

Susana Isabel Alves Ferreira da Silva Portocarrero  
Licenciada em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela FEUP

# *Estudo da Compatibilidade Electromagnética de Aparelhagem de Média Tensão*

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica  
e de Computadores (área de Sistemas de Energia)

Dissertação realizada sob orientação de:  
Professor Doutor Fernando Pires Maciel Barbosa,  
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

e

Professor Doutor Custódio João Pais Dias,  
Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Instituto Superior de Engenharia do Porto

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

PORTO, Dezembro de 2006







## **Resumo**

Palavras-chave: Compatibilidade electromagnética, Interferência Electromagnética

A realização deste trabalho está inserida no âmbito da Compatibilidade Electromagnética (CEM) referente a um equipamento específico - a aparelhagem de Média Tensão.

Devido ao crescimento tecnológico, tem vindo a ser dada uma maior atenção à área da Compatibilidade Electromagnética, no sentido de se estabelecerem critérios de controlo e prevenção dos efeitos indesejáveis provocados pela Interferência Electromagnética.

Este trabalho apresenta, de uma forma resumida, os aspectos históricos e os conceitos mais importantes para a compreensão do tema em estudo.

São apresentadas as normas que, actualmente, estão em vigor ao nível da Compatibilidade Electromagnética. Estas normas assumem especial importância pois, o seu principal objectivo é estabelecer regras, metodologias, critérios e recomendações para assegurar o perfeito funcionamento de equipamentos nos ambientes electromagnéticos que serão instalados.

Apresenta-se, de uma forma simplificada, quais as interferências encontradas nas Instalações Eléctricas e as soluções passíveis de as atenuar.

São apresentados os ensaios que os equipamentos devem ser submetidos para validar a sua conformidade com as normas harmonizadas de Compatibilidade Electromagnética. Apresentam-se as configurações dos vários tipos de ensaios, os seus procedimentos e os limites requeridos pelas normas para os vários tipos de interferências, emitidas e conduzidas.

Descrevem-se dois casos de estudo a equipamentos eléctricos, mais concretamente, a unidades de controlo. O primeiro tem como objectivo demonstrar a conformidade do equipamento com a Directiva de Compatibilidade Electromagnética, no âmbito da Marcação CE. O segundo caso mostra um estudo realizado para conhecer a causa de interferências produzidas no equipamento, no seu ambiente electromagnético, e para definir um plano de acção no sentido de as eliminar.



## **Abstract**

**Keywords:** *Electromagnetic compatibility, Electromagnetic Interference.*

This work is inserted in the scope of the Electromagnetic Compatibility (CEM) to medium voltage equipment.

Due to the technological growth, a bigger attention is being given to the area of the Electromagnetic Compatibility, mainly to establish control criteria and to prevent the effect of undesirable Electromagnetic Interference.

This work presents a resume of the historical aspects and the concepts most important for the understanding of the subject in study.

The actual Electromagnetic Compatibility norms are presented. These norms assume special importance, to establish rules, methodologies, criteria and recommendations to assure the perfect equipment functioning in the electromagnetic environments in which they will be installed.

This work presents, on a simplified form, the interferences that exist in the Electric Installations and the potential solutions to attenuate them.

The tests that the equipment must be submitted to validate the conformity with the harmonized norms of Electromagnetic Compatibility are presented and discussed. The configurations and types of tests, its procedures and the limits required for the norms for the types of interferences, radiated and conducted, are presented too.

The studies of two control electric equipment units are described. The first one has as objective to demonstrate the conformity of the equipment with the European Union's CEM Directive, in the scope of CE Mark. The second one studies the cause of interferences produced in the equipment in its electromagnetic environment and defines a plan to reduce the electromagnetic interference.





## ***Agradecimentos***

*A realização deste trabalho só foi possível com a contribuição de um conjunto de pessoas e instituições a quem devo os meus mais sinceros agradecimentos e aos quais não poderia deixar de fazer referência:*

- Aos Professores Doutores F. P. Maciel Barbosa e Custódio J. P. Dias, na qualidade de orientadores, que foram indispensáveis para a realização deste trabalho, pela valiosa orientação científica dada, pelo incentivo e pelo apoio constantes.*
- À EFACEC pelas contribuições dadas para a realização deste trabalho.*
- Ao Engenheiro Filipe Macedo, da EFACEC, que se mostrou sempre disponível, pela cedência de material, pelos conselhos e sugestões e pela resolução de dúvidas existentes.*



# **Índice**

**Índice de Figuras.....vii**

**Índice de Tabelas.....xi**

**Índice de Acrónimos.....xiii**

**Capítulo 1: Introdução.....1**

1.1 Enquadramento e motivação.....1

1.2 Estrutura e organização.....2

**Capítulo 2: Compatibilidade Electromagnética - Referência Histórica e conceitos.....3**

2.1. Evolução Histórica.....3

2.2. Onda Electromagnética.....4

2.3. Campos Electromagnéticos.....6

2.3.1. Campo Eléctrico.....7

2.3.2. Linhas de Força.....7

2.3.3. Campo Magnético.....9

2.4. Interferência Electromagnética.....12

2.4.1. Interferência Conduzida.....14

2.4.2. Interferência Radiada.....	15
2.5. Compatibilidade Electromagnética.....	17
2.6. Unidades de Compatibilidade Electromagnética.....	18
2.7. Conclusões.....	22

### **Capítulo 3: Normas de Compatibilidade Electromagnética.....23**

3.1. Aspectos Gerais.....	24
3.2. Principais Normas Internacionais e suas abrangências.....	28
3.3. Marca CE.....	30
3.4. Conclusões.....	31

### **Capítulo 4: Compatibilidade Electromagnética em Instalações Eléctricas.....32**

4.1. Qualidade da Energia Eléctrica.....	32
4.1.1. Normalização.....	40
4.1.2. Monitorização da Qualidade da Energia Eléctrica.....	44
4.1.3. Soluções para os problemas de Qualidade da Energia Eléctrica.....	45
4.2. Instalações Eléctricas.....	50
4.2.1. Condutores.....	52
4.2.2. Sistemas de Terra.....	55
4.2.3. Protecção contra Ondas de Choque.....	56
4.2.4. Blindagem Electromagnética.....	57
4.2.5. Protecção contra Descargas Atmosféricas.....	58
4.3. Conclusões.....	59

**Capítulo 5: Ensaios de Compatibilidade Electromagnética.....60**

5.1. Ensaios de Emissão.....	61
5.1.1. Ensaio de Emissão Radiada.....	63
5.1.2. Ensaio de Emissão Conduzida.....	68
5.2. Ensaios de Imunidade.....	72
5.2.1. Ensaio de Imunidade Radiada.....	73
5.2.2. Ensaio de Imunidade Conduzida.....	75
5.2.3. Ensaio de Imunidade a Ondas de Choque.....	77
5.2.4. Ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos.....	78
5.2.5. Ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas.....	80
5.2.6. Ensaio de Imunidade a Quedas/Interrupções de Tensão.....	84
5.3. Conclusões.....	86

**Capítulo 6: Estudo da Compatibilidade Electromagnética de uma Unidade de Aquisição, Controlo e Protecção.....87**

6.1. Descrição geral.....	89
6.2. Arquitectura Base.....	90
6.3. Características Funcionais.....	91
6.4. Ensaios realizados à UAC.....	94
6.4.1. Ensaio de Emissão Radiada.....	97
6.4.2. Ensaio de Emissão Conduzida.....	99
6.4.3. Ensaios de Imunidade.....	102
6.4.3.1. Ensaio de Imunidade Conduzida.....	103
6.4.3.2. Ensaio de Imunidade a Ondas de Choque.....	104

6.4.3.3. Ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos.....	109
6.4.3.4. Ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas.....	111
6.5. Interferências produzidas numa unidade TPU.....	114
6.6. Conclusões.....	120
<b>Capítulo 7: Conclusões.....</b>	<b>121</b>
<b>Referências.....</b>	<b>123</b>

## **Índice de Figuras**

Figura 2.1 - Onda Electromagnética.....	4
Figura 2.2 - Espectro Electromagnético.....	5
Figura 2.3 - Força do campo eléctrico entre duas cargas.....	7
Figura 2.4 - Linhas de força de um campo eléctrico com cargas positivas.....	8
Figura 2.5 - Linhas de força de um campo eléctrico com cargas negativas.....	9
Figura 2.6 - Espectro magnético.....	10
Figura 2.7 - Diagrama representativo de relação entre a força do campo e a distância.....	11
Figura 2.8 - Tipos de EMI.....	13
Figura 2.9 - Interferência por condução.....	14
Figura 2.10 - (a) Radiação entre sistemas; (b) Radiação entre subsistemas.....	15
Figura 2.11 - Circuito amplificador que ilustra a definição e o uso do decibel.....	19
Figura 3.1 - Marcação CE.....	31
Figura 4.1 - Distorção Harmónica.....	34
Figura 4.2 - Ruído (Interferência Electromagnética) .....	34
Figura 4.3 - Inter-harmónicos.....	35
Figura 4.4 - Interrupção momentânea.....	35
Figura 4.5 - Subtensão momentânea.....	36
Figura 4.6 - Sobretensão momentânea.....	36
Figura 4.7 - Flutuação da tensão.....	37
Figura 4.8 - Micro-cortes.....	37
Figura 4.9 - Transitórios.....	38
Figura 4.10 - Soluções para redução dos harmónicos de corrente à entrada dos equipamentos: (a) indutor em série; (b) conversor step-up.....	47

Figura 4.11 - Filtro activo paralelo: exemplo de funcionamento.....	48
Figura 4.12 - Esquema de um filtro activo paralelo.....	49
Figura 4.13 - Esquema de um filtro activo série.....	50
Figura 4.14 -Influência do comportamento do condutor na equipotencialização.....	56
Figura 5.1 - Divisão da emissão de RF nas classes radiada e conduzida.....	62
Figura 5.2 - OATS.....	63
Figura 5.3 - Célula GTEM.....	64
Figura 5.4 - Câmara Semi-Anecóica.....	64
Figura 5.5 - Montagem para o ensaio de Emissão Radiada - vista lateral.....	65
Figura 5.6 - Montagem para o ensaio de Emissão Radiada - vista superior.....	66
Figura 5.7 - Rede de Estabilização de Impedância de Linha.....	69
Figura 5.8 - Montagem para o ensaio de Emissão Conduzida.....	70
Figura 5.9 Diagrama de Ensaio de Imunidade.....	73
Figura 5.10 - Montagem para o ensaio de Imunidade Radiada.....	74
Figura 5.11 - Rede de Acoplamento e Desacoplamento (CDN).....	75
Figura 5.12 - Clamp Electromagnético.....	75
Figura 5.13 - Montagem para o ensaio de Imunidade Conduzida.....	76
Figura 5.14 - Montagem para o ensaio de Imunidade a Ondas de Choque.....	77
Figura 5.15 - Montagem para o ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos (a) nas portas principais; (b) nas portas de sinal.....	79
Figura 5.16 - Montagem para o ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas.....	81
Figura 5.17 - Exemplo de redução de Tensão a 70% por dois períodos.....	84
Figura 5.18 - Montagem para o ensaio de Imunidade a Quedas/Interrupções de Tensão.....	85
Figura 6.1 - Unidade de Aquisição, Controlo e Protecção (UAC).....	88
Figura 6.2 - Arquitectura geral da UAC.....	91



Figura 6.3 - Instalações da ANACOM.....	94
Figura 6.4 - Laboratório 1 de CEM.....	95
Figura 6.5 - Laboratório 2 de CEM.....	95
Figura 6.6 - Câmara Semi-Anecóica.....	96
Figura 6.7 - Câmara Blindada.....	96
Figura 6.8 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Emissão Radiada.....	98
Figura 6.9 - Gráfico das perturbações electromagnéticas radiadas.....	98
Figura 6.10 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Emissão Conduzida.....	100
Figura 6.11 - Gráfico do ensaio no positivo com tensão de alimentação de 19V.....	101
Figura 6.12 - Gráfico do ensaio no negativo com tensão de alimentação de 72V.....	101
Figura 6.13 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Imunidade Conduzida.....	104
Figura 6.14 - Gerador de Ondas.....	105
Figura 6.15 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Imunidade a Ondas de Choque...107	
Figura 6.16 - Gerador de Transitórios.....	110
Figura 6.17 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos.....	111
Figura 6.18 - Pormenor da aplicação de uma Descarga Electrostática pelo ar.....	113
Figura 6.19 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas.....	114
Figura 6.20 - Unidade TPU e sua localização.....	115
Figura 6.21 - Cabeças de ligação dos cabos de entrada e saída de 60kV.....	117
Figura 6.22 - Tampas metálicas de acesso aos transformadores de medida.....	118
Figura 6.23 - Chassis de Baixa Tensão.....	118
Figura 6.24 - Pontos de medição no solo.....	119

## Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Valores dos primeiros 25 harmónicos de tensão nos portos de fornecimento expresso em percentagem da tensão nominal $U_N$ .....	41
Tabela 4.2 - Níveis de Compatibilidade para harmónicos de tensão em redes de BT.....	42
Tabela 4.3 - Níveis de Compatibilidade para harmónicos de tensão em redes industriais.....	43
Tabela 4.4 - Limites máximos de distorção.....	44
Tabela 5.1 - Limites para a Emissão Radiada (L=10m) .....	68
Tabela 5.2 - Limites para a Emissão Conduzida nas linhas de alimentação.....	71
Tabela 5.3 - Limites para a Emissão Conduzida nas portas de comunicação.....	71
Tabela 5.4 - Níveis de severidade para o ensaio de Imunidade Conduzida.....	77
Tabela 5.5 - Níveis de severidade para o ensaio de Imunidade a Ondas de Choque.....	78
Tabela 5.6 - Níveis de severidade para o ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos.....	80
Tabela 5.7 - Níveis de severidade para o ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas.....	83
Tabela 5.8 - Critérios para selecção dos níveis de severidade.....	83
Tabela 5.9 - Níveis de Teste para o ensaio de Imunidade a Quedas/Interrupções de Tensão na Rede Eléctrica.....	85
Tabela 6.1 - Medições <i>Quasi-Peak</i> .....	99
Tabela 6.2 - Medições <i>Quasi-Peak</i> .....	102
Tabela 6.3 - Níveis ensaiados no ensaio de Imunidade Conduzida.....	103
Tabela 6.4 - Níveis ensaiados no ensaio de Imunidade a Ondas de Choque.....	105

Tabela 6.5 - Portos ensaiados.....	106
Tabela 6.6 - Resultados dos ensaios.....	108
Tabela 6.7 - Níveis ensaiados no ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos.....	109
Tabela 6.8 - Níveis ensaiados no ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas.....	112

## **Índice de Acrónimos**

**ANACOM** - Autoridade Nacional de Comunicações

**CDN** - Coupling Decoupling Network

**CEE** - Commission International de Reglementation en vue de l'Approbation de l'Equipment Electrique

**CEM** - Compatibilidade Electromagnética

**CENELCOM** - Comité Coordenação Européen des Normes Electriques pour le Marche Commun

**CENELEC** - Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

**CISPR** - Comité International Special des Perturbation Radiotechniques

**CPD** - Directiva dos Produtos da Construção

**CSA** - Câmaras Semi-Anecóicas

**EES** - Equipamentos Electrónicos Sensíveis

**EET** - Equipamento Em Teste

**EMI** - Interferência Electromagnética

**ESD** - Descarga Electrostática

**EUT** - Equipment Under Test

**FCC** - Federal Communications Commission

**GIS** - Gás Insulated Substation

**GSM** - Global System for Mobile Communications

**GTEM** - Células GHz Transverso Electromagnéticas

**HMI** - Human-Machine Interface

**IEC** - International Electrotechnical Commission

**IEEE** -Institute of Electrical and Electronics Engineers

**IPQ** - Instituto Português da Qualidade

**IRIG-B** - Inter Range Instrumentation Group - B

**ISM** -Equipamentos de uso Industrial, Científicos e Médicos

**ITE** -Equipamentos de Informática

**LISN** - Line Impedance Stabilization Network

**LAN** - Local Area Network

**OATS** - Open Area Test Site

**PAC** -Pontos de Acoplamento Comum

**PCC** – Point of Common Coupling

**PLC** - Controladores Lógicos Programáveis

**RF** - Rádio Frequência

**SCADA**- Supervisory Control And Data Acquisition

**THD** – Total Harmonic Distortion

**TPU** - Unidade Terminal de supervisão, controlo e Protecção

**TVSS** – Transient Voltage Surge Suppressors

**UAC** - Unidade de Aquisição, Controlo e Protecção

**UIR** - Union International de Radiodiffusion

**UPS** - Uninterruptable Power Supplies

**VEI** -Vocabulário Electrotécnico Internacional



# Capítulo 1

## Introdução

A Radiação Electromagnética existe desde o nascimento do Universo, sendo a luz a sua forma mais usual. O Sol, por exemplo, é a fonte de Radiação Electromagnética mais intensa a que estamos expostos.

O crescimento tecnológico, as mudanças no comportamento social e nos hábitos de trabalho criaram um ambiente crescentemente exposto a outras fontes de Radiação Electromagnética. Estas fontes, ou dispositivos, foram criadas artificialmente pelo homem e são, por exemplo, as antenas dos sistemas de telecomunicações, as linhas de alta tensão, os aparelhos eléctricos, etc. O funcionamento destes dispositivos é susceptível de ser alterado por fenómenos electromagnéticos, isto é, interferências electromagnéticas (EMI). Estas podem ser controladas pela adopção de práticas de Compatibilidade Electromagnética (CEM).

Alicerçado na importância da Compatibilidade Electromagnética, este capítulo descreve o enquadramento do trabalho desenvolvido e os motivos que levaram à sua realização, concluindo com uma descrição da forma como esta dissertação foi organizada.

### **1.1. Enquadramento e motivação**

Apesar da preocupação com os efeitos da Interferência Electromagnética já se fazer sentir na nossa sociedade desde o início do século passado, o assunto só veio a ser tratado de

norma mais aprofundada há apenas algumas décadas. Em virtude do aumento crescente deste fenómeno, surge o tema de estudo conhecido, actualmente, por Compatibilidade Electromagnética, uma das subáreas do amplo tema Energia.

É minha motivação que este trabalho constitua um documento útil para aqueles que pretendam saber mais sobre o amplo tema Compatibilidade Electromagnética.

## **1.2. Estrutura e organização**

A estrutura da dissertação acompanha o processo de execução do trabalho desenvolvido.

Neste capítulo introdutório descreve-se o enquadramento e a motivação para a realização do trabalho.

No capítulo 2 apresenta-se o tema que impulsionou o desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente a Compatibilidade Electromagnética. Este capítulo inicia-se com uma breve referência histórica à Compatibilidade Electromagnética, sendo ainda apresentados alguns conceitos importantes à compreensão do tema em estudo.

No capítulo 3 enumeram-se as normas vigentes para a Compatibilidade Electromagnética.

O capítulo 4 apresenta as características das instalações eléctricas e soluções para que estas sejam electromagneticamente compatíveis.

No capítulo 5 apresentam-se os ensaios de Compatibilidade Electromagnética e os seus procedimentos.

No capítulo 6 descrevem-se dois casos de estudo a unidades de controlo.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e propostas de trabalhos de desenvolvimento futuros



## **Capítulo 2**

### **Compatibilidade Electromagnética - Breve referência histórica e Conceitos**

#### **2.1. Evolução Histórica**

Historicamente, a consideração dos efeitos relacionados com a Compatibilidade Electromagnética começa em 1901, quando o Italiano Guglielmo Marconi realiza a primeira transmissão de sinais a longas distâncias através de ondas electromagnéticas. Vinte anos mais tarde, entram em operação os primeiros sistemas de radiodifusão comerciais. Com a proliferação destes sistemas surgem os problemas relacionados com as interferências electromagnéticas, conduzindo a comunidade científica à realização dos primeiros estudos, relacionando os novos fenómenos electromagnéticos com as interferências de radiofrequência.

Entre 1939 e 1945, a utilização de comunicações sem fios torna-se ainda mais intensa. Datam da Segunda Guerra Mundial os primeiros problemas de interferências electromagnéticas em sistemas de navegação por radar. Em virtude do impetuoso desenvolvimento dos sistemas de transmissão de informação, na forma digital, os problemas de Compatibilidade Electromagnética tornam-se ainda mais complexos. Os anos seguintes obrigam a um estudo e análise mais aprofundado destes fenómenos, os quais se tornam, mais tarde, objecto e tema de estudo da Compatibilidade Electromagnética.

Em virtude do desenvolvimento da electrónica, incorporada nos equipamentos electromecânicos, bem como o crescente uso destes equipamentos e outros dispositivos afins, nos vários sectores da sociedade contemporânea, o tema Compatibilidade Electromagnética impõe a sua presença nas mais diversas áreas da Engenharia Electrotécnica. Atingiu-se, actualmente, uma considerável evolução no que se refere ao controlo da Interferência Electromagnética. O resultado conquistado ao longo de décadas de investigação vem ao encontro de um conjunto de esforços mutuamente empreendidos por fabricantes, consumidores, organismos de normalização e de fiscalização, universidades, institutos e laboratórios, etc., em busca do controlo dos níveis de Radiação Electromagnética toleráveis aos equipamentos, em geral, e ao Homem.

## 2.2. Onda electromagnética

A propagação da energia electromagnética faz-se através das chamadas ondas electromagnéticas, que são constituídas por duas entidades interdependentes: o campo eléctrico,  $E$ , e o campo magnético,  $H$ . Não é possível observar directamente o campo eléctrico e o campo magnético, a não ser através de uma representação artificial, como a indicada na figura 2.1. Estes campos evoluem no espaço como uma onda, daí a designação de onda electromagnética. O produto destes dois campos resulta na densidade de potência,  $S$ .

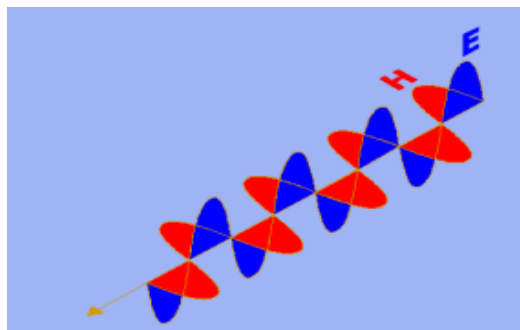


Figura 2.1 - Onda electromagnética [I 13].

Existem características particulares das ondas electromagnéticas que determinam as suas propriedades e aplicações. As características essenciais são:

- Comprimento de onda ( $\lambda$ ) e frequência ( $f$ );
- Amplitude;
- Direcção e velocidade de propagação;
- Polarização

A figura 2.2 representa uma larga gama de frequências e comprimentos de onda da Radiação Electromagnética, que se designa espectro electromagnético.

Cada parte do espectro electromagnético tem aplicações que lhe estão associadas, que vão desde as linhas de alta tensão operando a 50 Hz, até aos raios X e raios gama que têm frequências muito altas, e comprimentos de onda muito curtos. Entre estes extremos de frequências, encontram-se as ondas de rádio, as microondas, a radiação infravermelha, a luz visível e a radiação ultravioleta.

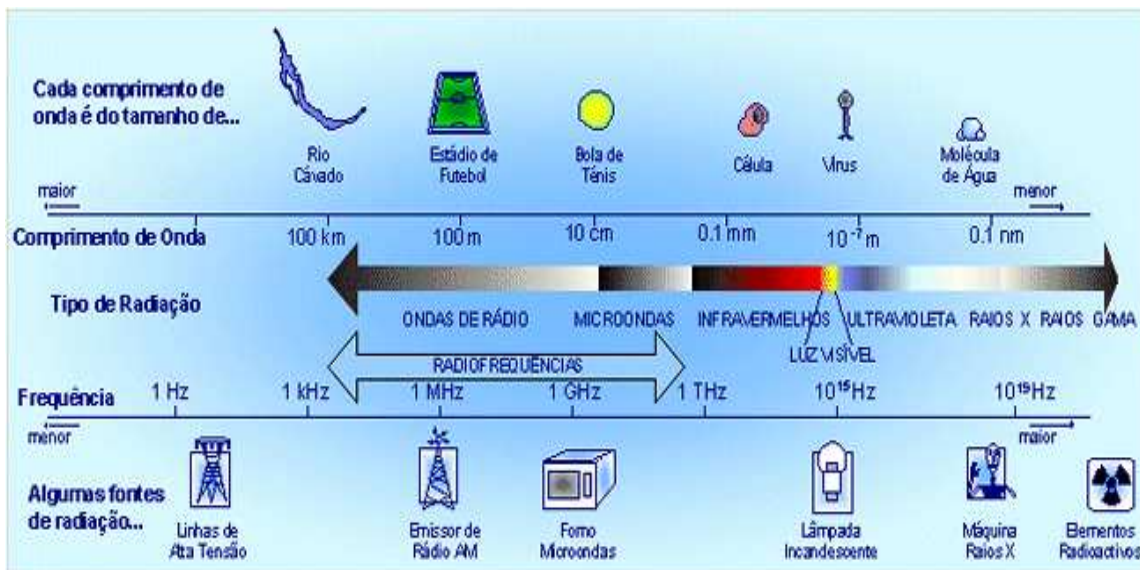


Figura 2.2 - Espectro electromagnético [I 13].

## **2.3. Campos Electromagnéticos**

O estudo dos fenómenos eléctricos e dos fenómenos magnéticos, conhecidos desde a Antiguidade, evoluiu até se criarem as noções de campo eléctrico e de campo magnético.

Quando, em 1820, o professor universitário dinamarquês Oersted terminava uma aula, verificou que uma corrente eléctrica fazia oscilar uma agulha magnética colocada próximo do circuito eléctrico que deixara ligado. Desta observação concluiu que existe uma relação entre o fenómeno eléctrico e o magnético.

O cientista americano Joseph Henry em 1830 e o cientista inglês Michael Faraday em 1831 verificaram que a variação do magnetismo nas imediações dum circuito eléctrico fazia surgir neste uma corrente eléctrica (fenómeno da indução magnética). Desta observação concluíram que existe uma relação entre o fenómeno eléctrico e o magnético.

Em 1867 o cientista inglês James Maxwell apresentou a teoria electromagnética e em 1873 publicou o “Tratado de Electricidade e Magnetismo”. Maxwell criou uma estrutura teórica e matemática que explica os fenómenos eléctricos e magnéticos como manifestações de uma mesma entidade, o chamado campo electromagnético. Os fenómenos eléctricos e magnéticos não são, portanto, independentes. Maxwell condensou em 4 equações matemáticas, as chamadas equações de Maxwell, a relação e a quantificação entre o campo eléctrico e o campo magnético.

A teoria de Maxwell foi confirmada, cerca de 20 anos mais tarde, pelas experiências do alemão Heinrich Hertz, que produziu ondas electromagnéticas com o chamado oscilador de Hertz. [I.1]

### 2.3.1. Campo eléctrico

De acordo com o conceito de campo, a interacção entre duas cargas,  $Q_1$  e  $Q_2$ , ocorre através da acção do campo de uma delas sobre a outra. Operacionalmente, o campo eléctrico é assim definido

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

onde  $q_0$  é a carga unitária, ou seja, tão pequena quanto possível. Isto é, para se conhecer o valor do campo eléctrico num determinado ponto, basta colocar uma carga unitária naquele ponto e dividir a força medida pelo valor da carga.

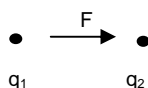


Figura 2.3 - Força do campo eléctrico entre duas cargas.

### 2.3.2. Linhas de Força

O conceito de linhas de força foi introduzido pelo físico inglês M. Faraday, no século XIX, com a finalidade de representar o campo eléctrico através de diagramas.

Para que se compreenda esta concepção de Faraday, supõe-se uma carga pontual positiva  $Q$  a criar um campo eléctrico no espaço em torno dela. Como se sabe, em cada ponto deste espaço existe um vector  $\underline{E}$ , cujo módulo diminui à medida que se afasta da carga. Na figura 2.4 (a) estão representados estes vectores em alguns pontos em torno de  $Q$ . Considerem-se os vectores  $\underline{E}_1$ ,  $\underline{E}_2$ ,  $\underline{E}_3$  etc., que têm a mesma direcção, de modo a traçar uma linha passando

por estes vectores orientada no mesmo sentido, como mostra a figura 2.4 (b). Esta linha é, então, coincidente aos vectores  $\underline{E}_1$ ,  $\underline{E}_2$ ,  $\underline{E}_3$  etc. Uma linha como esta é denominada linha de força do campo eléctrico. De maneira semelhante, pode-se traçar várias outras linhas de força do campo eléctrico criado pela carga  $Q$ . Esta figura fornece uma representação do campo eléctrico da maneira proposta por Faraday.

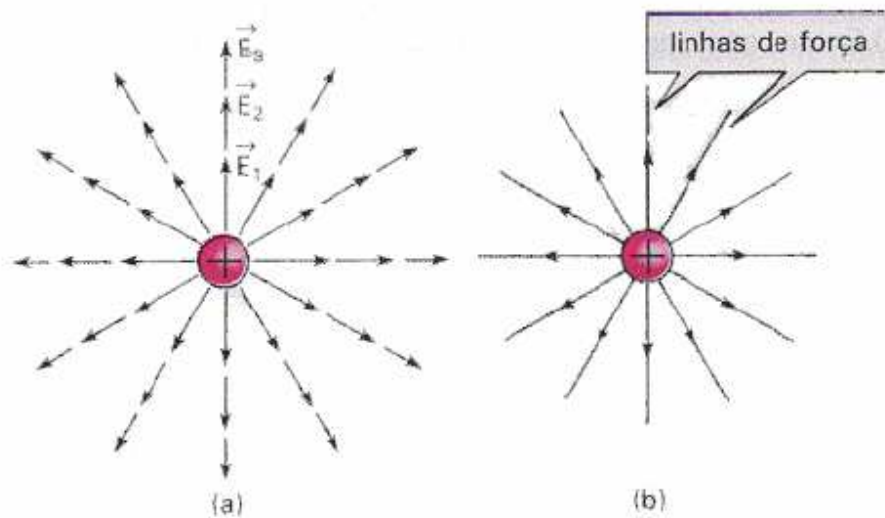


Figura 2.4 - Linhas de força de um campo eléctrico com cargas positivas [I 2].

Se a carga criadora do campo for uma carga pontual negativa, então, o vector  $\underline{E}$ , em cada ponto do espaço, estará dirigido para esta carga, como mostra a figura 2.5-a. Pode-se, então, traçar, também neste caso, as linhas de força que representarão este campo eléctrico. Observa-se, na figura 2.5-b, que a configuração destas linhas de força é idêntica àquela que representa o campo eléctrico da carga positiva, diferindo apenas no sentido de orientação das linhas de força: no campo da carga positiva as linhas divergem a partir da carga e no campo de uma carga negativa as linhas convergem para a carga [I.2].

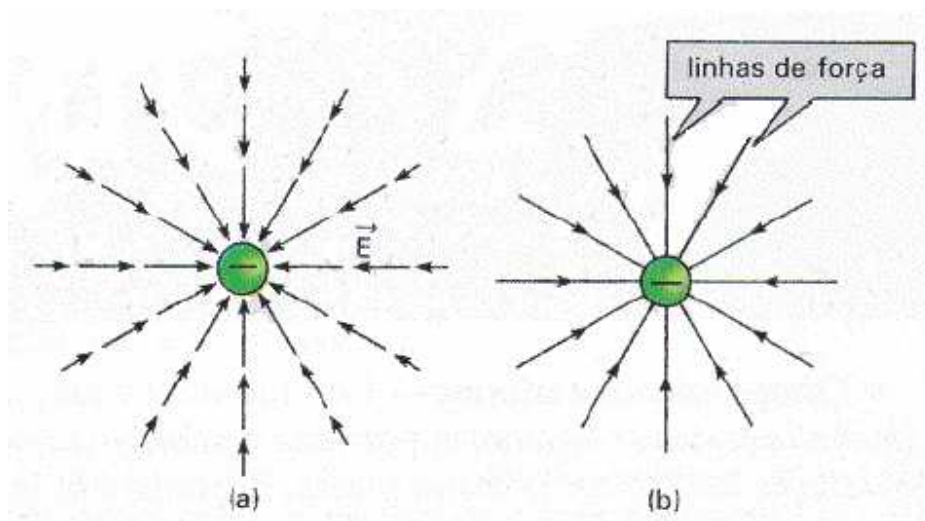


Figura 2.5 - Linhas de força de um campo eléctrico com cargas negativas [I 2].

### 2.3.3. Campo magnético

O campo magnético é uma região do espaço onde se manifesta o magnetismo, através das chamadas acções magnéticas. Estas acções verificam-se à distância e apenas algumas substâncias são influenciadas pelo campo magnético. Por exemplo, o cobre não tem propriedades magnéticas. Pelo contrário, os materiais ferrosos são fortemente influenciados. As substâncias que têm propriedades magnéticas chamam-se, por isso, ferromagnéticos [I.1].

Chama-se íman a um objecto com propriedades magnéticas. Verifica-se que um íman possui duas zonas distintas, que se chamam pólos magnéticos, designadas por pólo Norte e pólo Sul. Ao aproximar pólos do mesmo sinal, eles repelem-se, mas se forem de sinais contrários, atraem-se.

É possível visualizar a acção das forças num campo magnético, deitando limalha de ferro sobre uma folha de papel, por baixo do qual existe um íman.

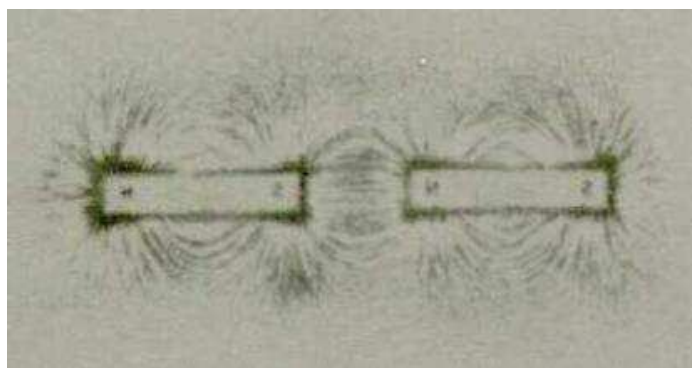


Figura 2.6 - Espectro magnético [I 1].

Com base na observação do espectro magnético, representado na figura 2.6, é fácil imaginar linhas de força, ao longo das quais se orientam as partículas de limalha de ferro, a que se dá o nome de linhas de força do campo magnético. Um material magnético como, por exemplo, uma agulha magnética, colocada nesta zona orienta-se de acordo com os sentidos das forças indicados atrás, de forma que as linhas de força entram pelo seu pólo Sul e saem pelo seu pólo Norte.

Os campos magnéticos dividem-se em duas categorias:

- Baixas frequências (até aproximadamente 30kHz)
- Altas-frequências (de 30kHz a 300GHz).

Acima desta gama de frequências encontra-se, por ordem crescente, o espectro de infravermelhos, luz visível, ultravioleta, raios X e raios Gama [I 8].



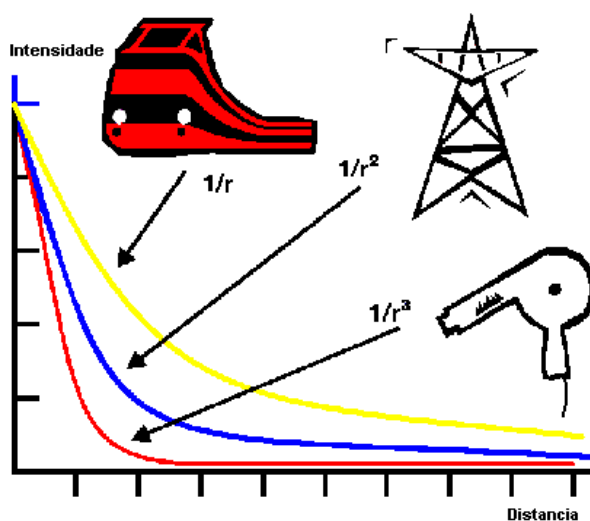


Figura 2.7 – Diagrama representativo da relação entre a força do campo e a distância [I 8].

A força do campo diminui rapidamente com o aumento da distância, como se pode ver na figura 2.7. Quanto mais longe estiver da fonte de radiação, menos radiação se encontrará. Logo, manter distância é uma das mais simples medidas de segurança.

Se a distância da fonte de radiação é menor que o seu comprimento de onda ( $\lambda$ ), essa região chama-se de região do campo próximo. A baixas frequências, este é quase sempre o caso.

Se a distância é maior que um comprimento de onda ( $\lambda$ ), essa região chama-se região do campo afastado. A distinção entre campo próximo e afastado é particularmente importante para medições na gama de altas-frequências.

Os campos eléctricos podem ser contidos com facilidade. Uma folha de metal ligada à terra fornece uma boa protecção. Por exemplo, está-se seguro contra descargas atmosféricas dentro de um automóvel tal como numa gaiola de Faraday.

Em contraste, os campos magnéticos passam através de todos os materiais de construção conhecidos. São necessárias espessas placas de metal ou ligas especiais para conter completamente a fonte de modo a obtermos protecção.

Na verdade, todo o equipamento eléctrico e electrónico produz, ao seu redor, algum tipo de campo electromagnético e, portanto, torna-se um gerador de Interferência Electromagnética.

## **2.4. Interferência Electromagnética**

Definição: “Fenómenos electromagnéticos susceptíveis de criar perturbações no funcionamento de um dispositivo, de um aparelho ou de um sistema, designadamente um ruído electromagnético, um sinal indesejado ou uma alteração do próprio meio de propagação”, Decreto-Lei nº74/92.

Existem actualmente dispositivos, aparelhos e sistemas cujo funcionamento é susceptível de ser alterado por perturbações electromagnéticas produzidas por aparelhos eléctricos e electrónicos, carecendo, por isso, de uma protecção eficaz contra as interferências provocadas por essas perturbações. Existe, ainda, a necessidade de assegurar a protecção das redes de distribuição de energia eléctrica, bem como dos equipamentos por elas alimentados, contra as perturbações electromagnéticas.

A Interferência Electromagnética (EMI) é uma forma crescente e séria de poluição ambiental. A EMI é um campo, uma onda eléctrica ou magnética, capaz de alterar o funcionamento de um equipamento. Esta interferência, capaz de se propagar tanto no vácuo como em meios físicos, pode ser insignificante, podendo não comprometer o resultado final do equipamento, mas quando significativa provoca sérios danos.

A EMI pode ser propositada ou acidental e pode ser de origem natural ou artificial. O campo geomagnético é de origem natural e causa interferência em sistemas eléctricos de potência. As manchas solares também causam interferência em sinais de telecomunicações na Terra. Outros exemplos de causas naturais de EMI são as descargas atmosféricas e os ventos.

A EMI caracteriza-se por uma degradação no desempenho de um determinado equipamento devido a alguma perturbação electromagnética. Este problema apresenta-se da seguinte forma:

- **Fonte** - Equipamento que gera a interferência que tanto pode ser interna como externa ao sistema.
- **Receptor** - Equipamento que é afectado pela interferência
- **Caminho** - Transmissão que permite fluir da fonte até a vítima.

Existem três tipos de caminhos:

1. **Irradiação** – Propaga-se por irradiação a partir da fonte, pelo espaço, até à vítima.
2. **Indução** – Ocorre quando dois circuitos são acoplados magneticamente.
3. **Condução** – Ocorre quando um sinal conduzido flui através dos fios ligados à fonte e à vítima.

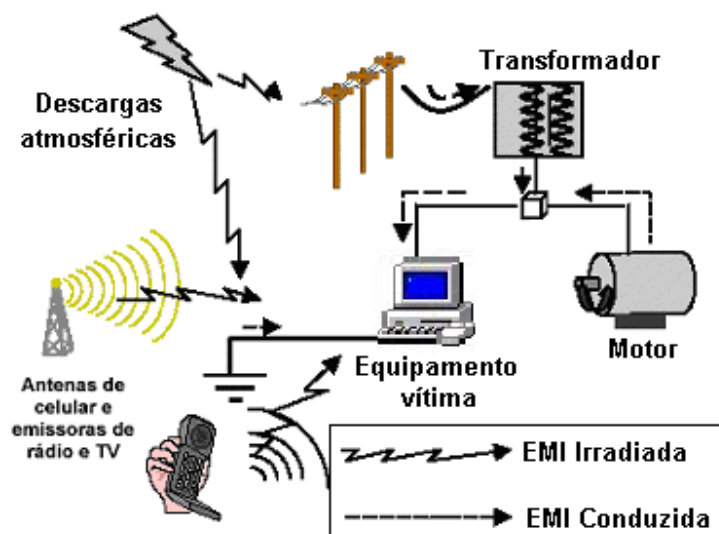


Figura 2.8 – Tipos de EMI [I 8].

As fontes são divididas em não naturais e naturais. As fontes não naturais são produzidas por equipamentos. Alguns exemplos destas fontes são: motores eléctricos, lâmpadas fluorescentes, aquecedores, equipamentos médicos, microondas, equipamentos de

comunicação móvel, inversores de frequência e outros. As fontes naturais são causadas por fenómenos naturais, tais como: ruídos atmosféricos decorrentes de descargas atmosféricas, ruídos cósmicos provocados por explosões solares, tempestades magnéticas e outros.

### **2.4.1. Interferência Conduzida**

A condução é o mecanismo pelo qual as interferências são levadas para dentro e para fora de um sistema via condutores metálicos ou elementos parasitas. Até há pouco tempo a preocupação maior, no que se referia a interferência por condução, era o ruído injectado na rede de alimentação. Isto, porque a rede de alimentação actua como meio de propagação desse ruído. Porém, equipamentos como o conversor estático injectam ruído na carga que alimentam e servem de meio de propagação entre a rede de alimentação e a carga. Esta constatação fez com que fossem intensificados os estudos dos equipamentos, como geradores, receptores e linhas de transmissão de Interferência Electromagnética. A figura 2.9 mostra um esquema de como ocorre a interferência por condução [D.1].

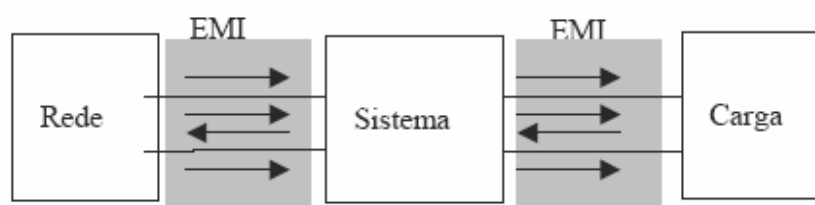


Figura 2.9 - Interferência por condução [D 1].

A EMI conduzida pode propagar-se por caminhos "intencionais" (por exemplo, componentes) ou por caminhos "não intencionais" (capacitância intrínseca de componentes e acoplamentos capacitivos e indutivos). Isso torna difícil o trabalho de reduzir a sua propagação porque exige o conhecimento de todos os caminhos possíveis que um ruído

(onda electromagnética) pode percorrer para propagar-se para dentro e para fora de um equipamento [D.2].

## **2.4.2. Interferência Radiada**

A radiação é um mecanismo pelo qual o ruído electromagnético é levado para dentro ou para fora de um sistema por meios não metálicos como, por exemplo, o ar. Estes ruídos aparecem devido a correntes que circulam por cabos, terminais de semicondutores, em caminhos fechados (loop) gerando campos electromagnéticos cuja intensidade depende de factores como a corrente (amplitude e frequência), comprimentos dos cabos, área do percurso fechado, etc. [D.1].

A previsão/redução das interferências radiadas é um trabalho árduo. O seu estudo exige o conhecimento do comportamento electromagnético dos materiais que compõem, cercam e permeiam um sistema. A figura 2.10 exemplifica a interferência por radiação entre sistemas (figura 2.10 (a)) e entre subsistemas de um sistema (figura 2.10(b)) [D.2].

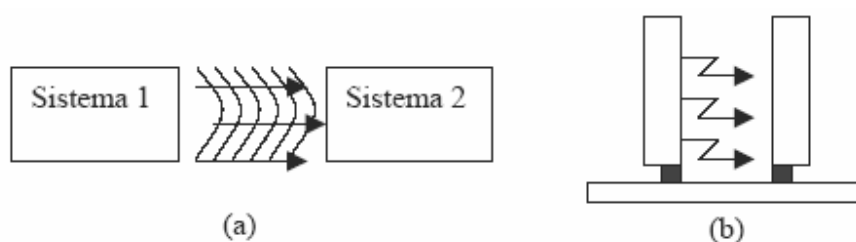


Figura 2.10 - (a)Radiação entre sistemas; (b) radiação entre subsistemas [D 2].

As perturbações electromagnéticas, contra as quais se exige um nível de protecção adequado, são:

- Fenómenos conduzidos de baixa frequência
  - Harmónicos
  - Flutuações de tensão
  - Variação da frequência da rede
  - Tensões induzidas de baixa frequência
- Fenómenos de campos radiados de baixa frequência
  - Campos magnéticos (contínuos ou transitórios)
  - Campos eléctricos
- Fenómenos conduzidos de alta-frequência
  - Tensões ou correntes induzidas
  - Transitórios unidireccionais
  - Transitórios oscilatórios
- Fenómenos de campos radiados de alta-frequência
  - Campos magnéticos
  - Campos eléctricos
  - Campos electromagnéticos
- Fenómeno de descargas electrostáticas

Os perigos da EMI são controlados pela adopção de práticas de Compatibilidade Electromagnética.

## **2.5. Compatibilidade Electromagnética**

Definição: “Aptidão de um aparelho ou de um sistema funcionar no seu ambiente electromagnético de modo satisfatório e sem produzir ele próprio interferências electromagnéticas intoleráveis para tudo o que se encontre nesse ambiente”, CEI 61000-1-1.

A Compatibilidade Electromagnética (CEM) quer dizer que um equipamento é compatível com o seu ambiente electromagnético. Os dois termos EMI/CEM estão intimamente ligados e um equipamento é dito compatível electromagneticamente quando:

- Não causa interferência em outros equipamentos;
- É imune às emissões de outros equipamentos;
- Não causa interferência em si próprio.

O nível máximo das interferências electromagnéticas geradas pelos aparelhos deve ser de modo a não perturbar a utilização, designadamente, dos aparelhos seguintes:

- Receptores de rádio e de televisão privados
- Equipamentos industriais
- Equipamentos de rádio móveis e radiotelefónicos comerciais
- Aparelhos médicos e científicos
- Equipamentos das tecnologias da informação
- Aparelhos domésticos e equipamentos electrónicos domésticos
- Aparelhos de rádio para a aeronáutica e a marinha
- Equipamentos educativos electrónicos
- Redes e aparelhos de telecomunicações
- Emissores de rádio e de teledifusão
- Iluminação e lâmpadas fluorescentes

Os aparelhos devem ser fabricados de forma a terem um nível adequado de imunidade electromagnética num ambiente de Compatibilidade Electromagnética normal nos locais em que os mesmos se destinam a funcionar, de modo a poderem ser utilizados sem perturbação, tendo em conta os níveis da interferência gerada pelos aparelhos conformes.

Para instalações específicas, por exemplo em Instalações Eléctricas, é de se esperar a necessidade de implementação de medidas de protecção complementares, nomeadamente quando os equipamentos a serem instalados cumprem especificações técnicas CEM para uso em ambientes comerciais/residenciais, que reflectem um nível de imunidade muito inferior àquele que seria adequado a este ambiente.

## **2.6. Unidades de Compatibilidade Electromagnética**

A capacidade de Interferência Electromagnética (ruídos) de um sistema, tanto nas emissões conduzidas como nas radiadas, está associada a ruídos de tensão e corrente produzidos por este sistema. Nas emissões por condução interessa determinar as tensões e correntes conduzidas para a linha de alimentação e para a carga. Nas emissões radiadas interessa determinar os campos electromagnéticos gerados a partir do sistema, devido às tensões e correntes internas deste sistema.

Assim, as unidades mais comuns na CEM são:

- Emissões por condução - Tensão (V) e corrente (A)
- Emissões radiadas: campo eléctrico (V/m) e campo magnético (A/m).

Associadas a estas grandezas estão a potência em Watts (W) ou a densidade de potência em Watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ), pois o sistema é considerado interferente quando o ruído por ele gerado tem potência/energia suficiente para provocar um mau funcionamento de outro.



O espectro harmónico é função da frequência e, como possui um conteúdo harmónico no qual é necessário analisar componentes de alguns poucos kHz até GHz, a escala de frequência é logarítmica. Da mesma forma, o espectro harmónico dos ruídos possui uma larga faixa de variação de amplitude (nV até V), por isso, é comum a utilização da unidade decibel (dB).

O decibel foi originalmente utilizado na indústria da telefonia para descrever o efeito do ruído nos circuitos telefónicos. Já que o ouvido tem uma resposta logarítmica aos sons que o excitam, descreve-se o efeito do ruído em decibéis. Considere-se o circuito amplificador representado na figura 2.11.

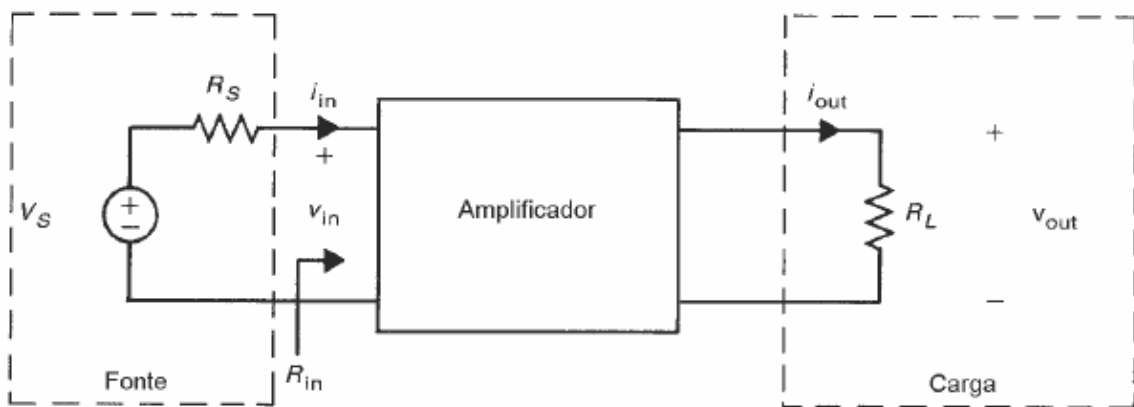


Figura 2.11 - Circuito amplificador que ilustra a definição e o uso do decibel.

A fonte de tensão  $V_S$ , com uma impedância  $R_S$ , fornece um sinal para um amplificador cuja carga é representada por  $R_L$ . A impedância de entrada do amplificador é denotada por  $R_{in}$  e a potência entregue ao amplificador é:

$$P_{in} = \frac{v_{in}^2}{R_{in}}$$

A potência entregue à carga é:

$$P_{out} = \frac{v_{out}^2}{R_L}$$

O ganho de potência do amplificador é:

$$\text{Ganho da Potência} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

O ganho de potência, expresso em decibéis, é definido por:

$$\text{Ganho da Potência} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

O ganho da tensão e o ganho da corrente do amplificador são:

$$\text{Ganho da Tensão} = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$\text{Ganho da Corrente} = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

Em decibéis tem-se:

$$\text{Ganho da Tensão}_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{v_{out}}{v_{in}} \right)$$

$$\text{Ganho da Corrente}_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{i_{out}}{i_{in}} \right)$$

Os decibéis são a razão entre as duas quantidades. Os níveis de potência, tensão ou corrente absolutas são expressos em decibéis com o seu valor referenciado a alguma quantidade de base. As tensões são normalmente expressas em  $\mu\text{V}$  ou em  $\text{dB}\mu\text{V}$ :

$$\text{dB}\mu\text{V} = 20 \log_{10} \left( \frac{V}{1\mu\text{V}} \right)$$

Portanto, uma tensão de 1V é equivalente a 120  $\text{dB}\mu\text{V}$  porque:

$$20 \log_{10} \left( \frac{1\text{V}}{1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}} \right) = 20 \log_{10} 10^6 = 120 \text{dB}\mu\text{V}$$

Pode entender-se o valor acima como: "1V é 120 dB $\mu$ V acima de 1 $\mu$ V.

Outras unidades padrões normalmente usadas são o dBmV, dB $\mu$ A e o dBmA, sendo:

$$\text{dBmV} = 20 \log_{10} \left( \frac{V}{1\text{mV}} \right)$$

$$\text{dB}\mu\text{A} = 20 \log_{10} \left( \frac{A}{1\mu\text{A}} \right)$$

$$\text{dBmA} = 20 \log_{10} \left( \frac{A}{1\text{mA}} \right)$$

A potência também é expressa em relação a um  $\mu$ W, dB $\mu$ W, e 1 dB acima de 1 mW, dBmW, embora normalmente se escreva dBm:

$$\text{dB}\mu\text{W} = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{1\mu\text{W}} \right)$$

$$\text{dBm} = \text{dBmW} = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{1\text{mW}} \right)$$

Os campos electromagnéticos irradiados apresentam-se como intensidades de campo eléctrico (V/m) ou como intensidades de campo magnético (A/m). As unidades de CEM para 1 $\mu$ V/m, 1mV/m, 1 $\mu$ A/m ou 1 mA/m são, respectivamente, dB $\mu$ V/m, dBmV/m, dB $\mu$ A/m ou dBmA/m.

Um dos limites legais de campo eléctrico irradiado é 100  $\mu$ V/m, o que é equivalente a 40 dB $\mu$ V/m. Assim, essas unidades podem ser calculadas como:

$$\text{dB}\mu\text{V/m} = 20 \log_{10} \left( \frac{V/m}{1\mu\text{V}/m} \right)$$

$$\text{dB}\mu\text{A/m} = 20 \log_{10} \left( \frac{A/m}{1\mu\text{A}/m} \right)$$

Também é importante saber como converter uma dada unidade em dB para o seu valor absoluto. Para tal utiliza-se a definição de logaritmo de um número na base  $m$ :

$$\log_m A = n$$

Assim, sabe-se que:

$$m^n = A$$

Portanto, para converter um valor dado em dB para o seu valor absoluto, realiza-se a operação dada na última expressão.

## **2.7 Conclusões**

Neste capítulo introdutório, foram apresentados, além de uma breve referência histórica, os conceitos básicos para um entendimento amplo do que é e qual a necessidade do estudo da Compatibilidade Electromagnética. Também se mencionam as unidades das grandezas utilizadas nesta área.

## Capítulo 3

### **Normas de Compatibilidade Electromagnética**

A motivação para a criação de normas de Compatibilidade Electromagnética decorre da imposição de requisitos adicionais para o projecto de sistemas electrónicos, além daqueles necessários para que o sistema seja funcional. Esses objectivos adicionais de projecto têm origem na necessidade do sistema possuir Compatibilidade Electromagnética relativamente ao seu ambiente. Há, basicamente, duas classes de normas de CEM que são impostas em sistemas electrónicos:

- As impostas pelo governo.
- As ditadas pelo fabricante do equipamento.

As normas impostas pelo governo são normas legais e não podem ser desprezadas. Estas normas são impostas para controlar a susceptibilidade do equipamento e a interferência produzida por ele.

Porém, se um equipamento estiver em conformidade com essas normas de CEM, não há garantias de que o equipamento não vá causar ou receber interferência. A conformidade do equipamento só permite controlar as emissões electromagnéticas que o equipamento gera ou recebe. Para um equipamento ser comercializado no Mercado Europeu, por exemplo, deve estar em conformidade com as suas normas de CEM, que estão em vigor desde 1996.

As normas de CEM que os fabricantes impõem nos seus equipamentos são criadas para satisfazer o consumidor. Elas são impostas com o propósito de garantir um equipamento de confiança e de qualidade.

### **3.1.Aspectos Gerais**

O interesse inicial relacionado com o controlo de interferências electromagnéticas concentrou-se durante muitos anos no controlo de emissões conduzidas e irradiadas. No entanto, com o início da disseminação do uso de dispositivos electrónicos a partir da segunda metade do século XX, passou a considerar-se, também, os aspectos relacionados à susceptibilidade electromagnética ou imunidade. Actualmente, é aplicado, preferencialmente, o termo imunidade.

A primeira organização internacional autorizada a divulgar recomendações técnicas relacionadas com a Compatibilidade Electromagnética foi a CISPR (*Comité International Special des Perturbation Radiotechniques*), fundada em 1933. Inicialmente, estabeleceu-se uma comissão conjunta entre a IEC (*International Electrotechnical Commission*) e a UIR (*Union International de Radiodiffusion*) para viabilizar a preparação de recomendações, com o objectivo de serem estabelecidos níveis aceitáveis e técnicas padronizadas para as medições de interferências. Após a Segunda Guerra Mundial, a UIR desvinculou-se desta comissão e a CISPR tornou-se um comité especial da IEC.

Os primeiros resultados relacionados com o objectivo inicial apareceram em 1961, onde uma série de recomendações, destinadas à utilização de equipamentos e técnicas de medição de interferências, foram divulgadas.

Em 1973, a CISPR foi reorganizada e foram criados seis novos sub-comités para substituir os comités anteriores. Estes sub-comités foram criados de acordo com as diversas áreas de interesse:

- *A - measurement of radio interference and statistical methods.*
- *B - measurement of interference regarding industrial, scientific or medical equipment, high voltage equipment, power lines, or traction devices.*
- *D - interference in motor vehicles (both gasoline and electric).*
- *F - interference in household appliances, tools, and lighting equipment.*
- *H - limitations to protect radio frequencies.*

- *I - electromagnetic compatibility of information technology (IT) equipment (e.g. computers), multimedia / hi-fi devices and radio equipment (receivers).*

As publicações CISPR são, basicamente, normas relativas à medição de interferências radiadas e conduzidas. Especificam os comprimentos de cabos, a configuração de equipamentos de medição e as medições base para que os resultados se tornem mais comparáveis. As normas CISPR também dizem respeito à imunidade a interferências externas [I.4].

Até agora, foram publicadas mais de trinta normas CISPR. As mais conhecidas são:

- *CISPR 10 - Organization, Rules and Procedures of the CISPR (1971).*
- *CISPR 11 - Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-Frequency Equipment -- Electromagnetic Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement.*
- *CISPR 14 - Electromagnetic Compatibility -- Requirements for Household Appliance, Electric Tools, and Similar Apparatus: 1) Emissions, 2) Immunity.*
- *CISPR 22 - Information Technology Equipment -- Radio Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement.*
- *CISPR 24 - Immunity Characteristics - Limits and Methods of Measurement.*
- *CISPR 25 - Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices - Limits and methods of measurement [I.3]*

Com a crescente utilização dos dispositivos semicondutores, a preocupação com o controlo do nível de Interferência Electromagnética evoluiu, e no Mercado Comum Europeu através da CENELCOM (*Comité Coordination Européen des Normes Electriques pour le Marche Commun*), estabeleceu-se, em 1970, um comité de normalização com o objectivo de se estabelecerem limites de emissão para os equipamentos eléctricos. Este comité era formado

por representantes de concessionárias e de fabricantes de equipamentos eléctricos de uso doméstico.

Em 1973, o CENELCOM foi reorganizado, passando-se a chamar CENELEC (*Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*).

Posteriormente, vários países reuniram-se com a IEC onde se estabeleceu a Subcomissão TC77, que passou a trabalhar em conjunto com a CISPR com o objectivo de abordar problemas de Interferência Electromagnética, tais como os relacionados com o controlo de harmónicos e com as flutuações de tensão, resultantes de equipamentos que utilizam dispositivos semicondutores.

Em relação aos aspectos relacionados com a susceptibilidade electromagnética, logo após a Segunda Guerra Mundial, a CEE (*Commission International de Reglementation en vue de l'Approbation de l'Equipment Electrique*) desencadeou os primeiros esforços para abordar este assunto.

No princípio da década de 1970, a IEC passou a partilhar esta tarefa, através da Subcomissão TC65. A seguir, esta tarefa passou a ser desenvolvida em conjunto com a Subcomissão TC77. As séries IEC 801-X, relacionadas a problemas de Interferência Electromagnética em automação industrial e controlo de processos, publicadas na década de oitenta e no início da década de 1990, resultaram deste esforço conjunto.

Actualmente, estas normas correspondem à série IEC 61000, que diz respeito à Compatibilidade Electromagnética. Compreende as seguintes partes:

- 1) Generalidades – considerações gerais, definições, terminologia, etc. (61000-1-x).
- 2) Ambiente – descrição do ambiente, características do ambiente onde vai ser instalado o equipamento, níveis de compatibilidade (61000-2-x).
- 3) Limites – limites de emissão, definindo os níveis de perturbação permitidos pelos equipamentos ligados à rede de energia eléctrica, limites de imunidade (61000-3-x).
- 4) Ensaios e medidas – técnicas de medição e técnicas de ensaio de modo a assegurar a conformidade com as outras partes da norma (61000-4-x).



5) Guias de instalação e de atenuação – guias para aplicação em equipamentos, tais como filtros, equipamentos de compensação, descarregadores de sobretensões, etc., para resolver problemas de qualidade da energia (61000-5-x).

6) Normas gerais e de produto – define os níveis de imunidade solicitados pelos equipamentos em geral ou para tipos específicos de equipamentos (61000-6-x).

Relativamente, à norma 61000-4 destacam-se os seguintes capítulos:

1. IEC 61000-4-2 - *Electrostatic Discharge Immunity Test.*
2. IEC 61000-4-3 - *Radiated, Radio-frequency, Electromagnetic Field Requirements.*
3. IEC 61000-4-4 - *Electrical Fast Transient/Burst.*
4. IEC 61000-4-5 - *Surge Immunity Test.*
5. IEC 61000-4-6 - *Immunity to Conducted Disturbances Induced by Radio-Frequency Fields.*
6. IEC 61000-4-11 - *Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations; Immunity tests.*

Os níveis de Compatibilidade Electromagnética são especificados de acordo com o vocabulário electrotécnico internacional, IEC 60050 (161) VEI. Define-se [A.2]:

– Nível de emissão: nível máximo permitido para um consumidor de uma rede pública ou para um aparelho.

– Nível de compatibilidade: nível máximo especificado de perturbação que se pode esperar num dado ambiente.

– Nível de imunidade: nível de perturbação suportado por um aparelho ou sistema.

– Nível de susceptibilidade: nível a partir do qual um aparelho ou sistema começa a funcionar deficientemente.

Actualmente, pode afirmar-se que os projectistas de equipamentos e de sistemas electro-electrónicos, que tinham como preocupação básica o controlo de emissões conduzidas e irradiadas, passaram a considerar, também, os aspectos relacionados com a imunidade. Esta consideração resulta, não apenas de aspectos técnicos necessários ao perfeito funcionamento de equipamentos e de sistemas eléctricos, mas, principalmente, do carácter mandatário das novas normas de Compatibilidade Electromagnética actuais.

A partir de Janeiro de 1996, para se comercializarem equipamentos na União Europeia (UE), devem ser atendidos os requisitos de Compatibilidade Electromagnética previstos nestas normas. Nota-se que, no início da implementação destes procedimentos, alguns fabricantes e profissionais relacionados com a área de mercado internacional, entenderam que os requisitos de Compatibilidade Electromagnética das normas europeias actuais representavam um impedimento para a livre comercialização dos seus produtos.

No entanto, pelo lado técnico, entende-se que este esforço desenvolvido pelos países da UE representa um esforço de harmonização dos requisitos de Compatibilidade Electromagnética no Mundo. Além disto, estas normas oferecem valores de referências e critérios necessários para garantir a Compatibilidade Electromagnética de sistemas e de equipamentos eléctricos, desde a etapa de projecto básico até o seu emprego. Actualmente, existem diversas iniciativas com o objectivo de diminuir a ambiguidade entre normas. Mesmo no que se refere às normas militares MIL-STD's, existe uma tendência no sentido de as substituir pelas normas comerciais actuais.

### **3.2. Principais Normas Internacionais e suas Abrangências**

Há uma vasta lista de características e fenómenos electromagnéticos considerados, actualmente, pelas normas internacionais, já aprovadas ou em fase de aprovação, conforme descrição apresentada a seguir:

- Campos electromagnéticos irradiados (30 MHz - 1 GHz).

- Distúrbios em meios condutores contínuos (DC a 150 kHz).
- Distúrbios em meios condutores (150 kHz a 30 MHz).
- Descargas electrostáticas.
- Transitórios rápidos.
- Sobretensões devido a descargas atmosféricas e Interrupções.
- Campos magnéticos em frequência industrial.
- Campos magnéticos devido a descargas atmosféricas.
- Campos magnéticos devido a curto-circuitos.
- Campos magnéticos devido a interrupção de linhas de transmissão.
- Harmónicos e inter-harmónicos.
- Quedas de tensão bruscas, interrupções e variações de tensão em circuitos de baixa tensão.
- Flutuações de tensão.
- Variação de frequência, etc.

Além das considerações relacionadas com as características e os fenómenos electromagnéticos anteriormente descritos, as normas e as recomendações técnicas internacionais apresentam classificações que não estão directamente vinculadas a esses parâmetros, mas particularmente aos tipos de sistemas e de equipamentos, ao tipo de uso e de aplicações, além de aspectos ambientais e biológicos.

Perante este tipo de classificação estão os equipamentos e os sistemas de uso industrial, científicos e médicos (ISM), os equipamentos de informática (ITE), os receptores de rádio e televisão e os sistemas de telecomunicações, os sistemas de instrumentação e controlo de processos industriais, os sistemas de instrumentação e controlo relacionados com os sistemas de segurança de instalações nucleares, os sistemas de produção, transmissão, e distribuição de energia eléctrica, os equipamentos de uso doméstico, as normas militares, os veículos motorizados, os navios, etc.

Como consequência da classificação das normas de acordo com estes critérios, onde se incluem combinações destes, resultaram algumas ambiguidades. Este facto gerou diversas dificuldades na aplicação destas normas e recomendações, tanto na área técnica como na área comercial. Diante deste facto, as normas, desenvolvidas recentemente pelos países da EU, são de grande valia, já que, além de focarem diversas características e fenómenos electromagnéticos, podem ser consideradas as mais harmoniosas, em função do grau de envolvimento das entidades normativas, fabricantes e utilizadores. Assim, estas normas são as que apresentam as metodologias de testes e os requisitos de Compatibilidade Electromagnética de maior consenso.

Tal como a UE, diversos países têm concentrado esforços para estabelecer metodologias de testes e requisitos de Compatibilidade Electromagnética. Deve ser dado especial destaque às normas militares MIL-STDs e às normas comerciais da *Federal Communications Commission* (FCC) e do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) nos Estados Unidos.

### **3.3. Marca CE**

A marcação CE simboliza que o produto em causa está em conformidade com as normas harmonizadas relevantes que resultam da CPD (Directiva dos Produtos da Construção, 89/106/CEE), bem como que foi aplicado o sistema de avaliação da conformidade relacionado. Indica a conformidade com as exigências legais da Directiva da União Europeia com respeito à segurança, saúde, meio ambiente, e protecção do consumidor.

Uma norma harmonizada é uma norma europeia preparada pelo CEN/CENELEC sob mandato da Comissão Europeia com vista ao cumprimento dos requisitos essenciais da Directiva.

A directiva de marca CE (93/68EEC) foi adoptada em 22.Jul.1993. Estabelece uma detalhada descrição das iniciais "CE" e a forma em que a conformidade deve ser obtida.

Todos os produtos oferecidos para venda em toda a Comunidade Europeia devem ter a marca, ou não poderão ser comercializados.

A marca CE oferece uma declaração visível do fabricante de que o produto atende todas as directivas aplicáveis a este produto (podem existir mais de uma directiva para o mesmo produto). A conformidade do produto pode ser comprovada seguindo os procedimentos de teste e certificação estabelecidos nas próprias directivas.

A marca é fixada ao produto/embalagem/manuais pelo fabricante depois de demonstrar esta conformidade através do símbolo apresentado na figura 3.1.

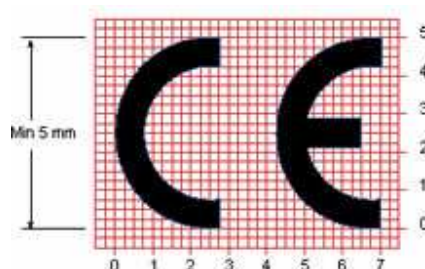


Figura 3.1 - Marcação CE.

### **3.4 Conclusões**

Neste capítulo apresentam-se as normas de Compatibilidade Electromagnética. A importância deste tópico reside no facto de que, na actualidade, estas normas regulam os projectos de desenvolvimento dos equipamentos electrónicos.

Este capítulo também abrange a relevância da Marca CE. Qualquer produto, electrónico ou não, para ser comercializado (pelo menos no espaço Europeu), deve ostentar a marcação CE. No caso de equipamentos electrónicos, isto significa cumprir os requisitos essenciais das Normas Harmonizadas, que conferem presunção de conformidade segundo as Directivas Comunitárias aplicáveis.

## **Capítulo 4**

### **Compatibilidade Electromagnética em Instalações Eléctricas**

Os campos eléctricos e magnéticos produzidos por Instalações Eléctricas são denominados campos de baixa frequência e estão enquadrados no elenco de radiações não ionizantes. Estas radiações não são capazes de promover a ionização de átomos, isto é, retirar electrões de átomos ou moléculas destabilizando a cadeia atómica.

Os campos eléctricos e magnéticos podem ser medidos utilizando instrumentos, para monitorização de radiações de baixa frequência, acoplados a antenas isotrópicas. Em função dos harmónicos gerados na baixa frequência é ainda realizada avaliação espectral através de analisadores de espectro.

No sentido de reduzir a magnitude dos ruídos e sinais gerados de forma indesejável, que podem alterar ou distorcer as características básicas dos sinais de um equipamento, deve-se reduzir os níveis de emissão da fonte de perturbação, ou proteger o receptor de modo a torná-lo imune à perturbação ou reduzir o acoplamento entre a fonte do sinal interferente e o equipamento receptor (vítima).

#### **4.1. Qualidade da Energia Eléctrica**

Com o desenvolvimento da electrónica de potência, os equipamentos ligados aos sistemas eléctricos evoluíram, melhorando o rendimento, o controlo e o custo, permitindo ainda a

execução de tarefas não possíveis anteriormente. Contudo, esses equipamentos têm a desvantagem de não funcionarem como cargas lineares, consumindo correntes não sinusoidais, e dessa forma poluindo a rede eléctrica com harmónicos. A presença de harmónicos nos sistemas de potência resulta num aumento das perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia eléctrica, em problemas de interferências com sistemas de comunicação e na degradação do funcionamento da maior parte dos equipamentos ligados à rede, sobretudo daqueles (cada vez em maior número) que são mais sensíveis por incluírem sistemas de controlo micro-electrónicos que operam com níveis de energia muito baixos.

Os prejuízos económicos resultantes destes e de outros problemas dos sistemas eléctricos são muito elevados, e por isso a questão da qualidade da energia eléctrica entregue aos consumidores finais é hoje, mais do que nunca, objecto de grande preocupação [A 4].

Normas internacionais relativas ao consumo de energia eléctrica, tais como IEEE 519, IEC 61000 e EN 50160, limitam o nível de distorção harmónica nas tensões com os quais os sistemas eléctricos podem operar, e impõem que os novos equipamentos não introduzam na rede harmónicos de corrente de amplitude superior a determinados valores. É dessa forma evidenciada a importância em resolver os problemas dos harmónicos, quer para os novos equipamentos a serem produzidos, quer para os equipamentos já instalados.

Entre os problemas de qualidade de energia, a interrupção do fornecimento é, incontestavelmente, o mais grave, uma vez que afecta todos os equipamentos ligados à rede eléctrica, à excepção daqueles que sejam alimentados por UPS's (*Uninterruptable Power Supplies* – sistemas de alimentação ininterrupta) ou por geradores de emergência. Contudo, outros problemas de qualidade de energia, como os descritos a seguir, além de levarem à operação incorrecta de alguns equipamentos, podem também danificá-los:

– Distorção harmónica: quando existem cargas não lineares ligadas à rede eléctrica, a corrente que circula nas linhas contém harmónicos e as quedas de tensão provocadas pelos harmónicos nas impedâncias das linhas faz com que as tensões de alimentação fiquem também distorcidas. Na figura 4.1 está representada uma distorção harmónica.

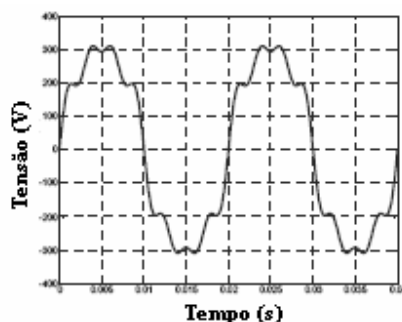


Figura 4.1 - Distorção Harmónica.

– Ruído (Interferência Electromagnética): corresponde ao ruído electromagnético de alta-frequência, representado na figura 4.2, que pode ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores electrónicos de potência.

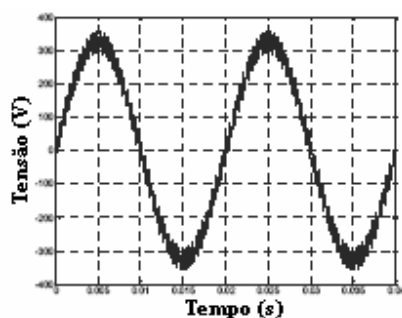


Figura 4.2. - Ruído (Interferência Electromagnética).

– Inter-harmónicos: surgem quando há componentes de corrente que não estão relacionadas com a componente fundamental (50 Hz); essas componentes de corrente podem ser produzidas por fornos a arco ou por ciclo-conversores (equipamentos que, alimentados a 50 Hz, permitem sintetizar tensões e correntes de saída com uma frequência inferior). Na figura 4.3 está representado um exemplo de inter-harmónicos.



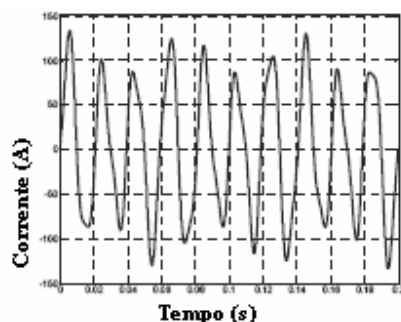


Figura 4.3. - Inter-harmónicos.

– Interrupção momentânea: representado na figura 4.4, ocorre, por exemplo, quando o sistema eléctrico dispõe de disjuntores com religador, que abrem na ocorrência de um curto-circuito, fechando-se automaticamente após alguns milissegundos (e mantendo-se ligados caso o curto-circuito já se tenha extinguido).

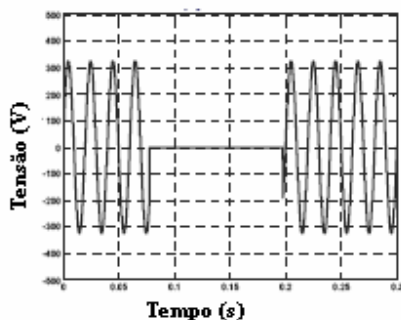


Figura 4.4 - Interrupção momentânea.

– Subtensão momentânea (*voltage sag*): representado na figura 4.5, também conhecido por “cava de tensão”, pode ser provocada, por exemplo, por um curto-circuito momentâneo num outro alimentador do mesmo sistema eléctrico, que é eliminado após alguns milissegundos pela abertura do disjuntor do ramal em curto.

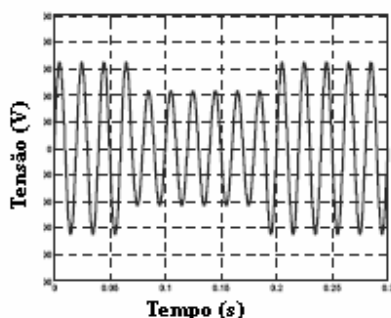


Figura 4.5 - Subtenção momentânea.

– Sobretensão momentânea (*voltage swell*): representado na figura 4.6, pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede eléctrica.

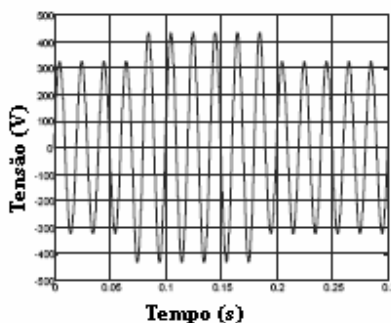


Figura 4.6 - Sobretensão momentânea.

– Flutuação da tensão (*flicker*): representado na figura 4.7, acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação (que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação eléctrica).

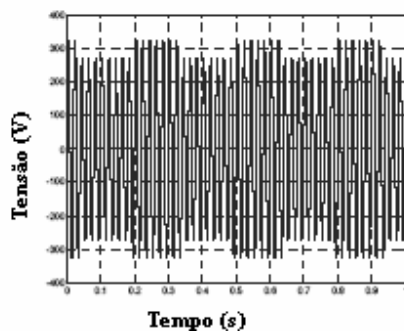


Figura 4.7 - Flutuação da tensão.

– Micro-cortes de tensão (*notches*): representado na figura 4.8, resultam de curto-circuitos momentâneos, que ocorrem durante intervalos de comutação dos semicondutores de potência dos rectificadores.

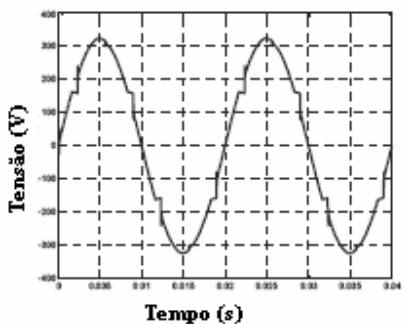


Figura 4.8 - Micro-cortes de tensão.

– Transitórios: representados na figura 4.9, ocorrem como resultado de fenómenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas.

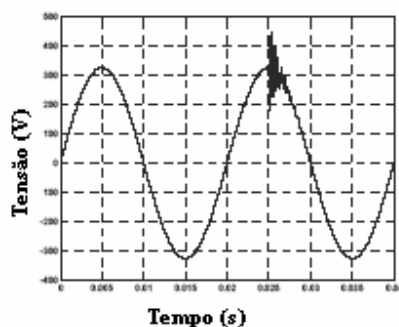


Figura 4.9 - Transitórios.

Grande parte dos problemas que surgem nos sistemas eléctricos tem origem na excessiva distorção das correntes ou tensões junto ao consumidor final.

A principal causa deste fenómeno, que pode ser visto como um tipo de poluição do ambiente electromagnético, é a crescente popularidade dos equipamentos electrónicos alimentados pela rede eléctrica, tais como computadores, aparelhos de televisão, balastos electrónicos para lâmpadas de descarga, controladores electrónicos para uma enorme variedade de cargas industriais, etc.

Quase todos os equipamentos electrónicos com alimentação monofásica ou trifásica incorporam um circuito rectificador à sua entrada, seguido de um conversor comutado do tipo *cc-cc* ou *cc-ca*. Um dos tipos de rectificadores mais utilizados em equipamentos de baixa potência é o rectificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo, que possui uma corrente de entrada altamente distorcida. O elevado conteúdo harmónico da corrente distorce a tensão de alimentação devido à queda de tensão na impedância das linhas.

Os controladores de fase, muito utilizados para controlar a potência em sistemas de aquecimento e ajustar a intensidade luminosa de lâmpadas (*dimmers*), também produzem formas de onda com conteúdo harmónico substancial e Interferência Electromagnética de alta-frequência. Mesmo as lâmpadas fluorescentes normais contribuem significativamente para os harmónicos na rede, devido ao comportamento não linear das descargas em meio gasoso e ao circuito magnético do balastro, que pode operar na região de saturação.

Para além da distorção das formas de onda, a presença de harmónicos nas linhas de distribuição de energia origina problemas em equipamentos e componentes do sistema eléctrico, nomeadamente [A 5 - A 11]:

- Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- Aquecimento, binários pulsantes, ruído audível e redução da vida útil das máquinas eléctricas rotativas;
- Disparo indevido dos semicondutores de potência em rectificadores controlados e reguladores de tensão;
- Problemas na operação de relés de protecção, disjuntores e fusíveis;
- Aumento nas perdas dos condutores eléctricos;
- Aumento considerável na dissipação térmica dos condensadores, levando à deterioração do dieléctrico;
- Redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (*flicker* – para o caso de ocorrência de subharmónicos);
- Erros nos medidores de energia eléctrica e instrumentos de medida;
- Interferência Electromagnética em equipamentos de comunicação;
- Mau funcionamento ou avarias no funcionamento em equipamentos electrónicos ligados à rede eléctrica, tais como computadores, controladores lógicos programáveis (PLC's), sistemas de controlo comandados por microcontroladores, etc. (é de salientar que estes equipamentos controlam processos de fabrico).

### **4.1.1. Normalização**

Para combater o aumento da “poluição” electromagnética, organizações como a Comissão Electrotécnica Internacional (IEC – *International Electrotechnical Commission*) e o IEEE – Instituto dos Engenheiros Electrotécnicos e Electrónicos - têm elaborado normas visando limitar o conteúdo harmónico nos sistemas eléctricos. Ao mesmo tempo, fabricantes e utilizadores de equipamentos de electrónica de potência têm vindo a desenvolver soluções para os problemas existentes.

No âmbito da Comunidade Europeia, no sentido da harmonização da legislação sem a qual ficaria afectada a livre troca de bens e serviços, várias directivas foram publicadas tendentes a eliminar as diferenças na legislação dos diferentes países. Uma dessas directivas é a Directiva 85/374 sobre responsabilidade por produtos defeituosos. O seu Artigo 2º define a electricidade como um produto, e como tal tornou-se necessário definir as suas características, o que originou a norma europeia EN 50160.

A norma EN 50160, “Características da Tensão Fornecida pelas Redes Públicas de Distribuição”, publicada pelo CENELEC (Comité Europeu de Normalização Electrotécnica), define, no ponto de fornecimento ao consumidor (PCC – *point of common coupling*), as características principais da tensão para as redes públicas de abastecimento de energia em Baixa Tensão (BT) e Média Tensão (MT), tais como: frequência, amplitude, forma de onda, cavas de tensão, sobretensões, harmónicos e inter-harmónicos de tensão, simetria das tensões trifásicas e transmissão de sinais de informação pelas redes de energia [N 4].

Para as redes de BT, relativamente aos harmónicos de tensão, nas condições normais de exploração, durante o período de uma semana, 95% dos valores eficazes de cada harmónico de tensão (valores médios em cada 10 minutos), não devem ultrapassar os valores indicados na Tabela 4.1.

Harmónicos ímpares				Harmónicos pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 - 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Nota: Os valores correspondentes aos harmónicos de ordem superior a 25, por serem geralmente baixos e muito imprevisíveis (devido aos efeitos de ressonância), não são indicados nesta tabela

Tabela 4.1 - Valores dos primeiros 25 harmónicos de tensão nos pontos de fornecimento, expressos em percentagem da tensão nominal  $U_N$  [N 4].

Além disso, esta norma especifica que a taxa de distorção harmónica total da tensão fornecida (tendo em conta os primeiros 40 harmónicos) não deverá ultrapassar 8%.

Para as redes de Média Tensão (MT) aplica-se a mesma tabela, com a observação de que o valor do harmónico de ordem 3, dependendo da concepção da rede, deve ser muito mais baixo.

Como já foi referido, a série 61000 de normas IEC diz respeito à Compatibilidade Electromagnética e compreende as seguintes partes:

- 1) Generalidades – considerações gerais, definições, terminologia, etc. (61000-1-x).
- 2) Ambiente – descrição do ambiente, características do ambiente onde vai ser instalado o equipamento, níveis de compatibilidade (61000-2-x).
- 3) Limites – limites de emissão, definindo os níveis de perturbação permitidos pelos equipamentos ligados à rede de energia eléctrica, limites de imunidade (61000-3-x).
- 4) Ensaio e medidas – técnicas de medição e técnicas de ensaio de modo a assegurar a conformidade com as outras partes da norma (61000-4-x)

5) Guias de instalação e de atenuação – providencia guias para a aplicação em equipamentos, tais como filtros, equipamentos de compensação, descarregadores de sobretensões, etc., para resolver problemas de qualidade da energia (61000-5-x).

6) Normas gerais e de produto – definem os níveis de imunidade requeridos pelos equipamentos em geral ou para tipos específicos de equipamentos (61000-6-x).

Os níveis de Compatibilidade Electromagnética são especificados de acordo com o vocabulário electrotécnico internacional, CEI 60050 (161) VEI. Define-se [A 2]:

– Nível de emissão: nível máximo permitido para um consumidor de uma rede pública ou para um aparelho.

– Nível de compatibilidade: nível máximo especificado de perturbação que se pode esperar num dado ambiente.

– Nível de imunidade: nível de perturbação suportado por um aparelho ou sistema.

– Nível de susceptibilidade: nível a partir do qual um aparelho ou sistema começa a funcionar deficientemente.

A norma IEC 61000-2-2 define os níveis de compatibilidade para os harmónicos de tensão para redes de baixa-tensão (BT), de acordo com a Tabela 4.2.

Harmónicos ímpares não múltiplos de 3		Harmónicos ímpares múltiplos de 3		Harmónicos pares	
Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2 + 0,5 \times 25/n$				

Tabela 4.2 - Níveis de compatibilidade para os harmónicos de tensão em redes de BT [N 2].

Por sua vez a norma IEC 61000-2-4 estabelece os níveis de compatibilidade para redes industriais (Tabela 4.3).



	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Distorção harmónica total	5%	8%	10%

Tabela 4.3 - Níveis de compatibilidade para os harmónicos de tensão em redes industriais [N 2].

Definem-se 3 classes com exigência de compatibilidade diferentes em função dos ambientes electromagnéticos possíveis:

Classe 1 – Aplica-se a redes protegidas e tem níveis de compatibilidade mais baixos do que os das redes públicas. Diz respeito à utilização de aparelhos muito sensíveis às perturbações da rede eléctrica, como por exemplo, instrumentos de laboratórios técnicos, certos equipamentos de automação e de protecção, certos computadores, etc.

Classe 2 – Esta classe aplica-se aos Pontos de Acoplamento Comum (PAC) à rede pública e aos pontos de ligação interna nos ambientes industriais em geral. Os níveis de compatibilidade desta classe são idênticos aos das redes públicas, pelo que os equipamentos destinados à utilização nestas redes podem ser usados nesta classe de ambiente industrial.

Classe 3 – Esta classe aplica-se somente aos pontos de ligação interna dos ambientes industriais. Os níveis de compatibilidade são superiores aos da classe 2 para certas perturbações. Esta classe deve ser considerada, por exemplo, quando uma das seguintes condições é satisfeita: a maior parte das cargas são alimentadas através de conversores; existem máquinas de soldar; ocorrem arranques frequentes de motores de grande potência; as cargas variam rapidamente.

Refira-se que os limites máximos individuais dos harmónicos de tensão e a taxa de distorção total impostos pela norma europeia EN 50160 coincidem com os valores das normas IEC 61000-2-2 e IEC61000-2-4, classe 2 para ambientes industriais.

De acordo com a norma ANSI/IEEE 519, as empresas distribuidoras são responsáveis pela manutenção da qualidade da tensão em todos os seus sistemas [N 5]. A norma estipula os

limites de distorção para os diferentes níveis de tensão a observar nas redes eléctricas, de acordo com a Tabela 4.4.

Tensão nominal no PAC ( $U_n$ )	Distorção harmónica individual (%)	Distorção harmónica total (%)
$U_n \leq 69$ kV	3,0	5,0
$69$ kV < $U_n \leq 161$ kV	1,5	2,5
$U_n > 161$ kV	1,0	1,5

Tabela 4.4 - Limites máximos de distorção [N 5].

### 4.1.2. Monitorização da Qualidade da Energia Eléctrica

A utilização de monitorizadores de qualidade de energia é a melhor forma de detectar e diagnosticar problemas nos sistemas eléctricos de energia. Estes equipamentos permitem, basicamente, medir e registar ao longo do tempo valores de tensões, correntes e potências em vários canais. Com base na informação que vai sendo recolhida, é então possível gerar alarmes (eventualmente em tempo real) e produzir relatórios de diversos tipos, seleccionando aplicações tais como:

- Aplicação “Osciloscópio e Distorção Harmónica” – O equipamento funciona como um osciloscópio de vários canais e permite ainda calcular valores médios, *true rms*, máximos e mínimos, de tensões e correntes. Pode ainda identificar os harmónicos e calcular os valores do conteúdo harmónico total (THD – *Total Harmonic Distortion*).
- Aplicação “Forma de Onda” – Permite detectar anomalias nas formas de onda das tensões, armazenando esses eventos juntamente com o instante da ocorrência.
- Aplicação “Sobretensões e Subtensões Momentâneas” – Detecta e regista estes fenómenos, juntamente com o instante em que ocorrem e a sua duração.
- Aplicação “Grandezas Clássicas” – Permite o cálculo de valores de amplitude e fase de tensões e correntes, impedâncias, potências aparente, activa e reactiva, factor de potência medidas de energia, valores relativos a desequilíbrios de fases, etc.

No mercado existe um leque bastante variado de equipamentos para monitorizar a qualidade da energia eléctrica. Contudo, estes equipamentos são normalmente muito caros, sobretudo os que apresentam bons desempenhos e múltiplas funções. Por essa razão é ainda hoje interessante desenvolver sistemas de monitorização virtuais baseados na utilização de computadores, placas de aquisição de dados *standard* e ferramentas de desenvolvimento do tipo LabView, uma vez que é possível conseguir soluções com características interessantes a custos muito mais baixos.

### **4.1.3. Soluções para os problemas de Qualidade de Energia Eléctrica**

A solução para os problemas de qualidade de energia eléctrica tradicionais (exceptuando as interrupções de serviço prolongadas) passa pela utilização de alguns dos seguintes condicionadores de rede eléctrica:

- Os varístores (TVSS – *Transient Voltage Surge Suppressors*) garantem protecção contra picos de tensão nas linhas.
- Os filtros de Interferência Electromagnética ajudam a prevenir o problema dos micro-cortes de tensão e garantem que o equipamento poluidor não conduz ruído de alta-frequência para a rede eléctrica.
- Os transformadores de isolamento com blindagens electrostáticas garantem não só isolamento galvânico como também evitam picos de tensão de modo comum ou entre linhas.
- Os transformadores ferro-ressonantes asseguram a regulação de tensão, bem como a filtragem de picos de tensão entre linhas.

- A regulação de tensão pode também ser garantida por meio de transformadores com várias saídas associadas a um esquema electrónico de comutação por meio de triacs ou tirístores montados em configuração anti-paralelo.

As interrupções prolongadas de fornecimento de energia eléctrica obrigam à utilização de fontes de alimentação sem interrupção (UPS's) ou a qualquer outra forma alternativa de geração de energia, como os geradores de emergência.

A solução para alguns problemas de qualidade de energia eléctrica obriga à utilização de conversores comutados (ou ressonantes), como é o caso do problema dos harmónicos.

De forma a cumprir com as regulamentações europeias sobre harmónicos (normas IEC) os equipamentos de electrónica de potência devem ser concebidos dentro das normas, ou então, filtros passivos ou activos devem ser previstos à entrada do equipamento original.

#### Equipamentos de baixa potência (Alimentação Monofásica)

O mais simples dos filtros passivos consiste num indutor em série com a entrada do equipamento poluidor, frequentemente um rectificador com um filtro capacitivo na saída (Figura 4.10 (a)). Trata-se de uma solução fiável e de baixo custo. Contudo, a bobina é pesada (devido ao ferro do seu circuito magnético) e ocupa muito espaço, o que limita praticamente esta solução a equipamentos de baixa potência (< 600 VA).

Uma alteração muito comum feita no projecto de equipamentos electrónicos monofásicos, de forma a reduzir significativamente os harmónicos produzidos, consiste na utilização de um conversor cc-cc do tipo *step-up* após a ponte rectificadora (Figura 4.10 (b)). Esse circuito, quando correctamente controlado, permite que a corrente consumida pelo equipamento seja praticamente sinusoidal, podendo ser usado até à potência normalmente disponível nas tomadas monofásicas (3 kVA). Embora os problemas de peso e espaço aqui não se coloquem, a solução apresenta como desvantagens o custo relativamente elevado, a pouca fiabilidade, e o facto de injectar ruído de alta-frequência na linha, devido à comutação do dispositivo semiconductor de potência (o que requer um filtro adicional).

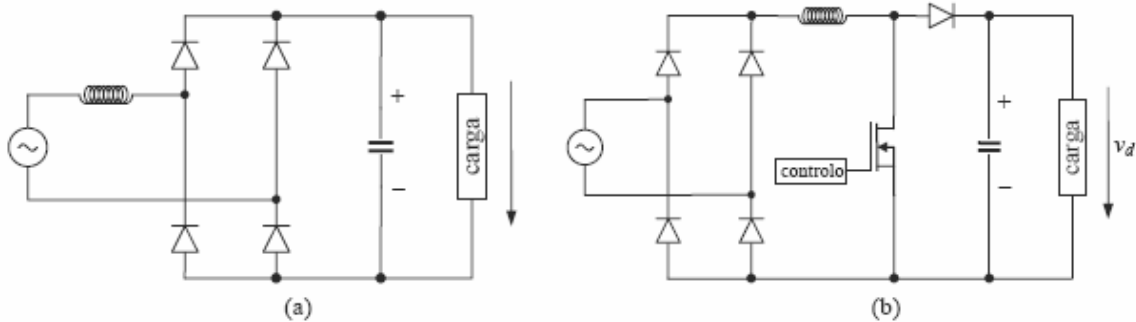


Figura 4.10 – Soluções para redução dos harmónicos de corrente à entrada dos equipamentos: (a) indutor em série; (b) conversor *step-up*.

### Equipamentos de Média e Alta Potência

Ao contrário dos equipamentos de baixa potência, os equipamentos industriais, que podem ter potências desde alguns kW até vários MW, não estão sujeitos à obrigatoriedade do cumprimento de normas relativas à “poluição” harmónica por eles produzida.

Durante muito tempo, as companhias de distribuição de energia eléctrica impunham aos consumidores industriais apenas limites para a potência reactiva consumida. A solução normalmente adoptada pelas indústrias consiste na utilização de bancos de condensadores para correcção do factor de potência da instalação, colocando-o dentro dos limites impostos pela empresa distribuidora.

Mais recentemente, as empresas distribuidoras de alguns países que já têm preocupações com os harmónicos de corrente que circulam na rede eléctrica, obrigam os consumidores a aplicar técnicas de redução de harmónicos baseadas em filtros passivos. Contudo, esta solução apresenta várias desvantagens, nomeadamente:

- Apenas filtram as frequências para as quais foram previamente sintonizados; quando as tensões de alimentação estão distorcidas, mesmo que moderadamente, os filtros passivos absorvem valores elevados de corrente, nas frequências harmónicas para as quais não estão sintonizados;

- Precisam frequentemente de ser sobredimensionados, uma vez que não é possível limitar o seu funcionamento a uma certa carga (muitas vezes acabam por absorver harmónicos de outras cargas ligadas ao sistema eléctrico);
- Podem ocorrer fenómenos de ressonância entre o filtro passivo e as outras cargas ligadas à rede, com resultados imprevisíveis;
- O dimensionamento dos filtros passivos deve ser coordenado com as necessidades de potência reactiva da carga, sendo difícil fazê-lo de forma a evitar-se que o conjunto opere com factor de potência capacitivo em algumas condições de funcionamento.

Para ultrapassar estas desvantagens, têm sido recentemente feitos esforços no sentido de desenvolver filtros activos de potência [A 12 - A 14].

#### Filtro Activo Paralelo

O filtro activo de potência do tipo paralelo (Figura 4.11) tem como função compensar os harmónicos das correntes nas cargas, podendo ainda compensar a potência reactiva (corrigindo o factor de potência). Permite ainda compensar a componente de sequência zero da corrente, equilibrando as correntes nas três fases (e eliminando a corrente no neutro), ou seja, a rede eléctrica passa a ver o conjunto constituído pelo filtro activo e pelas cargas, como se tratasse de um receptor trifásico equilibrado do tipo resistivo.

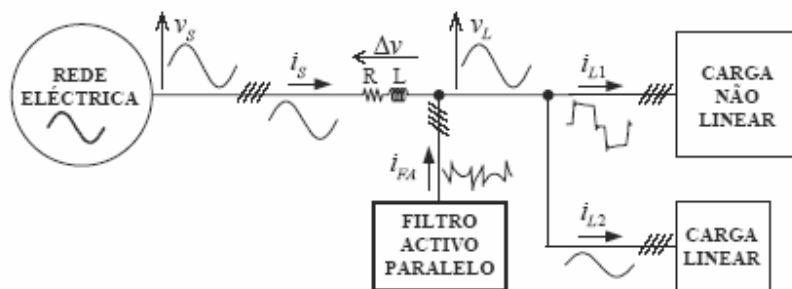


Figura 4.11 – Filtro activo paralelo: exemplo de funcionamento.

Na Figura 4.12 apresenta-se o esquema eléctrico de um filtro activo paralelo trifásico. O filtro é, basicamente, composto por um inversor fonte de tensão com controlo de corrente e o respectivo controlador. O controlador, a partir da medida dos valores instantâneos das tensões das fases ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ) e das correntes na carga ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ), produz as correntes de compensação de referência ( $i_{ca}^*$ ,  $i_{cb}^*$ ,  $i_{cc}^*$ ,  $i_{cn}^*$ ) para o inversor. O inversor injecta as correntes de compensação ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ,  $i_{cn}$ ) requeridas pela carga, de forma que as correntes nas fases da rede eléctrica ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) passam a ser sinusoidais e equilibradas, fazendo com que a corrente no neutro da rede eléctrica ( $i_{sn}$ ) assuma um valor nulo.

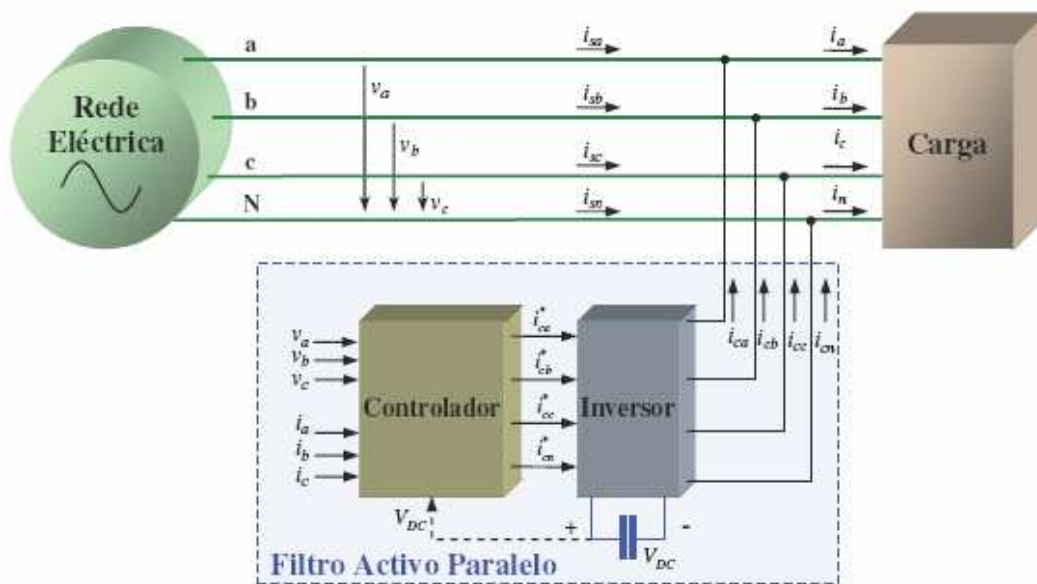


Figura 4.12 – Esquema de um filtro activo paralelo [D 3].

### Filtro Activo Série

O filtro activo de potência do tipo série (Figura 4.13) é o dual do filtro activo paralelo. A sua função é compensar as tensões da rede eléctrica ( $v_{sa}$ ,  $v_{sb}$ ,  $v_{sc}$ ), para os casos em que estas contenham harmónicos, de forma a tornar as tensões na carga ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ) sinusoidais. Em certos casos, dependendo da duração dos fenómenos e da energia que o filtro activo puder disponibilizar, é ainda possível compensar sobretensões, subtensões ou interrupções momentâneas.

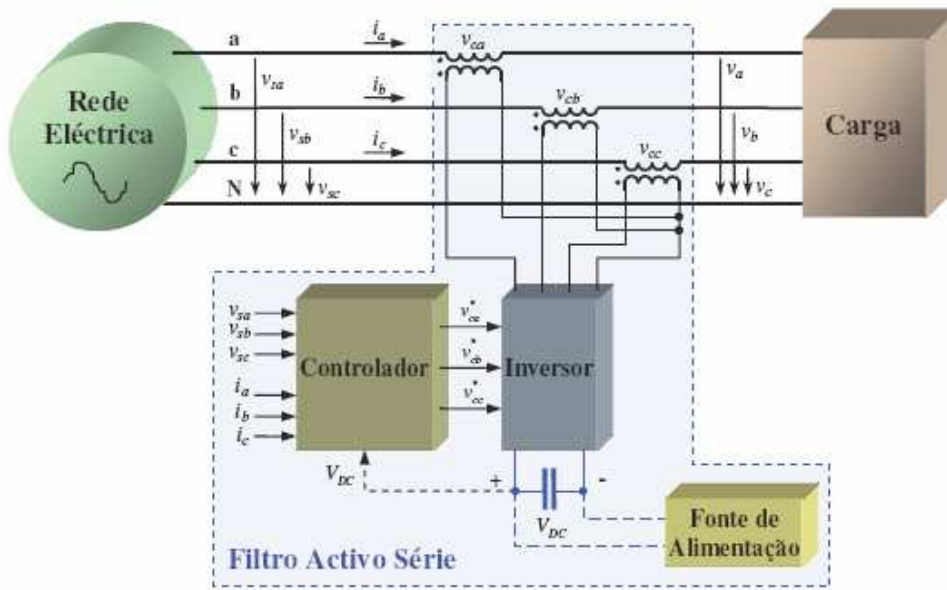


Figura 4.13 – Esquema de um filtro activo série [D 3].

## 4.2. Instalações Eléctricas

Numa instalação eléctrica existem muitos fenómenos que podem causar perturbações.

Deve ser considerada, por um lado, uma possível interferência entre os componentes dentro da instalação e, por outro lado, também deve ser considerado a interacção dos componentes do disjuntor com o meio exterior à instalação [A 15].

Tipicamente, estas instalações possuem alguns componentes onde é transmitida e distribuída a energia e, do outro lado, existem componentes electrónicos onde os sinais derivados dos circuitos primários são processados para controlo, protecção e outros propósitos. Estes componentes estão muitas vezes dispostos muito próximo uns dos outros, pelo que, o aspecto da compatibilidade, do ponto de vista electromagnético deve ser considerado. Este aspecto é descrito pela Compatibilidade Electromagnética como sendo a habilidade ou capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema eléctrico ou



electrónico, funcionar de acordo com suas características operacionais, no seu ambiente electromagnético, sem impor perturbação intolerável naquilo que compartilha o mesmo ambiente. Transferir esta definição para as instalações de corte e manobra significa dizer que:

- Aquando das operações de manobra nas instalações não são permitidas perturbações nos aparelhos localizados no meio ambiente circundante;
- As operações das instalações de corte e manobra não devem permitir que perturbações exteriores provenientes do meio ambiente as afectem;
- Os componentes das instalações de corte e manobra não devem perturbar outros aparelhos da instalação;

O último requisito diz-nos que a Compatibilidade Electromagnética interna deve ser assegurada, contudo, é um requisito básico, para ser satisfeito independentemente das normas estabelecidas, uma vez que assim, a instalação não funcionaria. Esta característica tem vindo a ser cada vez mais importante, à medida que tem vindo a ser feita a substituição da instalação de sensores de baixos níveis de energia para medições de tensão e corrente [A 16].

Os outros requisitos indicados acima determinam a relação entre o disjuntor e o meio, o qual é muitas vezes designado como CEM externa. Este aspecto tem vindo a tornar-se cada vez mais importante, nomeadamente desde que os disjuntores têm vindo a ser, cada vez com mais frequência instalada nos centros urbanos, isto é, muito perto das zonas de consumo de energia.

O ponto fundamental da Compatibilidade Electromagnética diz respeito ao conhecimento das fontes de interferência, cujas emissões podem influenciar componentes da própria instalação ou instalações vizinhas. Num sistema de análise CEM, devem ser examinados os caminhos de propagação e os níveis de perturbação nas interfaces com componentes possivelmente perturbados, que possam ser daí derivados. Estes níveis têm de ser comparados com os testes de imunidade dos componentes e, no caso de não ser possível,

devem ser realizadas medições no local. Em princípio, as medições podem ser aplicadas à fonte, aos caminhos de propagação ou aos componentes envolvidos.

Do ponto de vista técnico e económico, a mitigação dos problemas de interferência deve conjugar medidas definidas numa filosofia integrada, baseada nos seguintes pontos:

- Minimização dos sinais interferentes
- Ensaios de equipamentos
- Ligação ao mesmo potencial
- Sistema de Terra seguro

Para que o sistema de protecção tenha resposta adequada à Compatibilidade Electromagnética, devem ser integrados os seguintes pontos:

- Condutores
- Sistema de Terra
- Protecção contra ondas de choque electromagnéticas
- Blindagem Electromagnética
- Protecção contra descargas atmosféricas

#### **4.2.1. Condutores**

A cablagem entre equipamentos constitui o principal meio de transmissão das perturbações electromagnéticas dum emissor para um receptor. A eficiência da transmissão da perturbação do emissor para o receptor é caracterizada pelo coeficiente de acoplamento K, em dB, em que:

$$K = 20 \cdot \log [A (\text{recebido}) / A (\text{transmitido})]$$

Quanto mais baixo este coeficiente (maior valor absoluto em dB), mais fraca é a perturbação recebida, sendo portanto melhor a CEM. Este coeficiente K só faz sentido quando a transferência da perturbação electromagnética é proporcional à frequência, o que é o caso.

Para garantir uma CEM optimizada, há que ter em consideração certos aspectos no domínio da cablagem, nomeadamente:

- Escolha do tipo de cabo;
- Ligação aos terminais dos equipamentos a ligar;
- Trajecto do cabo;
- Agrupamento de diferentes tipos de cabos.

No que diz respeito às Linhas de Transmissão (LT), a sua geometria, que envolve tipos de estruturas, cabos e ferragens, influencia e determina os níveis de Campos Electromagnéticos, na faixa de segurança destas LT. O projecto tem um papel fundamental para o desempenho das LT e definirá, conforme a sua concepção, o grau de influência e alteração do meio no qual a LT estará inserida. É responsabilidade do projectista trabalhar os diversos parâmetros, de modo que eles possam interferir no ambiente de maneira menos intensa e mais amigável. Modificando um parâmetro podemos estar a causar efeitos opostos noutros e, conseqüentemente, alterar o ambiente electromagnético nas proximidades de forma não desejada. Embora o ambiente próximo das LT tenha os níveis de Interferência Electromagnética controlados pelas normas, a crescente procura de energia e, conseqüentemente, o aumento do número de corredores de linhas, implica uma melhoria contínua no que respeita à projecção (geometrias de apoios, uso de materiais mais adequados), tornando os níveis de interferência cada vez mais reduzidos.

Num ambiente electromagnético hostil podem ser adoptadas duas aproximações para a configuração da cablagem da instalação:

- Sinais de grande amplitude podem ser veiculados por um tipo de cabo seleccionado arbitrariamente, cujo trajecto é organizado sem preocupações particulares, e ligado aos aparelhos sem respeitar os procedimentos recomendados;

- Sinais de baixa amplitude podem atravessar o mesmo ambiente electromagnético hostil, por intermédio de um cabo cuidadosamente seleccionado, cujo trajecto e ligação aos aparelhos são correctamente efectuados, respeitando os princípios de CEM.

Para evitar interferência por acoplamento entre circuitos, ou por indução electromagnética externa, deverão ser adoptados os seguintes procedimentos na instalação de controlo:

a) Segregação entre condutores de sinal (digital ou analógico) e de força (comando e controlo em BT ou de energia em AT) através de rotas distintas.

b) Blindagem entre condutores de sinal e de força provida por tubos metálicos.

Uma medida suplementar corresponde a segregar os cabos dos circuitos de baixo nível de sinal, dos cabos de baixa tensão CA ou CC dos circuitos de força (onde as ondas de choque podem ser geradas / induzidas e propagadas). Devem ser empregues cabos blindados em todos os circuitos de protecção, comando, sinalização, medição e telecomunicações de subestações de Alta Tensão (AT). Para circuitos de sinais de baixo nível, particularmente àqueles ligados a equipamentos sensíveis, devem ser empregados cabos duplamente blindados (empregando a tubulação metálica como blindagem externa). A blindagem dos cabos deve ser ligada à terra na sala de comando e a tubagem metálica deve ser ligada à terra nas extremidades e em pontos intermediários.

O emprego de equipamentos para desacoplar circuitos, como transdutores, transformadores de potencial e corrente, relés auxiliares e acopladores ópticos para trazer os sinais de alta tensão para equipamentos dentro da sala de comando, é outra forma de atenuar os sinais interferentes.

## **4.2.2. Sistema de Terra**

A principal função de um sistema de terra é assegurar a segurança do pessoal e a protecção das instalações contra eventuais sinistros. Há assim que considerar a existência de dois fenómenos:

- Descargas eléctricas de origem atmosférica;
- Falhas/defeitos do sistema de potência.

Estes fenómenos traduzem-se pela circulação de correntes importantes susceptíveis de gerar tensões perigosas nas estruturas das instalações. O solo (terra) constitui assim a única via de retorno dessas correntes à sua fonte (meio ambiente). O sistema de terra deve constituir um caminho que permita às correntes atingir o solo, devendo garantir ao mesmo tempo que, entre quaisquer dois pontos da instalação, a diferença de tensão é o mais baixa possível.

Este sistema de terra, no entanto, por si só não é suficiente para satisfazer as prescrições de CEM.

Hoje em dia o equipamento pode ser susceptível a níveis de energia muito baixos, pois contem dispositivos electrónicos sensíveis às altas-frequências. O acoplamento electromagnético ocorre frequentemente, e para o evitar é necessário um óptimo sistema equipotencial de massa. Este é o primeiro passo a dar, de forma a proporcionar uma protecção contra as perturbações electromagnéticas.

A segunda função do sistema de terra consiste assim, para as instalações com sistemas electrónicos/eléctricos, em servir de referência comum à tensão, de modo a contribuir para a atenuação das perturbações.

Pela observação da figura 4.14, onde estão representados os casos A e B, constata-se que este objectivo de servir de referência absoluta de tensão muitas vezes não passa do plano teórico. Na prática, a indução de tensões externas faz com que a tensão entre dois pontos quaisquer do plano de referência seja diferente de zero, especialmente no domínio das altas-frequências. Sendo assim, quando surge a necessidade de ligar equipamentos separados por uma certa distância, mas exigindo uma referência comum de tensão, recomenda-se uma

solução de acordo com o caso A. Uma solução do tipo caso B deve ser evitada sempre que possível, na medida em que as tensões externas induzidas agudizam-se devido ao efeito do malha formado.

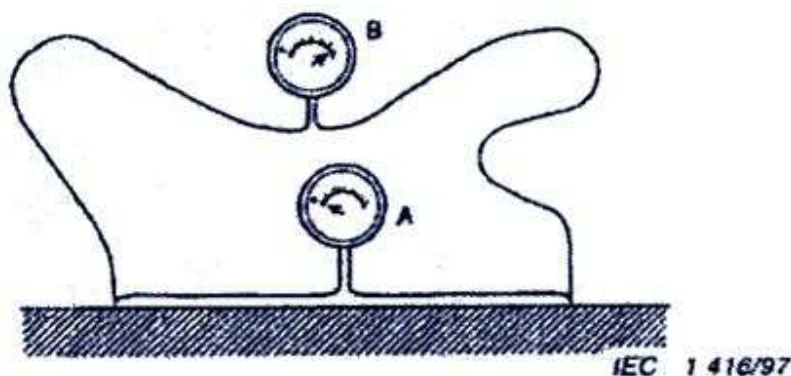


Figura 4.14 -Influência do comprimento do condutor na equipotencialização.

O sistema de terra contribui assim para a atenuação das perturbações, dado que constitui por um lado o caminho de retorno das correntes para a terra, e por outro constitui uma referência de tensão para os dispositivos de protecção.

No que toca à Compatibilidade Electromagnética, os aparelhos são em norma sensíveis a correntes e tensões bastante inferiores às consideradas para a segurança do pessoal.

### **4.2.3. Protecção contra Ondas de Choque**

Onda de choque é um fenómeno eléctrico muito rápido que ocorre por um curto período de tempo e é um fenómeno [I 9]. Para evitar a destruição dos componentes dos sistemas deverão ser instalados protectores contra sobretensões (supressores da onda de choque) com capacidade suficiente para absorver as ondas com alto conteúdo energético.

Devem ser instalados dispositivos para protecção contra ondas de choque, de acordo com o nível de protecção requerido e dos níveis de corrente e energia das ondas que se espera que atinjam os equipamentos.

#### **4.2.4. Blindagem Electromagnética**

Usualmente a blindagem electromagnética é empregue para minimizar interferências electromagnéticas produzidas no ambiente externo da instalação (descargas atmosféricas, descargas de contornamento de isoladores, etc.), devendo ser efectiva na faixa de frequências de 10 kHz até 500 kHz, correspondendo a frentes de onda da ordem de 25 ms e 1 ms, respectivamente. Genericamente, as características de um campo electromagnético são determinadas pela sua fonte, pelo meio de propagação e pela distância da fonte até onde está situado o equipamento/componente susceptível. Num ponto próximo ao local de produção do campo electromagnético, as propriedades deste são determinadas, principalmente, pelas características da fonte. Num ponto afastado da fonte perturbadora, as características do campo são determinadas pelo meio de propagação, daí ser o espaço dividido em duas regiões. Perto da fonte está o chamado *campo próximo*. A uma distância maior que um comprimento de onda  $\lambda/2$  está o chamado *campo afastado* ou *radiação*. Esta zona pertence às chamadas ondas planas (campo electromagnético). Assim, a transição entre os dois tipos de campo está na região próxima a  $\lambda/2$ , sendo o comprimento de onda emitido pela fonte considerada.

Genericamente, classifica-se uma blindagem electromagnética em termos da atenuação por absorção, atenuação por reflexão e atenuação por reflexões múltiplas. Se numa blindagem é utilizado material magnético, ao contrário de um bom condutor, ter-se-á um aumento de permeabilidade e uma diminuição da condutividade. Isto implica um aumento de perdas por absorção e uma diminuição de perdas por reflexão. No caso de ondas planas, tem-se uma diminuição do funcionamento da blindagem, por ser o mecanismo de reflexão o principal método de atenuação das ondas planas. No caso de campos eléctricos, ter-se-á o mesmo efeito pela mesma razão. Os materiais magnéticos, ao aumentar a sua frequência, diminuem

sua permeabilidade, e esta também depende da intensidade do campo. Os materiais de alta permeabilidade são adequados para frequências menores do que 10 kHz. Dependendo da faixa de frequências envolvidas, podem ser adoptadas blindagens simples ou duplas, material do tipo chapa plana ou perfurada, etc.

#### **4.2.5. Protecção do equipamento de comando contra Descargas Atmosféricas**

Em instalações de alta tensão empregam-se métodos probabilísticos na avaliação contra descargas atmosféricas directas. A aplicação destes métodos permite definir índices de desempenho empregados na escolha da melhor alternativa dentro das alternativas estudadas, sabendo-se que tais alternativas envolvem o posicionamento de cabos, hastes ou sistemas contendo ambos os elementos. O critério básico é de que todas as descargas que possam penetrar na blindagem prevista possuam correntes inferiores à corrente crítica, o que se espera que não cause danos aos equipamentos. Consideram-se duas situações distintas, a entrada de alta tensão e a sala de comando, onde estão instalados os Equipamentos Electrónicos Sensíveis (EES). Simplificadamente, pode-se afirmar que a forma de avaliação para ambos os casos é similar, diferindo na forma de se definir a corrente crítica de blindagem que para os equipamentos de alta tensão é definida em função da tensão de impulso atmosférico suportada pelos equipamentos, enquanto que para as salas de comando se define um valor máximo de 5 kA. Considerando que estas salas conterão os EES, estes deverão estar protegidos da melhor forma possível, o que consiste em dizer que os equipamentos deverão estar circunscritos numa Gaiola de Faraday composta por condutores em forma de malha, espaçados convenientemente. Nesta configuração, pode-se optar por duas formas básicas de blindagem que são compostas pela própria super estrutura da sala ou por uma malha externa sobreposta à sala.



Apesar de ambas as opções serem válidas, esta segunda opção é a mais recomendada devido ao efeito adicional de blindagem proporcionada pela super estrutura da sala o que propicia uma redução das sobretensões induzidas nos EES [N 16 - N 18].

### **4.3 - Conclusões**

Neste capítulo, são caracterizadas as principais interferências presentes nas instalações eléctricas, relacionadas com a qualidade da energia eléctrica, e são apresentadas possíveis soluções para os problemas causados por essas interferências.

No que concerne a métodos de atenuação das interferências, neste capítulo é apresentado um conjunto de soluções técnicas que podem ser implementadas na aparelhagem eléctrica, no sentido de melhorar o seu desempenho em termos de CEM, bem como em termos de qualidade de energia eléctrica.

## Capítulo 5

### **Ensaios de Compatibilidade Electromagnética**

Em geral, os testes de Compatibilidade Electromagnética são divididos em dois grupos:

1. Testes de Emissão.
2. Testes de Imunidade.

Para cada tipo de ensaio ou requisito testado, existem normas e procedimentos específicos, estabelecendo o procedimento, montagem de teste e medição, limites e tolerâncias.

Os ensaios de Emissão têm como objectivo verificar os níveis de campo electromagnético conduzido e radiado pelo equipamento em teste (EET, ou *EUT – Equipment Under Test*), bem como compará-los aos limites estabelecidos pelas normas vigentes.

Os ensaios de Imunidade têm como finalidade verificar o adequado funcionamento do equipamento quando exposto aos níveis de campo electromagnético que encontrará quando estiver em actividade.

Existem cinco classes que determinam o funcionamento de um sistema eléctrico e electrónico, quando submetido a campos electromagnéticos:

- Classe A: o dispositivo apresenta alteração no seu funcionamento normal, quando exposto a campos electromagnéticos.
- Classe B: uma ou mais função do dispositivo sofre influência (sem apresentar falha) quando exposto ao campo. Quando o campo cessa, as funções voltam ao funcionamento normal.

- Classe C: uma função do dispositivo apresenta falha quando exposto ao campo. Quando o campo cessa, as funções retornam ao funcionamento normal mediante um algoritmo de *autoreset*.
- Classe D: uma função do dispositivo apresenta falha quando exposto ao campo. Quando o campo cessa, as funções retornam ao funcionamento normal mediante um *reset* manual.
- Classe E: uma função do dispositivo apresenta falha quando exposto ao campo. Quando o campo cessa, as funções retornam ao funcionamento normal apenas após o reparo ou troca do dispositivo.

## **5.1. Ensaios de Emissão**

Um equipamento quando está a funcionar no seu ambiente não deve emitir perturbações electromagnéticas, sejam elas na forma radiada ou na forma conduzida, acima de valores limites determinados, pelas normas correspondentes, como sendo níveis aceitáveis de emissão. Entende-se que estes limites são seguros e que um equipamento, dentro dos limites especificados, não oferece ameaça de interferência ou dano aos dispositivos que funcionam nas proximidades ou que estão ligados ao equipamento em questão.

Os ensaios de medição das emissões de um equipamento foram desenvolvidos de modo a cobrir a faixa de 9kHz a 400GHz. As medições na faixa de 150kHz a 30MHz são realizadas considerando-se que nesta faixa o ruído predomina sob a forma conduzida, confinada aos cabos do equipamento. Já as medições na faixa de 30MHz a 1GHz são realizadas considerando-se que o ruído na sua maior parte está na forma radiada e diz respeito à componente de campo eléctrico. Acima de 1 GHz refere-se à potência da energia electromagnética radiada pelo EET.

A figura 5.1 mostra a divisão da emissão de rádio frequência (RF) em duas subclasses: radiada e conduzida.

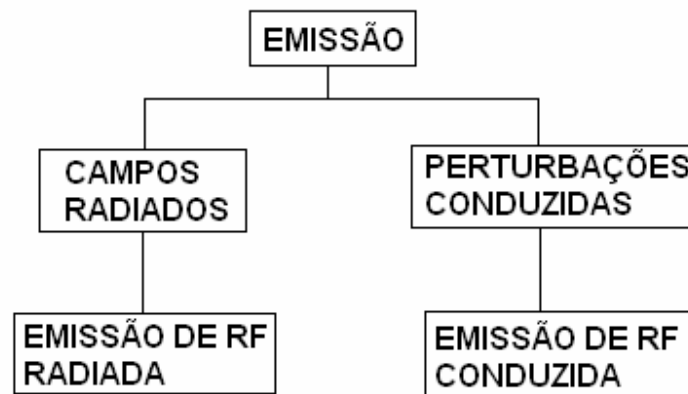


Figura 5.1 - Divisão da emissão de RF nas classes Radiada e Conduzida.

Para que se possam verificar os níveis de emissão do EET, certos procedimentos de ensaio devem ser adoptados e seguidos com o mais alto rigor para que se obtenham leituras coerentes e confiáveis.

Os critérios de emissão utilizados neste trabalho serão os definidos pelas normas:

- **CISPR 11 e 22**

As normas de referência para o ensaio de emissão radiada determinam duas classes de produtos de acordo com a sua utilização:

- Classe A: equipamentos comerciais e industriais
- Classe B: equipamentos de uso doméstico ou genérico

Adicionalmente, a CISPR 11 classifica os equipamentos em:

- Grupo 1: reúne todos os aparelhos nos quais a energia à frequência radioelétrica, que se propaga por fenómenos de condução, é produzida e utilizada intencionalmente porque é necessária ao funcionamento interno do aparelho.
- Grupo 2: reúne todos os aparelhos nos quais a energia à frequência radioelétrica é produzida e utilizada intencionalmente, sob a forma de Radiação Electromagnética, porque é necessária ao funcionamento interno do aparelho [N 9].

### **5.1.1. Ensaio de Emissão Radiada**

A medição das ondas radiadas por um equipamento deveria ser feita, em teoria, num local denominado *Open Area Test Site (OATS)*, que é um local em campo aberto onde se supõe que as únicas reflexões de onda possíveis são as provenientes do solo. A figura 5.2 mostra um exemplo de uma OATS [I.5].



Figura 5.2 - OATS[I.5].

Devido à dificuldade de se encontrar um local livre de ruídos ambientais para se efectuar os ensaios com OATS, opta-se por utilizar câmaras Semi-Anecóicas (CSA). Células GHz Transverso Electromagnéticas (GTEM) também podem ser utilizadas para as medições.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram, respectivamente, uma célula GTEM e uma câmara Semi-Anecóica.

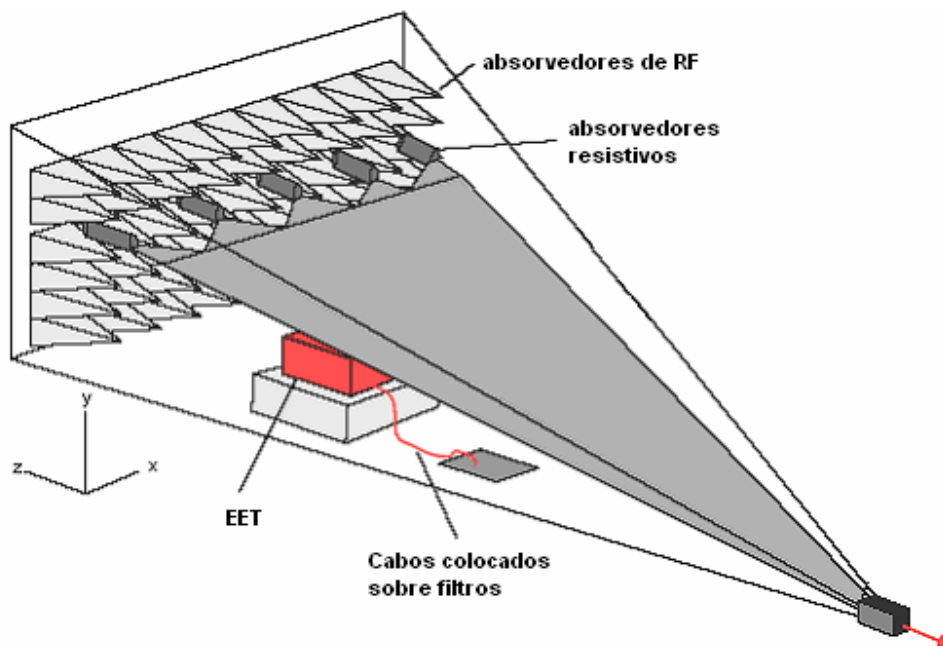


Figura 5.3 - Célula GTEM [I 10].



Figura 5.4 - Câmara Semi-Anecóica [I 5].

Uma CSA é toda construída em metal, o que lhe confere blindagem a radiações electromagnéticas. Internamente, é revestida por espumas especiais cobertas por carbono, material que absorve radiações electromagnéticas, excepto o chão que é metálico. Este é

composto por chapas metálicas cobertas por material sintético que permite uma ampla movimentação de cabos. A sua função é reflectir as ondas electromagnéticas para o ambiente. No fundo da câmara há uma base giratória onde é instalado o equipamento a ensaiar.

O objectivo da CSA é simular um campo aberto ideal, ou seja, um lugar onde as ondas se propagam com reflexão apenas do solo e sem a existência de ruído ou sinal electromagnético externo. As espumas no seu interior têm a função de evitar a reflexão de sinais electromagnéticos, simulando um campo aberto ideal onde as ondas se propagam para o infinito.

O equipamento em teste é colocado na CSA a disposto sobre uma mesa giratória, de acordo com as recomendações das normas de referência, conforme a figura 5.5.

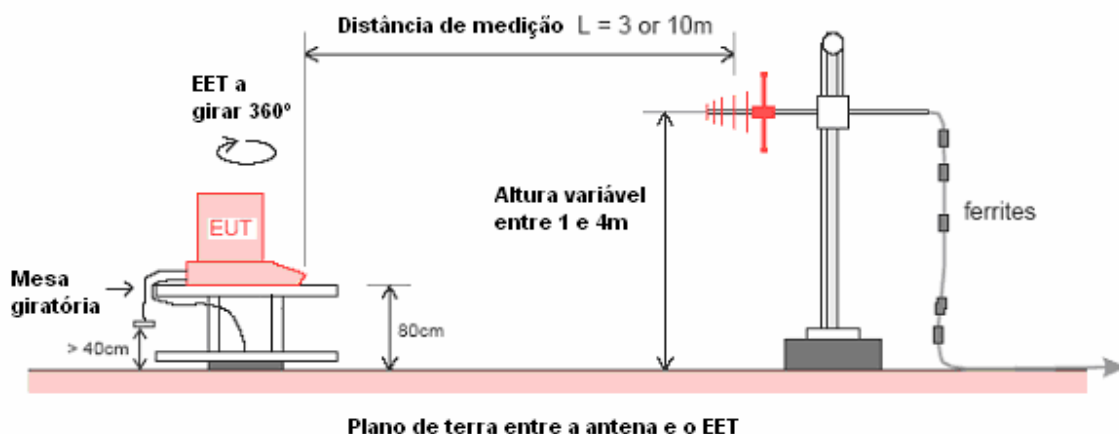


Figura 5.5 - Montagem para o ensaio de emissão radiada – vista lateral [I 10].

As normas CISPR 11 e 22 definem as dimensões mínimas em forma de elipse, onde não pode haver nenhum objecto metálico que possa reflectir as ondas. As dimensões são apresentadas na figura 5.6.

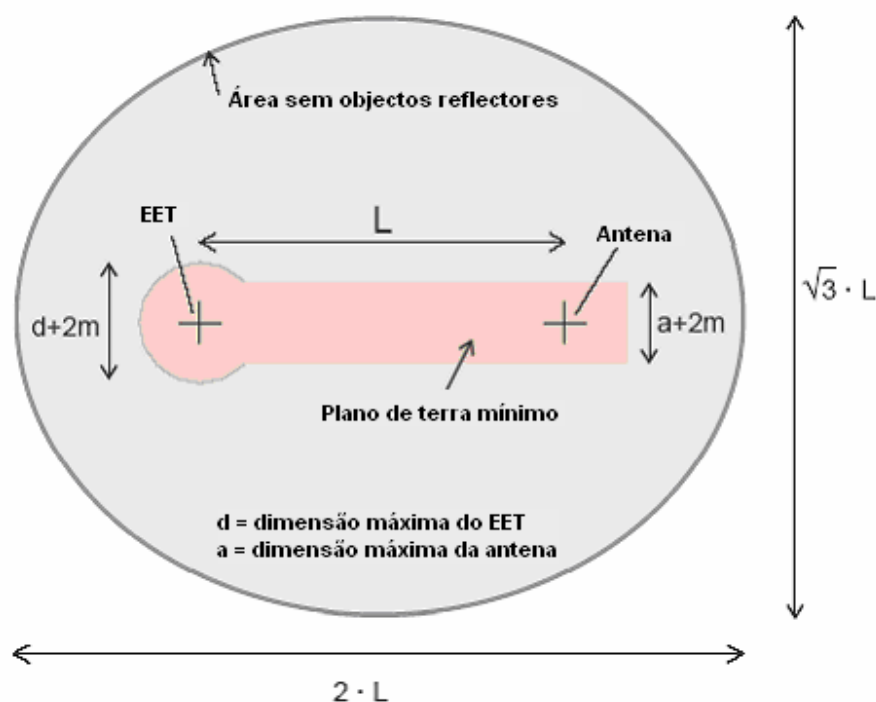


Figura 5.6 – Montagem para o Ensaio de Emissão Radiada – Vista Superior [I 10].

O EET é colocado de modo a simular uma condição normal de funcionamento. Feito isto, são realizadas as medidas de emissão radiada.

O objectivo final da medição é obter os valores de máxima radiação proveniente do EET e comparar esses valores obtidos no modo de detecção *Quasi-peak* com os limites estabelecidos nas normas de referência.

Com a finalidade de se conseguirem os maiores valores, faz-se uma prospecção espacial da radiação emitida pelo EET que é captada pelas antenas utilizadas no ensaio: biconica e log-periódica.

Para conduzir essa prospecção, são variadas as posições azimutais da mesa giratória onde se encontra o EET e a altura das antenas receptoras. A sequência destas variações é função do histórico de medição. Apenas se varia uma coordenada de cada vez.



O resultado da medição é calculado automaticamente por um microcomputador que processa os dados oriundos do receptor de EMI. Efectua-se uma compensação nas leituras devido a perdas nos cabos e aos factores de antena, conforme a seguinte fórmula:

$$E = V + K$$

onde: E- valor do campo eléctrico

V- valor da tensão recebida no receptor de EMI

K – factor que compensa as perdas, somatório das perdas nos cabos (C) e dos factores de antena (AF), definido como um factor de transdução do sinal do campo eléctrico recebido pela antena em sinal eléctrico produzido aos seus terminais, menos o ganho do amplificador (G):

$$K = C + AF - G$$

Os resultados obtidos são apresentados na forma gráfica pelo sistema computacional, que sobrepõe o limite da norma em questão para a análise dos resultados.

Basicamente, são utilizadas duas formas de detecção do sinal para este ensaio: pico e *Quasi-peak*. A primeira é sempre empregada inicialmente para conduzir à determinação das frequências dos sinais de interesse e à sua respectiva localização espacial. O seu valor é sempre maior ou igual à medida de *Quasi-peak* e o seu modo de aquisição é mais simples. A segunda forma de detecção é utilizada numa fase terminal e o seu valor é o oficial para efeito de comparação com os limites da norma.

As medições são sempre maximizadas no tempo usando-se, para tal, a função *Max Hold* o que é conseguido através de um software que trata as medidas dadas pelo receptor de EMI.

A tabela 5.1 mostra os limites estabelecidos pelas normas CISPR 11 e 22 para o ensaio de emissão radiada.

Banda de Frequência (MHz)	Classe A	Classe B
	Limite <i>Quasi - Peak</i> (dB $\mu$ V/m)	Limite <i>Quasi - Peak</i> (dB $\mu$ V/m)
30 - 230	40	30
230 - 1000	47	37

Tabela 5.1 - Limites para emissão radiada (L=10m) [N 10].

### 5.1.2. Ensaio de Emissão Conduzida

Os ensaios de emissão conduzida são feitos de modo a cobrir a faixa de frequência não coberta pelos ensaios de emissão radiada. O objectivo deste ensaio é garantir que o EET não gera ruídos conduzidos pelos seus cabos de energia e telecomunicações, acima de determinado nível, considerado pelas normas como limite.

A preocupação principal é que os ruídos acima de determinados níveis podem causar interferência noutros equipamentos, já que a rede eléctrica é interligada e muitos equipamentos compartilham a mesma rede.

A forma de medir a emissão conduzida de um equipamento é utilizando as *Line Impedance Stabilization Network (LISN)* ou Rede de Estabilização de Impedância de Linha. Esta funciona como um transdutor entre o EET e o equipamento de medida. O desenvolvimento e construção de uma LISN são descritos na norma CISPR16.



Figura 5.7 - Rede de Estabilização de Impedância de Linha.

Este tipo de ensaio é realizado numa sala de ensaio, conforme a figura 5.8, construída de acordo com as especificações de referência. O ensaio é composto por dois planos de terra, um vertical e outro horizontal, formando um L. Estes planos são uma referência de terra estabelecida pelas normas para todos os EET e para as LISN usadas. Uma LISN é uma rede fictícia inserida num cabo de alimentação eléctrica de um EET que fornece, em várias faixas de frequência, uma impedância de carga específica para a medição de tensões de frequência e que pode desacoplar o equipamento da rede eléctrica na referida faixa de frequências.

Do lado do plano vertical está o analisador de espectro usado neste tipo de ensaios. A meio da sala está uma mesa de madeira usada ou não nos ensaios dependendo da dimensão do EET.

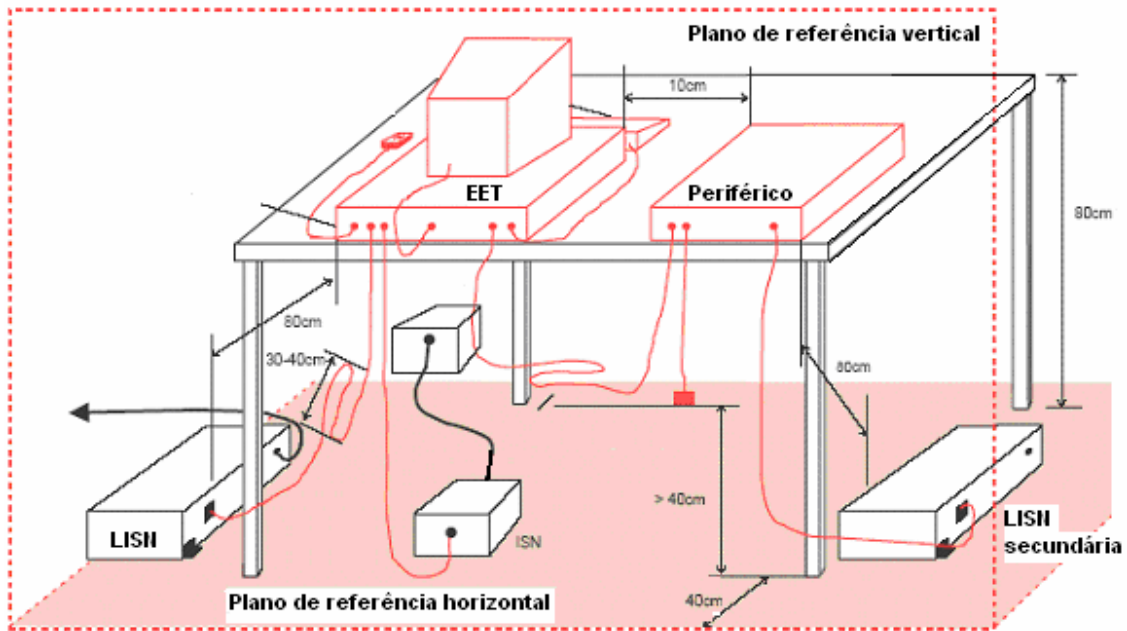


Figura 5.8 - Montagem para o Ensaio de Emissão Conduzida [I 10].

O EET é colocado na sala de ensaios e ligado à rede AC através da LISN, de acordo com as recomendações das normas de referência. O EET é excitado de modo a simular uma condição normal de funcionamento. Feito isso, são realizadas as medidas de emissão conduzida.

O critério de detecção é a mesma utilizada no ensaio de emissão radiada. Começa-se por utilizar a detecção de pico para a definição e posterior localização das frequências de interesse, que estão próximas e/ou ultrapassam os limites estipulados nas normas. A seguir, muda-se a forma de detecção para *Quasi-peak* para, finalmente, se proceder às análises e comparações com a norma de referência. Estas análises são realizadas com auxílio do próprio sistema computacional.

São realizadas, também, medidas de detecção do valor médio (*Average Measurement*) nos pontos em que a medida de pico estiver próxima ou ultrapasse o limite do valor médio.

O equipamento é aprovado se ambos os valores, *Quasi-peak* e Médio, estiverem abaixo dos respectivos limites.

Este procedimento é repetido para cada uma das fases de alimentação AC do EET, ou com as duas ao mesmo tempo. Para isso, utiliza-se um comando que simula, por software, a função *Max-Hold* do analisador de espectro. Esta função sobrepõe as medidas garantindo a obtenção dos valores máximos de cada fase.

As tabelas 5.2 e 5.3 mostram os limites de *Quasi-Peak* e valor médio estabelecidos pela norma CISPR 22.

<b>Limites para a classe A</b>		
Banda de frequência	Quasi-Peak (dB $\mu$ V)	Valor Médio (dB $\mu$ V)
150 kHz - 500 kHz	79	66
500 kHz - 30MHz	73	60
<b>Limites para a classe B</b>		
Banda de frequência	Quasi-Peak (dB $\mu$ V)	Valor Médio (dB $\mu$ V)
150 kHz - 500 kHz	66 - 56	56 - 46
500 kHz - 5MHz	56	46
5MHz - 30MHz	60	50

Tabela 5.2 - Limites para a emissão conduzida nas linhas de alimentação [N 10].

<b>Limites para a classe B</b>		
Banda de frequência	Quasi-Peak (dB $\mu$ V)	Valor Médio (dB $\mu$ V)
150 kHz - 500 kHz	84 - 74	74 - 64
500 kHz - 30MHz	74	64

Tabela 5.3 - Limites para a emissão conduzida nas portas de comunicação [N 10].

## **5.2. Ensaios de Imunidade**

Dos ensaios exigidos para certificação de um equipamento, vimos até agora as medições de emissão tanto na forma conduzida como na forma radiada. A próxima fase é a de testes de imunidade a perturbações, sendo esta mais extensa que a anterior.

As perturbações electromagnéticas podem associar-se de diversas maneiras aos equipamentos electro-electrónicos. A oposição que um equipamento oferece a estas perturbações, ou até mesmo a capacidade de funcionamento normal após sujeito a tais perturbações, é chamada imunidade a perturbações electromagnéticas.

As formas mais comuns de perturbação electromagnética, respeitantes aos testes de equipamentos, podem ser classificadas de acordo com seu tipo do acoplamento [L.1]:

- Campos Radiados
- Perturbações Conduzidas
- Descargas Electrostáticas
- Perturbações na alimentação

As quatro formas de acoplamento de perturbações citadas acima serão examinadas e divididas em ensaios que visam sua verificação. A figura 5.9 mostra um diagrama que associa os ensaios às categorias de perturbações citadas.

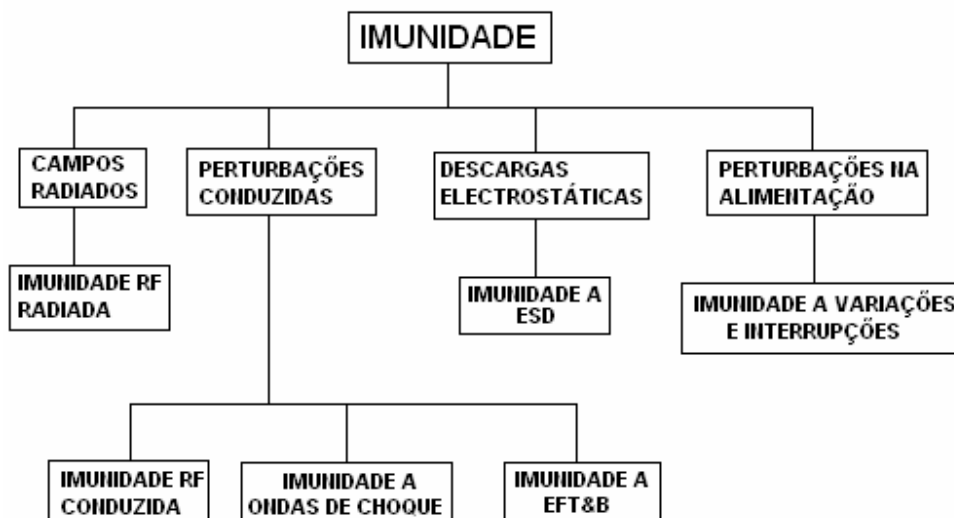


Figura 5.9 - Diagrama de Ensaios de Imunidade.

### 5.2.1. Ensaio de Imunidade Radiada

O ensaio de imunidade radiada tem como objectivo verificar se o equipamento sob ensaio é imune às perturbações, sob a forma radiada, presentes no ambiente. A estrutura para os testes é descrita pela norma IEC61000-4-3 e consiste em sujeitar o EET a um campo eléctrico, de intensidade definida de acordo com a aplicação do equipamento, e monitorizar o funcionamento do EET. A monitorização depende das características de cada EET e pode ser visual ou através de alguma medição.

Este tipo de ensaio é realizado numa câmara Semi-Anecóica, conforme figura 5.10. O fabricante deve especificar as configurações para as quais o equipamento será ensaiado.

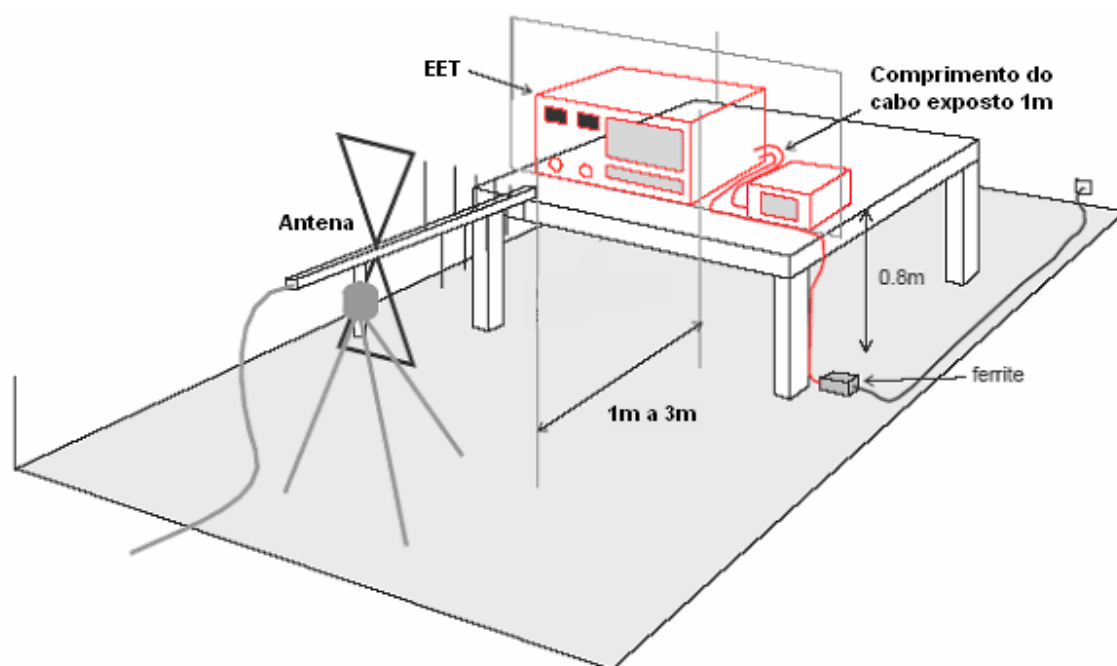


Figura 5.10. Montagem para o Ensaio de Imunidade Radiada [I 10].

Uma interface é trazida para fora da CSA através de um cabo de rede, onde são colocadas ferrites a fim de evitar a passagem de ruído de alta-frequência para dentro da CSA através destes cabos. Um medidor de nível selectivo, em alta impedância, é ligado à ponta deste cabo.

A intensidade do campo é ajustada antes de começar o ensaio utilizando-se o método de substituição, que consiste em posicionar uma antena de forma a medir o campo na mesma posição onde o EET será colocado durante o ensaio e elaborar uma tabela contendo a tensão necessária no gerador de sinais para atingir o campo desejado. O EET será, então, posicionado no local onde estava a antena. O gerador de sinais é controlado por um software desenvolvido especialmente para este ensaio que contem as faixas de frequência e as tensões necessárias para cada faixa.



## 5.2.2. Ensaio de Imunidade Conduzida

O teste de imunidade conduzida permite verificar se o equipamento, quando submetido a perturbações conduzidas através dos cabos de alimentação ou de comunicação, apresenta mau funcionamento sob algum aspecto. O ensaio é muito similar ao ensaio de imunidade radiada, sendo que, no caso radiado, a fonte de perturbação é um campo eléctrico e que no caso conduzido, é uma onda que se propaga junto ao cabo.

Como a fonte da perturbação é diferente do caso radiado, são usadas, para o acoplamento do ruído conduzido, as chamadas Redes de Acoplamento e Desacoplamento ou *Coupling Decoupling Network* (CDN), representada na figura 5.11. Estes dispositivos são capazes de acoplar a perturbação ao cabo em questão, sendo ligados em série nos cabos.



Figura 5.11 - Rede de Acoplamento e Desacoplamento (CDN) [I 10].

Uma outra maneira de se acoplar o ruído conduzido é através do *Electromagnetic Clamp* (Clamp EM), apresentado na figura 5.12. Este dispositivo é colocado à volta do cabo em questão e, através de sua estrutura, induzem a perturbação no cabo, proporcionando um acoplamento capacitivo e indutivo.

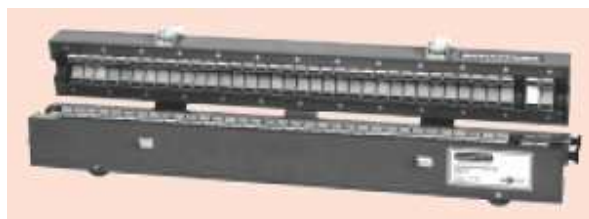


Figura 5.12 - Clamp Electromagnético.

Este ensaio é executado de acordo com a norma IEC 61000-4-6. Este tipo de ensaio é realizado numa CSA. O fabricante deve especificar as configurações para as quais o equipamento será ensaiado. A figura 5.13 mostra a montagem utilizada para este ensaio.

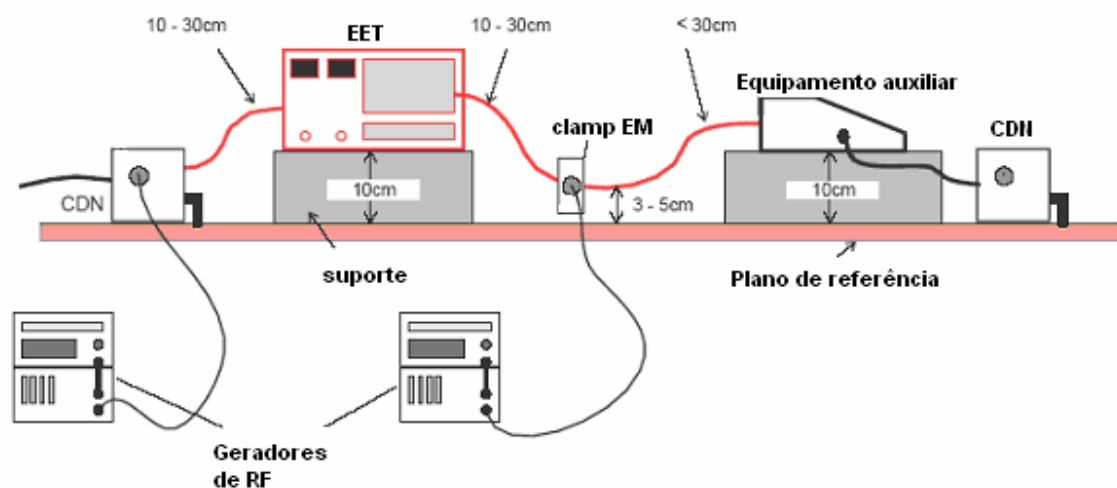


Figura 5.13 – Montagem para o ensaio de Imunidade Conduzida [I 10].

Este ensaio deve ser aplicado no cabo de alimentação do EET e em todos os cabos de comunicação com comprimento superior a 3 metros.

No início, é realizada uma qualificação para definição da tensão de saída do gerador de sinais necessário para se obter o nível especificado para o ensaio.

De acordo com a Norma IEC61000-4-6, os níveis de severidade a serem aplicados ao EET são determinados a partir do ambiente onde o EET será instalado. A tabela 5.4 mostra os níveis de perturbação sugeridos pela norma.

Severidade	Nível de Tensão	
	dB ( $\mu$ V)	U0 (V)
1	120	1
2	130	3
3	140	10
X	Especial	

Tabela 5.4 - Níveis de severidade para o ensaio de Imunidade Conduzida [N 11].

### 5.2.3. Ensaio de Imunidade a Ondas de Choque

O ensaio de imunidade a Ondas de Choque tem como objectivo verificar a imunidade do EET às perturbações e efeitos causados por descargas atmosféricas, as quais podem danificar equipamentos electrónicos. Para tal são utilizados equipamentos chamados de Geradores de Onda Combinada capazes de reproduzir os efeitos de uma descarga atmosférica.

A figura 5.14 mostra a montagem utilizada neste ensaio.

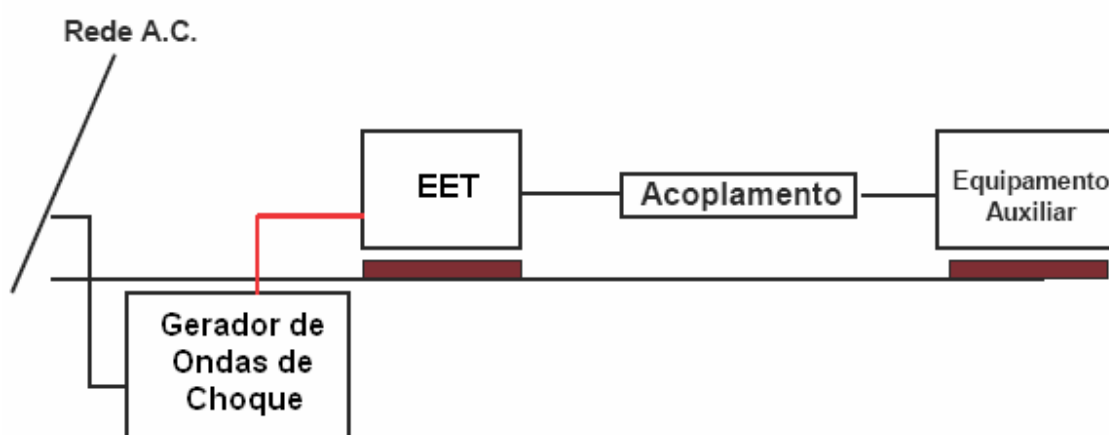


Figura 5.14 – Montagem para o ensaio de Imunidade a Ondas de Choque [I 11].

Os níveis de teste são definidos pela Norma IEC61000-4-5 de acordo com a classificação do local e condições de instalação do equipamento. A Tabela 5.5. reproduz os níveis de severidade sugeridos pela norma.

Severidade	Níveis de Tensão - Linhas de alimentação	
	Fase - Fase	Fase - Terra
1	n/a	0,5 KV
2	0,5 KV	1,0 KV
3	1,0 KV	2,0 KV
4	2,0 KV	4,0 KV
X	Especial	

Tabela 5.5 - Níveis de severidade para o ensaio a ondas de choque[N 14].

#### **5.2.4. Ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos**

Os ensaios de imunidade a transitórios eléctricos rápidos têm como objectivo verificar a imunidade do equipamento aos transitórios causados por motores, disjuntores abrindo e fechando e arcos voltaicos causados pela abertura e fecho de circuitos indutivos. O ensaio consiste em aplicar salvas de impulsos periódicos à alimentação e às interfaces de telecomunicações.

Para realizar este ensaio é necessário, basicamente, um gerador de perturbações e um acoplador. O EET deve ter os seus portos em funcionamento e monitorizadas de modo a se notar qualquer perda de funcionalidade durante os ensaios.

Os ensaios devem ser executados de maneiras diferentes – uma para o acoplamento das perturbações na alimentação (fase, neutro e terra) utilizando o próprio gerador de transitórios eléctricos rápidos, outra para o acoplamento nas linhas de comunicação

utilizando um clamp capacitivo e as demais estruturas descritas na norma IEC61000-4-4, como o plano de referência.

A configuração do ensaio é apresentada na figura 5.15 (a) e (b).

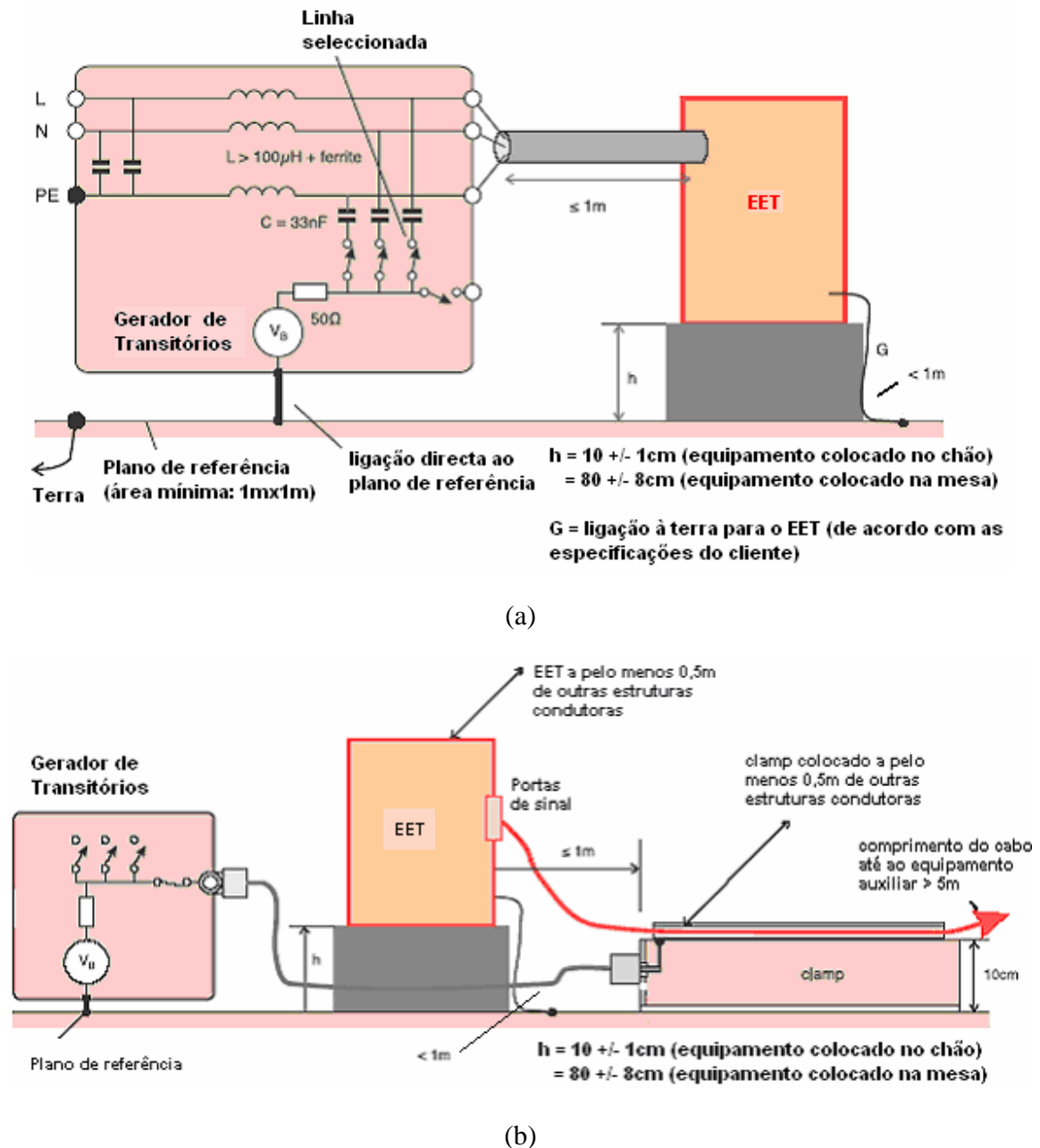


Figura 5.15 - Montagem para o ensaio de Imunidade a transitórios eléctricos rápidos (a) nas portas principais [I 10]; (b) nas portas de sinal [I 10].

Os níveis de teste para este ensaio são determinados de acordo com o local de instalação do EET. Os locais mais susceptíveis e onde estão presentes circuitos ligados por relés são classificados com maiores níveis de severidade. Os equipamentos podem ser sujeitos aos níveis de severidade indicados na tabela 5.6 sugeridos pela norma IEC61000-4-4.

Severidade	Níveis de Tensão /Taxa de repetição	
	Linhas de alimentação	Linhas de comunicação
1	0,5 kV / 5kHz	0,25 kV / 5kHz
2	1,0 kV / 5kHz	0,5 kV / 5kHz
3	2,0 kV / 5kHz	1,0 kV / 5kHz
4	4,0 kV / 2,5kHz	2,0 kV / 5kHz
X	Especial	

Tabela 5.6 - Níveis de severidade para o ensaio de imunidade a transitórios eléctricos rápidos [N 12].

### 5.2.5. Ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas

O objectivo do ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas é verificar os efeitos de descargas por contacto directo e indirecto humano e de equipamentos.

Para a execução dos ensaios a Descarga Electrostática (ESD), deve ser utilizado um simulador de ESD capaz de efectuar descargas até 15kV, obedecendo aos critérios da norma IEC61000-4-2.

Este ensaio deve ser executado utilizando um simulador de ESD, referenciado em inglês como “*ESD gun*”.

Existem três tipos de aplicações das ESD:

- Aplicação de Descarga Directa: pelo ar e por contacto
- Aplicação de Descarga Indirecta via Plano de Acoplamento Vertical (VCP)
- Aplicação de Descarga Indirecta via Plano de Acoplamento Horizontal (HCP)

O EET deve ser colocado no seu funcionamento normal e deve ser monitorizado de modo a ficar evidente qualquer perda de funcionalidade. A observação do comportamento do EET é o que vai determinar se o equipamento está conforme ou não com os aspectos de ESD. A figura 5.16 mostra um esboço da montagem para os ensaios de imunidade a descargas electrostáticas no EET.

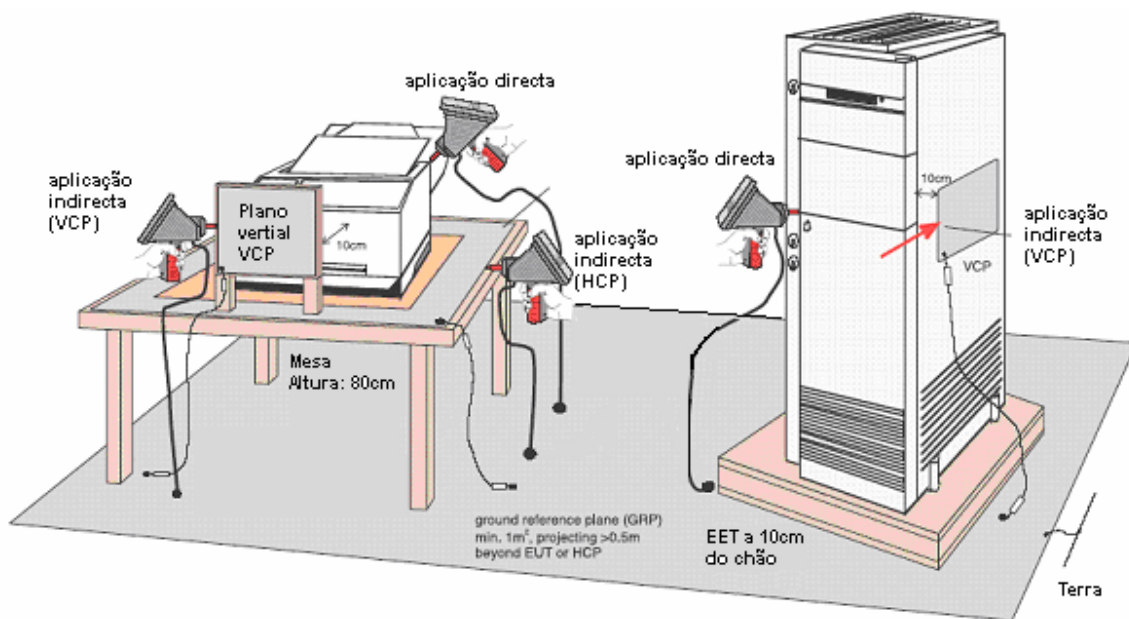


Figura 5.16 - Montagem para o ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas [I 10].

As descargas são aplicadas com o EET a trabalhar no seu estado de funcionamento normal.

### **DESCARGA DIRECTA**

Nesta parte do ensaio são escolhidos para a aplicação da Descarga Electrostática alguns pontos considerados críticos e de maior hipótese de apresentar problemas. A descarga é por contacto ou pelo ar.

### **DESCARGA INDIRECTA - VCP**

Nesta parte do ensaio é verificada a imunidade do EET ao acoplamento através do plano vertical. Após montado, dá-se início à aplicação das perturbações. O tempo entre impulsos de ESD é de 1 segundo. Inicialmente, são aplicados 10 impulsos negativos e em seguida é verificado o funcionamento do equipamento. Após os impulsos negativos, aplicam-se no mesmo ponto, 10 impulsos positivos. Novamente, verifica-se o funcionamento do equipamento para garantir que a perturbação gerada pelos impulsos de descarga electrostática não afectou o EET.

### **DESCARGA INDIRECTA - HCP**

Nesta parte do ensaio é verificada a imunidade do EET ao acoplamento através do plano de acoplamento horizontal. O tempo entre impulsos de ESD é de 1 segundo e são aplicados da mesma forma, 10 impulsos de polaridade negativa e 10 impulsos de polaridade positiva. Após a aplicação de cada sequência de impulsos, o funcionamento do EET é verificado.

### **VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE**

A conformidade com este item é atingida se o equipamento, após a aplicação das perturbações, continua a funcionar normalmente.

A tabela 5.7 reproduz os níveis de severidade sugeridos pela norma IEC61000-4-2.



Descarga por contacto		Descarga pelo ar		VCP / HCP	
Severidade	Nível de Tensão (kV)	Severidade	Nível de Tensão (kV)	Severidade	Nível de Tensão (kV)
1	2	1	2	1	2
2	4	2	4	2	4
3	6	3	8	3	6
4	8	4	15	4	8
X	Especial	X	Especial	X	Especial

Tabela 5.7 - Níveis de severidade para o ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas [N 13].

Os níveis de severidade devem ser seleccionados de acordo com a instalação real e condições ambientais, descritos na tabela 5.8.

Severidade	Humidade relativa (%)	Material	Tensão máxima (kV)
1	35	Anti-estático	2
2	10	Anti-estático	4
3	50	Sintético	8
4	10	Sintético	15

Tabela 5.8 - Critérios para selecção dos níveis de severidade.

## **5.2.6. Ensaio de Imunidade a Quedas/Interrupções de Tensão**

A rede de energia eléctrica pode variar ou até mesmo ser interrompida por breves momentos devido a mudanças abruptas de carga ou mau dimensionamento da rede. A fim de se evitar que estes tipos de problemas danifiquem os equipamentos electrónicos, são efectuados ensaios, simulando-se através de equipamentos específicos, as variações e interrupções na tensão de alimentação do EET. A Norma IEC61000-4-11 descreve os métodos de teste para este ensaio

A figura 5.17 mostra como seria a redução a 70% da tensão nominal, por dois períodos, da rede.

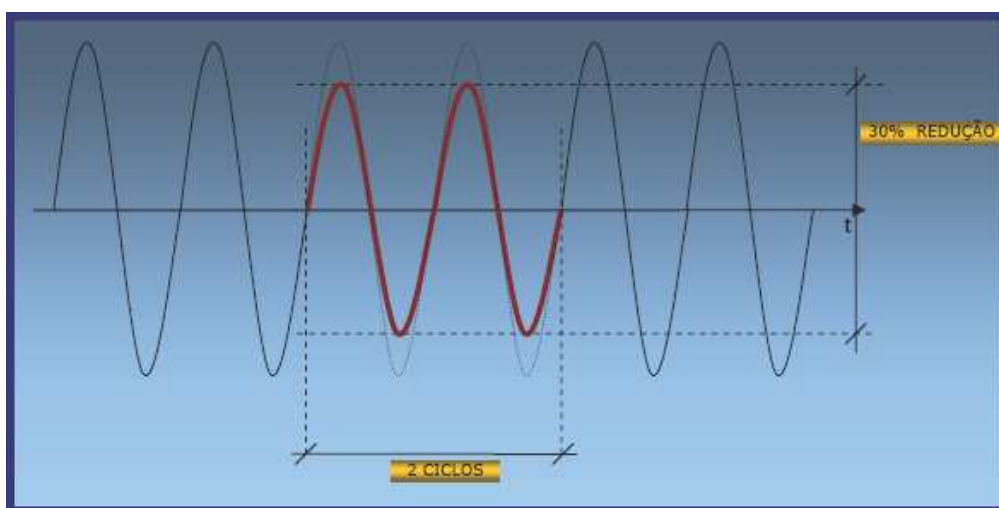


Figura 5.17 - Exemplo de redução de Tensão a 70% por dois períodos.

O ensaio de imunidade a variações e interrupções de tensão possui muitas possibilidades de variações. Consta, basicamente, num equipamento capaz de controlar a alimentação de acordo com o especificado nas normas. Para este ensaio, pode ser utilizada a seguinte montagem presente na figura 5.18.

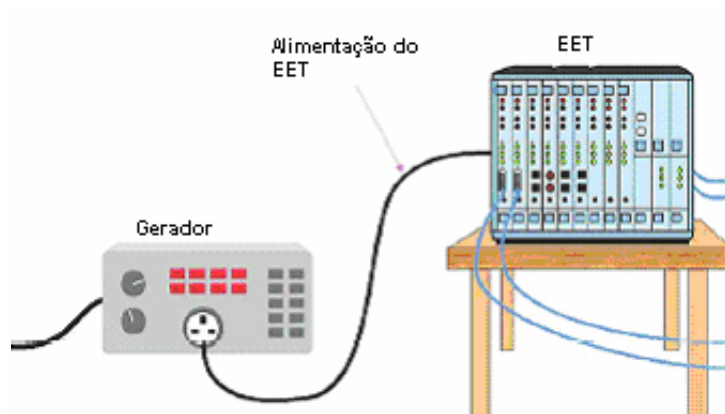


Figura 5.18 - Montagem para o ensaio de Imunidade a Quedas/Interrupções de Tensão [I 12].

A escolha dos níveis de teste para este ensaio é descrita na Norma IEC61000-4-11 e é baseada em estudos que relacionam o número de casos por ano da queda de tensão e sua duração.

Os níveis de teste estão indicados na tabela 5.9 de acordo com a norma IEC61000-4-11.

Nível de Teste	Redução de Tensão e curta interrupção (% V)	Duração (em períodos)
0	100	0,5
		1
		5
40	60	10
		25
		50
70	30	X

Tabela 5.9 - Níveis de Teste para o ensaio de Imunidade a Quedas/Interrupções da Tensão na Rede Eléctrica [N 15].

O EET é ligado ao simulador onde são programados os parâmetros de percentagem da redução e duração da interrupção conforme Tabela 4.5. As reduções de tensão são configuradas para ocorrer nos ângulos de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$  de fase da onda fundamental da alimentação.

### **5.3. Conclusões**

Neste capítulo faz-se referência aos ensaios aos quais os equipamentos devem ser submetidos, e como é que devem ser realizados.

De forma a respeitar as normas harmonizadas de Compatibilidade Electromagnética e, conseqüentemente, demonstrar a conformidade com a Directiva de Compatibilidade Electromagnética, no âmbito da Marcação CE, os equipamentos devem respeitar os limites impostos pelas normas. Estes ensaios permitem verificar a conformidade

## Capítulo 6

### **Estudo da Compatibilidade Electromagnética de uma Unidade de Aquisição, Controlo e Protecção**

Durante os trabalhos de investigação, fui convidada, pela EFACEC, a assistir e participar nos ensaios de Compatibilidade Electromagnética que iriam efectuar a um equipamento eléctrico, uma Unidade de Aquisição, Controlo e Protecção (UAC), como a da figura 6.1., nos laboratórios de CEM da ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações), em Carnaxide.

A UAC é uma unidade de protecção e controlo, vocacionada para efectuar funções de protecção, controlo e automação em subestações de distribuição de energia eléctrica.



Figura 6.1 - Unidade de Aquisição, Controlo e Protecção (UAC).

O objectivo destes ensaios foi o de demonstrar a conformidade com a Directiva de Compatibilidade Electromagnética, no âmbito da Marcação CE da unidade UAC.

Como se trata de um produto novo, embora derivado de uma família de produtos já existente, para poder ser colocado no mercado (Europeu) é necessário proceder ao processo de Marcação CE.

Qualquer produto, electrónico ou não, para ser comercializado (pelo menos no espaço Europeu), deve ostentar a Marcação CE. No caso de equipamentos electrónicos, isto significa cumprir os requisitos essenciais das Normas Harmonizadas que conferem presunção de Conformidade segundo as Directivas Comunitárias aplicáveis. As Directivas Comunitárias aplicáveis são, neste caso, a Directiva 73/23/CEE (Directiva de Baixa Tensão, que lida com aspectos de segurança), e a Directiva 89/336/CEE (Directiva de Compatibilidade Electromagnética – imunidade e emissão).

A norma EN 61000-6-2 estabelece os requisitos de imunidade no âmbito da Directiva de Compatibilidade Electromagnética, aplicável em ambientes industriais. A norma EN 61000-6-4 estabelece os limites de emissão no âmbito da Directiva de Compatibilidade Electromagnética, aplicável em ambientes industriais. A norma EN 50263 estabelece os requisitos para emissão e imunidade no âmbito da Directiva de Compatibilidade Electromagnética, aplicável a relés de medida e equipamentos de protecção.

Desta forma, e uma vez que a UAC se enquadra na categoria de “relés de medida e equipamentos de protecção”, e que o ambiente onde tipicamente são instaladas é considerado “ambiente industrial”, são consideradas as três normas, sendo também considerados os níveis mais restritivos solicitados pelas mesmas, para cada ensaio.

No presente caso, os ensaios em questão formam uma parte dos ensaios requeridos para demonstrar a Conformidade, segundo a Directiva de Compatibilidade Electromagnética, da UAC.

## **6.1. Descrição geral**

Dada a sua elevada fiabilidade e robustez, a UAC tem um largo campo de aplicação em redes de transmissão e distribuição de energia bem como em instalações industriais, tais como:

- Automação de redes eléctricas
- Comando, supervisão local e remota de órgãos de corte de rede e postos de Média Tensão (MT)
- Unidade de Comando e controlo de painel
- Unidade de Automação e medição para sistemas de Comando, controlo e supervisão
- Integração em sistemas SCADA

Esta unidade utiliza uma poderosa arquitectura multiprocessadora de 32 bit, que lhe garante elevado nível de desempenho.

Como unidade terminal avançada, a UAC disponibiliza um amplo conjunto de funções de supervisão, controlo, automação e medição, incluindo ainda algumas funções de detecção de defeitos e registos de eventos.

## **6.2. Arquitectura Base**

A arquitectura geral da UAC, representada na figura 6.2, inclui:

- 9 Entradas binárias
- 6 Saídas binárias
- 6 Entradas analógicas AC e 2 entradas DC, constituídas por 3 entradas de tensão, para a aquisição das tensões de fase, 3 entradas de corrente, para ligação das correntes de fase e 2 canais DC. Nesta opção a UAC calcula todas as medidas derivadas (potência, energia, factor de potência, frequência, etc.).
- 8 Entradas analógicas DC que permitem adquirir em tempo real o valor das grandezas contínuas, por exemplo, da tensão das baterias de serviços auxiliares ou outros sensores DC.
- 3 Portas série, constituídas por 2 portas traseiras, para integração em sistemas SCADA ou para acesso remoto, e por uma porta frontal para a configuração e diagnóstico local utilizando o pacote de software da UAC.
- 1 Porta para a recepção de um sinal de sincronização do tipo IRIG-B.

As opções de comunicação da UAC são:

- Ethernet redundante
- Lonworks 1.25 Mbps
- Protocolo série DNP 3.0
- Ligação a rádio ou GSM para comunicação através do protocolo PUR.



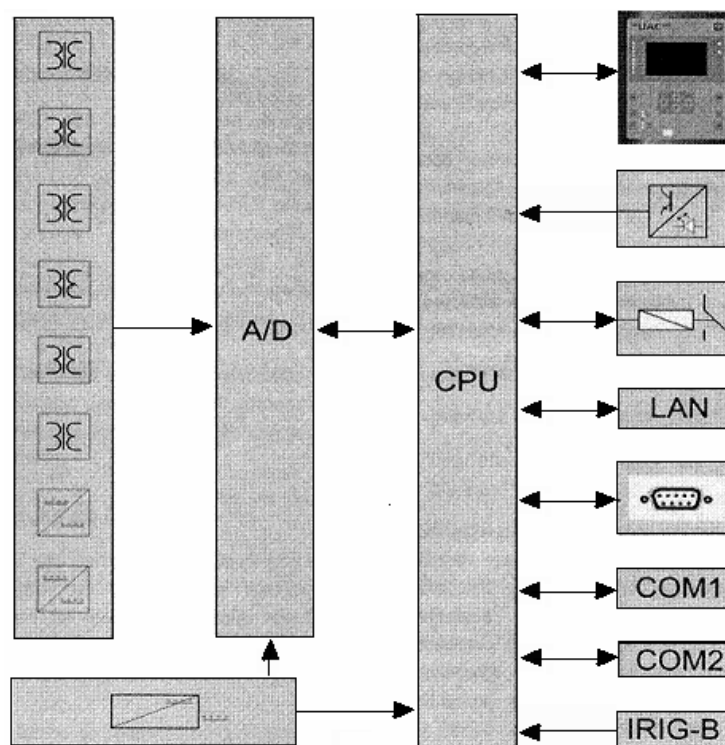


Figura 6.2 - Arquitectura geral da UAC.

A alimentação deste tipo de equipamento é proveniente de uma rede de alimentação dedicada, normalmente em corrente contínua.

### 6.3. Características Funcionais

A UAC é uma unidade terminal que oferece um conjunto de funcionalidades avançadas, que a torna numa solução atractiva para as mais diversas aplicações de supervisão e automação das redes eléctricas.

A supervisão do processo é realizada através da aquisição de dados digitais (simples, duplos, etc.). Dependendo da configuração das entradas analógicas, a UAC assegura a medida das seguintes grandezas:

- Valor das grandezas de tensão e corrente DC
- Valor eficaz das correntes nas três fases e no neutro (por soma virtual das três correntes de fase)
- Valor eficaz da corrente inversa
- Valor eficaz das tensões simples e compostas, assim como a tensão residual
- Frequência de cada entrada de tensão e respectivo valor médio da tensão
- Potência activa e reactiva, assim como o factor de potência
- Contagem da energia activa e reactiva fornecida e recebida.

Com base nas medidas efectuadas a UAC calcula e regista, com datação, as seguintes informações:

- Pontas máximas de corrente (médias dos máximos de corrente obtidas no intervalo de 1 segundo)
- Pontas máximas de potência activa (médias dos máximos de potência obtidas no intervalo de 15 minutos)
- Número de manobras do disjuntor, comutador e dos seccionadores.

A UAC possui dois mecanismos para a execução de comandos:

- Remotamente através das indicações de comando recebidas de uma estação principal
- Localmente através de HMI (*Human-Machine Interface*)

A HMI refere-se à interface com o utilizador. No caso da UAC, é composta por *display* gráfico, LED's, teclas, etc.

A execução de comandos poderá ser condicionada às condições de encravamento, calculadas pela UAC e programadas pelo utilizador.

A UAC poderá ser configurada para realizar as funções complementares associadas ao controlo do processo:

- Supervisão de execução de manobras
- Supervisão permanente do circuito de controlo através das entradas binárias configuradas para este efeito.

A UAC tem a capacidade de efectuar a detecção de defeitos por máximo de corrente de fase e homopolar em linhas MT. Permite também a detecção de defeitos mínimos de tensão.

A UAC efectua a monitorização das entradas e saídas binárias, bem como todas as variáveis lógicas internas definidas. Qualquer alteração de estado ou evento é registada com uma datação precisa em memória não volátil.

A UAC dispõe de duas portas série traseiras e uma porta série frontal. Quaisquer das portas série podem ser utilizadas para comunicação com o pacote de software da UAC. Para cada porta traseira estão disponíveis 4 tipos de interface, nomeadamente:

- Interface RS 232 isolada
- Interface RS 485 isolada
- Interface em fibra óptica de vidro ou de plástico

A UAC permite uma fácil integração em qualquer sistema de comunicação, seja rádio, PLC, TETRA, Linha dedicada ou Linha telefónica.

A UAC disponibiliza em tempo real um conjunto alargado de informação de sistema. Esta informação reflecte o estado interno da unidade, quer a nível de hardware quer a nível de software.

A UAC calcula e regista em permanência o diagrama de carga diário. Também regista e memoriza um número elevado de oscilografias.

A completa integração da UAC, no que respeita ao sistema de comando e controlo, torna possível a execução de funções de automatismo tirando partido da sua ligação à rede local

(LAN). Isto significa que, para além da comunicação vertical com a estação principal, estão disponíveis rápidos mecanismos de comunicação entre as diferentes unidades ligadas à LAN. Esta funcionalidade permite a implementação de automatismos, encravamentos ou outras funções baseadas na interacção entre unidades similares através da rede de comunicação.

#### **6.4. Ensaios realizados à unidade UAC**



Figura 6.3 - Instalações da ANACOM.

A ANACOM, figura 6.3, tem dois laboratórios de CEM:

- Laboratório da figura 6.4, inaugurado em 1992, está equipado para a realização de ensaios de emissões, quer conduzida, quer radiada, dispondo de um local de ensaios em espaço livre
- Laboratório da figura 6.5, inaugurado em 1996, está equipado para a realização de ensaios de imunidade, quer conduzida, quer radiada, dispondo para tal de uma Câmara Semi-Anecóica, figura 6.6, e uma Câmara Blindada, figura 6.7.

Os ensaios efectuados destinam-se a avaliar o cumprimento dos requisitos das normas genéricas da emissão e imunidade para ambientes industriais no âmbito da directiva de Compatibilidade Electromagnética 89/336/CEE.

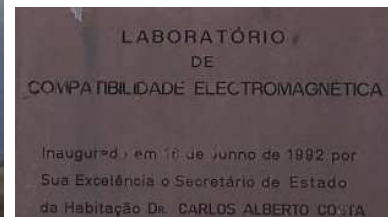


Figura 6.4 - Laboratório 1 de CEM.



Figura 6.5 - Laboratório 2 de CEM.

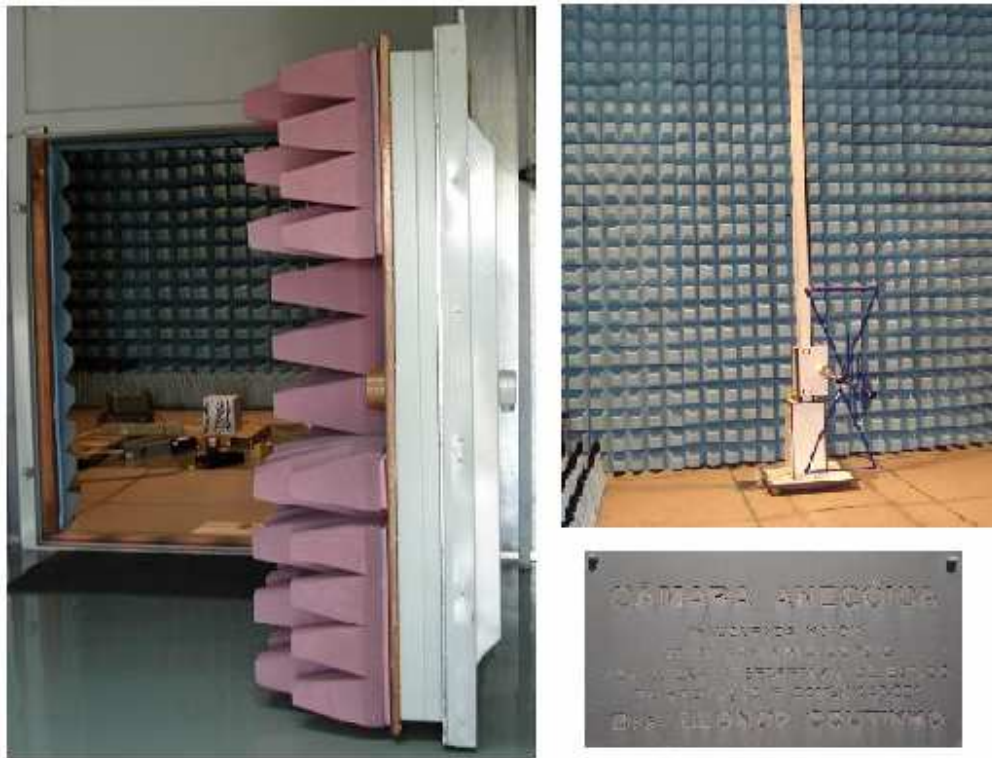


Figura 6.6 - Câmara Semi-Anecóica.



Figura 6.7 - Câmara Blindada.

### **6.4.1. Ensaio de Emissão Radiada**

Este ensaio tem como finalidade medir a quantidade de Radiação Electromagnética, na faixa de 30MHz a 1GHz, que é emanada do EET para o ar. Tal emissão não pode ser superior aos limites estabelecidos pela norma CISPR 11, já que a ultrapassagem do limite poderia causar interferência no funcionamento de outros equipamentos.

As condições ambientais na Câmara Semi-Anecóica, local onde foi realizado o ensaio, eram:

- Temperatura - 23°C
- Humidade - 60%

O EET foi colocado numa posição representativa do seu funcionamento normal, sobre uma mesa de madeira com 80cm de altura.

As condições do ensaio foram:

- Alimentação DC: 24V
- Equipamento auxiliar
- Distância Antena - EET: 3m
- Polarização: horizontal e vertical
- Tempo de medição: 10s
- Largura de Banda: 120kHz
- Amplificação: 10dB
- Atenuação: 0dB
- Nível de referência: -60dB

O arranjo do equipamento para este ensaio é apresentado na figura 6.8.

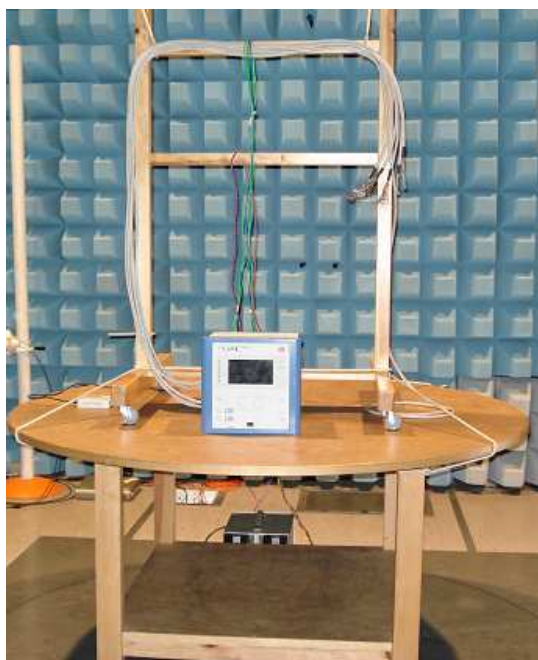


Figura 6.8 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Emissão Radiada.

Os resultados das medições estão representados na figura 6.9 e na tabela 6.1, que são uma digitalização da saída produzida pelo software do programa de medição.

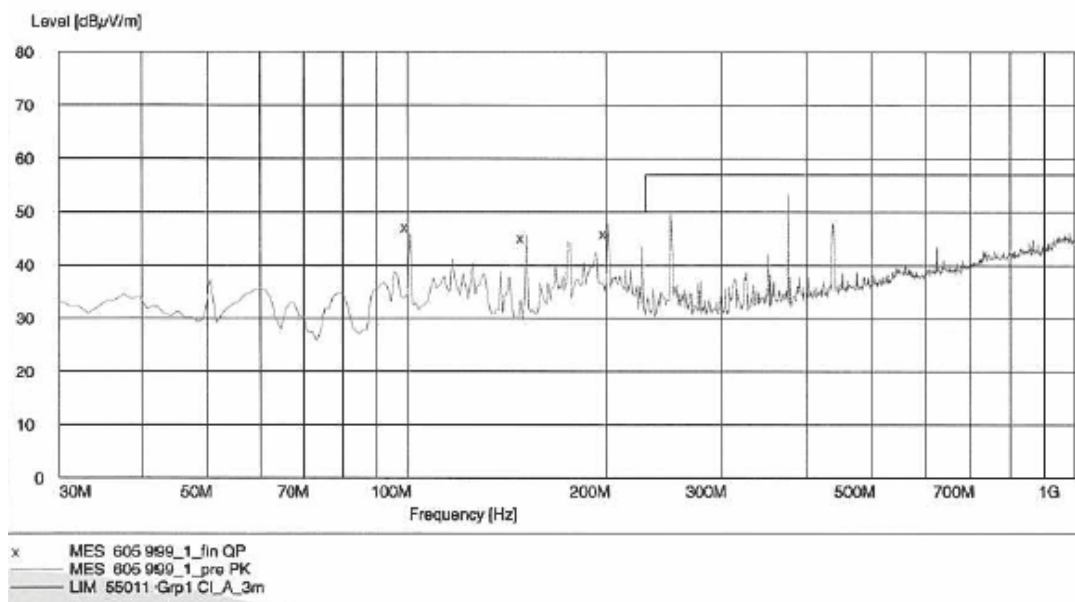


Figura 6.9 - Gráfico das perturbações electromagnéticas radiadas.



Frequency MHz	Level dB $\mu$ V/m	Transd dB	Limit dB $\mu$ V/m	Margin dB	Height cm	Azimuth deg	Polarisation
100.640000	47.30	11.5	50.0	2.7	175.0	20.00	HORIZONTAL
150.960000	45.20	12.5	50.0	4.8	175.0	272.00	HORIZONTAL
201.280000	46.00	10.2	50.0	4.0	100.0	271.00	VERTICAL

Tabela 6.1 - Medições de *Quasi-Peak*.

Com a distância Antena - EET de 3m, o valor estimado da incerteza para este ensaio realizado é de 4,9dB.

## 6.4.2. Ensaio de Emissão Conduzida

Este ensaio é semelhante ao ensaio de emissão radiada e tem como finalidade medir a quantidade de Radiação Electromagnética, na faixa de 0,15 MHz a 30MHz, que é conduzida do EET para a rede eléctrica através do seu cabo de alimentação. Tal propagação não pode ser superior aos limites estabelecidos pela norma CISPR 11, já que ultrapassar o limite poderia causar interferência no funcionamento de outros equipamentos.

O equipamento é ligado a uma LISN e desta o sinal é enviado para o analisador de espectro, onde também é gerado um gráfico e a intensidade de ruído é comparada com o limite da norma.

As condições ambientais no laboratório 1, local onde foi realizado o ensaio, eram:

- Temperatura - 21°C
- Humidade - 60%

O EET foi colocado numa posição representativa do funcionamento normal, sobre uma mesa de madeira com 80cm de altura.

As condições de ensaio foram:

- Condição 1: Alimentação DC: 19V

Equipamento Auxiliar

- Condição 2: Alimentação DC: 72V

Equipamento Auxiliar

O arranjo do equipamento para este ensaio é apresentado na figura 6.10.



Figura 6.10 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Emissão Conduzida.

Os resultados das medições estão representados nas figuras 6.11 e 6.12 e na tabela 6.2, que são uma digitalização da saída produzida pelo software do programa de medição.

Por observação dos gráficos, verifica-se que os valores medidos estão abaixo dos valores, do nível de emissão limite, ostentados na norma vigente.

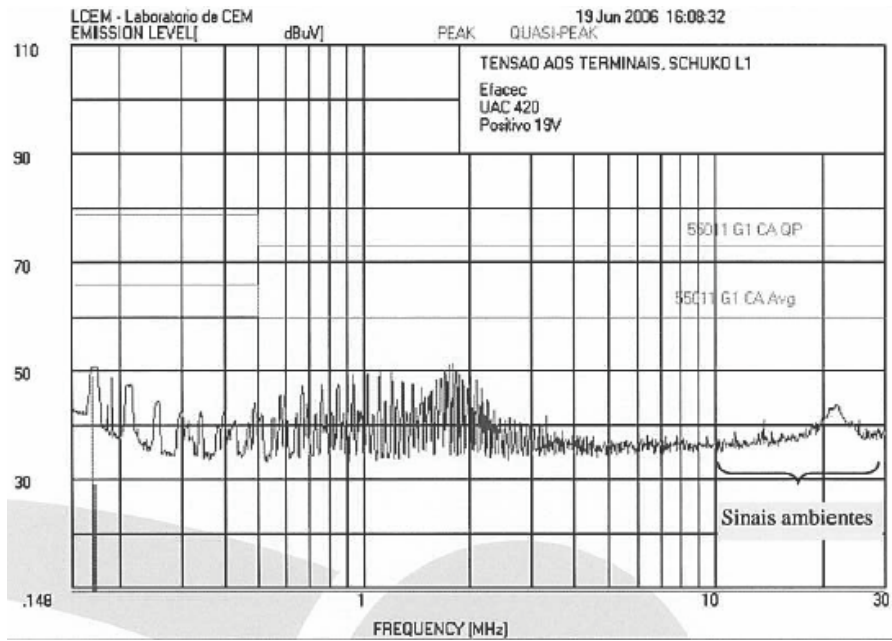


Figura 6.11 - Gráfico do ensaio no terminal positivo com tensão de alimentação de 19V.

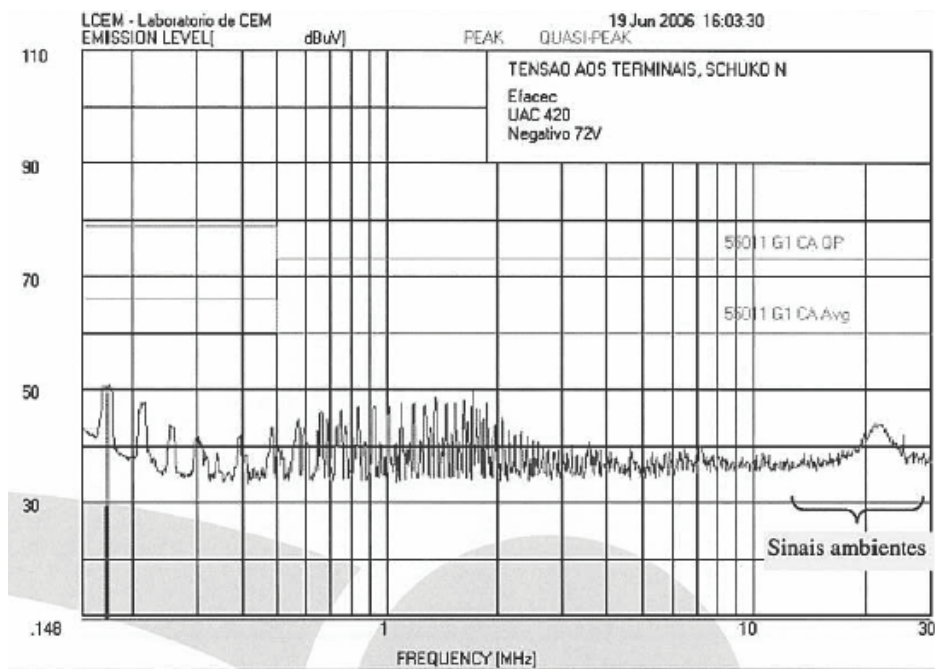


Figura 6.12 - Gráfico do ensaio no terminal negativo com tensão de alimentação de 72V.

Página	Terminal de alimentação	Frequência (MHz)	Valor medido (dB $\mu$ V)	Valor Limite – Valor medido (dB)
<b>Alimentação DC: 19 V</b>				
3	Positivo (L1)	0,1699	49	30,0
4	Negativo (N)	0,1681	52,1	26,9
<b>Alimentação DC: 72 V</b>				
5	Positivo (L1)	0,1690	49,4	29,6
6	Negativo (N)	0,1717	49,2	29,8

Tabela 6.2 - Medições de *Quasi-Peak*.

### 6.4.3. Ensaios de Imunidade

As condições necessárias para este tipo de ensaios são:

- Modo de Funcionamento do EET: Modo representativo do funcionamento normal, com estimulação das entradas analógicas DC e entradas digitais, comunicação Ethernet e RS 485, saídas digitais monitorizadas pelo PCA, e alarmes configurados e monitorizados pelo HMI e RCA.
- Crítério de Falha/ Desempenho: Durante o ensaio não pode haver alteração de modos de funcionamento. Não são permitidas operações incorrectas das funções de comando e controlo. É permitida degradação temporária da medida durante o ensaio, mas sem perda de dados.
- Monitorização: Observação visual do ecrã e LED's; consulta do menu de medidas e registo de eventos internos (RCA), bem como monitorização da comunicação Ethernet e RS 485, via SW WinProt.

- Configuração física do EET / Equipamento auxiliar: Alimentação a 24V DC, entradas analógicas configuradas para a medida de tensão, carta ETH activa a enviar pacotes UPD a uma cadência de 1/s (TP1), PC auxiliar a simular comunicação Ethernet com o EET, entrada da carta base I/O activa e monitorizada através da alarme visual no HMI. Comunicação com SW WinProt sobre bus RS 485.

### 6.4.3.1. Ensaio de Imunidade Conduzida

O teste de Imunidade Conduzida permite verificar se o equipamento, quando submetido a perturbações de RF conduzidas nos seus cabos de alimentação ou de comunicação, apresenta mau funcionamento sob algum aspecto.

De acordo com a Norma IEC61000-4-6, os níveis a serem aplicados são determinados a partir do ambiente onde a UAC será instalada. O ensaio foi realizado para os níveis apresentados na tabela 6.3, que são escolhidos de acordo com a classe do equipamento e a norma vigente.

150 kHz a 80 MHz		
Nível	Valor de Tensão (fem)	
	$U_0$ (db $\mu$ V)	$U_0$ (V)
3	140	10

Tabela 6.3 - Níveis ensaiados no ensaio de Imunidade Conduzida.

Os portos ensaiados foram a alimentação+terra, IO1+IO5+IO6, IO2+IO3+IO4, T1+T2, Ethernet, IRIG-B e RS 485. Os portos ligados pelo símbolo + são ensaiados conjuntamente. Esta é também a sequência de aplicação da tensão.

As condições ambientais na sala blindada, local onde foi realizado o ensaio, eram:

- Temperatura - 23°C
- Humidade - 60%

O arranjo do equipamento para este ensaio é apresentado na figura 6.13. O EET foi colocado na posição representativa do funcionamento normal, de acordo com a norma de ensaio.



Figura 6.13 - Arranjo do equipamento para ensaio de Imunidade Conduzida.

Verificou-se que não houve alterações das condições de funcionamento durante e após o ensaio. Não se verificaram condições de erro.

### **6.4.3.2. Ensaio de Imunidade a Ondas de Choque**

Este ensaio tem como objectivo verificar a imunidade do EET às perturbações e efeitos causados por descargas atmosféricas, as quais podem danificar equipamentos electrónicos.

O ensaio de Imunidade a Ondas de Choque foi realizado utilizando-se um gerador de Onda Combinada, capaz de reproduzir os efeitos de uma descarga atmosférica, e as demais estruturas descritas na norma IEC 61000-4-4.

A figura 6.14 mostra um gerador de ondas.

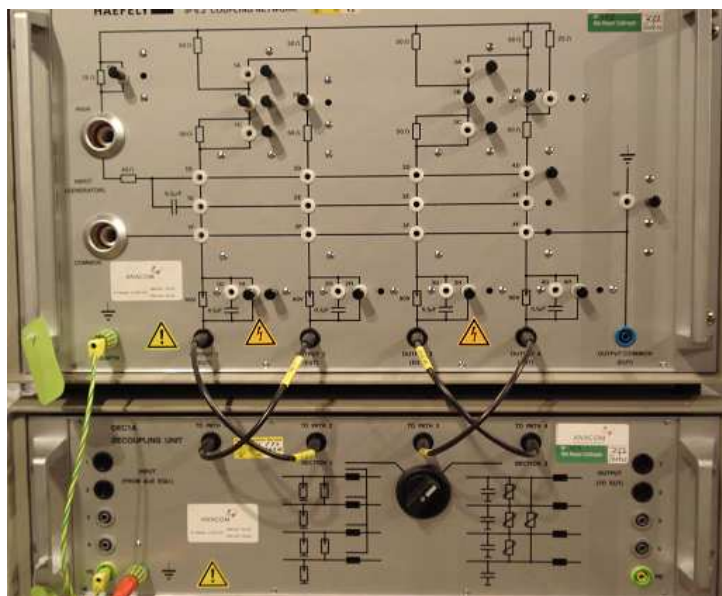


Figura 6.14 - Gerador de ondas.

O ensaio foi realizado para os níveis apresentados na tabela 6.4.

Nível	Alimentação		Circuitos desbalanceados Barramento a grande distância		Circuitos balanceados	
	Z = 2Ω	Z = 12Ω	Z = 42Ω	Z = 42Ω	Z = 42Ω	Z = 42Ω
	Linha - Linha kV	Linha - Terra kV	Linha - Linha kV	Linha - Terra kV	Linha - Linha kV	Linha - Terra kV
3	±1,0	±2,0	±1,0	±2,0	NA	±2,0
4	±2,0	±4,0	±2,0	±4,0	NA	±2,0

Tabela 6.4 - Níveis ensaiados no ensaio de Imunidade a Ondas de Choque.

Os portos que foram ensaiados estão apresentados na tabela 6.5, que são escolhidos de acordo com a classe do equipamento e a norma vigente.

Designação do Porto		Alimentação: A Simétrico: S Assimétrico: AS	De acordo com a classe de instalação
A	Alimentação	A	4
B	Entradas digitais (IO 1 ou IO 5 ou IO 6)	AS	4
C	Saídas digitais (IO 2 ou IO 3 ou IO 4)	AS	4
D	Entradas analógicas (T 1 ou T2)	AS	4
E	RS 485 (COM1)	AS	5

Tabela 6.5 - Portos ensaiados.

A sequência de aplicação da tensão de ensaio aos portos da UAC foi: Alimentação, IO2, T1, IO3, IO5, IO1 e RS 485. O ensaio também foi realizado na blindagem do cabo no porto RS 485.

De acordo com a norma, foram realizadas 5 aplicações em cada um dos portos ensaiados com intervalos de 1 minuto.

As condições ambientais na sala blindada, local onde foi realizado o ensaio, eram:

- Temperatura - 21°C
- Humidade - 50%

O arranjo do equipamento para este ensaio é apresentado na figura 6.15. O EET foi colocado na posição representativa do funcionamento normal, de acordo com a norma de ensaio.





Figura 6.15 - Arranjo do equipamento para ensaio de Imunidade a Ondas de Choque

Na tabela 6.6 estão requeentados os resultados do ensaio.

Porto Ensaiado	Acoplamento	Nível kV	Resultado do ensaio	
			Passa	Não passa
Alimentação DC	Linha - Linha	± 0,5	✓	
		± 1	✓	
		± 2 <sup>(1)</sup>	✓	
	Linha - Terra	± 0,5	✓	
		± 1	✓	
		± 2	✓	
Entrada Digital IO1	Linha 1 - Terra	± 0,5	✓	
		± 1	✓	
		± 2	✓	
		± 4 <sup>(1)</sup>	✓	
	Linha 2 - Terra	± 0,5	✓	
		± 1	✓	
		± 2	✓	
		± 4 <sup>(1)</sup>	✓	
	Linha 1 - Linha 2	± 0,5	✓	
		± 1	✓	
		± 2 <sup>(1)</sup>	✓	
	Entrada Analógica TI	Linha 1 - Terra	± 0,5	✓
± 1			✓	
± 2			✓	
± 4 <sup>(1)</sup>			✓	
Linha 2 - Terra		± 0,5	✓	
		± 1	✓	
		± 2	✓	
		± 4 <sup>(1)</sup>	✓	
Linha 1 - Linha 2		± 0,5	✓	
		± 1	✓	
		± 2 <sup>(1)</sup>	✓	

<sup>(1)</sup> - Níveis solicitados pela EFACEC, acima dos valores requeridos pela norma)

Tabela 6.6 - Resultados do ensaio.

Foi demonstrado que o EET cumpre os requisitos especificados pela norma, com grau de confiança de aproximadamente 95%. Este valor é fruto dos métodos e limites de medição dos equipamentos que o Laboratório (neste caso, a ANACOM) utilizou para os ensaios. Depende, portanto, dos equipamentos e métodos de ensaio utilizados. O valor é

determinado aquando da Acreditação do Laboratório perante as entidades competentes. Em Portugal, trata-se do Instituto Português da Qualidade (IPQ).

### **6.4.3.3. Ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos**

Este ensaio tem como objectivo verificar a imunidade do EET quando submetido a transitórios, como os originados por interrupções de cargas indutivas, accionamentos de relés, etc.

O ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos foi realizado utilizando-se um gerador de transitórios e as demais estruturas descritas na norma IEC 61000-4-4.

O ensaio foi efectuado para os níveis apresentados na tabela 6.7., que são escolhidos de acordo com a classe do equipamento e a norma vigente.

Portos de Alimentação e Terra de Protecção			Portos de controlo, dados e sinal (I/O)		
Nível	Tensão de Pico (kV)	Taxa de repetição (kHz)	Nível	Tensão de Pico (kV)	Taxa de repetição (kHz)
3	± 2	5	3	± 1	5
4	± 4	2,5	4	± 2	5
X1	± 4	5	X 2	± 4	5

Tabela 6.7 - Níveis ensaiados no ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos.

A figura 6.16 mostra pormenor do gerador de transitórios.



Figura 6.16 - Gerador de Transitórios.

Os portos ensaiados foram a alimentação+terra, IO1+IO5+IO6, IO2+IO3+IO4, T1+T2, Ethernet, IRIG-B e RS 485. Os portos ligados pelo símbolo + são ensaiados conjuntamente.

As condições ambientais na sala blindada, local onde foi realizado o ensaio, eram:

- Temperatura - 21°C
- Humidade - 50%

Durante a aplicação das salvas de transitórios rápidos nos vários portos não foi detectada qualquer alteração no funcionamento da UAC.

O arranjo do equipamento para este ensaio é apresentado na figura 6.17. O EET foi colocado na posição representativa do funcionamento normal, de acordo com a norma de ensaio.



Figura 6.17 - Arranjo do equipamento para ensaio de Imunidade a Transitórios Eléctricos Rápidos.

Foi demonstrado que o equipamento de ensaio cumpre os requisitos especificados na respectiva norma, com um grau de confiança de 95%.

#### **6.4.3.4. Ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas**

O objectivo do ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas é verificar os efeitos de descargas por contacto directo e indirecto no EET.

Para a execução destes ensaios foi utilizado um simulador de descargas electrostáticas capaz de efectuar descargas até 15kV, obedecendo aos critérios da norma IEC61000-4-2.

O EET foi colocado numa posição representativa do funcionamento normal, sobre uma mesa de acordo com a norma de ensaio

As características das descargas foram as seguintes:

- Descargas directas: por Ar e por Contacto
  - Nº de descargas: 10 em cada polaridade e em cada ponto de aplicação
  - Tempo entre descargas: 1segundo
  - Polaridade: Positiva e Negativa
- Descargas indirectas:
  - Nº de descargas no HCP: 10 em cada polaridade e em cada ponto de aplicação
  - Nº de descargas no VCP: 10 em cada polaridade e em cada ponto de aplicação
  - Tempo entre descargas: 1segundo
  - Polaridade: Positiva e Negativa

O ensaio foi realizado para os níveis apresentados na tabela 6.8, que são escolhidos de acordo com a classe do equipamento e a norma vigente.

Descarga por contacto directo/indirecto		Descarga pelo ar	
Nível	Tensão de Ensaio (kV)	Nível	Tensão de Ensaio (kV)
1	± 2	1	± 2
2	± 4	2	± 4
3	± 6	3	± 8
4	± 8	4	± 15

Tabela 6.8 - Níveis ensaiados no ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas.

Os pontos de aplicação da tensão de ensaio foram os seguintes:

- Partes metálicas do HMI
- Partes metálicas da Caixa - conector frontal, moldura frontal, faces laterais e superior, parafusos de fixação, tampa traseira, parafusos e carcaças dos conectores acessíveis
- Parte isolante do HMI - sobre o ecrã, LED's e teclas.

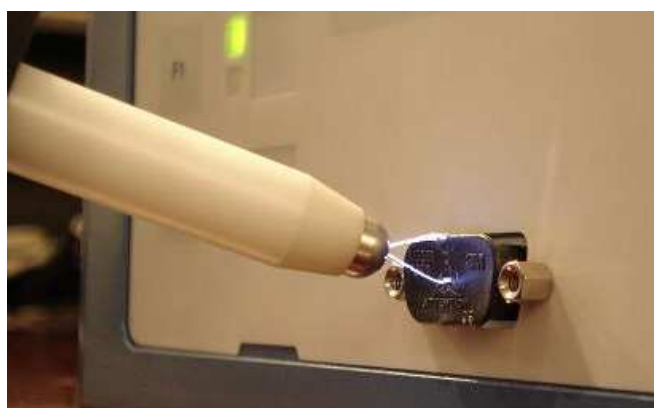


Figura 6.18 - Pormenor da aplicação de uma Descarga Electrostática pelo ar.

As condições ambientais na sala blindada, local onde foi realizado o ensaio, eram:

- Temperatura - 21°C
- Humidade - 50%

O arranjo do equipamento para este ensaio é apresentado na figura 6.19.



Figura 6.19 - Arranjo do equipamento para o ensaio de Imunidade a Descargas Electrostáticas.

As descargas foram aplicadas ao EET tanto na polaridade positiva como na negativa e em nenhum dos casos se detectou alteração no funcionamento da UAC, logo, o equipamento cumpre os requisitos especificados na respectiva norma, com um grau de confiança de aproximadamente 95%.

## **6.5. Interferências produzidas numa unidade TPU**

A unidade TPU (Unidade Terminal de supervisão, controlo e Protecção) consiste numa versão mais antiga da Unidade de Aquisição, Controlo e Protecção (UAC) descrita anteriormente. Este tipo de unidades cumpria os requisitos de imunidade impostos por normas mais antigas às utilizadas actualmente, que apontavam para classes de imunidade menos severas

Foram registados, pela EFACEC, vários casos em que o funcionamento da unidade TPU era afectado pela abertura e pelo fecho de seccionadores situados muito próximos da TPU.



Um desses casos ocorreu na subestação de Gondomar - Valbom, ao qual tive acesso durante os trabalhos de investigação.

Nesta subestação foram detectadas interferências na TPU, o que levou a EFACEC a solicitar um estudo de modo a conhecer a causa dessas interferências e a definir um plano de acção no sentido de eliminar as interferências produzidas na TPU quando os seccionadores eram colocados em funcionamento.



Figura 6.20 - Unidade TPU e sua localização.

Os painéis do tipo GIS (Gás Insulated Substation), local onde a TPU está localizada, figura 6.20, formam um ambiente bastante ruidoso o que levou há existência de um problema de incompatibilidade electromagnética.

Foi verificado que a maioria das manobras dos seccionadores afectava o funcionamento da respectiva unidade TPU. A situação mantinha-se, quer quando a linha de 60kV não tinha carga, quer quando esta linha não tinha tensão. As interferências não se manifestavam noutros equipamentos electrónicos instalados nem nas unidades TPU mais afastadas dos seccionadores de 60kV.

Inicialmente, colocaram-se diversos dispositivos de filtragem nos cabos da TPU, tais como ferrites, o que permitiu melhorar a situação, sem, no entanto, a resolver. Também, se alteraram as ligações de massa da TPU, mas obteve-se o mesmo resultado. Ainda se utilizaram cabos mais curtos nas ligações à TPU, mas conclui-se que agravava a situação.

É de salientar que implementações com a proximidade encontrada entre a TPU e o seccionador, embora apresentem inúmeras vantagens, apresentam ainda alguns riscos, uma vez que não estão ainda largamente experimentadas e difundidas.

Conforme relatado em diversos relatórios técnicos, na comutação de circuitos de Alta Tensão (AT) o arco eléctrico produzido emite elevadas perturbações electromagnéticas, numa banda numa banda de frequências muito alargada (desde alguns kHz até às centenas de MHz) que se propagam numa primeira fase por via aérea, sendo facilmente acopladas aos condutores eléctricos próximos, como acontece neste caso.

Devido tratar-se, essencialmente, dos chamados campos próximos, o acoplamento que se verifica apresenta uma baixa impedância, sendo problemático conseguir o seu cancelamento.

As medidas que podem ser tomadas, no sentido de diminuir as perturbações verificadas e no sentido de eliminar as interferências, passam por diminuir o acoplamento verificado e/ou escoar as perturbações que conseguem acoplar-se aos diversos cabos, evitando a sua introdução na TPU.

Perante as informações recolhidas preconizam-se as seguintes acções por ordem decrescente de prioridade:

- Diminuição de acoplamento de interferências
  - 1ª Acção - consolidar blindagens em torno das câmaras de seccionamento: com o auxílio de um miliohmímetro de alta corrente (aproximadamente, 12A~) medir a resistência entre todos os painéis de blindagem de todas as câmaras e a régua de terra; corrigir todas as situações que apresentem uma resistência superior a 0,05 Ohm.
  - 2ª Acção - consolidar ligação à terra das blindagens em torno das câmaras de seccionamento: com o auxílio de um telurímetro (ohmímetro AC de 3 fios) medir (no solo) a resistência de terra da régua de terra; corrigir se apresentar uma resistência superior a 5 Ohm.

- 3ª Acção - avaliação quantitativa das perturbações emitidas durante operações de seccionamento: com o auxílio de um Receptor EMI (receptor de acordo com norma CISPR 16) e antenas de banda larga medir o campo radiado durante as comutações e comparar com valores de referência, concluindo acerca da eficácia da blindagem das câmaras; actuar em conformidade.
- Escoamento das perturbações que conseguem acoplar-se
  - 4ª Acção - otimizar trajecto de todos os cabos ligados à TPU.
  - 5ª Acção - introduzir filtros LC em todos os cabos da unidade TPU.

Com o intuito de implementar o plano de acção acima descrito, foram, inicialmente, efectuadas medições de continuidade de terra com o auxílio de um miliohmímetro de alta corrente ( $15A_{ac}$ ), medindo-se a resistência entre todos os painéis de blindagem de todas as câmaras e a régua de terra.

As situações que apresentaram uma resistência superior a  $0,05\Omega$  foram:

- Cabeças de ligação dos cabos de entrada e saída de 60kV (são em nylon e têm uma parte pintada com uma tinta de baixa resistividade)



Figura 6.21 - Cabeças de ligação dos cabos de entrada e saída de 60kV.

- Tampas metálicas de acesso aos transformadores de medida de tensão



Figura 6.22 - Tampas metálicas de acesso aos transformadores de medida de tensão.

- Chassis de baixa tensão atrás dos painéis frontais



Figura 6.23 - Chassis de baixa tensão.

Foram, também, efectuadas medições (no solo) da resistência de terra da régua de terra com o auxílio de um telurímetro (ohmímetro AC de 3 fios).

Foram efectuados 3 conjuntos de medições em pontos do solo distintos.



Figura 6.24 - Pontos de medição no solo.

Os valores obtidos ( $1,53\Omega$ ;  $0,88\Omega$ ;  $0,45\Omega$ ) permitiram concluir que a resistência de terra da régua de terra não apresenta problemas de maior que possam causar as perturbações manifestadas.

Considerando os resultados obtidos, conclui-se que era necessário consolidar as ligações de massa dos chassis isolados e da tampa dos transformadores de medida e construir uma blindagem metálica que envolvesse as partes em tinta e nylon das cabeças de ligação dos cabos de entrada e saída de 60kV.

## **6.6. Conclusões**

Conforme consta no relatório de ensaios emitido pela ANACOM, no qual é baseado o descrito sobre os ensaios em que participei, bem como as conclusões presentes nos relatórios de ensaios emitidos por outros laboratórios, nos quais a UAC também foi ensaiada, pode concluir-se que o equipamento em causa cumpre os requisitos aplicáveis segundo as normas Harmonizadas em vigor, no âmbito da Directiva de Compatibilidade Electromagnética.

Relativamente à unidade TPU, pode concluir-se que, para aumentar o seu grau de imunidade às interferências causadas pela manobra dos seccionadores, foi necessário afastá-la do seccionador ou construir uma blindagem metálica adicional que a envolvesse.

# Capítulo 7

## Conclusões

O uso da electrónica num largo número de aplicações introduziu um novo, e importante, conceito em matéria de qualidade, a Compatibilidade Electromagnética. Para garantir os requisitos mínimos de qualidade em termos de Compatibilidade Electromagnética, é necessário assegurar o correcto funcionamento do equipamento instalados em ambientes susceptíveis a perturbações electromagnéticas, assim como a operação desse mesmo equipamento sem a emissão de perturbações electromagnéticas intoleráveis para o ambiente externo.

Para cumprir estes propósitos, devem ser introduzidas certas regras na fase de projecto, produção e instalação do equipamento. Apenas a realização de medições e ensaios, em conformidade com as respectivas normas, pode produzir resultados válidos que traduzam o desempenho satisfatório do equipamento no seu ambiente electromagnético.

O presente trabalho teve por objectivo apresentar um estudo, ao nível da Compatibilidade Electromagnética, de equipamentos de Média Tensão.

Neste sentido, foram apresentados os conceitos e aplicações da Compatibilidade Electromagnética, imprescindíveis para a compreensão do tema, as principais normas utilizadas, bem como os ensaios realizados aos equipamentos.

Com esta finalidade, foi realizado um levantamento bibliográfico exaustivo, já que a Compatibilidade Electromagnética em equipamentos electrónicos é um assunto recente e ainda em estudo. Deste modo, grande parte deste trabalho é dedicado à divulgação teórica e à aprendizagem da Compatibilidade Electromagnética.

Foram apresentados dois casos de estudo, onde é aplicada a informação teórica descrita na dissertação, de forma a comprovar a aplicação prática da Compatibilidade Electromagnética.

Como perspectiva de trabalhos de desenvolvimento futuros sugere-se que fossem estudados:

- O comportamento electromagnético em ambientes onde existe o risco comprovado de Interferências Electromagnéticas
- A implementação de novas técnicas para redução das Interferências Electromagnéticas
- A Compatibilidade Electromagnética noutros tipos de equipamentos electrónicos
- A implementação de novas técnicas com o objectivo de otimizar os procedimentos dos ensaios de Compatibilidade Electromagnética
- O interesse de tornar mais severas determinadas normas.



## **Referências**

### **- Artigos**

- [A.1] - Jacon, Fábio, "Ensaio de Compatibilidade Electromagnética", NMI Brasil.
- [A.2] - Martins, Júlio S.; Couto, Carlos; Afonso, João Luiz, "Qualidade de Energia Eléctrica", 3º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – CLME'2003, Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento Maputo, Moçambique, 19-21 Agosto 2003, pp. 219-231
- [A.3] - Barbosa, Edino; Filho, Giudice, "Ambiente Electromagnético Próximo a Linhas Aéreas de 500 kV - Projectos e Impactos", Belo Horizonte, 27 de Junho de 2001
- [A.4] - Elles, Weberton Luiz Gonçalves; Schoeder, Marco Aurélio O., "Estudo da viabilidade Técnica para mitigação de Campo Magnético nas proximidades de Linhas de Transmissão" CEFET - MG, 2003.
- [A.5] - IEEE Task Force, "Effects of Harmonics on Equipments", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, Abril de 1993.
- [A.6] - Henderson, R. D.; Rose P. J., "Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 30, pp. 528-532, 1994.
- [A.7] - Fuchs; Roesler; Alashab, "Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System's Voltage. Part I: Transformers and Induction Machines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2, pp. 435-444, Abril de 1987.
- [A.8] - Girgis; Nims; Jacamino; Dalton; Bishop, "Effect of Voltage Harmonics on the Operation of Solid State Relays in Industrial Applications", Proc. IAS, pp. 1821-1828, 1990.

- [A 9] - Cavallini, A.; Ghinello, I.; Mazzanti, G.; Montanari, G. C., "Considerations on the Life Performance and Installation Practice of Shunt Capacitors in the Presence of Harmonics Generated by Ac/Dc Converters", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, no. 1, Jan. 1999.
- [A 10] - Cavalcante, F.; Stephan, R.; Mello, A.; Américo. M., "Harmonic Effects on Electrical Measurement Instruments", Proc. IEEE, pp. 531-536, 1996.
- [A 11] - IEEE Working Group, "Power Lines Harmonics Effects on Communication Line Interference", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 9, pp. 2578-2587, Set. 1985.
- [A 12] - Afonso, J. L.; Silva, H. R.; Martins, J. S., "Active Filters for Power Quality Improvement", IEEE Porto Power Tech'2001, Porto, Portugal, 10-13 Set. 2001.
- [A 13] - Afonso, J. L.; Martins, J. S.; Couto, C., "Active Filters with Control Based on the p-q Theory", IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, vol. 47, nº 3, Setembro de 2000.
- [A 14] Afonso, J. L.; Aredes, M.; Watanabe, E.; Martins, J. S., "Shunt Active Filter for Power Quality Improvement", International Conference UIE 2000, Lisboa, Portugal, 1 a 4 de Novembro de 2000.
- [A 15] Alves, M. F.; Ribeiro, E. E., "Designing electronic systems for high voltage substation environment", ISEMC'94 - International Seminar on Electromagnetic Compatibility, São Paulo Dezembro de 1994.
- [A 16] - Lewis, W. H., "The use and abuse of insulated / isolated grounding", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 6, NOV/DEC 1989.

## **- Normas e Publicações Oficiais**

[N 1] - CEI/IEC 61000-2-1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems, 1st. Ed. 1990-05.

[N 2] - CEI/IEC 61000-2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems, 2st. Ed. 2002-03.

[N 3] - CEI/IEC 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances, 2st. Ed. 2002-06.

[N 4] - CENELEC NE/EN 50160: Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution, Nov. 1994.

[N 5] - IEEE STANDARD 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.

[N 6] - IEEE C62.41-1991, IEEE Recommended practice on surge voltage in low - voltage AC power circuits, 1991

[N 7] - ANSI/IEEE C62.45-1987, IEEE Guide on surge testing for equipment connected to low - voltage AC power circuits, 1987.

[N 8] - ANSI/IEEE C62.42-1987, IEEE Guide for the application of gas tube arrester low - voltage surge - protective devices, 1987.

[N 9] - CISPR 11 - "Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-Frequency Equipment - - Electromagnetic Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement".

[N 10] - CISPR 22 - "Information Technology Equipment -- Radio Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement".

[N 11] - CEI/IEC 61000-4-6 - "Immunity to Conducted Disturbances Induced by Radio-Frequency Fields.", 1.2st. Ed. 2001-04.

[N 12] - CEI/IEC 61000-4-4 - "Electrical Fast Transient/Burst.", 2st. Ed. 2004-07.

[N 13] - CEI/IEC 61000-4-2 - "Electrostatic Discharge Immunity Test", 1.2st. Ed. 2001-04.

[N 14] - CEI/IEC 61000-4-5 - "Surge Immunity Test", 2st. Ed. 2005-11.

[N 15] - CEI/IEC 61000-4-11 - "Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations; Immunity tests", 2st. Ed. 2004-03.

## **- Internet**

[I.1] - <http://br.geocities.com>

[I.2] - <http://educar.sc.usp.br>

[I.3] - <http://en.wikipedia.org>

[I.4] - <http://www.iec.ch/>

[I.5] – <http://www.pmm.it>.

[I.6] – <http://www.etslindgren.com/>

[I 7] - <http://www.achrnews.com>

[I 8] - <http://www.projetoderedes.com>

[I 9] - <http://www.okime.com>

[I 10] - <http://www.schaffner.com>

[I 11] - <http://www.nmibrasil.com.br>

[I 12] - <http://www.iee.org>

## **- Dissertações**

[D.1] - de Liz, M. B., "Introdução à Compatibilidade Electromagnética em Conversores Electrostáticos", Instituto de Electrónica de Potência, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

[D.2] - Schlichting, Luís Carlos Martinhago, "Contribuição ao estudo da Compatibilidade Electromagnética em Conversores Estáticos". Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

## **- Livros**

[L.1] -Paul, Clayton R., "*Introduction to Electromagnetic Compatibility*", Second Edition. Wiley- Interscience, 2006.