quad (6.29)$$

Note-se que, na figura 6.14, tal como no caso da protecção com dois cabos, a distância da descarga ao solo  $r_g$  não está envolvida, uma vez que a distância do ponto de intersecção ao

solo é maior que  $r_g$ .

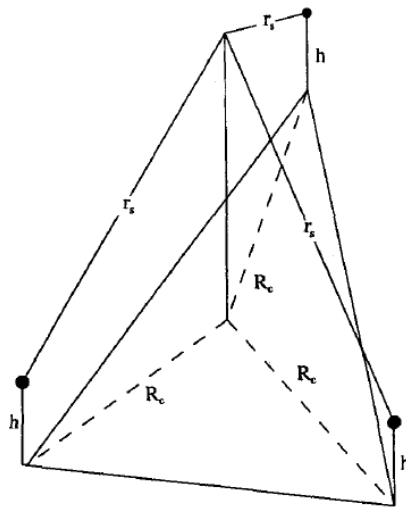


Figura 6.14 –  $R_c$  é a distância ao centro do triângulo originado pela disposição dos três mastros

[20]

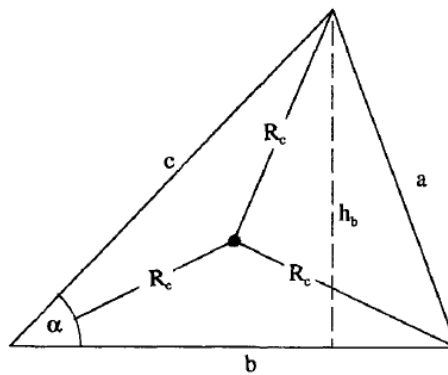


Figura 6.15 – Cálculo de  $R_c$  [20]

Das figuras 6.16 e 6.17 vem

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \quad (6.30)$$

$$R_{PC} = \sqrt{r_c^2 - (h - y + \sqrt{r_s^2 - R_c^2})^2} \quad (6.31)$$

Note-se que  $R_{PC}$  representa o raio de um círculo centrado no meio do triângulo descrito por  $R_c$ . A figura 6.18 é um esboço da zona de protecção no interior do triângulo.

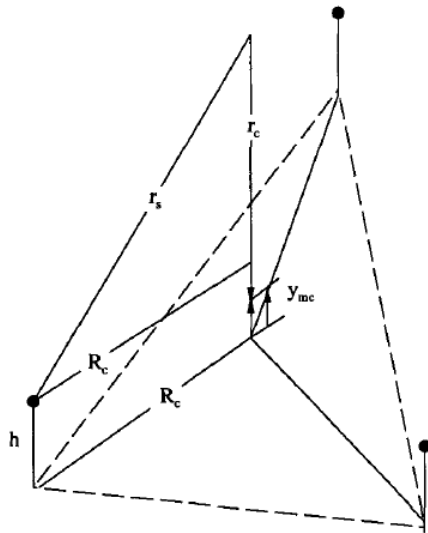


Figura 6.16 – Determinação de  $y_{mc}$  [20]

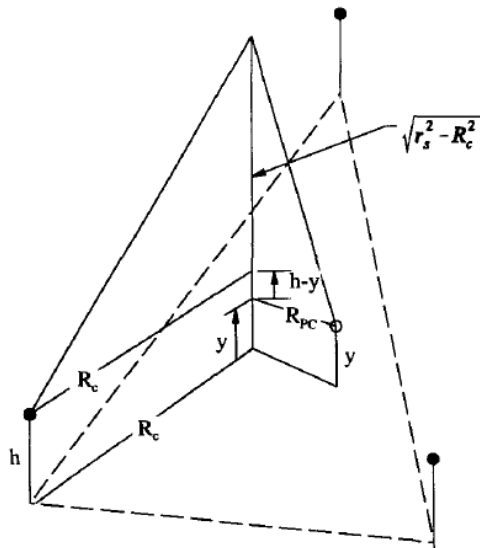


Figura 6.17 – No centro dos três mastros [20]

Como descrito, a altura mínima da zona de protecção é  $y_{mc}$  centrado em  $R_c$ . Círculos de raio  $R_{PC}$  são desenhados a partir deste ponto com  $y_2 > y_1 > y_{mc}$ , etc...



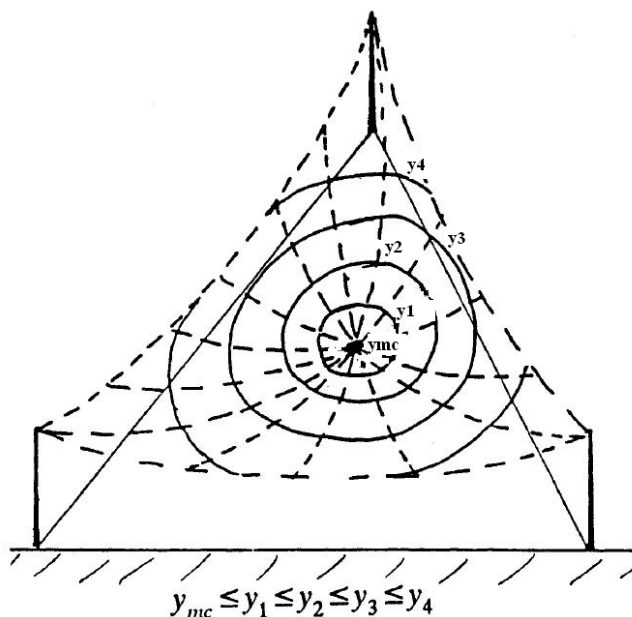


Figura 6.18 – Diagrama tridimensional da zona de protecção entre os três mastros [20]

#### 6.4.3.4. Mais do que três mastros

A protecção com três mastros representa a combinação de mastros básica ou fundamental. Se existirem mais do que três mastros, estes podem ser tratados como conjuntos compostos por três mastros.

Considere-se os quatro mastros representados na figura 6.19. Estes podem ser considerados como sendo dois conjuntos de três mastros, sendo que cada conjunto possui o seu próprio valor de  $R_c$ , que designaremos por  $R_{c1}$  e  $R_{c2}$ .

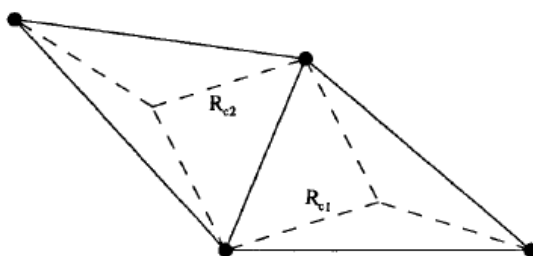


Figura 6.19 – Quatro mastros podem ser separados em dois conjuntos de três mastros [20]

No entanto, como as combinações de quatro mastros como as que se apresentam na figura 6.20 ocorrem com bastante frequência, estas serão consideradas como casos especiais, sendo que, nestes casos,  $R_{c1}=R_{c2}$ , ou seja, só existe um valor de  $R_c$ . A combinação de quatro mastros em formato rectangular é apresentada nas figuras 6.21 e 6.22. Destas figuras obtêm-se:

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \quad (6.32)$$

$$R_{PC} = \sqrt{r_c^2 - (h - y + \sqrt{r_s^2 - R_c^2})^2} \quad (6.33)$$

$$R_c = \frac{1}{2} \sqrt{S_g^2 + S_w^2} \quad (6.34)$$

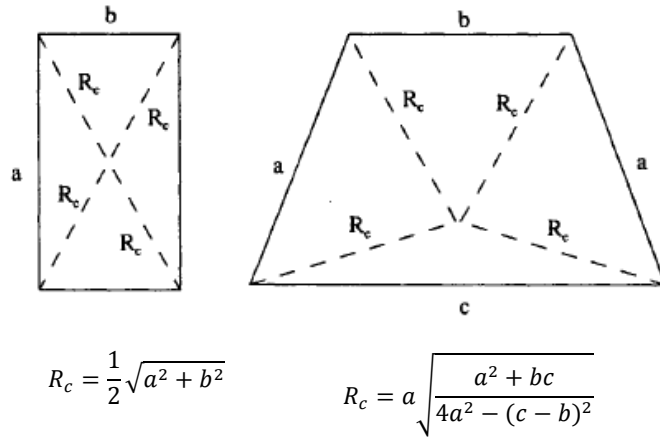


Figura 6.20 – Casos especiais com quatro mastros [20]

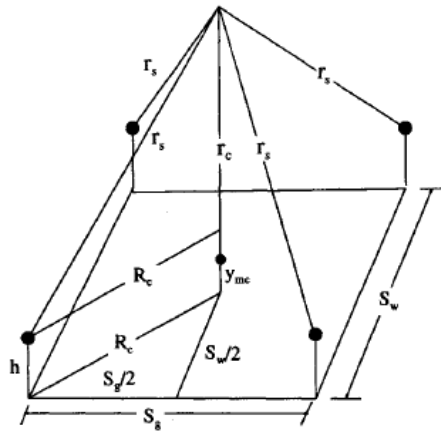


Figura 6.21 – Combinação de quatro mastros mostrando  $y_{mc}$  [20]

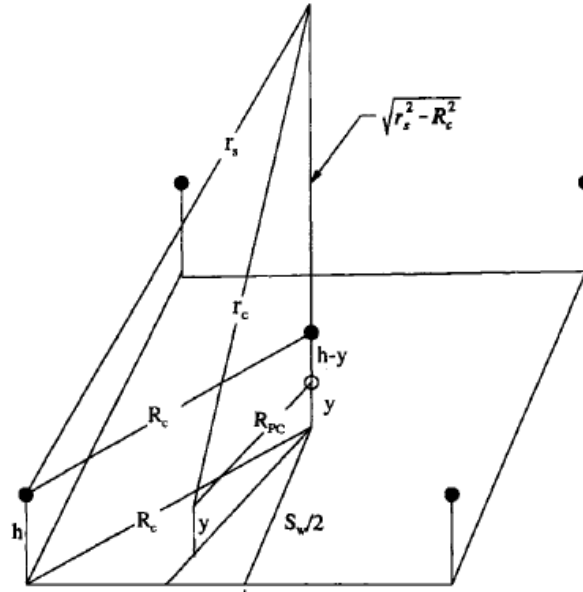


Figura 6.22 – Determinação da zona de protecção no interior dos mastros [20]

A figura 6.23 representa um esboço tridimensional da zona de protecção, considerando apenas o interior dos mastros. No entanto, tal como para o caso de três mastros, o efeito da terra, ou seja, a região fora do rectângulo, influencia ou projecta-se para o interior deste espaço.

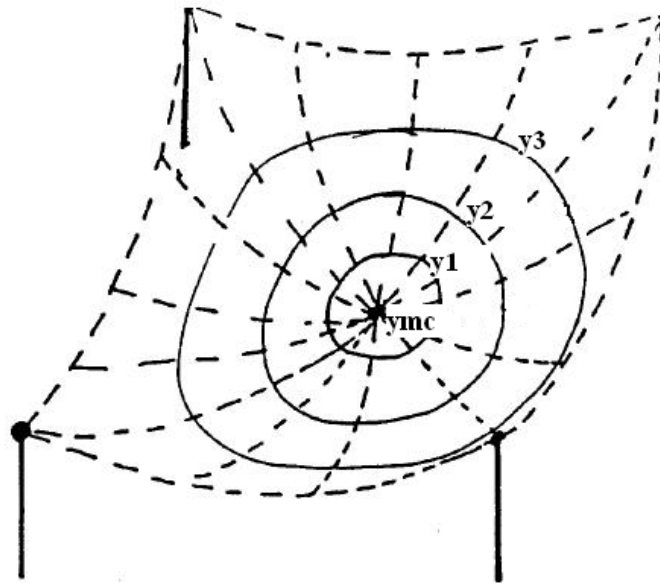


Figura 6.23 – Esboço tridimensional da zona de protecção no interior dos mastros [20]

## 6.5. Desenvolvimento de uma aplicação em ambiente Matlab® para determinação das zonas de protecção oferecidas por mastros e cabos

O Matlab proporciona um ambiente de computação técnica desenvolvido para suportar a implementação de tarefas de computação. Em suma, o Matlab é um ambiente computacional interactivo que permite a computação numérica e a visualização gráfica dos resultados.

O Matlab possui centenas de funções integradas que podem ser usadas para resolver problemas, dos mais simples aos mais complexos. Quer se pretenda apenas efectuar simples cálculos numéricos ou estatísticos, ou resolver equações simultâneas, desenhar gráficos ou correr um programa completo de simulação, o Matlab torna-se uma ferramenta decisiva.

Neste subcapítulo, apresenta-se a forma como foi desenvolvida uma aplicação, que corre em ambiente Matlab, e cujo objectivo é passar à prática a teoria desenvolvida nos subcapítulos precedentes, com especial ênfase no subcapítulo 6.3.

Tal como anteriormente explanado, a tarefa de representar graficamente e tridimensionalmente as zonas de protecção oferecidas pelas diferentes disposições de mastros e cabos de protecção é árdua e envolve a execução de todo um conjunto de passos de representação, morosos e facilmente passíveis de erro. Com o desenvolvimento desta aplicação, pretendeu-se aligeirar, simplificar e tornar muito mais expedita a representação e o cálculo destas zonas de protecção.

### 6.5.1. O Interface Gráfico de Utilizador (GUI)

O Interface Gráfico de Utilizador (GUI) é uma ferramenta composta por objectos gráficos, tais como botões, caixas de texto, menus de escolha múltipla entre outros.

Ao disponibilizar um interface entre o utilizador e o código subjacente à própria aplicação, o GUI permite ao simples utilizador a possibilidade de executar a aplicação e todas as suas funcionalidades sem que necessite conhecer os comandos necessários para que a mesma fosse executada através de uma simples linha de comandos.

O ambiente de desenvolvimento de um GUI em Matlab, contém todo um conjunto de ferramentas que simplificam grandemente a tarefa de elaboração deste tipo de interfaces [23].

Na figura 6.24 apresenta-se o GUI desenvolvido para esta aplicação em concreto.

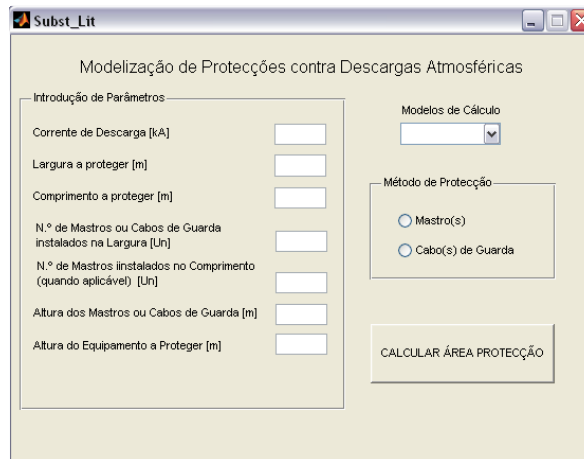


Figura 6.24 – Aspecto do GUI desenvolvido para a aplicação

Na caixa “Introdução de Parâmetros” à esquerda, o utilizador introduz os dados com os quais pretende determinar as zonas de protecção.

Do lado direito do GUI, o utilizador pode escolher entre quatro diferentes modelos de distância à descarga e se pretende efectuar a protecção utilizando mastros ou cabos de protecção.

## 6.5.2. Resultados das diversas simulações

### 6.5.2.1. Protecção com um único mastro ou cabo de guarda

Nas figuras 6.25 e 6.26, apresenta-se o resultado da simulação efectuada para um mastro e um cabo de protecção, utilizando os seguintes parâmetros de configuração:

- Corrente da descarga: 10 kA;
- Altura da protecção: 15m;
- Modelo de cálculo: Young;

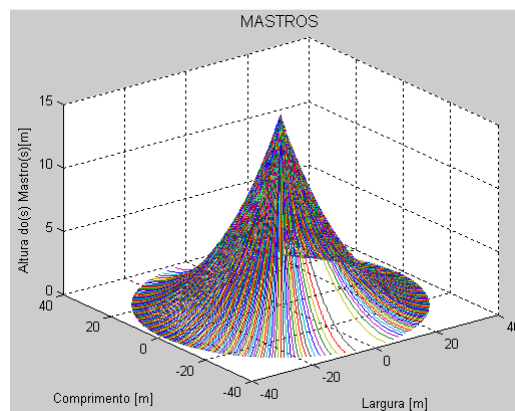


Figura 6.25 – Zona de protecção oferecida por um mastro

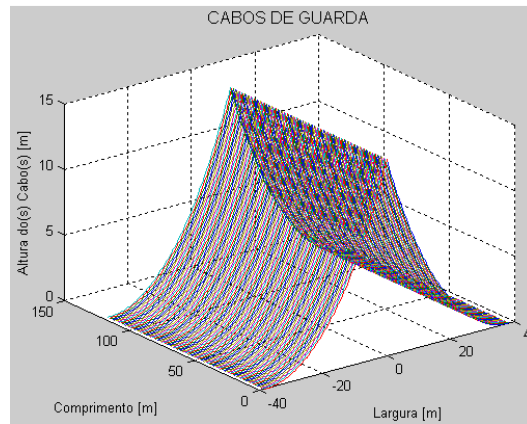


Figura 6.26 – Zona de protecção oferecida por um cabo de guarda

### 6.5.2.2. Efeito do número de mastros na zona de protecção

Nas simulações apresentadas nas figuras 6.27 a 6.30, apresenta-se o efeito provocado pelo aumento do número de mastros na zona de protecção produzida. Verifica-se que um dado número de mastros poderá ser insuficiente da proteger toda a área necessária ou, mesmo protegendo essa área, a sua altura não ser suficiente para proteger os objectos nela contidos. O aumento do número de mastros apresenta-se como solução para esse problema.

As zonas foram obtidas com os seguintes parâmetros:

- Corrente da descarga: 10 kA;
- Altura da protecção: 15m;
- Modelo de cálculo: Love;

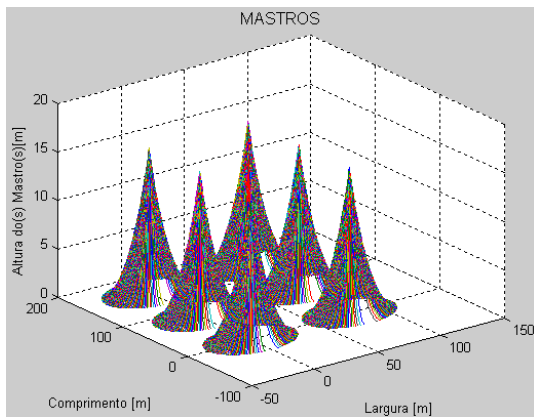


Figura 6.27 – Zona de protecção oferecida por 3x2 mastros

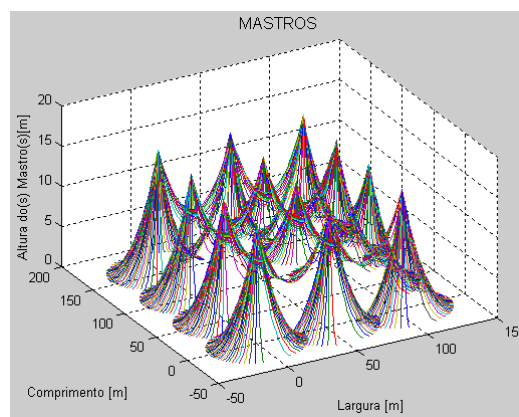


Figura 6.28 – Zona de protecção oferecida por 4x3 mastros

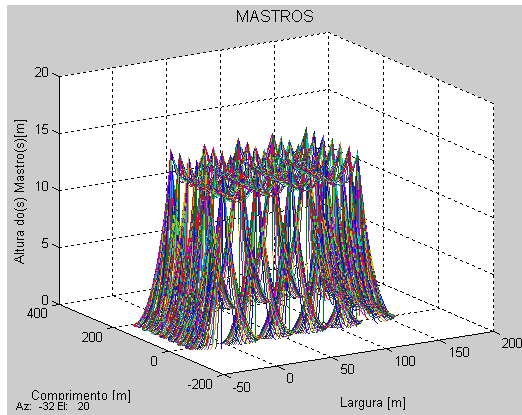


Figura 6.29 – Zona de protecção oferecida por 5x7 mastros

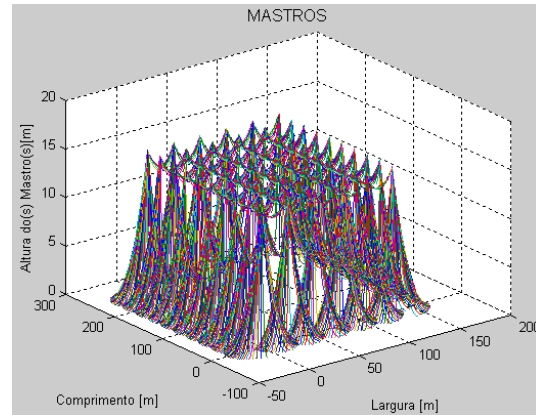


Figura 6.30 – Zona de protecção oferecida por 6x10 mastros

Na figura 6.27 o conjunto de mastros é insuficiente para garantir a protecção total da área desejada, havendo zonas desprotegidas ao redor dos mastros.

Na figura 6.28, o aumento do número de mastros já permite cobrir toda a área desejada, sendo que a altura mínima de protecção é de  $y_{mc}= 6,53\text{m}$ , ou seja, objectos dentro da área protegida com altura superior poderão ficar expostos.

Nas figuras seguintes, verifica-se que o aumento do número de mastros faz subir a altura mínima de protecção para  $y_{mc}=12,15\text{m}$  e  $y_{mc}=13,04$  respectivamente.

### 6.5.2.3. Efeito do número de cabos na zona de protecção

Nas simulações apresentadas nas figuras 6.31 a 6.34, apresenta-se o efeito provocado pelo aumento do número de cabos na zona de protecção produzida. As conclusões são semelhantes aquelas obtidas com o número de mastros.

As zonas foram obtidas com os seguintes parâmetros:

- Corrente da descarga: 10 kA;
- Altura da protecção: 20m;
- Modelo de cálculo: Love;

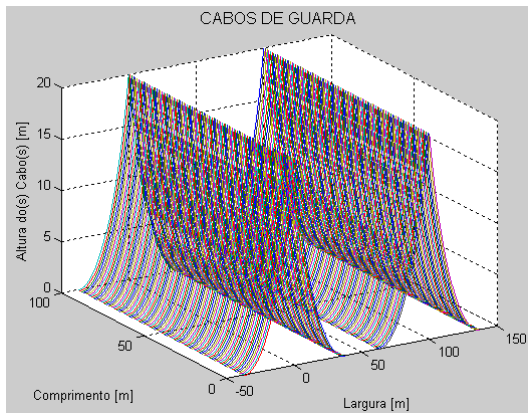


Figura 6.31 – Zona de protecção oferecida por 2 cabos

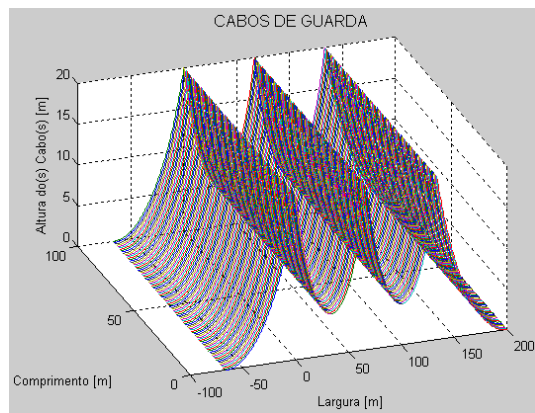


Figura 6.32 – Zona de protecção oferecida por 3 cabos

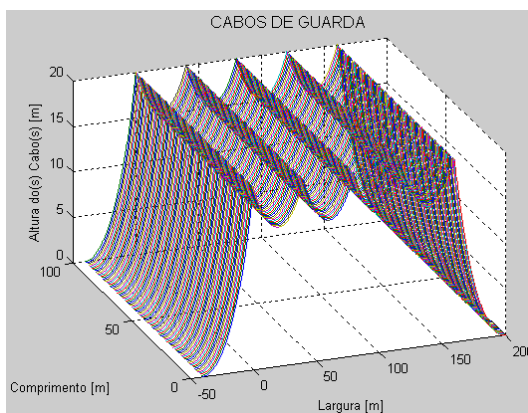


Figura 6.33 – Zona de protecção oferecida por 5 cabos

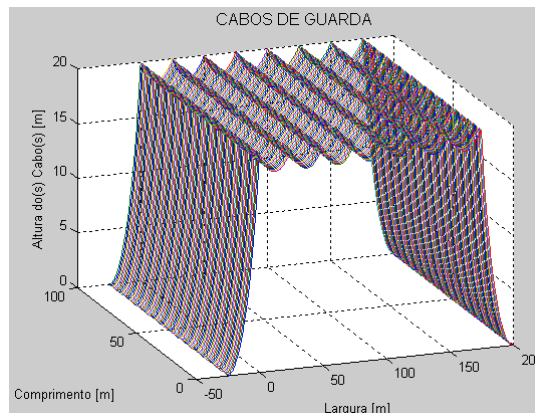


Figura 6.34 – Zona de protecção oferecida por 8 cabos

Na figura 6.31 os dois cabos mostram-se insuficientes para garantir a protecção total da área desejada, havendo uma zona sem protecção entre eles.

Na figura 6.32, o aumento do número de cabos já permite cobrir toda a área desejada, sendo que a altura mínima de protecção é de  $y_{mc} = 5,07\text{m}$ , ou seja, objectos dentro da área protegida com altura superior poderão ficar expostos.

Nas figuras 6.33 e 6.34, verifica-se que o aumento do número de cabos faz subir a altura mínima de protecção para  $y_{mc} = 15,27\text{m}$  e  $y_{mc} = 18,22$  respectivamente.

#### 6.5.2.4. Efeitos da aplicação dos diferentes modelos ao cálculo

Nas figuras seguintes, para o mesmo número de mastros e cabos, efectuaram-se os cálculos utilizando os diferentes modelos utilizados, a saber: Young, Love, Brown-Whitehead/CIGRE e IEEE-1995 respectivamente.



As zonas foram obtidas com os seguintes parâmetros:

- Corrente da descarga: 10 kA;
- Altura da protecção: 20m;

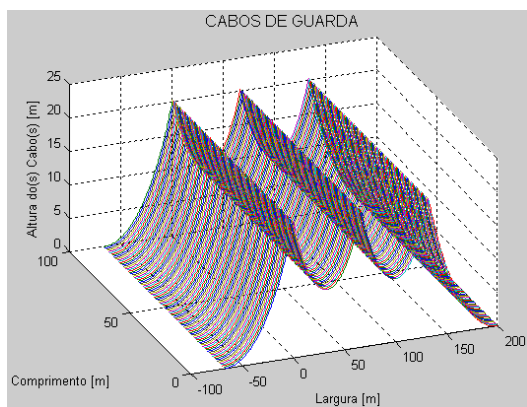


Figura 6.35 – Modelo YOUNG,  $y_{mc}=9,41\text{m}$

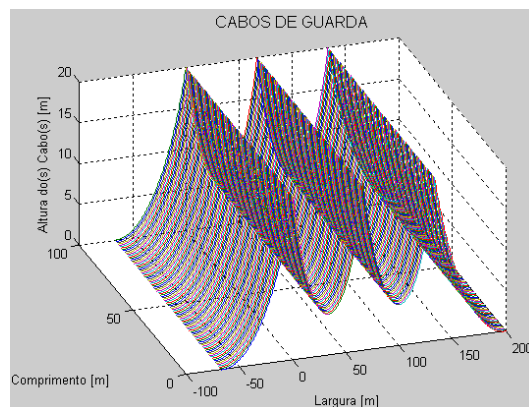


Figura 6.36 – Modelo LOVE,  $y_{mc}=5,07\text{m}$

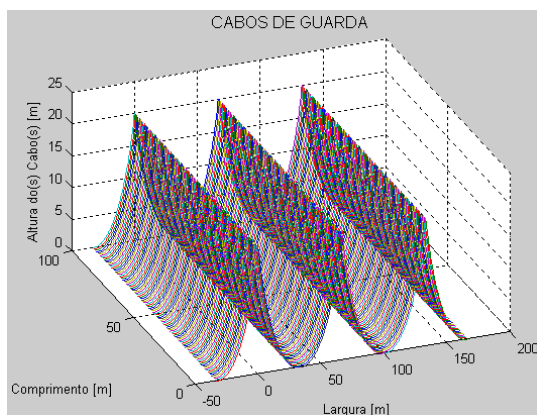


Figura 6.37 – Modelo Brown-Whitehead/CIGRE,  $y_{mc}=0,05\text{m}$

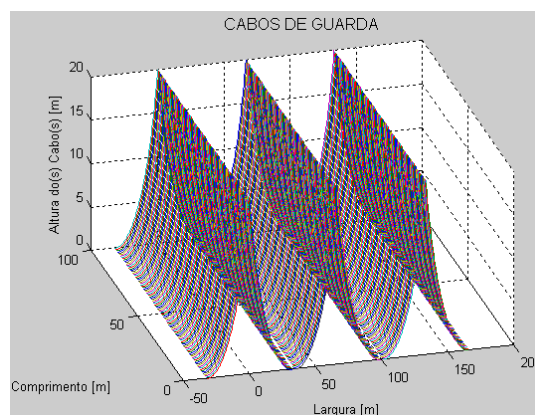


Figura 6.38 – Modelo IEEE-1995,  $y_{mc}=0\text{m}$

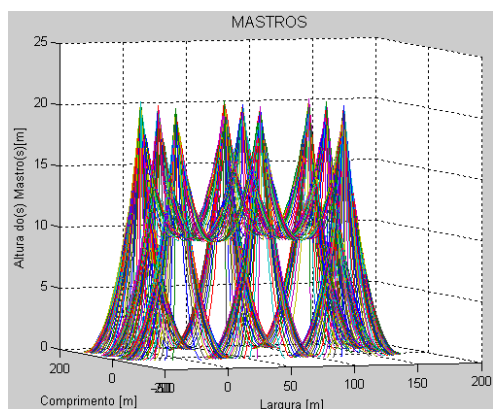


Figura 6.39 – Modelo YOUNG,  $y_{mc}=9,41\text{m}$

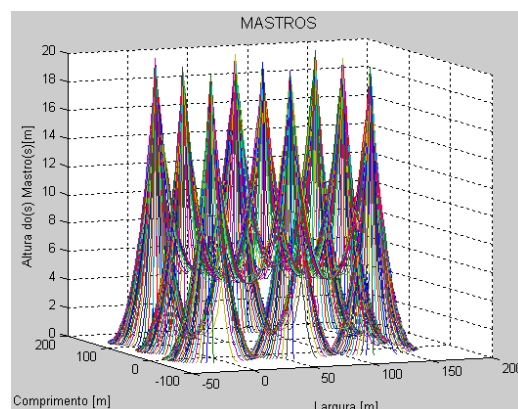


Figura 6.40 – Modelo LOVE,  $y_{mc}=5,07\text{m}$

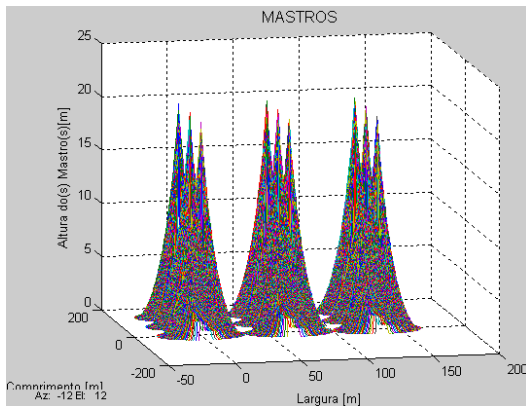


Figura 6.41 – Modelo Brown-Whitehead/CIGRE,  $y_{mc}=0,05m$

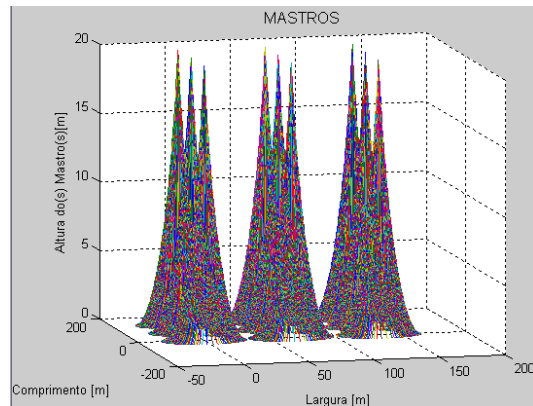


Figura 6.42 – Modelo IEEE-1995,  $y_{mc}=0m$

Da comparação entre os quatro modelos conclui-se que, utilizando os mesmos parâmetros de cálculo, os resultados podem ser bastante diferentes.

Para a mesma situação, o modelo de Young garante uma altura mínima de protecção  $y_{mc}=9,41m$  enquanto que o modelo IEEE-1995 já apresenta zonas desprotegidas entre os cabos ou mastros.

#### 6.5.2.5. Efeitos da aplicação de diferentes amplitudes de corrente

Nas figuras seguintes, para o mesmo número de mastros e cabos, efectuaram-se os cálculos utilizando diferentes amplitudes para a corrente de descarga.

As zonas foram obtidas com os seguintes parâmetros:

- Modelo de cálculo: LOVE;
- Altura da protecção: 20m;

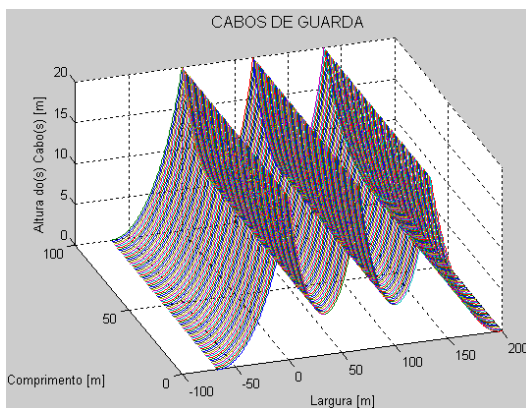


Figura 6.43 –  $I=10kA$ ,  $y_{mc}=5,07m$

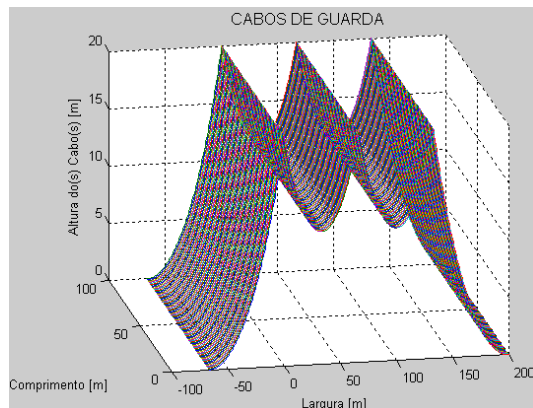


Figura 6.44 –  $I=20kA$ ,  $y_{mc}=11,57m$

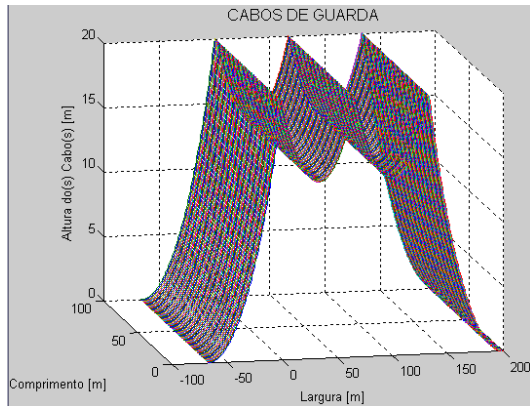


Figura 6.45 – I=30kA,  $y_{mc}=13,69m$

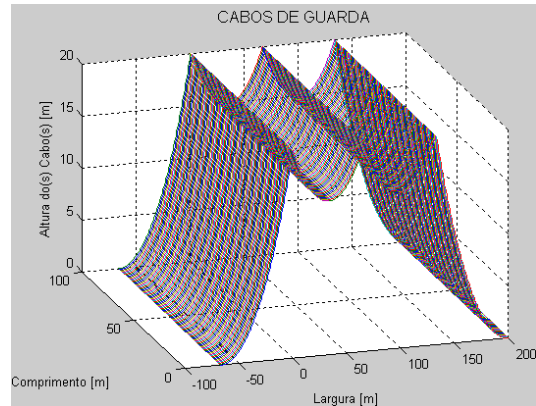


Figura 6.46 – I=40kA,  $y_{mc}=14,83m$

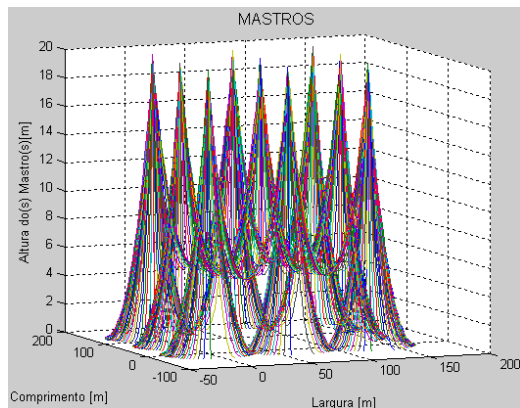


Figura 6.47 – I=10kA,  $y_{mc}=5,07m$

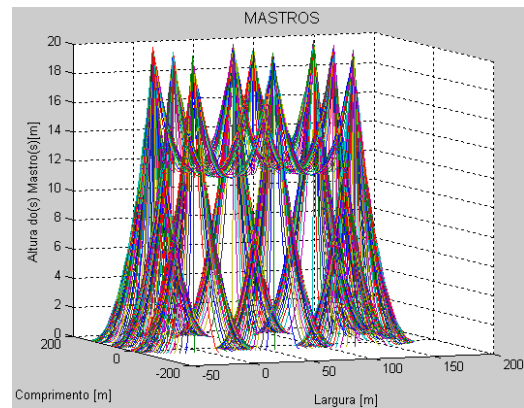


Figura 6.48 – I=20kA,  $y_{mc}=11,57m$

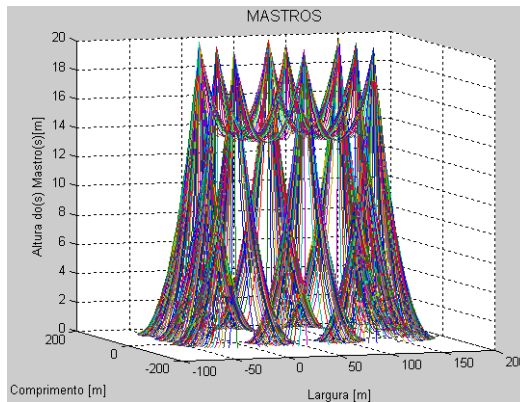


Figura 6.49 – I=30kA,  $y_{mc}=13,69m$

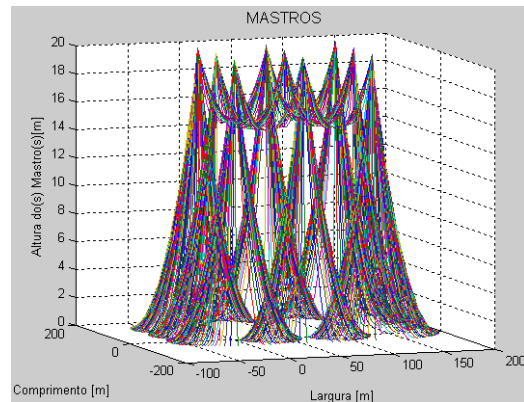


Figura 6.50 – I=40kA,  $y_{mc}=14,83m$

Pela observação das zonas de protecção apresentadas, pode concluir-se que, quanto maior for a amplitude da corrente de descarga, maior será a altura mínima de protecção pelo que melhor será a protecção conferida. Pode ainda concluir-se que, para efeitos de projecto, será suficiente o cálculo para correntes de descarga inferiores, garantindo-se assim a protecção mínima.



# Capítulo 7

## Conclusões

Da abordagem efectuada nos segundo e terceiro capítulos desta tese, foi apresentado o conceito de sistema de terra, indicadas as suas funções e aplicações e quais os seus constituintes. Foram introduzidas as definições de tensão de passo, tensão de toque e potencial transferido, que devem ser tidas em conta no dimensionamento de qualquer sistema de protecção com ligação à terra. Daqui se conclui que, qualquer sistema de ligação à terra tem que obrigatoriamente respeitar determinados parâmetros de segurança, que se encontram bem definidos pela legislação em vigor e que têm em linha de conta, fundamentalmente, a protecção e segurança de pessoas e bens.

No que concerne ao tema desenvolvido no capítulo quatro, verifica-se que a introdução da electrónica num cada vez mais elevado número de aplicações e equipamentos eléctricos deu origem ao surgimento de um novo e importante requisito: a compatibilidade electromagnética ou EMC. A capacidade de operar em ambientes ruidosos e sem provocar interferência em outros equipamentos tornou-se um requisito de qualidade mandatório. De forma a atingir estes objectivos, torna-se necessário compreender bem os fenómenos envolvidos neste conceito. A conclusão a que se chega é a de que o local e as características da instalação também desempenham um importante papel na compatibilidade electromagnética. Torna-se necessário definir cuidadosamente a localização e a disposição dos equipamentos de potência, os caminhos por onde circulam os cabos, bem como a blindagem dos mesmos, logo desde o início do projecto da instalação. Mesmo recorrendo a equipamentos devidamente certificados em EMC, uma instalação bem projectada pode estender as margens de segurança de compatibilidade electromagnética.

No capítulo cinco, apresentou-se o comportamento dos eléctrodos de terra em regime estacionário para baixas frequências e em solo homogéneo. Foram indicadas algumas expressões que permitem determinar o valor da resistência de terra e a distribuição do potencial pelo solo e à sua superfície, para diversos eléctrodos e geometrias diversas. Verificou-se que, nestes casos, os factores geométricos são preponderantes nos valores de resistência de terra assumidos pelos eléctrodos. As simulações efectuadas em ambiente Matlab, ao representarem graficamente estes conceitos, permitiram perceber de que forma a geometria dos eléctrodos influencia na segurança das pessoas, pela forma como modificam o perfil de distribuição do potencial à superfície, modificando deste modo também os valores de tensão de passo e de tensão de toque a que as mesmas poderão vir a ser sujeitas em caso de defeito.

Por fim, no capítulo seis, foram enunciados alguns conceitos básicos subjacentes ao

fenómeno natural das descargas atmosféricas, como se produzem e como são determinados os seus parâmetros teóricos. Foram apresentados alguns sistemas de protecção contra estas mesmas descargas e como é feita a sua interligação com os sistemas de terra da instalação. Foram identificadas as diversas equações de distância à descarga actualmente utilizadas e foi feita a descrição, passo a passo, do método geométrico de cálculo das áreas de protecção produzidas pelos diferentes sistemas de protecção, em diversas geometrias de disposição e para as diferentes equações de distância à descarga. Dada a complexidade e morosidade de execução deste método e a dificuldade em visualizar tridimensionalmente o resultado obtido, foi elaborada uma aplicação em ambiente Matlab que permite, de um modo rápido e expedito, obter estas mesmas áreas de protecção, tornando assim fácil a tarefa de comparar os diferentes modelos de cálculo e geometrias de disposição das protecções, sendo uma ferramenta de grande utilidade no projecto e dimensionamento de protecções contra descargas atmosféricas e podendo ser utilizada quer na protecção de objectos e edifícios, quer na protecção de linhas de transmissão e de distribuição de energia.

Das simulações efectuadas com a aplicação desenvolvida, pode concluir-se que, quanto maior for o número de elementos de protecção instalados, dentro da mesma área, maior será a zona de protecção por eles criada. De igual modo, quanto maior for o número de elementos de protecção instalados, dentro da mesma área, maior será a altura mínima de protecção gerada. Quanto maior for a amplitude da corrente gerada pela descarga atmosférica, melhor se comportam os modelos face às zonas de protecção criadas, pelo que se conclui que será mais difícil garantir a protecção quanto menor for a amplitude dessa corrente de descarga.

Das 4 equações dos modelos aplicadas, verifica-se que as de Brown-Whitehead/CIGRE e IEEE-1995 são as mais prudentes face às zonas de protecção resultantes da sua aplicação, pelo que se assume que são as que mais se aproximam da realidade dado serem as usadas pelos organismos mais prestigiados neste tema.

# Bibliografia

- [1] Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), Ministério da Economia e Inovação (MEI), *RTIEBT - Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão*, INCM, Lisboa 2006;
- [2] Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM), *Manual ITED – Prescrições e Especificações Técnicas das Infra-estruturas de Telecomunicações em Edifícios*, INCM, Lisboa 2009;
- [3] Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM), *Manual ITUR – Infra-estruturas de Telecomunicações em Loteamentos, Urbanizações e Conjunto de Edifícios*, INCM, Lisboa 2009;
- [4] MORRISON, Ralph, *Grounding and Shielding Techniques – 4th Edition*, John Wiley & Sons, Inc., E.U.A. 1998;
- [5] MORRISON, Ralph, LEWIS, Warren H., *Grounding and Shielding in Facilities*, John Wiley & Sons, Inc., E.U.A. 1990;
- [6] IEEE Emerald Book (Std 1100-1992), *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment – 3rd Edition*, IEEE, Inc., E.U.A. 1995;
- [7] FILHO, Silvério Visacro, *Aterramentos Eléctricos*, Artliber Editora, São Paulo 2005;
- [8] FILHO, Silvério Visacro, *Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia*, Artliber Editora, São Paulo 2005;
- [9] OTT, Henry W., *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems – 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Inc., E.U.A. 1988;
- [10] CARLSON, A. Bruce, *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication – 3rd Edition*, McGraw Hill International Editions, E.U.A. 1986;
- [11] LANGGUTH, Wolfgang, *Earthing & EMC – Fundamentals of Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Power Quality Application Guide, Copper Development Association, 2006, (<http://www.copper.org>);
- [12] International Telecommunication Union (ITU), *Protection Against Interference – Bonding Configurations and Earthing inside a Telecommunication Building*, 1996;
- [13] DELABALLE, Jaques, *EMC: Electromagnetic Compatibility*, Collection Technique, Schneider Electric, 2001, (<http://www.schneider-electric.com>);
- [14] Schneider Electric, Programa de Formação Técnica Continuada: *Compatibilidade Electromagnética*, (<http://www.schneider-electric.com>);
- [15] VENHHUIZEN, Reyer, *Earthing & EMC – A Systems Approach to Earthing*, Power Quality Application Guide, Copper Development Association, 2002, (<http://www.copper.org>);

- [16] MARKIEWICZ, Henryk, KLAJN, Antoni, *Earthing & EMC – Earthing Systems: Basic Constructional Aspects*, Power Quality Application Guide, Copper Development Association, 2004, (<http://www.copper.org>);
- [17] LEE, Bok-Hee, JOE, Jeong-Hyeon, CHOI, Jong-Hyuk, *Simulations of frequency-dependent impedance of ground rods considering multi-layered soil structures*, Journal of Electrical Engineering & Technology, 2009;
- [18] MARKIEWICZ, Henryk, KLAJN, Antoni, *Earthing & EMC – Earthing Systems: Fundamentals of Calculation and Design*, Power Quality Application Guide, Copper Development Association, 2003, (<http://www.copper.org>);
- [19] Schneider Electric, Programa de Formação Técnica Continuada: Protecção contra descargas atmosféricas, (<http://www.schneider-electric.com>);
- [20] HILEMAN, Andrew R., *Insulation Coordination for Power Systems*, CRC Press, Taylor & Francis Group, E.U.A. 1999;
- [21] VAHIDI, Behrooz, ALIABAD, Ali Akbar D., *A software based on Matlab for teaching substation lightning protection design to undergraduate students with emphasize on different striking distance models*, Wiley Periodicals Inc., Irão 2009;
- [22] McDONALD, John D., *Electric Power Substations Engineering*, CRC Press LLC, E.U.A., 2003;
- [23] CHAPMAN, Stephen J., *Matlab® Programming for Engineers - 2<sup>nd</sup> Edition*, Bookware Companion Series;
- [24] COORAY, Vernon, *Lightning Protection*, IET Power and Energy Series 58, Reino Unido, 2010;
- [25] VIJAYARAGHAVAN, G., BROWN, Mark, BARNES, Malcolm, *Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*, E.U.A., 2004;



# Anexo I

Resistividade dos terrenos de acordo com a sua natureza [1]

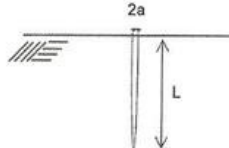
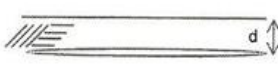

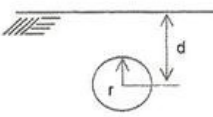
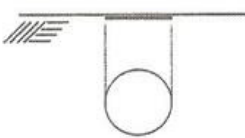
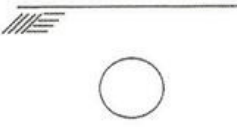

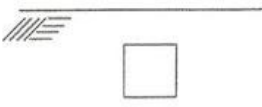
[7] [18]

Natureza dos terrenos	Resistividade ( $\Omega \times m$ )
Terreno pantanoso	1 a 30
Lama	20 a 100
Húmus	10 a 150
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 3 000
Solo pedregoso nu	1 500 a 3 000
Solo pedregoso recoberto de relva ou erva curta	300 a 500
Calcários macios	100 a 300
Calcários compactos	1 000 a 5 000
Calcários fissurados	500 a 1 000
Xistos	50 a 300
Micaxistos	800
Granito e grés, consoante a alteração geológica	1 500 a 10 000
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

# Anexo II

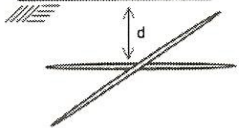
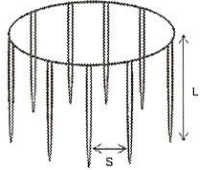
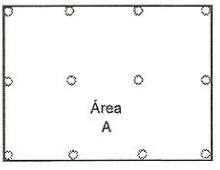
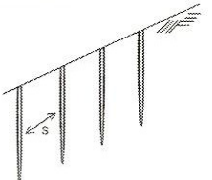
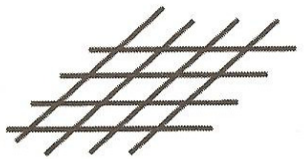
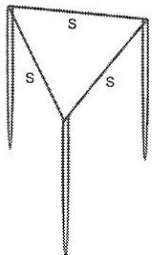
Expressões para configurações típicas de eléctrodos de terra

[7]

Eléctrodo	Tipo / Expressão
	<p>Haste Vertical</p> $R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
	<p>Eléctrodo Horizontal</p> $R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{4L}{d} - 2 + \frac{2d}{L} + \dots \right)$
	<p>Semi-esfera ao nível do solo</p> $R_T = \frac{\rho}{2\pi r}$
	<p>Esfera colocada à profundidade "d"</p> $R_T = \frac{\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{2d} \right)$
	<p>Disco horizontal ao nível do solo</p> $R_T = \frac{\rho}{4r}$
	<p>Disco vertical à profundidade "d"</p> $R_T = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{8\pi d} \left( 1 + \frac{7}{24} + \frac{r^2}{4d^2} + \dots \right)$
	<p>Disco horizontal à profundidade "d"</p> $R_T = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{8\pi d}$
	<p>Superfície quadrada vertical</p> <p>Mesma resistência que a de um disco de mesma área, colocado à mesma profundidade</p>

# Anexo III

## Expressões para configurações típicas de sistemas de terra [7]

Eléctrodos	Tipo / Expressão
	<p>Estrela de 4 pontos colocada num plano horizontal de profundidade “d” (raio do eléctrodo: a)</p> $R_T = \frac{\rho}{8\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{L}{d} + 2,91 - 1,07 \frac{2d}{L} \dots \right)$
	<p>n hastes verticais dispostas em círculo (<math>s \gg L</math>)</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{d} \ln \frac{2n}{\pi} \right)$
	<p>n hastes verticais dispostas uniformemente na área A</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln \frac{4L}{a} - 1 + 2 \cdot \frac{K_1 L}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$ <p><math>K_1</math> = constante que depende da profundidade da parte superior das hastes</p>
	<p>n hastes verticais dispostas em linha reta (<math>s \gg L</math>)</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{d} \ln \frac{1,781 \cdot n}{2,718} \right)$
	<p>Malha constituída por reticulado formado com eléctrodos horizontais, cobrindo a área A e comprimento total de condutores L</p> $R_T \cong 0,443 \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L}$
	<p>Conjunto de 3 hastes verticais interligadas, dispostas no vértice de um triângulo equilátero</p> $R_T = R_{11} \cdot \frac{1+2r/s}{3} \quad R_{11} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$ $\frac{\rho}{2\pi r} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$ <p>r: raio do hemisfério que possui o mesmo valor de resistência de uma haste (<math>R_{11}</math>)</p>