

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Aplicação da tecnologia de deteção ultrassónica
para a caracterização de defeitos eléctricos em
componentes das Redes de Energia**

Pedro Nuno Ferreira de Oliveira

VERSÃO PROVISÓRIA

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

Orientador: Prof. Dr. António Carlos Sepúlveda Machado e Moura
Coorientador: Eng. António Ferreira Dias

Janeiro de 2016

Resumo

A sociedade atual é cada vez mais dependente da energia elétrica. Na maioria dos casos, para que a energia elétrica chegue aos locais onde é consumida é necessário que esta seja transportada vários quilômetros desde os centros eletroprodutores. Este transporte a longas distâncias é conseguido em grande parte recorrendo a linhas aéreas que operam a tensões elevadas. Assim, o correto funcionamento destas linhas revela-se fundamental para que o Sistema Elétrico de Energia do qual elas fazem parte funcione também ele corretamente.

Sabendo que a tecnologia de ultrassons possui já um vasto campo de aplicação, sabe-se também que existe a possibilidade de esta ser aplicada na inspeção de Sistemas Elétricos de Energia e seus componentes, nomeadamente através da captação e análise de ultrassons propagados pelo ar gerados pelos componentes em causa.

Apesar da possibilidade anteriormente referida, existe ainda uma enorme falta de informação relativamente a este assunto, e visando colmatar essa lacuna, nesta dissertação foram realizadas tentativas experimentais procurando relacionar o estado dos componentes da rede, neste caso isoladores cerâmicos aplicados em linhas aéreas, com os ultrassons por estes emitidos quando se encontram sob tensão. Procedeu-se à análise dos níveis de intensidade sonora, das ondas sonoras no domínio temporal e dos respetivos espectros de frequência emitidos por isoladores em bom estado de funcionamento e por isoladores danificados, retirando dessa mesma análise as respetivas conclusões.

Abstract

The modern society is more and more dependent on electricity. In most cases, so that electricity reaches the places where it is consumed, it is necessary its transportation several kilometres from electricity generation centres. This transportation over long distances is possible largely through overhead powerlines that operate under high voltage. So, the proper functioning of these lines is fundamental so the Electric Energy System from which they are part of works properly.

Knowing that ultrasound technology already has a wide application field, we also know that there is a possibility that this can be applied on Electric Energy Systems inspection and its components by collection and analysis of the airborne ultrasounds generated from the referred components.

Although the possibility previously mentioned, there is still a huge lack of information on this subject. Aiming to help to fill this gap, in this dissertation there have been done experimental attempts to relate the state of network components, in this case ceramic insulators used in overhead powerlines, with the ultrasounds emitted by them while they are under a certain voltage. Subsequently, the analysis of the levels of sound intensity, temporal soundwaves and frequency spectrums of the ultrasounds emitted by good condition insulators and by damaged insulators allowed to take the conclusions presented in this dissertation.

Agradecimentos

Ao meu orientador, o Prof. Dr. António Carlos Sepúlveda Machado e Moura, pela disponibilidade e amizade com que pautou a orientação desta dissertação desde o primeiro momento.

Ao meu coorientador, o Eng^o António Ferreira Dias, por me ter proporcionado a oportunidade de trabalhar neste tema e pelo interesse que demonstrou ao longo do trabalho. Tenho ainda a agradecer-lhe, e a todos os colaboradores do ISQ sem exceção, a forma como fui recebido na empresa.

Ao técnico do Laboratório de Alta Tensão da FEUP, Tomás Sapage, pela sua disponibilidade incansável e sem a qual certamente não me teria sido possível apresentar esta dissertação.

Ao Eng^o Tomás Abreu da EDP e à Eng^a Eduarda Lourenço da Cerisol pelo fornecimento dos isoladores utilizados nos ensaios.

Aos que durante estes anos foram meus colegas de faculdade, em especial aos que certamente permanecerão amigos para a vida: Manuel Castro, Pedro Duarte, Nuno Daniel, José Pedro Alves e António Sousa.

Por fim, aos que qualquer tentativa de traduzir por palavras tudo o que lhes tenho a agradecer seria sempre diminuir tudo o que fizeram e tudo o que significam para mim: o meu pai Nuno Oliveira, a minha mãe Teresa Ferreira, a minha namorada Carla Caetano, a Simone, a Lia, o Joel Costa... e claro, o meu avô Joaquim Oliveira.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xix
Abreviaturas e Símbolos	xxi
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivação e objetivos.....	1
1.2 - Estrutura	2
Capítulo 2	3
Redes de Energia Elétrica	3
2.1- Origem e evolução.....	3
2.2- Rede Nacional de Energia Elétrica.....	4
2.2.1- Rede Nacional de Transporte.....	5
2.2.2- Rede Nacional de Distribuição	5
2.3- Componentes das linhas aéreas	6
2.3.1- Apoios	6
2.3.2- Armações.....	7
2.3.3- Condutores.....	8
2.3.4- Isoladores	9
Capítulo 3	17
Defeitos Elétricos	17
3.1- Manutenção e monitorização das linhas aéreas	17
3.1.1- Indicadores de qualidade de serviço	17
3.1.2- Inspeção de falhas.....	18
3.2- Defeitos elétricos nos componentes das linhas.....	20
3.2.1- Átomos, eletrões e níveis de energia	20
3.2.2- Ionização	21
3.2.3- Rutura elétrica de gases	23

3.2.4-	Arco elétrico	28
3.2.5-	Descargas elétricas parciais	31
Capítulo 4		37
Acústica e Ultrassons		37
4.1- Ondas sonoras		37
4.1.1- Características de uma onda		37
4.1.2- Propagação das ondas sonoras		39
4.1.3- Domínio dos tempos e domínio das frequências		41
4.1.4- Espectro sonoro		42
4.1.5- Fenómenos ondulatórios		43
4.2- Ultrassons e fenômenos elétricos		44
4.2.1- Arco elétrico		45
4.2.2- Efeito de coroa		46
4.2.3- Descargas parciais superficiais		47
Capítulo 5		49
Tecnologia de Ultrassons		49
5.1- Áreas de aplicação		49
5.1.1- Ultrassons na monitorização e manutenção preventiva		49
5.2- Funcionamento do detetor de ultrassons		50
5.2.1- Piezoelectricidade		51
5.2.2- Heterodinagem		51
5.3- <i>Ultraprobe 10000 Touch</i>		53
5.3.1- Módulos e acessórios		54
5.3.2- Funcionalidades		55
5.4- Inspeções com o <i>Ultraprobe 10000 Touch</i>		55
5.4.1- Inspeção visual		56
5.4.2- Inspeção em BT		56
5.4.3- Inspeção em MT e AT		56
5.4.4- Método “Grosso a Fino”		56
Capítulo 6		59
Laboratório de Alta Tensão		59
6.1- Constituição do LAT		59
6.1.1- Equipamento de ensaio à onda de impulso		59
6.1.2- Equipamento de ensaio à frequência industrial		61
6.1.3- Medidas de segurança		63
6.2- Montagens para ensaios à frequência industrial		66
6.2.1- Isoladores de suporte		66
6.2.2- Cadeias de isoladores		66
Capítulo 7		67
Ensaio Laboratoriais		67
7.1- Caracterização dos isoladores ensaiados		67
7.1.1- Isoladores de suporte		67
7.1.2- Cadeias de isoladores		69
7.2- Procedimento		71
7.2.1- Montagens		71
7.2.2- Metodologia de teste		73
7.3- Análise de resultados		73
7.3.1- Isoladores de suporte		74
7.3.2- Cadeias de isoladores		80
7.4- Conclusões		85
Capítulo 8		89
Conclusões e Trabalhos Futuros		89

8.1- Conclusões	89
8.2- Trabalhos futuros	90
Referências	91
Anexo I.....	97
Condutores e Isoladores Aplicados nas Linhas Aéreas da EDP Distribuição	97
Anexo II	101
Características técnicas da camara termográfica <i>Flir A325</i>	101
Anexo III	105
Resultados dos ensaios laboratoriais	105

Lista de figuras

Figura 2.1 - Evolução, ao longo dos anos, do nível de tensão máximo em linhas de transmissão de energia elétrica [2]	4
Figura 2.2 - Cadeia de valor do SEN	4
Figura 2.3 - Diferentes tipos de apoios [7]	7
Figura 2.4 - Diferentes disposições de condutores [9]	8
Figura 2.5 - Cabo de alumínio-aço [21]	9
Figura 2.6 - Classificação dos isoladores de acordo com o material do dielétrico	10
Figura 2.7 - Conexão campânula e espigão numa cadeia de isoladores [22]	13
Figura 2.8 - Cadeia de isoladores em suspensão, à esquerda, e em amarração, à direita [9]	13
Figura 2.9 - Isolador rígido em porcelana	13
Figura 2.10 - Linha de fuga, à esquerda, e distância de arco, à direita, numa cadeia de isoladores [33]	15
Figura 2.11 - Exemplos de um isolador de classe A, à esquerda, e classe B, à direita [23] ...	15
Figura 3.1 - Termografia na inspeção a linhas aéreas [42]	20
Figura 3.2 - Modelo ilustrativo de um átomo [43]	21
Figura 3.3 - Ilustração da ionização de um átomo por impacto de eletrões [45]	22
Figura 3.4 - Evolução da corrente I em função da tensão aplicada [2]	24
Figura 3.5 - Evolução da tensão de rutura v_s em função da pressão para vários gases [2]	26
Figura 3.6 - Aparecimento de avalanches auxiliares, à esquerda; canal altamente ionizado entre os dois eléctrodos, à direita [2]	27
Figura 3.7 - Mecanismo de canal proposto por <i>Raether</i> [2]	27
Figura 3.8 - Eletrões e iões positivos no arco e a sua distribuição longitudinal de tensão [2]	28

Figura 3.9 - Distribuição radial da temperatura ao longo da secção transversal do arco para vários gases [2].....	29
Figura 3.10 - Características tensão-corrente DC de arcos de diferentes comprimentos ocorridos no ar entre elétrodos de cobre [2]	30
Figura 3.11 - Evolução temporal da corrente, tensão e temperatura para um arco de 50Hz e 10A entre dois elétrodos de cobre distanciados de 3mm [2]	30
Figura 3.12 - Exemplos de descargas parciais, da esquerda para a direita: externas, superficiais e internas [51]	31
Figura 3.13 - Formação de canais ionizantes sob impulso de tensão, com aumento progressivo da duração do impulso [46].....	33
Figura 3.14 - Exemplo de descarga parcial na superfície de um dielétrico, desde um elétrodo curvo [54]	34
Figura 3.15 - Ilustração dos pontos da onda sinusoidal de tensão onde podem ocorrer as descargas parciais superficiais, a cinzento	34
Figura 3.16 - Modelo simplificado para a análise de descargas parciais, que neste caso ocorrem de um elétrodo para uma superfície isolante [55]	35
Figura 4.1 - Caracterização gráfica do período e amplitude de uma onda sinusoidal	38
Figura 4.2 - Propagação de uma onda longitudinal [62]	40
Figura 4.3 - Propagação de uma onda transversal [63]	40
Figura 4.4 - Propagação das ondas superficiais <i>Love</i> e <i>Rayleigh</i> [62]	41
Figura 4.5 - Representação no domínio temporal e dos espectros de amplitude e de fase de uma onda sinusoidal pura [65]	42
Figura 4.6 - Representação no domínio temporal e no domínio das frequências de uma onda sonora não sinusoidal [65]	42
Figura 4.7 - Espectro sonoro [67].....	42
Figura 4.8 - Fenómeno de reflexão de uma onda sonora [69]	43
Figura 4.9 - Fenómeno de difração com um obstáculo de dimensão semelhante ao comprimento de onda, à esquerda, e com um obstáculo de dimensão diferente do comprimento de onda, à direita [68].....	43
Figura 4.10 - Fenómeno de refração de uma onda sonora [70].....	44
Figura 4.11 - Exemplo dos ultrassons gerados pelo arco elétrico. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)....	45
Figura 4.12 - Exemplo dos ultrassons gerados pelo arco elétrico. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)	45
Figura 4.13 - Exemplo dos ultrassons gerados pelo efeito de coroa. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude).....	46

Figura 4.14 - Exemplo dos ultrassons gerados pelo efeito de coroa. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)	46
Figura 4.15 - Exemplo dos ultrassons gerados por descargas parciais superficiais. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	47
Figura 4.16 - Exemplo dos ultrassons gerados por descargas parciais superficiais. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).....	47
Figura 5.1 - Aplicação de tecnologia de ultrassons na imagiologia médica: ecografia [75] ...	49
Figura 5.2 - Inspeção a linhas aéreas pela detecção de ultrassons propagados pelo ar [77] ...	50
Figura 5.3 - Diagrama de blocos relativo ao funcionamento do detetor de ultrassons	50
Figura 5.4 - Multiplicador analógico [81]	52
Figura 5.5 - Multiplicação de duas sinusoides de frequências f_1 e f_2 [81].....	52
Figura 5.6 - Multiplicação de um sinal por uma senoide pura [81].....	53
Figura 5.7 - <i>Ultraprobe 10000 Touch</i> [82]	53
Figura 5.8 - Mostrador do <i>Ultraprobe 10000 Touch</i> [83]	55
Figura 6.1 - Torre do gerador de choque	60
Figura 6.2 - Divisor de tensão utilizado em ensaios à onda de impulso	60
Figura 6.3 - Unidade de alimentação do gerador de choque	60
Figura 6.4 - Unidade de controlo e DIAS	61
Figura 6.5 - Transformador <i>Phenix</i> de 300kVA.....	61
Figura 6.6 - Divisor de tensão utilizado em ensaios à frequência industrial	62
Figura 6.7 - Regulador [84].....	62
Figura 6.8 - Controlador	63
Figura 6.9 - Montagem das esferas de calibração [84]	63
Figura 6.10 - Baixada para ligação dos barramentos principal e secundário.....	64
Figura 6.11 - Fixação do barramento principal à parede do LAT	64
Figura 6.12 - Exemplo de pontos para ligação de terras dos equipamentos e estruturas utilizados nos ensaios.....	64
Figura 6.13 - Quadro de comando	65
Figura 7.1 - Isolador <i>SuporteOK</i>	67
Figura 7.2 - Desenho técnico do isolador <i>SuporteOK</i> [86]	68
Figura 7.3 - Isolador <i>SuporteDanificado</i>	69

Figura 7.4 - Isolador <i>SuportePerfurado</i>	69
Figura 7.5 - Desenho técnico dos isoladores constituintes das cadeias de isoladores ensaiadas [85]	70
Figura 7.6 - Cadeia de isoladores <i>CadeiaOK</i>	70
Figura 7.7 - Cadeia de isoladores <i>CadeiaPerfurada</i>	71
Figura 7.8 - Montagem para os ensaios com os isoladores de suporte.....	71
Figura 7.9 - Montagem para os ensaios com as cadeias de isoladores.....	72
Figura 7.10 - Localização do detetor de ultrassons relativamente à zona de testes [22]	72
Figura 7.11 - Camara termográfica <i>Flir A325</i> [87]	73
Figura 7.12 - Evolução do NIS com a tensão aplicada durante o ensaio aos isoladores de suporte	74
Figura 7.13 Amostra dos ultrassons captados para o isolador <i>SuporteOK</i> com uma tensão aplicada de 28kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	75
Figura 7.14 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador <i>SuporteDanificado</i> com uma tensão aplicada de 28kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	75
Figura 7.15 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador <i>SuportePerfurado</i> com uma tensão aplicada de 24kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	76
Figura 7.16 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador <i>SuporteOK</i> com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude).....	76
Figura 7.17 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador <i>SuporteDanificado</i> com uma tensão aplicada de 40Kv. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	77
Figura 7.18 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador <i>SuportePerfurado</i> com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	77
Figura 7.19 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador <i>SuporteOK</i> com uma tensão aplicada de 60kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	78
Figura 7.20 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador <i>SuporteDanificado</i> com uma tensão aplicada de 60Kv. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	78
Figura 7.21 - Espectro de frequências da onda sonora obtida para o isolador <i>SuporteOK</i> com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).	79
Figura 7.22 - Espectro de frequências da onda sonora obtida para o isolador <i>SuporteDanificado</i> com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)	79

Figura 7.23 - Espectro de frequências da sonora obtida para o isolador <i>SuportePerfurado</i> com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)	79
Figura 7.24 - Imagens termográficas para <i>SuporteOK</i> (a), <i>SuporteDanificado</i> (b) e <i>SuportePerfurado</i> (c) no final dos respectivos ensaios	80
Figura 7.25 - Evolução da intensidade sonora com a tensão aplicada durante o ensaio às cadeias de isoladores	81
Figura 7.26 - Amostra dos ultrassons captados para a <i>CadeiaOK</i> com uma tensão aplicada de 24kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	81
Figura 7.27 - Amostra dos ultrassons captados para a <i>CadeiaPerfurada</i> com uma tensão aplicada de 24kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	82
Figura 7.28 - Amostra dos ultrassons captados para a <i>CadeiaOK</i> com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	82
Figura 7.29 - Amostra dos ultrassons captados para a <i>CadeiaPerfurada</i> com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	82
Figura 7.30 Amostra dos ultrassons captados para a <i>CadeiaOK</i> com uma tensão aplicada de 60kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	83
Figura 7.31 - Amostra dos ultrassons captados para a <i>CadeiaPerfurada</i> com uma tensão aplicada de 60kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)	83
Figura 7.32 - Espectro de frequências da sonora obtida para a <i>CadeiaOK</i> com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).	84
Figura 7.33 - Espectro de frequências da sonora obtida para a <i>CadeiaPerfurada</i> com uma tensão aplicada de 40kV Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).....	84
Figura 7.34 - Espectro de frequências da sonora obtida para a <i>CadeiaOK</i> com uma tensão aplicada de 60kV. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).	84
Figura 7.35 - Espectro de frequências da sonora obtida para a <i>CadeiaPerfurada</i> com uma tensão aplicada de 56kV Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).....	85
Figura 7.36 - Imagens termográficas para <i>CadeiaOK</i> (a) e <i>CadeiaPerfurada</i> (b)	85
Figura 7.37 - Comparação entre as ondas sonoras obtidas para o isolador <i>SuporteDanificado</i> para uma tensão de 40kV e os pontos de descarga admissíveis para descargas parciais superficiais	86

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Comprimento das linhas da RNT em serviço por nível de tensão em 31-12-2014 [5]	5
Tabela 2.2 – Comprimento das linhas da RND por nível de tensão em 31-12-2009 [7]	6
Tabela 2.3 – Características físicas, elétricas e mecânicas dos principais metais condutores [19]	9
Tabela 2.4 – Principais vantagens e desvantagens dos materiais isolantes [23]	11
Tabela 3.1 – Indicadores gerais de qualidade de serviço [39]	18
Tabela 3.2 – Situações alvo de especial atenção durante as inspeções terrestres [4][40]	19
Tabela 3.3 – Tensões mínimas de rutura para vários gases [2]	26
Tabela 5.1 – Frequências recomendadas para diferentes tipos de inspeções [57]	56
Tabela 7.1 – Características técnicas do isolador <i>SuporteOK</i> utilizado nos ensaios [85]	68
Tabela 7.2 – Características dos isoladores constituintes das cadeias testadas nos ensaios [85]	70
Tabela I.1 – Lista de condutores nus para linha aéreas e fornecedores qualificados pela EDP Distribuição	98
Tabela I.2 – Lista de isoladores e fornecedores qualificados pela EDP Distribuição	100
Tabela II.1 – Características técnicas da camara termográfica <i>Flir A325</i> [87]	102
Tabela III.1 – Tensão aplicada ao isolador e respetivo NIS dos ultrassons captados	106

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	<i>Alternate Current</i>
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CEI	Comissão Eletrotécnica Internacional
DC	<i>Direct Current</i>
EDP	Energias de Portugal
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
I.A.C.S.	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
LAT	Laboratório de Alta Tensão
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
REN	Redes Energéticas Nacionais
RND	Rede Nacional de Distribuição
RNT	Rede Nacional de Transporte
RQS	Regulamento da Qualidade de Serviço
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SI	Sistema Internacional

Lista de símbolos

n	Nível de energia n de um eletrão
n_0	Número inicial de eletrões
n_x	Número de eletrões a uma distância x do cátodo
α	Coefficiente de primeira ionização de <i>Townsend</i>
γ	Coefficiente de segunda ionização de <i>Townsend</i>

β	Número de elétrons produzidos no cátodo durante a primeira avalanche de elétrons
I	Valor médio da corrente elétrica no espaço entre dois elétrodos
I_0	Corrente elétrica inicial
V_{Eunif}	Tensão num campo elétrico uniforme tal que $E=V_{Eunif}/d$
V_s	Tensão de rutura
E	Campo elétrico
p	Pressão de um gás
d	Distância entre elétrodos
V_{smin}	Tensão mínima de rutura
I_{arc}	Corrente de arco
∇V	Gradiente da tensão
N_e	Densidade de elétrons
N_i	Densidade de iões
k_e	Mobilidade dos elétrons
k_i	Mobilidade dos iões
V_{arc}	Tensão de arco
θ	Temperatura
δ	Densidade do ar
E_c	Valor crítico do gradiente da tensão superficial
r	Raio
f	Frequência
T	Período
Y	Amplitude
λ	Comprimento de onda
c	Velocidade de propagação
I_{son}	Intensidade sonora
NIS	Nível de intensidade sonora
I_{ref}	Intensidade sonora de referência (limiar da audibilidade)
c_l	Velocidade de propagação de uma onda longitudinal
E_Y	Módulo de elasticidade de <i>Young</i>
ρ	Densidade de um determinado material
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>
c_s	Velocidade de propagação de uma onda transversal
c_R	Velocidade de propagação de uma onda de <i>Rayleigh</i>
φ	Ângulo de defasamento
w	Velocidade angular
t	Tempo

Capítulo 1

Introdução

O presente documento apresenta o trabalho desenvolvido no tema “Aplicação da Tecnologia de Detecção Ultrassónica para a Caracterização de Defeitos Elétricos em Componentes das Redes de Energia” realizado no âmbito da unidade curricular “Dissertação” inserida no plano de estudo do curso Mestrado Integrado de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Nesta fase introdutória do documento são apresentados os objetivos que se pretendem cumprir e é ainda feita uma descrição da estrutura do mesmo.

1.1 - Motivação e objetivos

A acentuada e crescente dependência relativamente à energia elétrica por parte da sociedade leva a que as empresas que atuam no sector elétrico, nomeadamente os operadores das redes de transporte e distribuição de energia elétrica, sejam obrigadas a garantir elevados níveis de segurança, fiabilidade e qualidade de serviço. Assim, ferramentas que permitam a deteção de problemas que eventualmente existam nas redes e nos componentes que as constituem assumem uma importância vital para que seja possível garantir os elevados níveis de operabilidade.

Como é de conhecimento generalizado, a tecnologia de ultrassons existe e é amplamente utilizada há vários anos. Porventura a sua aplicação mais conhecida é na imagiologia médica, designadamente na realização de ecografias. No entanto, e apesar das suas previsíveis potencialidades, no que toca à aplicação da tecnologia de ultrassons para a deteção de fenómenos elétricos em sistemas de energia, só muito recentemente o assunto tem despertado o interesse da comunidade científica, sendo ainda vaga a existência de informação concreta relativamente ao assunto. Pretende-se com este trabalho contribuir para colmatar essa lacuna e com isso perceber as potencialidades da aplicação das tecnologias de ultrassons nesta área.

Assim, o principal objetivo desta dissertação é estudar a tecnologia de ultrassons e a sua aplicabilidade em inspeções à rede elétrica, no caso concreto em isoladores empregues em linhas aéreas. Durante o desenvolvimento do trabalho, nomeadamente na parte prática, será

utilizado o detetor de ultrassons *Ultraprobe 10000 Touch* comercializado pela empresa *UESystems*. Especificando, os objetivos desta dissertação são os seguintes:

- Estudo dos componentes pertencentes às redes de energia elétrica portuguesas;
- Estudo relativo aos defeitos elétricos que ocorrem nas redes de energia;
- Estudo dos ultrassons propagados pelo ar;
- Estabelecer correlação entre fenómenos elétricos e ultrassons propagados pelo ar;
- Estudo da instrumentação de deteção e captação de ultrassons;
- Desenvolvimento de metodologia de teste para a deteção de defeitos nos componentes das redes elétricas;
- Execução de testes e ensaios a componentes elétricos utilizando tecnologias de deteção de ultrassons propagados no ar;
- Identificar e quantificar defeitos elétricos recorrendo à deteção de ultrassons propagados no ar.

1.2 - Estrutura

Assim, e indo de encontro aos objetivos apresentados na secção anterior, o presente documento divide-se em oito capítulos.

No capítulo 2 é estudada a rede elétrica portuguesa e os componentes que constituem as suas linhas aéreas com nível de tensão MT ou superior, com especial foco para os isoladores, tema prioritário desta dissertação.

No capítulo 3 é descrito o processo que se adota atualmente na inspeção de linhas aéreas. São ainda estudados os fenómenos e mecanismos associados aos defeitos elétricos que podem ocorrer nas linhas.

No capítulo 4 é feito um estudo da acústica, dos ultrassons e da relação entre estes e os fenómenos elétricos que os originam.

No capítulo 5 é apresentada a instrumentação utilizada para a deteção de ultrassons e o procedimento recomendado pelo fabricante para a realização de inspeções elétricas com esta instrumentação.

No capítulo 6 é feita uma exposição do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da FEUP, local onde foram realizados os ensaios da parte prática, nomeadamente a suas principais características e componentes que o constituem e os tipos de ensaios que esses mesmos componentes permitem realizar. São ainda analisadas as recomendações normativas para os ensaios realizados.

No capítulo 7, que corresponde à parte prática desta dissertação, são apresentados os procedimentos experimentais adotados, os resultados obtidos e é feita uma análise desses mesmos resultados.

No capítulo 8, o último, são retiradas as conclusões finais decorrentes da informação recolhida e dos resultados obtidos durante a realização do presente trabalho. São ainda indicados possíveis trabalhos a realizar num futuro próximo e que se entendem como pertinentes no desenvolvimento desta área de conhecimento.

Capítulo 2

Redes de Energia Elétrica

Com este capítulo pretende-se apresentar uma breve descrição da estrutura típica das redes de transporte e distribuição de energia elétrica, particularizando para o caso das redes nacionais, de forma a verificar a pertinência de estudar soluções que permitam garantir o correto funcionamento das linhas aéreas. É também feita a identificação e descrição dos principais elementos que constituem uma linha aérea, com especial foco para os isoladores que serão ensaiados na parte prática desta dissertação.

2.1- Origem e evolução

Os primeiros sistemas de energia elétrica, nomeadamente de iluminação por lâmpadas de arco, surgiram por volta de 1870 e eram constituídos por geradores individuais que alimentavam a instalação elétrica de uma única residência [1]. Cerca de uma década depois, *Thomas Edison* inventava a lâmpada de incandescência, ao que se seguiu a invenção do primeiro gerador de *Edison*, que permitiu aumentar a escala do processo e alimentar várias lâmpadas [1]. Rapidamente a geração e distribuição local de energia elétrica foi adotada para fins de iluminação um pouco por todo o Mundo.

Com o surgimento do transformador foi possível aumentar a escala de produção e transporte, pois com a utilização de corrente alternada era possível aumentar os níveis de tensão de forma a reduzir as perdas e as quedas de tensão no transporte a grandes distâncias. Assim, em 1884 foi realizado o primeiro transporte em corrente alternada monofásica, a um nível de tensão de 18kV [1]. Alguns anos mais tarde, em 24 de Agosto de 1891, na Alemanha, foi transmitida pela primeira vez corrente trifásica entre a central hidroelétrica de *Lauffen* e a Exposição Internacional de *Frankfurt*, locais que distavam de 175km [1]. Este foi um marco de tal forma importante que, em 1990, o IEEE acordou declarar a data deste acontecimento como o início da utilização industrial da corrente alternada e do seu transporte [1]. Desde então os níveis de tensão utilizados no transporte de energia têm aumentado. Em 1910 já existia transporte de energia elétrica a tensões de 110kV e em 1922 foi colocada em serviço a primeira linha de 245kV [1]. É importante notar que a capacidade de transporte em corrente alternada de uma linha aumenta proporcionalmente com o quadrado da tensão, enquanto que

os custos por unidade de potência transportada diminuem. Assim, ao longo dos anos têm sido desenvolvidos esforços para encontrar soluções tecnológicas que permitam utilizar níveis de tensão cada vez mais elevados. Isto reflete-se na evolução das tensões máximas de transporte que se têm verificado e que se encontra ilustrada na figura 2.1.

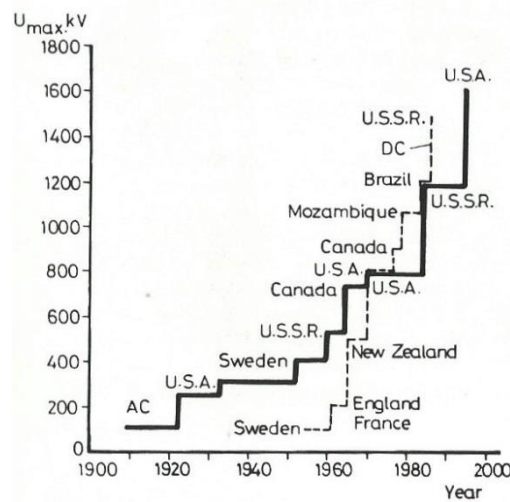


Figura 2.1 - Evolução, ao longo dos anos, do nível de tensão máximo em linhas de transmissão de energia elétrica [2]

2.2- Rede Nacional de Energia Elétrica

Atualmente, e de acordo com a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), a cadeia de valor do sistema elétrico nacional (SEN) integra cinco etapas que correspondem às atividades de produção, transmissão, distribuição, comercialização e consumo. Esta segmentação encontra-se ilustrada na figura 2.2.

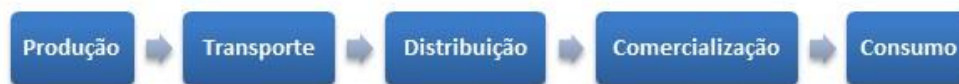


Figura 2.2 - Cadeia de valor do SEN

A atividade de produção é realizada nos centros electroprodutores. Estes podem ser centrais térmicas, como as centrais a carvão e a gás natural, grandes centrais hídricas, de fio-de-água ou de albufeira, e ainda as centrais que produzem energia elétrica a partir de fontes renováveis, como é o caso dos parques eólicos, das centrais de solar fotovoltaico e das centrais mini-hídricas [3]. Estas centrais de produção de energia concorrem em regime de mercado com as centrais espanholas, das quais Portugal importa energia elétrica, constituindo-se assim o designado mercado ibérico [3].

A energia proveniente da produção é encaminhada para a rede nacional de transporte (RNT), que opera em MAT ou AT. Esta atividade encontra-se pormenorizadamente caracterizada na subsecção 2.2.1, pois as linhas aéreas que a constituem são relevantes para a presente dissertação.

Na cadeia de valor do SEN segue-se a atividade de distribuição, garantida pela rede nacional de distribuição (RND), que permite o escoamento da energia elétrica que aflui dos centros electroprodutores e das interligações às subestações da RNT para as instalações consumidoras. Esta atividade encontra-se pormenorizadamente caracterizada na subsecção 2.2.2, pela mesma razão referida anteriormente para a RNT.

À atividade de distribuição segue-se na cadeia de valor do SEN a atividade de comercialização. Com a liberalização do setor energético procedeu-se à separação das atividades de comercialização e de distribuição, de forma a permitir a entrada de novos agentes neste segmento, visando introduzir concorrência. Isto tem como o objetivo principal aumentar a eficiência das empresas e gerar benefícios para os consumidores. Assim, o fornecimento de energia elétrica e a distribuição são atualmente duas atividades separadas [3]. Os comercializadores podem então comprar e vender eletricidade de forma livre, desde que preencham os requisitos necessários para operarem no mercado. Para tal, têm direito de acesso à RNT e à RND, mediante o pagamento de tarifas reguladas [3]. Por outro lado, os consumidores podem assim escolher livremente o comercializador ao qual compram a eletricidade.

2.2.1- Rede Nacional de Transporte

A atividade de transporte funciona em regime de monopólio natural regulado. Tal acontece pois seria inviável duplicar as linhas de MAT e de AT, tanto do ponto de vista económico como ambiental. Assim, esta atividade que integra o desenvolvimento, exploração e manutenção da RNT é concessionada em regime de exclusividade pelo estado português à REN, devendo esta garantir, além do já referido, a coordenação da RNT com as instalações de produção e distribuição [3][4].

Tabela 2.1 – Comprimento das linhas da RNT em serviço por nível de tensão em 31-12-2014 [5]

	Comprimento (km)
Linhas 400kV	2467
Linhas 220 kV	3601
Linhas 150 kV	2561

2.2.2- Rede Nacional de Distribuição

No caso português a RND é operada por concessão exclusiva, sendo competência do Estado Português decidir qual o operador da rede. Atualmente, esta concessão exclusiva está atribuída à EDP Distribuição, uma subsidiária do grupo EDP, conforme estabelecido no artigo nº70 do Decreto-Lei 29/2006 [6]. Os termos desta concessão estão por sua vez definidos no Decreto-Lei 172/2006 [6]. A EDP Distribuição é assim responsável pela exploração da rede em AT e MT, possuindo também concessões municipais de distribuição de eletricidade em BT [4].

Na sua globalidade, a RND é constituída por linhas aéreas operando em MAT, AT, MT e BT, por cabos subterrâneos operando em AT, MT e BT e ainda por postos de transformação e subestações [4][7]. As linhas aéreas são características de zonas rurais, enquanto que em zonas urbanas são utilizadas preferencialmente linhas subterrâneas de forma a evitar perigos que poderiam advir de um desprendimento dos condutores [4][8]. Observando a tabela 2.2 é

possível verificar que para todos os níveis de tensão as linhas aéreas apresentam maior extensão do que as subterrâneas. Constata-se ainda que, excluindo os níveis de BT, as linhas aéreas de MT são as que apresentam maior extensão. Assim, é imediato perceber a importância de garantir o correto funcionamento das linhas aéreas de MT de forma a ser possível satisfazer os consumos de eletricidade com adequado nível de qualidade ao mesmo tempo que se minimizam as perdas energéticas no processo de distribuição de energia aos consumidores.

Tabela 2.2 – Comprimento das linhas da RND por nível de tensão em 31-12-2009 [7]

	Comprimento (km)
Linhas aéreas MAT (>110 kV)	63
Linhas aéreas AT (60 kV)	8382
Linhas aéreas MT (6/10/15/30 kV)	58261
Linhas aéreas BT (<1 kV)	104225
Cabos subterrâneos AT (60 kV)	468
Cabos subterrâneos MT (6/10/15/30 kV)	15113
Cabos subterrâneos BT (<1 kV)	31714

2.3- Componentes das linhas aéreas

Dos vários componentes possíveis de identificar na constituição de uma linha aérea, os que se destacam pela sua importância no funcionamento das referidas linhas são os apoios, as armações, os condutores e os isoladores. Ao longo das subsecções que se seguem analisam-se estes componentes e indicam-se quais os mais utilizados nas linhas aéreas em Portugal, com especial ênfase para a RND, pelo facto de os componentes ensaiados serem para utilização na RND.

2.3.1- Apoios

Os apoios são estruturas destinadas a suportar os condutores, os cabos de guarda, os isoladores e os acessórios, garantindo as distâncias de segurança entre condutores, entre os condutores e o apoio, e, entre os condutores e o solo e obstáculos ao longo do trajeto da linha [9][10].

Os apoios de uma linha aérea estão sujeitos a solicitações de diversos tipos e que se classificam da seguinte forma [11]:

- **Esforços transversais:** resultam da ação do vento sobre os apoios e da tração dos condutores quando formam um ângulo;
- **Esforços longitudinais:** existem quando os esforços mecânicos aplicados ao apoio pelos condutores dos dois vãos adjacentes são diferentes. Logicamente que este tipo de esforços também se verificam se o apoio suportar condutores apenas de um dos lados;
- **Esforços verticais:** resultantes do peso dos condutores e de possíveis depósitos de gelo ou neve sobre os mesmos.

De acordo com o disposto no artigo 4.º do Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (RSLEAT), os apoios de uma linha aérea podem ser classificados da seguinte forma [10]:

- **Apoio de alinhamento:** apoio situado num troço retilíneo da linha;
- **Apoio de ângulo:** apoio situado num ângulo da linha;
- **Apoio de derivação:** apoio onde se estabelecem uma ou mais derivações;
- **Apoio de fim de linha:** apoio capaz de suportar a totalidade dos esforços que os condutores e os cabos de guarda lhe transmitem de um só lado da linha;
- **Apoio de reforço:** apoio destinado a suportar esforços longitudinais para reduzir as consequências resultantes da rutura de condutores ou cabos de guarda;
- **Apoio de travessia ou de cruzamento:** apoio que limita um vão de travessia ou de cruzamento.

Os diversos tipos de apoio acima referidos encontram-se esquematizados na figura 2.3.

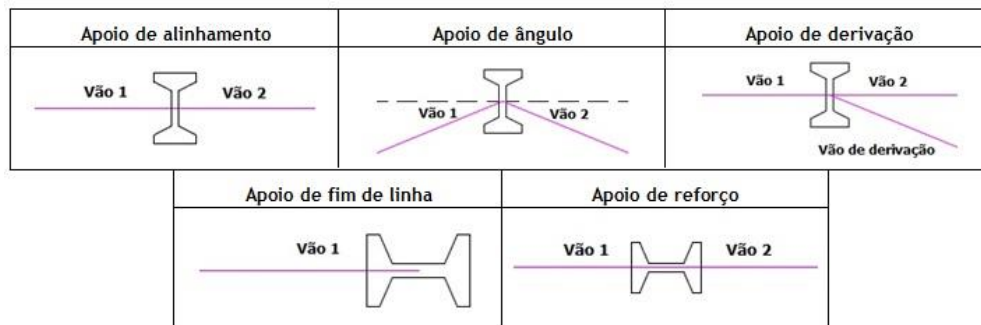


Figura 2.3 - Diferentes tipos de apoios [7]

Quanto ao material que os constitui, os apoios utilizados em níveis de tensão iguais ou superiores a MT podem ser em betão ou em metal. Os apoios em betão apresentam como vantagens o facto de serem mais baratos e requererem maciços mais pequenos [9]. No entanto, para alturas maiores, o seu manuseamento torna-se complicado. Já os apoios em metal apresentam como vantagens a facilidade no transporte, uma vez que são transportados às peças, e a maior resistência mecânica [9]. A principal desvantagem deste tipo de apoios reside no elevado custo monetário quando em comparação com os apoios em betão, o que leva a que, quando possível, sejam utilizados os de betão [9][12].

2.3.2- Armações

As armações são estruturas metálicas aplicadas na parte superior dos apoios e que se destinam a suportar os isoladores e os condutores. Existem diversos tipos de armações, sendo que a designação que lhe é atribuída corresponde à disposição dos condutores na armação.

As disposições de condutores mais utilizadas nas linhas aéreas são as disposições em esteira horizontal, triângulo, galhardete, esteira vertical, esteira vertical dupla e pórtico [13-16]. Na figura 2.4 estão esquematizadas algumas destas disposições.

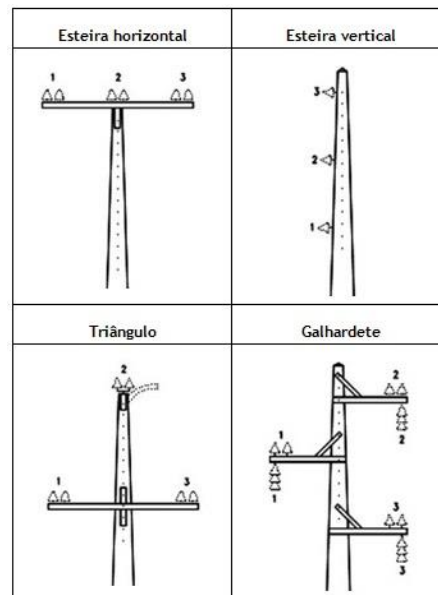


Figura 2.4 - Diferentes disposições de condutores [9]

A disposição dos condutores em esteira horizontal utiliza-se, normalmente, em apoios de fim de linha e de derivação [17][18]. A disposição em triângulo é empregue no percurso da linha quando os vãos são curtos [17][18]. Caso se verifiquem vãos muitos extensos e a probabilidade de ocorrência de ventos fortes seja considerável, existe a possibilidade de os condutores se tocarem. Nestas situações, para garantir que tal não acontece, utiliza-se preferencialmente a disposição em galhardete, que permite maior distanciamento entre os condutores [17][18]. Por sua vez, a disposição em esteira vertical é principalmente utilizada quando dois vãos adjacentes fazem um ângulo muito acentuado num apoio. Como os condutores se encontram amarrados apenas de um lado do poste, evita-se desta forma que estes se aproximem perigosamente da estrutura do apoio [17].

2.3.3- Condutores

Um condutor elétrico é definido como o conjunto constituído pela alma condutora, responsável pela condução de corrente elétrica, e pela camada isolante, que assegura o isolamento elétrico. Os condutores são assim os elementos da rede responsáveis pela condução de energia elétrica. Estes devem ser escolhidos considerando as correntes elétricas que neles circularão e as tensões mecânicas a que serão sujeitos.

Os principais tipos de condutores utilizados nas linhas aéreas são os condutores nus [19]. Um condutor nu é caracterizado por não ter na sua constituição qualquer isolamento elétrico exterior.

Relativamente ao material condutor, os mais utilizados são o cobre e o alumínio e suas ligas [19]. O alumínio é muitas vezes utilizado em conjunto com o aço com o objetivo de se obter uma maior resistência mecânica.

Os condutores de cobre são condutores concêntricos, compostos por uma ou mais camadas de fios de cobre [20]. Os de liga de alumínio e os de alumínio-aço são também condutores concêntricos, compostos por uma ou mais camadas de fios de liga de alumínio. A principal diferença entre estes dois últimos reside em que os de alumínio-aço possuem um núcleo de aço galvanizado de alta resistência mecânica [19].

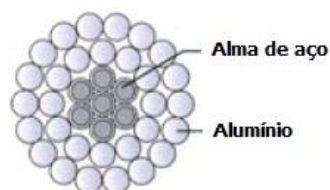


Figura 2.5 - Cabo de alumínio-aço [21]

No caso das linhas aéreas, os condutores de alumínio apresentam vantagens, tanto económicas como técnicas, em relação ao cobre. Concretizando a afirmação anterior, em condições de igualdade de condutividade elétrica:

- Os condutores de alumínio apresentam menor peso, cerca de metade, em relação ao peso dos condutores de cobre. Devido a este facto o alumínio é muito utilizado em linhas aéreas pois permite a redução das flechas (distância, medida na vertical, entre os condutores e a linha reta que une o topo dos apoios) e o aumento dos vãos (distância entre dois apoios consecutivos), possibilitando a redução da altura dos apoios e do número de apoios, isoladores e respetivos acessórios. Quando é necessário melhorar as características mecânicas destes condutores, que são piores em relação às do cobre, utilizam-se os já mencionados cabos alumínio-aço, que aliás são muito empregues nas linhas aéreas em Portugal [19];
- Os condutores de alumínio-aço têm uma secção superior aos de cobre, o que constitui uma vantagem na redução do fenómeno de efeito de coroa [20];
- O alumínio tem um preço significativamente inferior ao cobre e que se tem mantido estável ao longo do tempo [19];

As principais características dos metais condutores mais utilizados em redes de energia elétrica encontram-se na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Características físicas, elétricas e mecânicas dos principais metais condutores [19]

Características	Cobre	Alumínio	Liga
Massa específica (kg/dm ³)	8,89	2,703	2,703
Coefficiente de dilatação linear (°C ⁻¹)	17,0×10 ⁻⁶	23,0×10 ⁻⁶	23,0×10 ⁻⁶
Módulo de elasticidade (kg/mm ²)	12700	7000	7000
Resistividade a 20°C (Ω.mm ² /m)	0,017774	0,028264	0,0305 a 0,0325
Condutividade a 20°C (% I.A.C.S)	97,0	61,0	52,5
Coefficiente de Temperatura a 20°C (°C ⁻¹)	0,00381	0,00403	0,00360
Calor específico a 20°C	0,092	0,215	0,215

Os condutores aplicados nas linhas da RND encontram-se na tabela I.1 do anexo I.

2.3.4- Isoladores

Os isoladores têm duas funções principais: uma função mecânica de sustentação das linhas e uma outra de isolamento elétrico entre os condutores e as estruturas ligadas à terra [21][22]. De forma a desempenhar a função de isolamento com sucesso, os isoladores são

constituídos por materiais não condutores e têm formas e dimensões adequadas para garantir uma distância no ar longa o suficiente de maneira a impedir descargas disruptivas entre os condutores e as já mencionadas estruturas ligadas à terra. Assim, em condições normais de funcionamento, o isolador de linha equivale a um circuito de impedância teoricamente infinita a fenômenos de descargas disruptivas [22].

Material do dielétrico

Uma das formas que a Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI) utiliza para classificar os isoladores diz respeito ao material com o qual o corpo isolante é fabricado [23]. Este critério de classificação permite dividir os isoladores em dois grandes grupos: os cerâmicos e vidro e os poliméricos. O esquema da figura 2.6 fornece uma visão geral dos isoladores utilizados em linhas aéreas.



Figura 2.6 - Classificação dos isoladores de acordo com o material do dielétrico

Como se constata observando o esquema da figura 2.6, é possível subdividir os isoladores em quatro grupos fundamentais quanto ao material do dielétrico: isoladores de porcelana, de vidro, de resina e compósitos. As principais vantagens e desvantagens da aplicação destes materiais em linhas aéreas encontram-se na tabela 2.4.

Na RND aplicam-se isoladores de porcelana e de vidro, sendo que na RNT são também aplicados isoladores compósitos [22][24][25]. Quanto aos isoladores de resina, estes não são aplicados em linhas de transmissão [23]. Como a parte prática da presente dissertação incide sobre os isoladores de porcelana, torna-se relevante estudar mais detalhadamente as características do material e os processos pelo qual este é obtido.

Um material cerâmico é um material inorgânico e que se caracteriza por um ponto de fusão elevado [22]. Normalmente estes materiais são excelentes isoladores elétricos e na sua maioria apresentam uma resistividade elétrica superior a $10^{14} \Omega \cdot m$ [26]. Outras propriedades que se verificam nestes materiais, dependendo da sua composição química, devidamente adaptada à aplicação a que se destinam, são as seguintes [26][27]:

- Fácil modelagem e possibilidade de obtenção de várias formas;
- Reduzidas perdas dielétricas;
- Reduzido coeficiente de dilatação térmica;
- Resistência à corrosão;
- Resistência a choques térmicos;
- Boa flexibilidade;
- Baixa densidade;
- Rigidez, dureza e resistência estrutural.

Tabela 2.4 – Principais vantagens e desvantagens dos materiais isolantes [23]

Material	Vantagens	Desvantagens
Vidro	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fiabilidade a longo prazo ▪ Indicação visual de defeitos internos ▪ Boa resistência à perfuração ▪ Isoladores de diferentes fabricantes têm normalmente um bom desempenho 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alvo para vândalos ▪ Disrupção por bandas secas durante longos períodos de tempo pode danificar o vidro ▪ Material pesado ▪ Não disponível em algumas regiões
Porcelana	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fiabilidade a longo prazo ▪ Superfície resistente à disrupção por bandas secas ▪ Não estilhaçam quando são atingidos por vândalos ▪ Isoladores de diferentes fabricantes têm normalmente um bom desempenho 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Os defeitos internos não são muitas vezes visíveis a olho nú ▪ Em zonas de poluição forte poderá ser necessário ter mais isoladores para equipar uma cadeia ▪ Material Pesado ▪ Não disponível em algumas regiões
Compósito	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixo peso ▪ Baixo custo ▪ Menos sensível ao vandalismo ▪ Melhor desempenho face à poluição 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempo de vida útil variável ▪ Anos de experiência insuficientes ▪ Diferentes projetos e diferentes materiais no seu fabrico ▪ Sensíveis ao manuseamento ▪ Defeitos internos nem sempre são visíveis
Resina	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixo custo ▪ Baixo peso 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mau desempenho face à poluição ▪ Erosão da superfície em climas húmidos ▪ Tempo de vida variável

Assim, a aplicação de materiais cerâmicos verifica-se em diversas áreas. A cerâmica tradicional é aplicada sobretudo na construção civil e porcelanas decorativas. Por sua vez, a cerâmica técnica, cuja matéria-prima utilizada apresenta um maior grau de pureza quando em comparação com a cerâmica tradicional, é utilizada para fins tecnologicamente mais avançados, como na engenharia aeroespacial no isolamento de vaivéns espaciais, na biomedicina em próteses e implantes, na eletrónica em condensadores e substratos de circuitos integrados, entre outras aplicações [26][28].

As matérias-primas utilizadas para obter determinado material cerâmico podem ser divididas, quanto à sua origem, em dois grupos principais: as matérias-primas naturais e as

matérias-primas sintéticas [26]. As primeiras são extraídas diretamente da natureza e podem ser submetidas a um processo para remoção de impurezas mas sem que ocorra modificação na sua composição química. Já as matérias-primas sintéticas são aquelas em que a sua composição química é alterada em resultado de passarem por um processo térmico ou químico, nomeadamente a calcinação, sinterização ou fusão. As principais matérias-primas utilizadas para obter isoladores elétricos cerâmicos são a argila, o caulino, o feldspato, a sílica e a alumina [26][29].

O fabrico da porcelana para fins isolantes cumpre três etapas fundamentais, sendo a primeira a obtenção da pasta cerâmica [29]. Nesta etapa, ocorre a moagem em via húmida das matérias-primas, devidamente doseadas, visando a formação da massa de porcelana [26]. De seguida procede-se à extração da água excessiva até que o teor desta no material atinja um valor muito próximo dos 20% [29]. A quantidade de água na massa é controlada com muito rigor ao longo do processo de fabrico, pois o controlo da plasticidade da massa é essencial para garantir a estabilidade do produto trabalhado [22].

A segunda etapa consiste na moldagem e maquinagem da massa, onde se esculpe a forma do dielétrico de acordo com o pretendido [22][29].

Na terceira e última etapa realiza-se cozedura e a aplicação de vidragem superficial [29]. A massa é mergulhada numa solução vítrea e secada em fornos por longos períodos de tempo [22]. A aplicação da vidragem superficial tem como objetivo facilitar a limpeza dos isoladores pela chuva [22]. O aquecimento dos fornos é realizado de acordo com curvas específicas de forma a evitar fraturamento interno do material [22]. Este processo ocorre a temperaturas tipicamente entre os 1300°C e os 1400°C de forma a que se obtenha a porcelana com todas as características desejadas, nomeadamente a não porosidade e a adequada resistência mecânica e dielétrica [26]. Verifica-se também uma retração de 10% a 15% nas dimensões do material durante o processo de cozedura [29].

No final destas três etapas existem normas CEI que se devem verificar e ensaios a realizar para confirmação do cumprimento das mesmas.

Cadeias de isoladores

Como visto anteriormente, uma das formas de classificar os isoladores é de acordo com o seu material dielétrico. Outra forma de o fazer é classificando-os em cadeias de isoladores ou isoladores rígidos.

Os isoladores de cadeia, habitualmente designados por isoladores do tipo campânula e espigão, são interligados através da conexão do espigão do isolador do topo com a campânula do adjacente, formando as cadeias de isoladores. Esta conexão campânula-espigão é observável na figura 2.7. As cadeias de isoladores assim formadas são por sua vez fixadas articuladamente às estruturas de apoio [9][22]. Então, um isolador de cadeia é constituído por três componentes fundamentais [22][30]:

- **Dielétrico:** é o material isolante, que no caso dos isoladores de cadeia é a porcelana ou o vidro [22][31].
- **Campânula:** componente em metal fixada na parte superior do dielétrico recorrendo ao uso de cimento e que permite conexão ao espigão de outro isolador da cadeia ou a um terminal metálico [22].

- **Espigão:** componente em metal fixada ao dielétrico na cavidade inferior deste através do uso de cimento. Permite a conexão à campânula de outro isolador da cadeia ou a um terminal metálico [22].

Este tipo de isoladores é amplamente utilizado em linhas de transporte e distribuição. Uma das suas grandes vantagens é a versatilidade que apresentam, podendo ser utilizados em qualquer nível de tensão, bastando para tal escolher um número adequado de elementos constituintes da cadeia.



Figura 2.7 - Conexão campânula e espigão numa cadeia de isoladores [22]

As cadeias de isoladores podem ser utilizadas em suspensão ou em amarração, tal como ilustrado na figura 2.8. O primeiro tipo de utilização referido é empregue em apoios de alinhamento ou de ângulo até 20 graus, sendo este ângulo medido entre a posição da cadeia de isoladores e o eixo que a atravessa verticalmente em posição de alinhamento [9][17]. A solução de amarração é utilizada em apoios de ângulo, reforço ou fim de linha [9]. As cadeias de amarração podem ainda ser ascendentes ou descendentes, conforme a situação do apoio, de forma a evitar a acumulação de água da chuva na campânula [32].

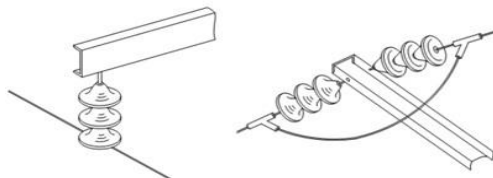


Figura 2.8 - Cadeia de isoladores em suspensão, à esquerda, e em amarração, à direita [9]

Isoladores rígidos



Figura 2.9 - Isolador rígido em porcelana

Ao contrário dos isoladores em cadeia, os isoladores rígidos consistem numa peça única ou várias peças permanentemente interligadas, feitos para serem fixos rigidamente às estruturas

de apoio. A sua aplicação deve limitar-se a apoios de alinhamento ou com pequenos ângulos e onde sejam utilizados condutores de baixa secção [9].

Conceitos e características

As descargas elétricas nos isoladores ocorrem quando a rigidez dielétrica que separa dois pontos a potenciais diferentes é rompida. A rigidez dielétrica de um determinado material é normalmente expressa em kV/mm e define-se como sendo a capacidade que o material tem de resistir a um determinado valor limite de um campo elétrico, aplicado entre dois pontos, sem que ocorra condução elétrica [22]. As descargas elétricas em isoladores podem ser classificadas essencialmente em três tipos, de acordo com o meio de propagação do arco elétrico [22]:

- **Escorvamento:** a descarga ocorre num meio gasoso ou líquido;
- **Contornamento:** a descarga ocorre na superfície de separação entre um isolante e um gás ou líquido;
- **Perfuração:** quando a descarga ocorre através de um isolante sólido.

A ocorrência destas descargas elétricas está fortemente condicionada pelas principais características dimensionais, mecânicas e elétricas dos isoladores, e que são as seguintes:

- **Linha de fuga:** como se pode observar na figura 2.10 corresponde à distância mínima, ou soma das distâncias mínimas, ao longo da superfície de um isolador entre duas partes metálicas a diferentes potenciais. A adoção de uma linha de fuga suficientemente longa é fundamental para que se evite a passagem de pequenas correntes de fuga que se estabelecem aos terminais dos isoladores [22].
- **Distância de arco:** tal como ilustrado na figura 2.10, é a distância mínima através do meio envolvente entre dois terminais do isolador. No caso das linhas aéreas, o meio que envolve o isolador é o ar [22].
Tendo em conta a possível perfuração interna do isolador, as normas definem duas classes de isoladores, sendo elas a A e a B. Para um isolador ser considerado de classe A, a distância mínima de perfuração do isolador é pelo menos igual a metade do comprimento mínimo do arco externo. Verificando-se esta situação, considera-se que o isolador é à prova de perfurações [23]. Consideram-se isoladores de classe B aqueles cuja distância mínima de perfuração é menor que metade do comprimento mínimo do arco externo. Este tipo de isolador é classificado como perfurável [23].
- **Força de rutura eletromecânica especificada:** normalmente expressa em kN, é a força máxima que pode ser atingida quando um elemento de cadeia ou um isolador do tipo rígido é ensaiado sob condições de ensaio normalizadas [24][25]. No caso de isoladores em que o material dielétrico é o vidro, toma a designação de força de rutura mecânica especificada [24][25].
- **Tensão suportável à frequência industrial, sob chuva:** normalmente expressa em kV, é a tensão à frequência industrial suportada sob chuva pelo isolador nas condições de ensaio normalizadas [24][25].

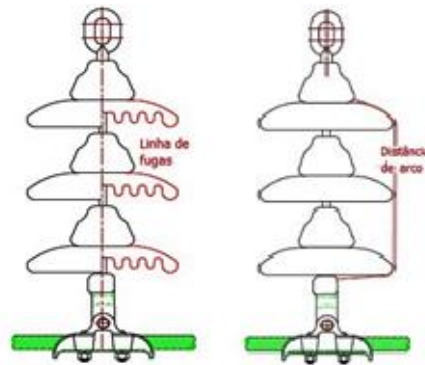


Figura 2.10 - Linha de fuga, à esquerda, e distância de arco, à direita, numa cadeia de isoladores [33]

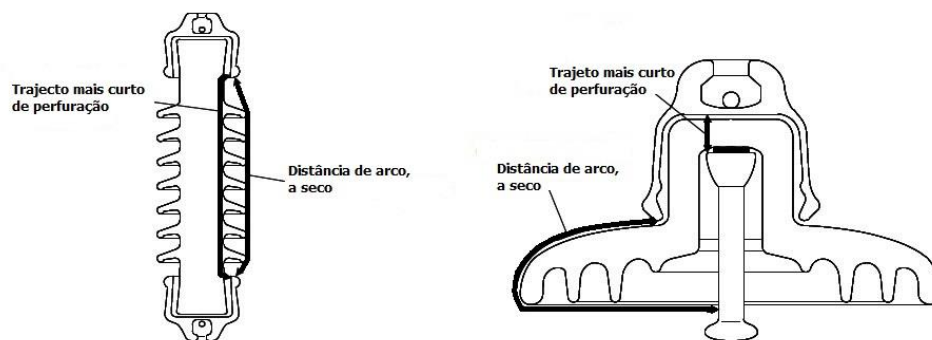


Figura 2.11 - Exemplos de um isolador de classe A, à esquerda, e classe B, à direita [23]

- **Tensão suportável ao choque atmosférico, a seco:** normalmente expressa em kV, é a tensão de choque atmosférico a seco suportada pelo isolador nas condições de ensaio normalizadas [24][25].
- **Tensão de perfuração especificada:** é a tensão que provoca a perfuração de um elemento de cadeia ou de um isolador rígido nas condições de ensaio normalizadas [24][25].

Isoladores aplicados nas linhas aéreas portuguesas

A EDP disponibiliza *online* documentos dos quais constam o material normalizado a aplicar nas linhas que opera, sendo assim possível detalhar quais os isoladores utilizados nestas. Então, em novos projetos de linhas aéreas da EDP Distribuição não se aplicam isoladores rígidos, optando-se apenas por cadeias de isoladores, sendo o material dielétrico destes em porcelana ou vidro. No momento, a escolha recai sobre os de vidro temperado. As cadeias de isoladores a aplicar na RND, de acordo com o nível de tensão, a secção do condutor, o nível de poluição da zona e o trajeto da linha são: 3×U70BS, 3×U100BLP, 3×U100BLP+HA1, 3×U100BS, 6×U70BS+HA1+HA2, 6×U100BLP+HA1+HA2 e 6×U100BS+HA1+HA2 [23]. Estes isoladores e os respetivos fornecedores qualificados pela EDP encontram-se na tabela I.2 do anexo I.

É ainda importante perceber o significado das referências que identificam os isoladores. Assim, o algarismo no início da referência indica o número de elementos da cadeia de

isoladores. Relativamente aos caracteres que se seguem, a norma IEC60305 atribui-lhes os seguintes significados [30]:

- **Letra U:** seguida de um número, é utilizada para designar o isolador e a respetiva força de rutura eletromecânica para os isoladores cerâmicos ou mecânica para os isoladores de vidro;
- **Letra B:** utilizada para indicar que se trata de uma ligação de bola e alvéolo;
- **Letra S:** utilizada para indicar que o passo é curto;
- **Letra L:** utilizada para indicar que o passo é longo;
- **Letra P:** utilizada para indicar que os elementos têm linha de fuga longa, ou seja, que se trata de um isolador do tipo antipoluição.

As designações HA1 e HA2 são utilizadas pela EDP nos seus documentos para indicar a aplicação de hastes de descarga.

Em linhas já existentes são também aplicados os seguintes isoladores rígidos, de acordo com as designações atribuídas pela EDP: RH-85, RH-102, R-70, R-85 e R-102 [34-38].

Isolador, isolante, isolamento e isolação

Por fim, é importante que fique clara a diferença entre o termo isolador e os termos isolante, isolamento e isolação, cujas definições são as seguintes:

- **Isolador:** equipamento utilizado para sustentação de condutores e função de isolamento elétrico;
- **Isolante:** material com características isolantes;
- **Isolamento:** desempenho de um determinado isolante;
- **Isolação:** camada isolante de um condutor isolado ou cabo.

Capítulo 3

Defeitos Elétricos

Neste capítulo é feita uma exposição dos indicadores utilizados para aferir a qualidade do serviço prestado pelos operadores da rede elétrica portuguesa. São também identificados e explicados os processos utilizados atualmente na inspeção dessa mesma rede. Por fim, é feito um estudo dos mecanismos e processos associados aos fenómenos elétricos possivelmente presentes em situações de defeito.

3.1- Manutenção e monitorização das linhas aéreas

Para as empresas concessionárias das redes de transmissão de energia, os custos que resultam da manutenção e da ocorrência de falhas nas redes podem ser superiores aos custos associados ao equipamento que constitui o sistema [4]. É então necessário perceber como e porque ocorrem essas falhas e procurar soluções cada vez mais eficazes para diminuir o número de ocorrências.

3.1.1- Indicadores de qualidade de serviço

A qualidade do serviço que é prestado pelos operadores das redes elétricas e pelos comercializadores de eletricidade envolve aspetos relacionados com o corte de energia, a qualidade da energia fornecida ou a qualidade da interação com os clientes. Assim, a qualidade de serviço pode ser dividida em duas componentes principais:

- Qualidade de serviço comercial, respeitante aos comercializadores de eletricidade;
- Qualidade de serviço técnica, relacionada com a continuidade de serviço e a qualidade da energia elétrica garantida pelos operadores das redes [39]. É esta que assume relevância para a presente dissertação.

A regulação da qualidade de serviço, garantida pela ERSE, é definida através do Regulamento de Qualidade de Serviço (RQS) e do Regulamento Tarifário. O RQS estabelece as regras que definem o nível mínimo da qualidade de serviço e nele estão, entre outras, disposições relativas aos indicadores e padrões de qualidade a garantir. Os indicadores gerais

de qualidade de serviço e a sua aplicabilidade constam da tabela 3.1. A coluna da correspondente ao nível de tensão AT aplica-se apenas às redes de Portugal continental.

Tabela 3.1 – Indicadores gerais de qualidade de serviço [39]

Indicador geral	Unidades	Aplicabilidade			
		Transporte	Distribuição		
			AT	MT	BT
ENF - Energia não fornecida	MW/h	X			
TIE - Tempo de interrupção equivalente	Minutos	X			
END - Energia não distribuída	MW/h			X	
TIEPI - Tempo de interrupção equivalente da potência instalada	Minutos			X	
SAIFI - Frequência média de interrupções do sistema	Interrupções/ano	X	X	X	X
SAIDI - Duração média das interrupções do sistema	Minutos	X	X	X	X
SARI - Tempo médio de reposição do serviço do sistema	Minutos	X			
MAIFI - Frequência média de interrupções breves	Interrupções/ano	X	X	X	

3.1.2- Inspeção de falhas

A inspeção das linhas aéreas das redes de energia elétrica é essencial para obter informação sobre o estado atual dos componentes que as constituem. Depois de recolher essa informação e proceder a uma análise adequada da mesma é possível [4]:

- Identificar anomalias nos equipamentos;
- Identificar situações de violação dos regulamentos;
- Atualizar informação relativa ao estado das linhas e determinar o estado do sistema.

A atual metodologia para inspeção de falhas nas linhas aéreas níveis de MT ou superiores baseia-se, de uma forma geral, em inspeções visuais a partir do solo e em inspeções aéreas tripuladas [4][40].

Rondas e inspeções terrestres

Nesta categoria enquadram-se todas as atividades de ronda e inspeção visual pelo solo às linhas aéreas para verificação do estado dos diversos componentes. Durante estas inspeções são ainda identificadas árvores e outra vegetação a ser cortada, de forma a garantir distâncias regulamentares à linha. Assim, ao realizar estas rondas deve ser registado o estado dos componentes da rede, nomeadamente dos apoios, das armações, dos isoladores e dos condutores e cabos de guarda, caso se verifique a existência destes últimos [4][40]. Na tabela

3.2 encontram-se os principais aspetos a considerar e a serem alvo de maior atenção durante a realização destas inspeções.

Tabela 3.2 – Situações alvo de especial atenção durante as inspeções terrestres [4][40]

Componente da rede	Situações a ter em atenção
Apoios	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estado dos maciços dos apoios; ▪ Estado dos parafusos e das cantoneiras.
Armações	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estado do tratamento anticorrosivo; ▪ Eventuais sinais de apodrecimento; ▪ Existência de fissuras.
Isoladores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estado dos isoladores, com especial atenção para isoladores partidos e contornados; ▪ Objetos na superfície dos isoladores; ▪ Estado de fixação dos isoladores; ▪ Verificação da verticalidade das cadeias de suspensão; ▪ Hastes de descarga ou anéis de proteção desapertados ou danificados; ▪ Acessórios com desgaste.
Condutores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estado das pinças de suspensão e amarração; ▪ Existência de condutores com alma de aço desfiada; ▪ Existência de sinais de aquecimento exagerado de condutores; ▪ Flechas de condutores irregulares; ▪ Distâncias regulamentares dos condutores ao solo; ▪ Existência e construção infraestruturas a distâncias não regulamentares; ▪ Distância da linha à vegetação; ▪ Roubo de cobre.

Inspeções aéreas tripuladas

A inspeção aérea tripulada às linhas aéreas é feita com recurso a helicópteros que sobrevoam as linhas a uma determinada distância dos condutores em tensão. Este tipo de procedimento permite realizar uma série de ações de inspeção em simultâneo, recorrendo a diferentes tipos de instrumentos de inspeção que equipam os helicópteros, como é o caso de câmaras de filmar, câmaras ultravioleta e câmaras termográficas [4]. Apesar de todos os estes equipamentos, valoriza-se também a experiência dos inspetores presentes no helicóptero que realizam inspeção visual.

Nestas inspeções destaca-se a termografia, uma técnica não destrutiva que consiste na medição da radiação infravermelha emitida por determinado corpo. Esta é uma técnica muito útil no que toca a linhas aéreas dado que oferece as seguintes possibilidades [40]:

- Realização de medições sem contacto físico com os componentes da linha, aumentando assim a segurança;
- Verificação de equipamentos em funcionamento, não sendo assim necessário a realização do corte de energia para a linha em medição;
- Inspeção de grandes áreas num período de tempo reduzido.

No entanto esta técnica apresenta também algumas desvantagens:

- É insensível a defeitos internos que não sejam suficientemente intensos para provocar alteração da temperatura na superfície dos equipamentos [40];
- A sensibilidade dos equipamentos de detecção de infravermelhos depende das condições atmosféricas, que podem ser bastante dinâmicas, introduzindo assim erros nas medidas [41];

A termografia assume assim importância preponderante na manutenção das linhas aéreas, permitindo identificar situações de defeito e a que estão associadas temperaturas elevadas, como é o caso de curto-circuitos, defeitos à terra e situações de alta impedância, que se verificam em ligações soltas, conexões corroídas, rutura de condutores e condutores e equipamentos de corte subdimensionados [4].

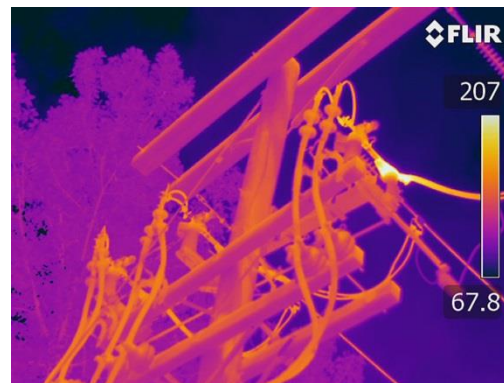


Figura 3.1 - Termografia na inspeção a linhas aéreas [42]

3.2- Defeitos elétricos nos componentes das linhas

A presença de defeitos nos componentes da rede tem associados fenómenos elétricos dos quais são exemplo o arco elétrico e as descargas parciais. É assim importante perceber os processos e mecanismos físicos e químicos envolvidos nestes fenómenos.

3.2.1- Átomos, eletrões e níveis de energia

Um átomo é a menor partícula que permite identificar um elemento químico e é composto por um núcleo em torno do qual se situa uma nuvem eletrónica. Um átomo tem assim dimensões muito reduzidas. De facto, os raios dos átomos têm valores compreendidos entre 31pm, no caso do hélio, e 298pm, no caso do célio [43]. O raio do núcleo atómico é, por sua vez, muito menor que o do átomo, mais concretamente cerca de cem mil vezes menor [43]. Na figura 3.2 encontra-se ilustrado o modelo de um átomo, com o núcleo no centro do átomo e os eletrões orbitando em torno do núcleo. De notar que nesta representação o tamanho do núcleo se encontra muito exagerado.

O núcleo é constituído por protões, partículas que têm carga elétrica positiva, e neutrões, partículas com carga elétrica nula. Um átomo de determinado elemento químico é definido pelo seu número de protões, designado por número atómico. Átomos de um mesmo

elemento químico mas com diferente número de neutrões designam-se por isótopos. À soma do número de protões com neutrões dá-se o nome de número de massa.

Quanto aos eletrões, estes são partículas com carga elétrica negativa e que se movem a elevadas velocidades em torno do núcleo, formando o que se designa por nuvem eletrónica. A sua massa é desprezável quando comparada com as dos protões e dos neutrões. Assim, no cálculo da massa de um átomo a massa dos eletrões é desprezada. A posição exata de um eletrão em relação ao núcleo não é possível de determinar, pelo que o modelo da nuvem eletrónica baseia-se em métodos probabilísticos de forma a indicar o local onde existe maior probabilidade de se encontrar um eletrão. A nuvem eletrónica apresenta zonas mais densas e outras menos densas, sendo que é nas zonas mais densas, as orbitais, onde existe maior probabilidade de encontrar eletrões.

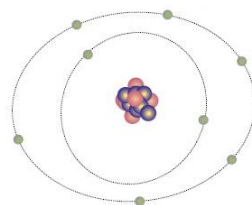


Figura 3.2 - Modelo ilustrativo de um átomo [43]

Eletrões e níveis de energia

Num átomo os eletrões distribuem-se por diferentes níveis de energia, sendo que cada nível de energia só pode ter um determinado número máximo de eletrões. Quando o primeiro nível de energia se encontra preenchido, os restantes eletrões distribuem-se pelo segundo nível. Quando o segundo nível é preenchido, os eletrões que restam distribuem-se pelo terceiro nível, e assim sucessivamente. O átomo de oxigénio, por exemplo, tem oito eletrões no total, sendo que dois estão no primeiro nível de energia e seis no segundo. O número máximo de eletrões por cada nível pode ser calculado por $2n^2$, sendo n o nível de energia correspondente. Existe no entanto uma exceção: caso determinado nível de energia seja o último de um certo átomo, nunca poderão existir mais que oito eletrões nesse nível. Os eletrões que ocupam este último nível de energia são designados por eletrões de valência e desempenham um papel importante no fenómeno de ionização. De facto, a energia necessária para que ocorra ionização, designada por energia de ionização, pode ser definida como a energia necessária para retirar um eletrão da última camada de valência de um determinado átomo. Estes eletrões de valência têm ainda um papel fundamental nas ligações entre átomos, dando origem a moléculas.

3.2.2- Ionização

A presença de determinados fenómenos elétricos nos componentes de uma rede elétrica representa a existência de processos que podem levar à falha desses mesmos componentes. Desses fenómenos fazem parte o arco elétrico e as descargas parciais, presentes nas falhas que ocorrem em isolamentos, condutores e outros elementos integrantes das redes elétricas [44]. A estes fenómenos está associada a ionização, um processo pelo qual átomos ou moléculas perdem ou ganham eletrões, passando assim a ser iões.

Os elétrons livres num gás, ao moverem-se sob a ação de um campo elétrico, colidem numerosas vezes com as moléculas de gás, podendo levar à ionização destas últimas. Entre estas colisões, os elétrons percorrem caminhos livres ao longo dos quais são acelerados, verificando-se um aumento da sua energia. Este aumento depende não só do caminho livre percorrido mas também da intensidade do campo elétrico aplicado [2]. De forma similar, os iões positivos que se geram durante o processo de ionização também recebem energia do campo elétrico. Quando estes iões colidem com as moléculas de gás, perdem uma parte substancial da sua energia, cerca de 50%, uma vez que a massa do ião e a massa da molécula de gás são próximas [2]. Assim, a energia dos iões durante este processo será menor que aquela que se verifica no caso dos elétrons em situações similares, significando isto que os iões positivos são menos capazes de ionizar as moléculas de um gás [2].

Ionização por impacto de elétrons

Existem vários processos de ionização, tais como a fotoionização, a ionização por interação com metastáveis, a ionização por partículas nucleares, a ionização térmica e a ionização por separação de elétrons. No entanto, no estudo de descargas elétricas em gases, o processo de ionização por impacto de elétrons, ilustrado na figura 3.3, é o que assume maior relevância [2]. Sendo que no caso das linhas aéreas as descargas ocorrem maioritariamente pelo ar, este é também o processo mais importante para o desenvolvimento da presente dissertação.

Quando um elétron colide com um átomo, ocorre uma troca de energia cinética. Se desta colisão não resultar excitação ou ionização do átomo em causa, diz-se que ocorreu uma colisão elástica. Por outro lado, se desta colisão resultar excitação ou ionização então ocorreu uma colisão inelástica. Quando tal acontece, é possível afirmar que uma parte da energia cinética que o elétron tinha antes do impacto foi convertida em energia potencial do átomo ou da molécula. É então facilmente perceptível que a intensidade do fenómeno de ionização por impacto depende da energia dos elétrons. Caso num determinado espaço se verifique uma elevada densidade de elétrons, é também possível que elétrons que se desloquem a baixa velocidade, e portanto com baixa energia cinética, provoquem ionização de átomos ou moléculas ao colidir com estes, sendo que para tal ocorra é necessário que estes últimos se encontrem excitados.

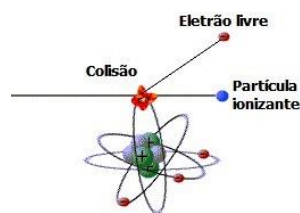


Figura 3.3 - Ilustração da ionização de um átomo por impacto de elétrons [45]

De notar que elétrons que se movem a velocidades bastantes elevadas são, ao contrário do que poderia ser expectável, fracas partículas ionizantes, isto porque o tempo de colisão entre o elétron e o átomo será muito reduzido, o que leva a que a energia transferida entre estes seja também ela reduzida. Para cada gás existe um valor ótimo para a energia dos elétrons que garante uma probabilidade significativa de ocorrência de ionização [2].

3.2.3- Rutura elétrica de gases

Apesar de a ionização por impacto de eletrões ser um processo muito importante, não é por si só suficiente para causar a rutura elétrica dos gases [2]. Para que esta ocorra, seguem-se à ionização avalanches de eletrões que por sua vez podem causar a referida rutura.

Mecanismo de pré-ruptura em gases: avalanche de eletrões

Considerem-se dois elétrodos imersos num gás, onde existe um campo elétrico uniforme. Considere-se ainda que eletrões são gerados no cátodo através de, por exemplo, radiação ultravioleta. Estes eletrões encontram-se então sujeitos à ação do campo elétrico uniforme, sendo acelerados em direção ao ânodo. Como anteriormente referido, estes eletrões irão adquirir energia cinética enquanto percorrem um caminho livre e poderão, caso adquiram energia suficiente, ionizar as moléculas de gás por colisão.

Ocorrendo a referida ionização, o eletrão proveniente da molécula de gás, juntamente com o que colidiu com a mesma, percorrem ambos o campo elétrico, deixando para trás um ião positivo. Com a repetição deste processo, a uma distância x do cátodo irão existir n_x eletrões. Na presença de um campo elétrico uniforme e considerando que o número inicial de eletrões é igual a n_0 , n_x é dado pela expressão 3.1 [2]. Nesta expressão α representa o primeiro coeficiente de ionização de *Townsend* e apresenta um valor constante em resultado do campo ser também ele constante.

$$n_x = n_0 \cdot e^{(\alpha \cdot x)} \quad (3.1)$$

Importa notar que a ionização por colisão é um fenómeno sujeito a flutuações de natureza estatística e que α é apenas o valor médio de ionizações por unidade de comprimento percorrida pelo eletrão. Assim, a probabilidade da ocorrência de uma avalanche com um determinado número de eletrões é obtida recorrendo a modelos estatísticos [2].

Aquando da ocorrência de uma avalanche é possível observar uma elevada concentração de eletrões junto ao ânodo, enquanto os iões positivos ainda se deslocam em direção ao cátodo. Isto acontece pois a velocidade a que os eletrões se deslocam é muito superior à velocidade dos iões, sendo inclusive comum considerar a velocidade destes últimos igual a zero durante o período de tempo que os eletrões demoram a atingir o ânodo [2].

Após os iões alcançarem o cátodo, considera-se que o processo está completo. No entanto, se esta primeira avalanche for suficientemente significativa, pode aparecer no espaço em estudo um número considerável de novos eletrões provenientes de mecanismos secundários e que podem dar início a novas avalanches. A quantificação dos agentes ionizantes secundários, que podem ser por exemplo iões positivos ou fotões, é feita recorrendo a um coeficiente que indica o número médio de novos eletrões gerados no cátodo por cada colisão ionizante durante a primeira avalanche. Este coeficiente γ é designado por coeficiente de segunda ionização de *Townsend* e é função da razão entre o campo elétrico e a pressão do gás, sendo o seu valor bastante mais reduzido que o de α [2]. Definido este coeficiente é então possível estabelecer a expressão 3.2, que permite determinar o número de eletrões β produzidos no cátodo durante a primeira avalanche [2]. Nesta mesma equação, d representa a distância entre os elétrodos [2][46].

$$\beta = \gamma \cdot [e^{(\alpha \cdot d)} - 1] \cdot n_0 \quad (3.2)$$

São estes eletrões que iniciam a segunda geração de avalanches. O intervalo de tempo após o qual a segunda avalanche se inicia depende dos mecanismos secundários anteriormente referidos, sendo que no caso das descargas no ar é comum que o mecanismo secundário seja o efeito fotoelétrico [2].

As sucessivas avalanches de eletrões e o iões positivos movendo-se a baixas velocidades podem levar a aumento do campo elétrico no espaço entre elétrodos de tal forma a que o rápido aumento de corrente que daí resulta leva à rutura do gás [2].

Rutura em gases: mecanismo de Townsend

Considerando um campo elétrico uniforme, o valor médio I da corrente no espaço entre dois elétrodos aumenta proporcionalmente com o aumento da tensão, de acordo com a expressão 3.3, onde I_0 corresponde à corrente inicial [2][46]. Esta expressão é válida até ao ponto onde ocorre a rutura do gás.

$$I = [I_0 \cdot e^{(\alpha \cdot d)}] / [1 - \gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)] \quad (3.3)$$

A variação da corrente com a tensão até que ocorre a rutura elétrica do gás está representada no gráfico da figura 3.4. O aumento inicial da corrente está representado pelo segmento do gráfico entre 0 e V_1 . Depois, verifica-se uma corrente de valor médio constante entre V_1 e V_2 e que corresponde à corrente produzida no ânodo. A partir da tensão V_2 , verifica-se um rápido aumento da corrente com o aumento da tensão, até que se atinge um valor de crítico de tensão V_s para o qual ocorre a rutura. O aumento da corrente observável entre V_2 e V_3 deve-se à ionização por impacto de eletrões, enquanto que o aumento a partir de V_3 está associado aos processos secundários modelizados pelo coeficiente de segunda ionização de Townsend γ .

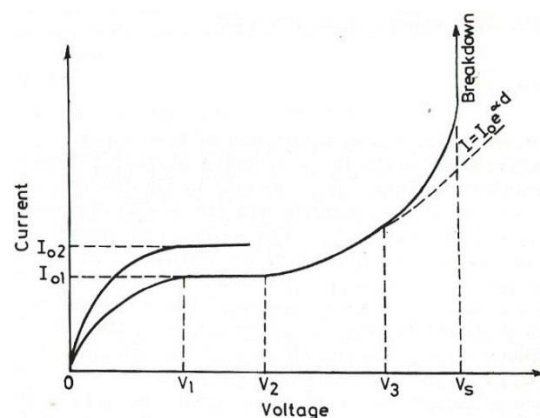


Figura 3.4 - Evolução da corrente I em função da tensão aplicada [2]

O critério de *Townsend*, estabelecido na expressão 3.4, define o valor limite da corrente para o qual ocorre a rutura do gás [2][46].

$$\gamma \cdot [e^{(\alpha \cdot d)} - 1] = 1 \quad (3.4)$$

No entanto, este critério é válido apenas para baixos valores de corrente, nomeadamente da ordem de grandeza de 10^{-7} A, pois para valores superiores as distorções da distribuição não são desprezáveis e pode ainda ocorrer danificação dos elétrodos [46].

O encontro entre as tensões de rutura calculadas por via analítica e as tensões de rutura obtidas experimentalmente permitiu chegar a uma expressão para o cálculo das tensões de rutura a pressões relativamente baixas e válida para distâncias entre elétrodos tanto pequenas como grandes. Então, sabendo que os coeficientes α e γ são ambos função do campo elétrico E e da pressão p do gás, é possível escrever as expressões 3.5 e 3.6 [2].

$$\alpha = p \cdot f_1 \cdot (E/p) \quad (3.5)$$

$$\gamma = f_2 \cdot (E/p) \quad (3.6)$$

Assim, e para um campo uniforme entre dois elétrodos tal que $E=V_{Eunif}/d$, é possível reescrever a equação 3.4, que toma a forma da equação 3.7.

$$f_2 \cdot [V_{Eunif}/(p \cdot d)] \cdot [e^{(p \cdot d \cdot f_1 \cdot (V_{Eunif}/(p \cdot d)))} - 1] = 1 \quad (3.7)$$

Verifica-se então que, para um gás e um material dos elétrodos em particular, a tensão de rutura V_s pode ser expressa pelo produto da pressão do gás p e da separação entre elétrodos d , tal como se mostra na expressão 3.8, conhecida como Lei de Paschen [2][46].

$$V_s = f(p \cdot d) \quad (3.8)$$

A relação entre a variação de V_s e a variação do valor do produto $p \cdot d$ para o ar, o dióxido de carbono e o hidrogénio está presente na figura 3.5.

Para pressões muito reduzidas, situação representada à esquerda do ponto mínimo das curvas na figura 3.5, a densidade do gás é também ela reduzida e conseqüentemente os eletrões colidem menos vezes com as moléculas de gás, dificultando a ocorrência de ionização e posterior rutura elétrica do gás. Assim, a rutura do gás acontecerá apenas se a energia cinética dos eletrões for elevada, o que acontece quando estes se encontram na presença de um campo elétrico de valor elevado. Para que isto ocorra é necessário também que o valor da tensão seja elevado, resultando daqui as tensões de rutura que se verificam no gráfico para as pressões mais reduzidas.

Com o aumento da pressão a densidade do gás aumenta, ocorrendo um maior número de colisões entre os eletrões e as moléculas de gás, pelo que, para que ocorra ionização do gás, não é necessário que os eletrões possuam uma energia cinética tão elevada como acontece para pressões mais reduzidas. Esta não necessidade de uma energia cinética elevada reflete-se nos valores baixos da tensão de rutura que se verificam para valores de pressão mais significativos. No entanto, é também observável que à direita do ponto mínimo das curvas da figura 3.5, ocorre um ligeiro aumento da tensão de rutura com o aumento da pressão. Isto acontece porque, a partir de um certo ponto, o aumento da pressão do gás reduz significativamente o caminho livre percorrido pelos eletrões, o que faz com que a energia cinética adquirida por estes antes das colisões seja menor. Assim, para que a energia cinética dos eletrões aumente e ocorra ionização, é necessário que a magnitude do campo elétrico a

que os elétrons estão sujeitos também aumente, o que conduz ao crescimento da tensão de rutura verificado à direita dos pontos mínimos das curvas.

O valor de $p \cdot d$ para o qual se verifica o valor mínimo da tensão de rutura, tal como o valor desta nesse ponto é apresentado para vários gases na tabela 3.3.

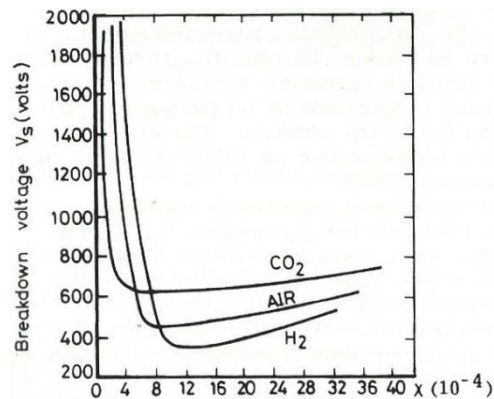


Figura 3.5 - Evolução da tensão de rutura V_s em função da pressão para vários gases [2]

Tabela 3.3 – Tensões mínimas de rutura para vários gases [2]

Gás	V_{smin} (V)	$p \cdot d$ para V_{smin} (Pa·m)
Ar	327	0,754
CO ₂	420	0,678
H ₂	273	1,530
He	156	5,320
O ₂	450	0,931

Várias relações empíricas para expressar a tensão de rutura no ar à pressão atmosférica, entre dois eléctrodos distanciados de d e entre os quais existe um campo eléctrico uniforme, têm sido sugeridas ao longo dos anos por vários autores. Uma dessas relações é a que se apresenta na expressão 3.9 [2].

$$V_s = 2440 \cdot d + 61 \cdot \sqrt{d} \quad (3.10)$$

Rutura em gases: mecanismo de canal

O crescimento de portadores de carga numa avalanche de elétrons que ocorre num campo eléctrico uniforme é dado pela expressão 3.1. No entanto, esta expressão mostra-se válida apenas enquanto o campo eléctrico criado pela distribuição de elétrons e iões no espaço entre eléctrodos é desprezável em relação ao campo exterior aplicado [46]. O curto intervalo de tempo que se verifica entre as descargas eléctricas quando tensões elevadas são aplicadas a campos eléctricos uniformes não é consistente com o mecanismo de *Townsend*, que se baseia na geração de avalanches sucessivas [2]. É também difícil de explicar, pelo mecanismo de *Townsend*, as descargas observadas através de longos espaços entre eléctrodos, em que estas se dividem e têm carácter irregular [2]. Assim, foi desenvolvida a teoria do Mecanismo de Canal, segundo a qual a descarga se desenvolve directamente a partir de apenas uma avalanche, na qual a distribuição de carga se transforma num canal de plasma. Verifica-se então um rápido aumento da condutividade e ocorre a rutura do gás através deste canal.

Loeb e Meek desenvolveram uma versão desta teoria em que o canal é dirigido ao cátodo, enquanto que *Raether* desenvolveu uma versão em que o canal é dirigido ao ânodo.

Na versão de *Loeb e Meek*, o canal ionizante dirige-se então do ânodo para o cátodo. Na presença de um campo elétrico uniforme e ocorrendo uma avalanche de eletrões como explicado anteriormente, os eletrões estão junto ao ânodo enquanto que os iões positivos permanecem num volume em forma de cone no espaço entre os eléctrodos. Cria-se então um campo de elevada densidade junto ao ânodo, sendo que no restante espaço entre os eléctrodos a densidade de carga é baixa. No entanto, no gás que circunda a avalanche, eletrões são produzidos em resultado de fenómenos de fotoionização devido à elevada ionização do gás que se encontra nessa zona. Estes eletrões iniciam avalanches auxiliares, que ocorrem ao longo do eixo da avalanche principal, onde o campo elétrico criado pela distribuição de carga é superior ao campo aplicado. Os iões positivos provenientes dessas avalanches ramificam, prolongam e intensificam a distribuição de carga da avalanche. Este processo desenvolve-se até que se cria um canal altamente ionizado entre os dois eléctrodos. Esta evolução está ilustrada na figura 3.6.

Na versão proposta por *Raether* para descargas entre o cátodo e o ânodo os canais ionizantes desenvolvem-se quando a primeira avalanche produz um número suficiente de eletrões, tal que o campo criado pela distribuição de cargas é comparável ao campo elétrico exterior [2]. Nesta situação, o campo elétrico resultante leva ao aparecimento de avalanches secundárias dirigidas ao ânodo, tal como representado na figura 3.7. Estas avalanches secundárias são iniciadas por fotoeletrões existentes no espaço à frente da avalanche principal.

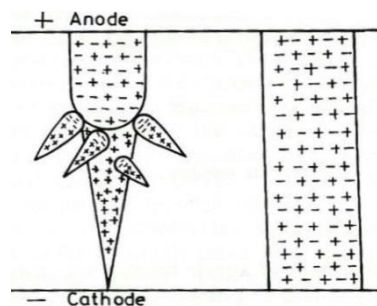


Figura 3.6 - Aparecimento de avalanches auxiliares, à esquerda; canal altamente ionizado entre os dois eléctrodos, à direita [2]

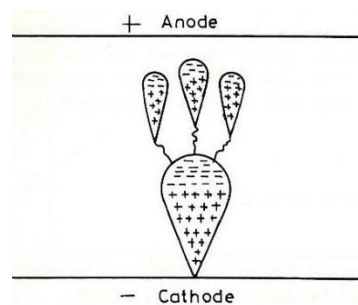


Figura 3.7 - Mecanismo de canal proposto por *Raether* [2]

3.2.4- Arco elétrico

As descargas por arco elétrico em sistemas de energia elétrica ocorrem frequentemente. Por exemplo, quando um disjuntor é aberto enquanto existe passagem de corrente, ocorre um arco entre os contactos. Além de situações de abertura e fecho de circuitos elétricos, este fenómeno pode também estar associado a defeitos no isolamento elétrico dos equipamentos, a descargas atmosféricas, contactos acidentais, entre outras causas [44]. Um arco elétrico consiste então num fluxo de corrente elétrica entre, pelo menos, dois eléctrodos a potenciais diferentes [44]. Esta descarga ocorre através de um gás ou mistura de gases, como o ar no caso das linhas aéreas, formando-se entre os eléctrodos uma descarga luminosa semelhante a uma chama. Durante o tempo de duração da descarga produz-se uma luminosidade muito intensa e é libertada uma elevada quantidade de calor [44].

Devido à severidade deste fenómeno, no projeto e operação de um sistema elétrico é fundamental conhecer e compreender as características dos arcos e os fatores que os podem originar.

Regiões do arco

Considerem-se dois eléctrodos, um cátodo e um ânodo. O arco elétrico entre estes dois eléctrodos é caracterizado por três regiões principais: a do ânodo, a do cátodo e a coluna do arco. A distribuição da tensão ao longo do arco encontra-se na figura 3.8.

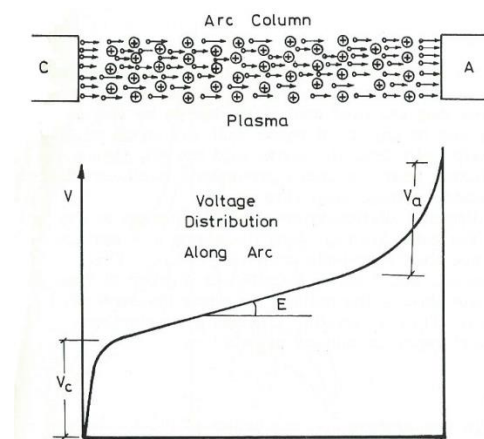


Figura 3.8 - Elétrões e íons positivos no arco e a sua distribuição longitudinal de tensão [2]

- **Região do cátodo:** os elétrões emitidos pelo cátodo podem ser produzidos por emissão termiônica se o material do cátodo for um metal de alto ponto de fusão, de que são exemplos o carbono e o tungsténio [2][47]. Neste caso, o material aquece até uma temperatura suficientemente elevada para a qual ocorre a emissão de elétrões da sua superfície [47]. Em cátodos com baixo ponto de fusão os elétrões podem ser emitidos devido ao campo elétrico desde pontos de microrugosidade onde o campo é altamente concentrado [2].

Além da ação dos elétrões que se dirigem do cátodo para o ânodo, a corrente é também parcialmente transportada por íons positivos que se deslocam lentamente para o cátodo provenientes da coluna do arco [2]. Na região entre a superfície do cátodo e a nuvem de íons positivos que se dirige para essa mesma superfície existe um elevado campo elétrico, o que leva a que se verifique uma considerável queda de tensão no cátodo [2].

- **Região do ânodo:** os elétrons provenientes do plasma bombardeiam o ânodo e entregam elevadas quantidades de energia, o que faz com que o ânodo se mantenha a uma temperatura muito elevada [2]. Iões positivos são produzidos no ânodo por ionização térmica do gás e de qualquer vapor de metal presente, deslocando-se lentamente desde o ânodo até ao plasma [2]. A distribuição espacial das cargas nas imediações do ânodo, maioritariamente cargas negativas, produz um campo elétrico não linear nesta área e leva ao conseqüente aparecimento de uma queda de tensão [2][47].
- **Coluna do arco:** esta região corresponde a quase todo o volume do arco e é constituída por partículas neutras, iões e elétrons livres [47]. Devido às altas temperaturas que se verificam aquando da ocorrência de um arco elétrico, na ordem dos 10^4K , as moléculas do gás encontram-se na sua maioria dissociadas e portanto os seus átomos ionizados [2]. Assim, no interior da coluna do arco, verifica-se uma elevada condutividade elétrica. Existem medições que indicam que a condutividade de muitos gases, casos do N_2 e do H_2 , é insignificante até temperaturas perto de 5000K , aumentando para $30\text{S}\cdot\text{cm}$ aos 10^4K e para $80\text{S}\cdot\text{cm}$ aos $2\cdot 10^4\text{K}$ [2]. As temperaturas extremamente elevadas e a alta condutividade estão confinadas ao núcleo da coluna do arco, decrescendo rapidamente com a distância ao centro desta [2].

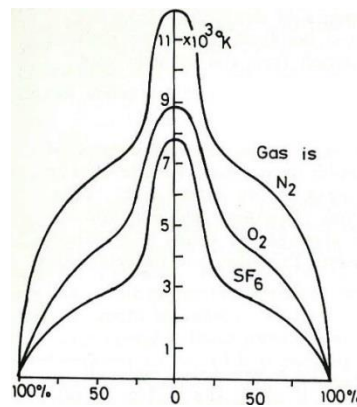


Figura 3.9 - Distribuição radial da temperatura ao longo da secção transversal do arco para vários gases [2]

Características do arco

A relação entre a tensão e a corrente do arco depende do comprimento do arco, do material dos eléctrodos e do ambiente onde se dá a descarga [2]. Para sistemas DC, considerando que as descargas elétricas ocorrem no ar atmosférico e que os eléctrodos se mantêm a uma distância constante, a tensão e a corrente estão relacionadas como esquematizado na figura 3.10.

Esta relação é traduzida, de forma aproximada, pela equação 3.10, onde I_{arc} a corrente de arco, ∇V o gradiente da tensão na coluna do arco, N_e a densidade de elétrons, N_i a densidade de iões e k_e e k_i fatores que indicam a mobilidade dos elétrons e iões, respetivamente [2].

$$I_{arc} = \nabla V \cdot [\pi \cdot r^2 \cdot (N_e \cdot k_e + N_i \cdot k_i)] \tag{3.10}$$

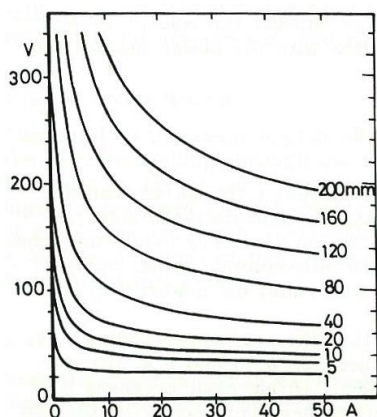


Figura 3.10 - Características tensão-corrente DC de arcos de diferentes comprimentos ocorridos no ar entre elétrodos de cobre [2]

Vários resultados provenientes de estudos experimentais do arco elétrico através do ar indicam relações entre a tensão total do arco V_{arc} e a corrente I_{arc} conforme o disposto na equação 3.11, em que a , b , c e d são constantes e l a distância entre elétrodos [2]. Exemplificando, para correntes de arco I_{arc} até 20A e $l=5\text{cm}$, as constantes desta relação assumem os seguintes valores: $a=17\text{V}$, $b=22\text{V/cm}$, $c=20\text{W}$ e $d=180\text{W/cm}$ [2].

$$V_{arc} = a + b \cdot l + (c + d \cdot l) \cdot I_{arc}^{-1} \quad (3.11)$$

Considere-se agora a figura 3.11, onde está representada a evolução temporal da corrente e da tensão para um arco elétrico através do ar num sistema AC. Está ainda representada a evolução da temperatura.

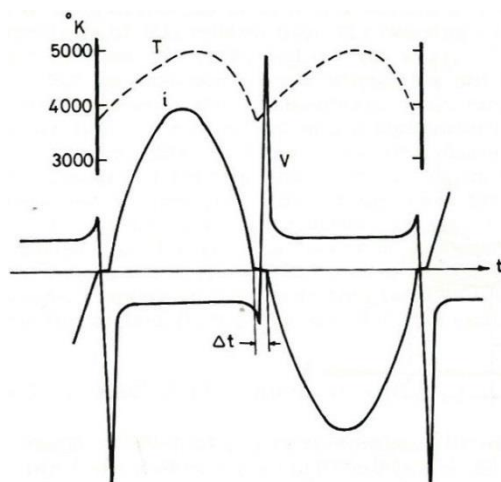


Figura 3.11 - Evolução temporal da corrente, tensão e temperatura para um arco de 50Hz e 10A entre dois elétrodos de cobre distanciado de 3mm [2]

Analisando em primeiro lugar o que ocorre na arcada positiva da corrente, tem-se que, quando esta está próxima do seu valor máximo, a tensão necessária para manter o arco será relativamente baixa. No entanto, à medida que a corrente se aproxima de zero, uma tensão cada vez maior é necessária para manter o arco. No caso de a tensão de arco não ser elevada o suficiente, dar-se-á a extinção do arco. Para que a corrente possa fluir no sentido

contrário, o que corresponde na figura à arcada negativa, é necessário que o gás sofra nova rutura elétrica, sendo então necessário uma tensão suficientemente elevada. Assim, enquanto não se dá a extinção do arco, é expectável que no início de cada meio-ciclo da onda sinusoidal de corrente a tensão seja consideravelmente maior do que o se verifica para o restante meio-ciclo. De notar ainda que a temperatura da coluna do arco varia de acordo com a corrente, mas com um ligeiro atraso [2].

3.2.5- Descargas elétricas parciais

As descargas parciais são descargas elétricas causadas por imperfeições ou descontinuidades no material isolante e que são muitas vezes acompanhadas pela emissão de som, luz, calor e reações químicas [48][49]. Uma descarga parcial é geralmente caracterizada como uma descarga elétrica que ocorre quando a região onde existem imperfeições é sujeita a um campo elétrico e onde o caminho formado pela descarga não une completamente duas extremidades da referida região [48]. A ocorrência deste fenómeno depende do campo elétrico aplicado à região e também das características da tensão aplicada [48].

A classificação das descargas parciais de acordo com a sua origem pode ser feita da seguinte forma [48][50][51]:

- **Descargas parciais internas:** ocorrem no interior de um material isolante, em cavidades ou inclusões nas quais a constante dielétrica é diferente da do material que as envolve. Quando o material é submetido a um campo elétrico, este distribui-se pelo material e a cavidade fica sujeita a um gradiente de tensão superior ao gradiente máximo suportável. Ocorrem então pequenas descargas disruptivas no interior da cavidade levando a uma deterioração progressiva do material e que pode mesmo culminar na falha do equipamento.
- **Descargas parciais superficiais:** ocorrem em gases ou líquidos na superfície dos materiais isolantes, partindo habitualmente do eléctrodo para a superfície, quando a componente do campo elétrico tangencial à superfície excede um determinado valor crítico.
- **Descargas parciais externas:** podem ocorrer em torno de arestas, pontas afiadas, em condutores e outras situações onde estejam presentes campos elétricos não uniformes e de valores de tal forma elevados que excedem o valor de rutura dielétrica do gás circundante.

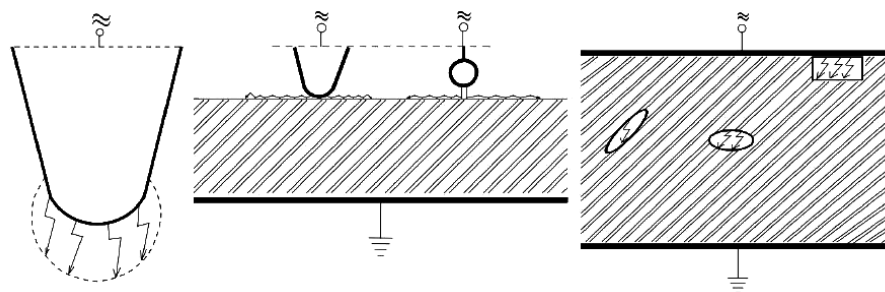


Figura 3.12 - Exemplos de descargas parciais, da esquerda para a direita: externas, superficiais e internas [51]

Para a presente dissertação assumem interesse as descargas parciais externas e as superficiais, uma vez que são os ruídos gerados por estas que são detetáveis pela inspeção de ultrassons propagados pelo ar.

Descargas parciais externas: Efeito de coroa

Em espaços onde existem campos elétricos uniformes, um aumento gradual da tensão leva normalmente à rutura completa do gás. Por outro lado, quando o campo elétrico é não uniforme, o aumento da tensão leva a que primeiro ocorram descargas elétricas nos pontos de maior intensidade do campo elétrico e que são observáveis muito antes da rutura completa ocorrer [46][52]. Estas descargas podem ser transitórias ou permanentes e constituem o designado efeito de coroa.

Quanto maior for o nível de tensão da linha em causa maior relevância assumem as descargas parciais por efeito de coroa, sendo o fenómeno agravado se não existir a possibilidade de evitar campos elétricos não uniformes. O limite mínimo de tensão para que estas descargas se verifiquem é de 1000V [57]. Este fenómeno é acompanhado por uma série de efeitos, tais como luz visível, ruído audível, perdas de energia, vibrações mecânicas e reações químicas que produzem ozono e óxidos de nitrogénio [2][48][49].

Estas descargas começam nas superfícies de elementos condutores quando o gradiente da tensão superficial destes alcança um valor crítico E_c [2][21][44]. A magnitude de E_c depende da polaridade da tensão e da pressão e temperatura do gás em causa [2]. Considerando o gás em causa como sendo o ar, a temperatura θ e a pressão do ar p são habitualmente combinadas num fator δ , designado por densidade do ar e que pode ser calculado pela expressão 3.12 [2].

$$\delta = (2,94 \cdot p)/(273 + \theta) \quad (3.12)$$

O valor do gradiente da tensão na superfície no caso de um condutor cilíndrico coaxial em AC, envolvido por ar atmosférico, para que se verifique um efeito de coroa visível é dado aproximadamente pela equação 3.13, conhecida como expressão de Peek [46]. Nesta expressão r é o raio do condutor e E_c é expresso em kV/cm.

$$E_c/\delta = 31,53 + 9,63/\sqrt{(\delta \cdot r)} \quad (3.13)$$

Como referido, o processo de descarga depende da polaridade da tensão aplicada ao elemento condutor. Quando uma tensão de valor positivo é aplicada, o aspeto visual do efeito de coroa consiste numa bainha azulada ao longo de toda a superfície do condutor [46]. Já no caso de uma tensão negativa, o efeito de coroa apresenta-se como pontos avermelhados e brilhantes ao longo do condutor, sendo que o número de pontos aumenta com o aumento do valor da corrente elétrica [46]. Assim, devido às diferenças que se verificam, é conveniente estudar o que acontece em cada um dos casos.

As designadas coroas de ânodo constituem o caso em que a tensão aplicada é positiva. No estudo das características do efeito de coroa, é importante distinguir entre o caso em que este fenómeno ocorre sob um impulso de tensão de curta duração, no qual não se dá acumulação espacial de carga, e o caso de tensões contínuas aplicadas durante um longo período de tempo. Quando um impulso positivo de tensão é aplicado a um eléctrodo pontual, a primeira ionização detetável consiste num canal ionizante [46]. Quando o nível de tensão do

impulso é aumentado, estes canais ionizantes aumentam tanto em número como em comprimento. De notar que estes canais nunca se cruzam e que a sua velocidade diminui rapidamente quando estes entram nas regiões onde se verificam valores reduzidos do campo elétrico [46]. Este processo está esquematizado na figura 3.13.

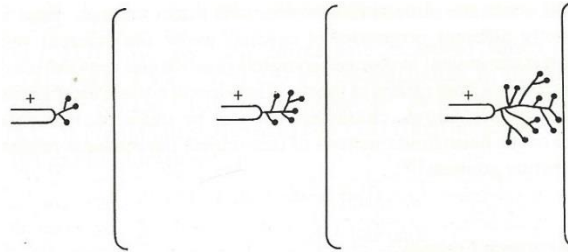


Figura 3.13 - Formação de canais ionizantes sob impulso de tensão, com aumento progressivo da duração do impulso [46]

No caso em que é aplicada uma tensão contínua durante um período de tempo teoricamente infinito, as cargas resultantes do fenómeno de ionização terão tempo para se movimentarem no espaço e acumularem-se de tal forma que provocarão distorção do campo elétrico verificado inicialmente. Considere-se então uma situação inicial onde está presente um campo elétrico não homogéneo e na qual se tem um eléctrodo plano em forma de haste com o terminal circular à semelhança do presente na figura 3.13, sujeito a uma tensão contínua positiva e a uma distância da terra tal que se verifica a não homogeneidade do campo elétrico. Aumentando o valor da tensão, numa fase inicial verificam-se descargas ligeiramente ramificadas e filamentosas, à semelhança do que acontecia para o caso do impulso de tensão. Neste caso, os canais irão desenvolver-se com frequências distintas, gerando correntes que são proporcionais ao seu comprimento. Aumentando ainda mais o valor da tensão, surgirão mais canais, até que esta atividade transitória pára e a descarga se torna autossustentável, verificando-se um brilho estável em torno do ânodo [46]. Verifica-se então em torno deste uma corrente que, embora seja variável, é também contínua [46]. Elevando ainda mais a tensão verifica-se um aumento da luminosidade que corresponde a mais numerosos e mais severos canais ionizantes, até que é atingido um valor crítico de tensão que leva à rutura completa do gás [46].

Outra situação ocorre quanto a tensão aplicada ao eléctrodo é negativa e surgem as designadas coroas de cátodo. Neste caso verifica-se que acima de determinado valor de tensão a corrente é formada por impulsos regulares, sendo estes designados por impulsos de *Trichel* [46]. Com o aumento da tensão aumenta também a frequência dos impulsos de corrente, dependendo esta frequência do raio do cátodo, do espaço entre eléctrodos e da pressão do gás [46]. Apenas com um grande aumento da tensão é possível verificar a transição dos impulsos de *Trichel* para a situação de descarga autossustentável. Aumentando ainda mais a tensão, esta descarga persiste até que ocorre a rutura. De notar que a rutura sob polaridade negativa ocorre para valores de tensão superiores aos que se verificam sob polaridade positiva, exceto para pressões reduzidas [46].

Relativamente ao efeito de coroa em sistemas AC, a principal diferença relativamente ao efeito de coroa ocorrido num sistema DC reside no facto de que, nos sistemas AC, ocorre uma alteração periódica na direção do campo elétrico aplicado. Este facto exerce influência sobre a distribuição de cargas residual proveniente do meio-ciclo precedente [2]. Assim, os fenómenos característicos do efeito de coroa de ânodo podem aparecer durante um curto

período de tempo, ao passo que os fenómenos associados às coroas de cátodo, nomeadamente os impulsos de *Trichel*, são facilmente verificáveis [2]. Importante ainda notar que, de acordo com o já referido, a rutura sob polaridade negativa ocorre para valores de tensão superiores aos que se verificam sob polaridade positiva, levando isto a que em sistemas AC no caso de ocorrer rutura esta verifica-se sempre durante o meio-ciclo positivo da onda de tensão [46].

Descargas parciais superficiais

Este fenómeno ocorre quando a componente tangencial do campo eléctrico à superfície excede um determinado valor crítico, iniciando-se assim o processo de descarga parcial, normalmente de um eléctrodo para a superfície [54]. Na figura 3.14 está representado um caso típico em que há um espaço vazio entre um eléctrodo curvo e o material dieléctrico [54]. Um dos locais onde habitualmente se verificam estes fenómenos é em saias de isoladores [54].

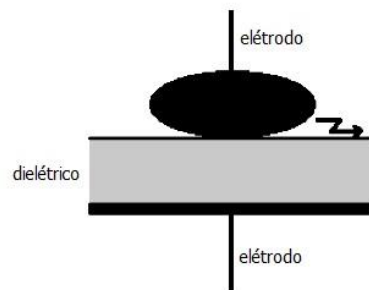


Figura 3.14 - Exemplo de descarga parcial na superfície de um dieléctrico, desde um eléctrodo curvo [54]

Em sistemas AC, estas descargas parciais superficiais ocorrem durante o primeiro e terceiro quartos de cada ciclo da onda, tal como ilustra a figura 3.15 [55].

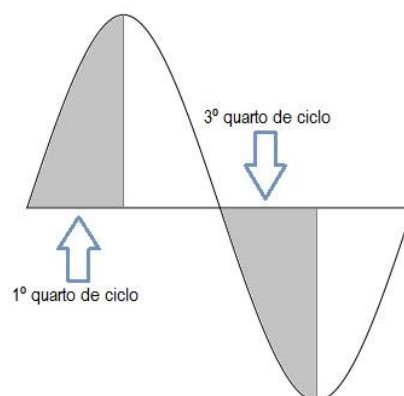


Figura 3.15 - Ilustração dos pontos da onda sinusoidal de tensão onde podem ocorrer as descargas parciais superficiais, a cinzento

Verifica-se então que é quando a magnitude da onda aumenta que as descargas ocorrem, podendo isto ser explicado modelizando o espaço onde ocorrem as descargas. Um modelo

simplificado que permite fazer esta análise consiste num componente capacitivo em paralelo com uma resistência, tal como se observa na figura na figura 3.16 [55].

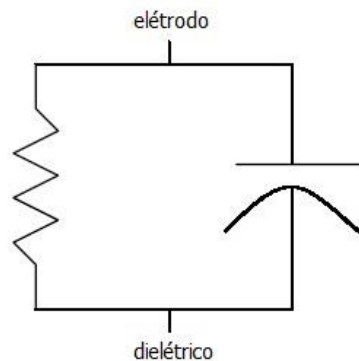


Figura 3.16 - Modelo simplificado para a análise de descargas parciais, que neste caso ocorrem de um eletrodo para uma superfície isolante [55]

Considerando então este modelo, tem-se que durante o aumento inicial da tensão, o condensador é carregado até que a tensão crítica para que ocorra a descarga é atingida, momento a partir do qual ocorrem as descargas parciais na superfície do dielétrico. Quando o valor da tensão no meio ciclo positivo da onda entra na fase descendente, a tensão nos terminais do circuito sofrem também uma redução. Sendo que a tensão aos terminais do condensador não se altera instantaneamente, quando a onda passa por zero existe ainda alguma carga capacitiva. No entanto, durante o terceiro quarto de ciclo da onda, a polaridade da tensão do circuito é efetivamente invertida, resultando no carregamento do condensador com polaridade contrária ao que acontecia para o meio ciclo positivo e levando ao consequente aparecimento de descargas parciais de forma análoga ao que explicado anteriormente [55].

Estas descargas elétricas, caso assumam um carácter repetitivo, conduzem à degradação da superfície isolante onde ocorrem as sucessivas descargas criando caminhos condutores, num processo designado por *tracking* [56]. Esta degradação ocorre pois as descargas libertam calor e outras formas de energia que causam erosão do material [49].

As descargas por efeito de coroa podem também evoluir para *tracking*, pois originam ozono e óxidos de nitrogénio que quando combinados com humidade resultam em ácido nítrico [48][57]. Este ácido é destrutivo para a maioria dos dielétricos e para certos metais, originando corrosão e depositando materiais condutores nas superfícies que causam o aparecimento de descargas parciais no material isolante [48][57]. Devido às suas características, o *tracking* é denominado em alguma literatura como efeito de coroa destrutivo e também como *baby arcing* (arco embrionário) [58][59].

Capítulo 4

Acústica e Ultrassons

Neste capítulo são expostos os conceitos base mais relevantes relacionados com as ondas sonoras, a sua origem e propagação. É também abordada a possibilidade de estabelecer uma relação entre os ultrassons e os defeitos elétricos que os originam.

4.1- Ondas sonoras

Quanto à sua origem uma onda pode ser classificada como mecânica ou eletromagnética. Enquanto que uma onda mecânica resulta de uma perturbação em determinado meio material, as ondas eletromagnéticas têm a sua origem na variação de um campo elétrico e um campo magnético [53]. Devido à sua natureza, as ondas mecânicas necessitam de meio material para se propagarem, ao contrário das ondas eletromagnéticas que têm a capacidade de se propagarem no vácuo [53]. As ondas sonoras são assim classificadas como ondas mecânicas, resultado de serem originadas por variações rápidas de pressão num meio material e de necessitarem deste para se propagarem.

4.1.1- Características de uma onda

Uma onda é tipicamente caracterizada por diversos parâmetros, nomeadamente o período, a frequência, a amplitude, o comprimento de onda e a velocidade de propagação. No caso de uma onda sonora é ainda importante compreender o conceito de intensidade sonora. De seguida são então definidos esses conceitos:

- **Período:** o período T de uma onda consiste no intervalo de tempo necessário para que ocorra uma oscilação completa, ou seja, para que um mesmo fenómeno se repita. A unidade sistema internacional (SI) é o segundo, s . Uma onda pode também ser não periódica, ou seja, pode não ter um período. Isto acontece quando o carácter repetitivo anteriormente referido não se verifica.
- **Amplitude:** a amplitude Y de uma onda consiste no afastamento máximo que as partículas sofrem relativamente à posição de equilíbrio. Este ponto de afastamento máximo é designado por crista da onda. A unidade a utilizar para quantificar esta

grandeza varia de acordo com o tipo de onda em causa, sendo que nas ondas sonoras é habitual utilizar-se o decibel, dB. Esta característica de uma onda sonora permite classificar um som como forte ou fraco. Um som é tanto mais forte quanto maior a amplitude da onda. Opostamente, um som será tanto mais fraco quanto menor a amplitude da onda sonora.

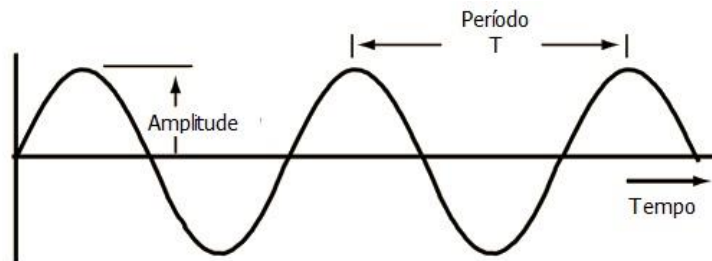


Figura 4.1 - Caracterização gráfica do período e amplitude de uma onda sinusoidal

- **Frequência:** a frequência f de uma onda consiste no número de oscilações por unidade de tempo. A unidade SI correspondente é o Hertz, Hz, que equivale ao número de oscilações por segundo. A frequência está relacionada com o período através da expressão 4.1.

$$f = 1/T \quad (4.1)$$

A frequência de determinado som é o que o permite definir como grave ou agudo. Assim, quanto maior for a frequência de determinada onda sonora, mais agudo será o som. Por outro lado, quanto menor for a frequência mais grave será o som.

- **Comprimento de onda:** o comprimento de onda λ consiste na distância mínima entre dois pontos consecutivos onde a perturbação da onda se repete. Assim, o comprimento de onda pode ser obtido calculando, por exemplo, a distância entre duas cristas consecutivas da onda. A unidade SI é o metro, m.
- **Velocidade de propagação:** a velocidade de propagação c de uma onda é a distância percorrida pela onda por unidade de tempo. A velocidade pode ser calculada através da expressão 4.2 e em unidades SI o resultado é expresso em metros por segundo, m/s.

$$c = \lambda/T = f \cdot \lambda \quad (4.2)$$

- **Intensidade sonora:** a intensidade sonora I_{son} pode ser definida como a energia que a onda sonora transporta por unidade de tempo por unidade de área, tal como consta da expressão matemática 4.3 [60]. Em unidades SI, a intensidade sonora é expressa em watt por metro quadrado, W/m².

$$I_{son} = Potência/Área \quad (4.3)$$

É então perceptível que quanto mais intensa é uma determinada onda sonora, maior é a energia transportada pela onda.

No entanto, existe um problema relacionado com a aplicação expressão 4.3. Devido à ampla faixa de variação da intensidade sonora, exprimir o seu valor em W/m² não é praticável. Tal levaria a representar linearmente uma gama de variação em que o valor

máximo é cerca de cinco milhões de vezes superior ao valor mínimo [61]. O mesmo acontece para a unidade Pascal, Pa. Por outro lado, o ouvido humano segue uma curva de sensibilidade auditiva logarítmica, em que a sensibilidade do ouvido é maior para os sons menos intensos e menor para os sons mais intensos [61]. Assim, de forma a facilitar a representação do som é utilizada uma escala que leva em conta esta resposta logarítmica do ouvido humano [61]. Então, uma unidade que é aplicável na prática é o Bell, B. Esta permite a comparação entre a intensidade de dois sons distintos, sendo que um deles é o som de referência com intensidade I_{ref} e o outro é o som do qual se pretende medir a intensidade I_{son} . Obtém-se então uma medida relativa da intensidade sonora, designada por nível de intensidade sonora NIS , que permite comprimir a ampla variação que se verifica na escala linear pela transformação desta numa escala logarítmica. Obtém-se então a expressão 4.4, em que o valor de I_{ref} corresponde ao limiar da audibilidade, ou seja, 10^{-12} W/m^2 [61].

$$NIS = \log(I_{son}/I_{ref}) \quad (4.4)$$

Esta expressão pode ainda ser melhorada, utilizando-se a unidade decibel, dB [61]. Sabendo que o decibel é a décima parte do Bell, obtém-se a expressão 4.5.

$$NIS = 10 \cdot \log(I_{son}/I_{ref}) \quad (4.5)$$

4.1.2- Propagação das ondas sonoras

Assumindo que o meio pelo qual uma onda sonora se propaga é um meio composto por partículas discretas, estas partículas oscilam em torno do seu ponto de equilíbrio quando são submetidas à passagem da onda. Considerando que o meio em estudo é um meio elástico e sabendo que as ondas mecânicas se propagam em qualquer direção, os tipos de ondas existentes podem subdividir-se em ondas longitudinais, transversais ou superficiais. As ondas longitudinais são o tipo de onda que se apresenta como relevante para o desenvolvimento da presente dissertação, isto porque a deteção dos ultrassons emitidos pelos defeitos elétricos será feita pelo ar e são estas as únicas que têm a capacidade de se propagarem através deste meio. No entanto, tendo em conta os diferentes módulos que a instrumentação de ultrassons possui e que permitem detetar os restantes tipos de ondas, e visando futuros trabalhos, será feito um breve estudo das ondas transversais e superficiais.

Ondas longitudinais

Uma onda longitudinal é definida como um onda cujo movimento das partículas no meio de propagação se dá na mesma dimensão da direção de propagação da onda [62]. As ondas longitudinais criam áreas de compressão e rarefação no meio onde se propagam. Nas áreas de compressão as partículas do meio encontram-se mais próximas entre si, ou seja, existe uma maior densidade. Por outro lado, nas áreas de rarefação as partículas do meio encontram-se mais distantes, ou seja, a densidade é menor. O mecanismo de propagação de uma onda longitudinal encontra-se ilustrado na figura 4.2, onde é possível observar zonas de compressão e de rarefação, correspondentes às referidas zonas de maior e menor densidade, respetivamente.

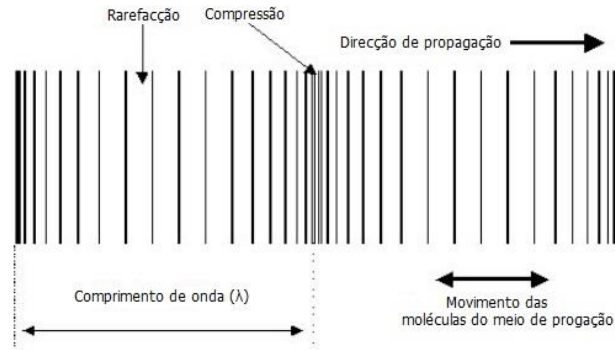


Figura 4.2 - Propagação de uma onda longitudinal [62]

No caso em que é aplicada uma tensão contínua durante um período de tempo teoricamente infinito, as cargas resultantes do fenómeno de ionização terão tempo para se movimentarem no espaço e acumularem-se de tal forma que provocarão distorção do campo elétrico verificado inicialmente.

A velocidade das ondas longitudinais c_l é independente da frequência e é dada pela expressão 4.6, onde E_Y é o módulo de elasticidade de Young, ρ é a densidade do material onde a onda se propaga e ν é o coeficiente de Poisson desse material [63].

$$c_l = \sqrt{[(E_Y \cdot (1 - \nu)) / (\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu))]} \quad (4.6)$$

Ondas transversais

Quanto às ondas transversais, a oscilação das partículas do meio de propagação faz-se em planos perpendiculares à direção de propagação da onda, tal como representado na figura 4.3.

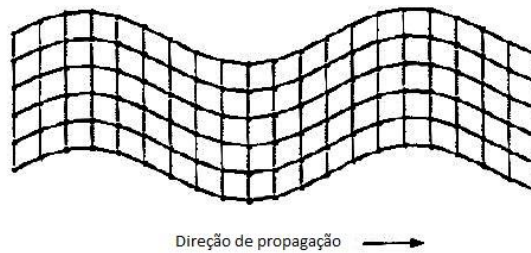


Figura 4.3 - Propagação de uma onda transversal [63]

A velocidade das ondas transversais, c_s , é também independente da frequência e é dada pela expressão 4.7 [63].

$$c_s = \sqrt{[E_Y / (2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu))]} \quad (4.6)$$

Ondas superficiais

As ondas sonoras podem também propagar-se na superfície de materiais sólidos. A sua propagação é concetualmente semelhante, embora matematicamente diferente, à das ondas que se observam à superfície de um corpo de água [63][64]. As ondas superficiais são muitas vezes designadas por ondas de *Rayleigh*. Estas ondas propagam-se como um deslocamento

sucessivo da superfície acima e abaixo da posição de equilíbrio, a uma velocidade c_R que é independente da frequência e dada de forma aproximada pela expressão 4.7 [64].

$$c_R = 0,9 \cdot c_S \quad (4.7)$$

Existem algumas variantes das ondas superficiais, como é o caso das ondas *Love*, que se propagam paralelamente à superfície do material mas transversalmente à direção de propagação.

O mecanismo de propagação das ondas *Love* e das ondas *Rayleigh* pode ser observado na figura 4.4.

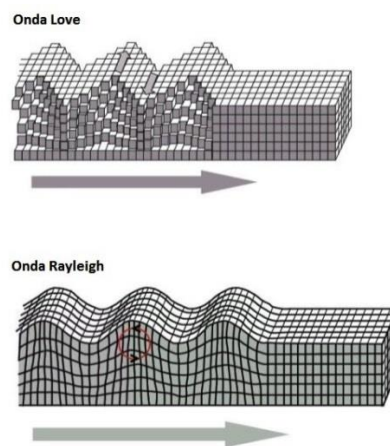


Figura 4.4 - Propagação das ondas superficiais *Love* e *Rayleigh* [62]

4.1.3- Domínio dos tempos e domínio das frequências

Considere-se uma fonte sonora que vibra sinusoidalmente e que é escolhido um local, a uma distância específica dessa fonte sonora, para analisar a variação temporal do movimento e da densidade das partículas do ar. As representações da vibração das partículas do ar ou da variação da pressão do ar ao longo do tempo designam-se por representações no domínio dos tempos.

No estudo teórico do fenómeno de propagação de ondas sonoras, é habitual considerarem-se ondas sinusoidais. No entanto, e embora muito importantes no estudo da acústica, na realidade é muito difícil encontrar sons que sejam ondas sinusoidais puras. Normalmente, os sons são ondas mais complexas com padrões não sinusoidais [65]. Assim, e de forma a ser possível efetuar uma análise mais detalhada de determinado sinal sonoro, além da representação no domínio dos tempos é importante ter em conta outro método de representação, nomeadamente a representação no domínio das frequências. Existem dois tipos de representações no domínio das frequências que são utilizadas para caracterizar um som. Uma dessas representações é o espectro de amplitude da onda. Outra, não tão relevante como a anterior, é o espectro de fase. O espectro de amplitude da onda consiste num gráfico onde se mostram que frequências estão presentes num determinado sinal e com que amplitudes estão presentes. Normalmente, o eixo das abcissas corresponde às frequências e o eixo das ordenadas corresponde às amplitudes. Quanto ao espectro de fase, este corresponde a uma representação das frequências que constituem o sinal sonoro e qual a sua fase.

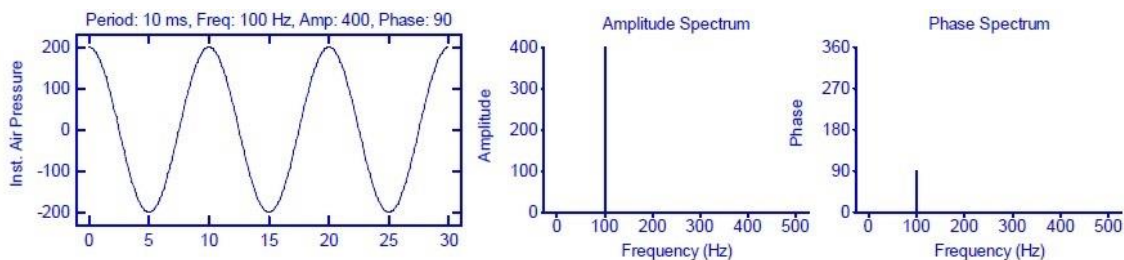


Figura 4.5 - Representação no domínio temporal e dos espectros de amplitude e de fase de uma onda sinusoidal pura [65]

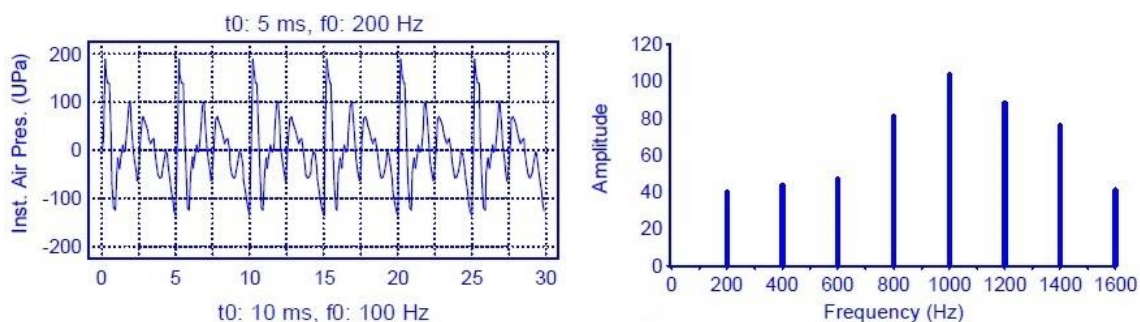


Figura 4.6 - Representação no domínio temporal e no domínio das frequências de uma onda sonora não sinusoidal [65]

4.1.4- Espectro sonoro

Segundo a sua frequência, as ondas sonoras podem ser classificadas da seguinte forma [60]:

- **Ondas infrassônicas:** ondas sonoras cuja frequência é inferior a 20Hz;
- **Ondas audíveis:** ondas sonoras cuja frequência está compreendida entre os 20Hz e os 20kHz;
- **Ondas ultrassônicas:** ondas sonoras cuja frequência é superior a 20 kHz.

O conjunto dos três tipos de ondas acima referidos constitui o espectro sonoro. Este encontra-se representado na figura 4.7 e pode ser definido como o conjunto das frequências de vibração que podem ser produzidas pelas diversas fontes sonoras [66].

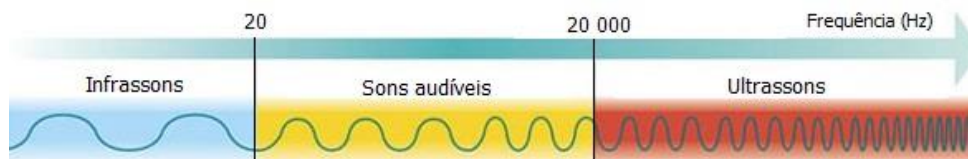


Figura 4.7 - Espectro sonoro [67]

4.1.5- Fenómenos ondulatórios

Os principais fenómenos que ocorrem quando uma onda sonora se propaga em determinado meio são: reflexão, refração, difração, interferência entre ondas e atenuação. Segue-se uma breve explicação destes fenómenos ondulatórios.

- **Reflexão:** o fenómeno de reflexão acontece quando uma onda muda de direção ao embater numa superfície lisa sem que mude de meio de propagação. Quando a reflexão acontece numa superfície rugosa, a onda reflete-se em todas as direções e o fenómeno designa-se por difusão [68].

No fenómeno de reflexão existem três elementos a ter em conta: a onda incidente, a perpendicular à superfície e a onda refletida. Designa-se por ângulo de incidência o ângulo formado entre a perpendicular à superfície e a onda incidente. Já o ângulo entre a perpendicular à superfície e a onda refletida designa-se por ângulo de reflexão [68].

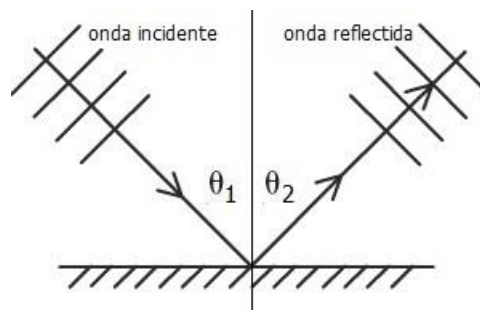


Figura 4.8 - Fenómeno de reflexão de uma onda sonora [69]

- **Difração das ondas:** designa-se por difração o desvio ou espalhamento que uma onda sofre quando contorna ou transpõe determinado obstáculo. Quanto mais próximos são o comprimento de onda e a dimensão do obstáculo maior é o fenómeno de difração. Por outro lado, se o comprimento de onda e o tamanho do obstáculo forem muito diferentes, o fenómeno de difração é impercetível [68].

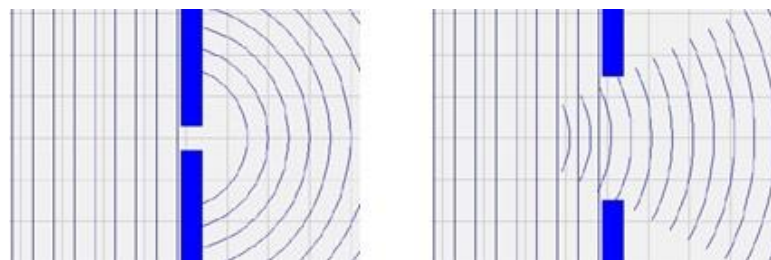


Figura 4.9 - Fenómeno de difração com um obstáculo de dimensão semelhante ao comprimento de onda, à esquerda, e com um obstáculo de dimensão diferente do comprimento de onda, à direita [68]

- **Refração:** designa-se por refração de uma onda a mudança de direção e de velocidade sofrida pela onda quando esta passa de um meio de propagação para um outro diferente do anterior. Cada meio tem um índice de refração distinto [68].

No estudo do fenómeno de refração existem também três elementos principais a considerar: a onda incidente, a perpendicular à superfície e a onda refratada. Analogamente ao que acontece para o fenómeno de reflexão, denomina-se por ângulo

incidente o ângulo entre a perpendicular à superfície e a onda incidente. Ao ângulo entre a perpendicular e a onda refratada dá-se o nome de ângulo de refração [68].

Quando a onda passa de um meio para outro em que se propaga mais rapidamente, a onda refratada aproxima-se da perpendicular com a superfície de separação dos meios, enquanto que se a onda passar de um meio para outro onde se propaga mais lentamente, a onda refratada afasta-se da perpendicular [68].

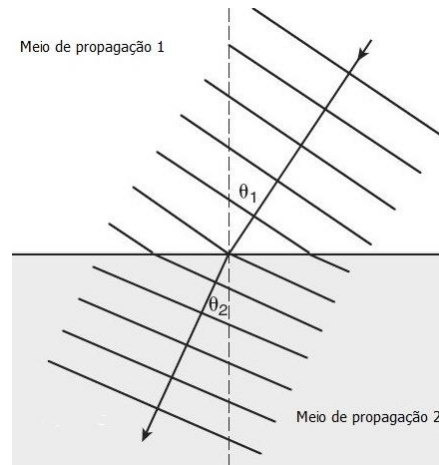


Figura 4.10 - Fenómeno de refração de uma onda sonora [70]

- **Interferência entre ondas:** consiste na sobreposição de duas ou mais ondas. Esta interferência pode ser construtiva ou destrutiva. A construtiva acontece quando as ondas que se sobrepõem se encontram em fase, obtendo uma onda de maior amplitude do que as ondas iniciais. Por outro lado, a sobreposição destrutiva acontece quando as ondas sobrepostas estão em antifase, obtendo-se assim uma onda de menor amplitude que as ondas iniciais [68]. Geralmente as interferências destrutivas são indesejáveis e devem ser eliminadas, enquanto que as construtivas são geralmente obtidas de forma voluntária [68].
- **Atenuação:** ao propagar-se, uma onda sonora sofre uma diminuição da sua intensidade [71]. Esta atenuação é proporcional à frequência, ou seja, um som com uma frequência elevada sofre uma maior atenuação do que outro som de frequência inferior [71]. A atenuação das ondas sonoras no ar depende também das condições atmosféricas, ou seja, da temperatura, da pressão e da humidade [72].

4.2- Ultrassons e fenómenos elétricos

Verifica-se empiricamente que a cada tipo de fenómeno eléctrico está associado um ruído diferente [57]. Isto significa, por exemplo, que aquando da ocorrência do arco eléctrico são emitidos ultrassons distintos dos que seriam no caso de estarmos na presença de um fenómeno de efeito de coroa ou de *tracking*. Assim, é possível associar determinado padrão de ultrassons ao fenómeno eléctrico que o gerou, como se constata nas subsecções que se seguem e das quais constam exemplos (fornecidos com o programa *UE Spectralyzer 4.2*) dos ultrassons emitidos por diferentes fenómenos eléctricos em casos específicos.

4.2.1- Arco elétrico

Na figura 4.11 está representado, no domínio temporal, um ruído ultrassónico típico emitido por um arco elétrico. Como no arco elétrico as descargas podem ocorrer em qualquer ponto da onda de sinal, verifica-se a não uniformidade que é observável na figura. Sendo este o fenómeno elétrico mais severo dos estudados, é frequente observarem-se descargas que duram por períodos extensos quando em comparação com as descargas verificadas nos restantes fenómenos elétricos. A amplitude é variável de acordo com a severidade das descargas e o tempo entre descargas é, geralmente, curto [73].

Na figura 4.12 é apresentado o mesmo sinal mas agora no domínio das frequências. São então perceptíveis as perdas de harmónicos à medida que se avança na frequência.

O som característico do arco elétrico que é audível com a instrumentação de deteção de ultrassons consiste em ruídos não contínuos, com aumentos e diminuições abruptas da intensidade sonora [73].

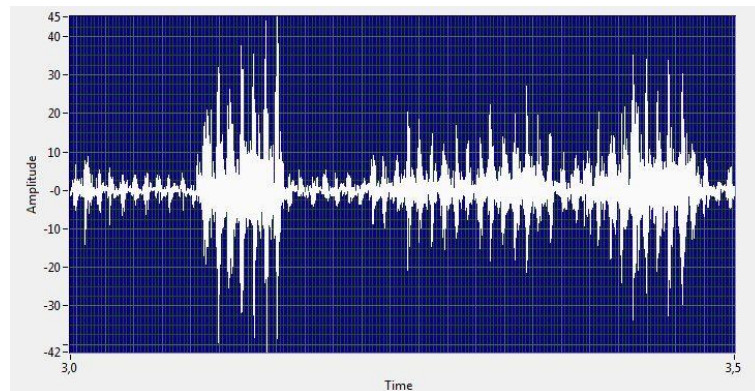


Figura 4.11 - Exemplo dos ultrassons gerados pelo arco elétrico. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

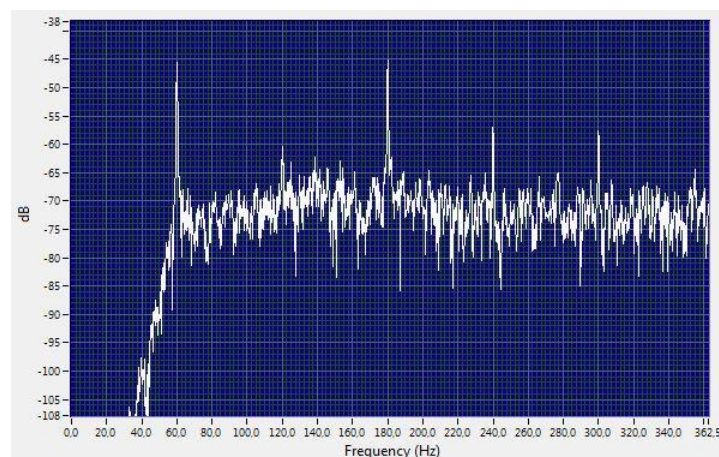


Figura 4.12 - Exemplo dos ultrassons gerados pelo arco elétrico. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)

De notar ainda que a frequência fundamental no exemplo apresentado é de 60Hz uma vez que as medições que deram origem aos dados apresentados foram realizadas nos Estados Unidos da América. Caso estas medições tivessem sido feitas em Portugal, a frequência

fundamental seria de 50Hz, uma vez que é esta a frequência da rede. Esta observação é válida também para os espectros apresentados nas figuras 4.14 e 4.16.

4.2.2- Efeito de coroa

Na figura 4.13 está representado no domínio temporal o típico ruído ultrassónico gerado por um fenómeno de efeito de coroa. É observável a uniformidade dos ultrassons tanto na amplitude dos picos como no espaçamento entre estes.

Na figura 4.14 é apresentado o mesmo sinal, agora no domínio das frequências. Para a frequência fundamental e seus harmónicos são evidentes os picos pronunciados. Entre os harmónicos da frequência fundamental o conteúdo espectral é baixo, cerca de metade do valor dos picos [73].

O som característico do efeito de coroa que é audível com a instrumentação de deteção de ultrassons consiste num “zumbido” permanente e constante [73].

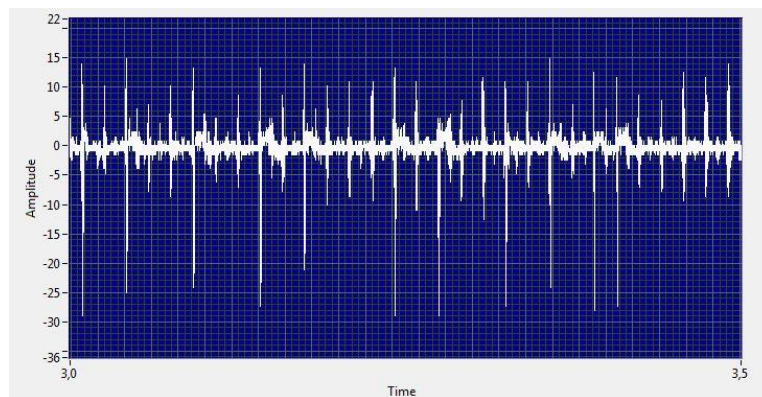


Figura 4.13 - Exemplo dos ultrassons gerados pelo efeito de coroa. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

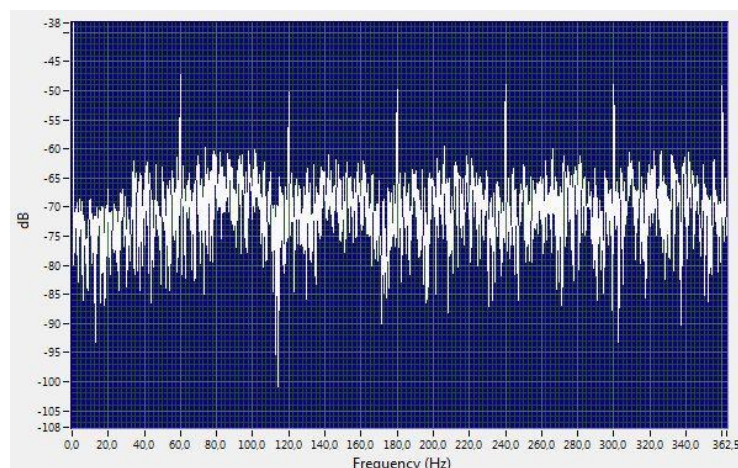


Figura 4.14 - Exemplo dos ultrassons gerados pelo efeito de coroa. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)

4.2.3- Descargas parciais superficiais

De acordo com o exemplo da figura 4.15, aquando da ocorrência de descargas parciais superficiais é possível verificar periodicidade entre os picos da onda de ultrassons. O espectro de frequências correspondente a esta situação encontra-se na figura 4.16, no qual é possível identificar alguns dos primeiros harmônicos da frequência fundamental, verificando-se depois uma perda destes à medida que se avança na frequência.

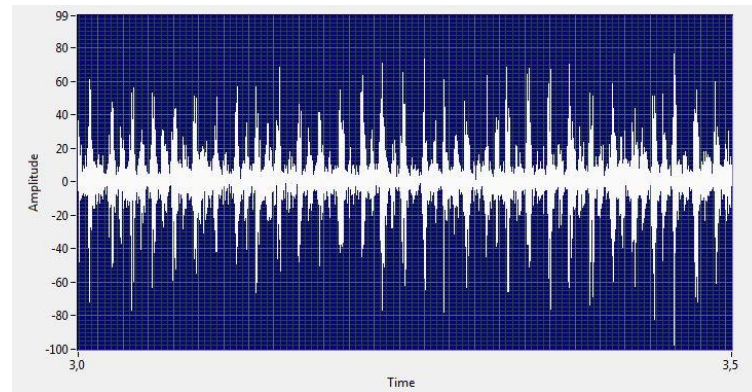


Figura 4.15 - Exemplo dos ultrassons gerados por descargas parciais superficiais. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

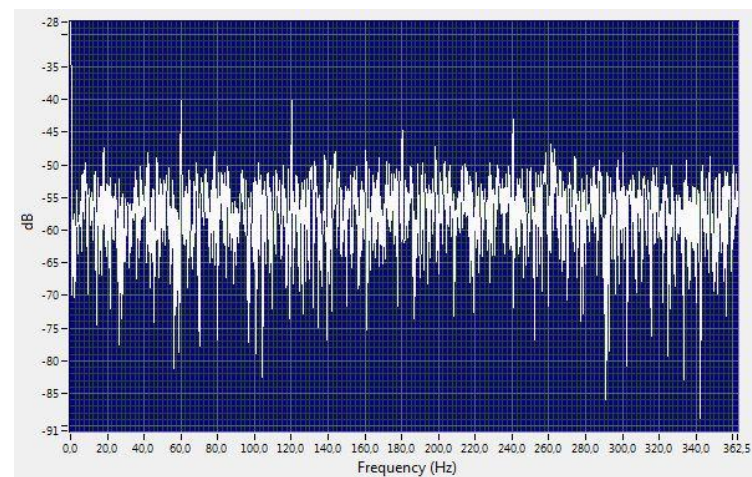


Figura 4.16 - Exemplo dos ultrassons gerados por descargas parciais superficiais. Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)

Capítulo 5

Tecnologia de Ultrassons

Neste capítulo são identificadas algumas áreas de aplicação da tecnologia de ultrassons. É também apresentada a instrumentação utilizada durante os ensaios laboratoriais e estudados conceitos base do seu funcionamento.

5.1- Áreas de aplicação

As tecnologias que utilizam ultrassons são utilizadas nas mais diversas aplicações, desde as mais populares, como os sonares e a imagiologia médica, até outras menos conhecidas, como na medição de espessuras, na homogeneização de líquidos, em emulsões, na desintegração de material fibroso, na desgaseificação de líquidos, entre outros [74].



Figura 5.1 - Aplicação de tecnologia de ultrassons na imagiologia médica: ecografia [75]

5.1.1- Ultrassons na monitorização e manutenção preventiva

A manutenção preditiva e monitorização de sistemas é outra área em que as tecnologias de ultrassons são aplicadas. Na atualidade, a eficiência na indústria assume um papel cada vez mais importante, de forma a garantir serviços de elevada qualidade tendo sempre em

consideração aspetos económicos e ambientais. Então, identificar possíveis anomalias que existam em sistemas elétricos e mecânicos revela-se essencial. Para tal, verifica-se uma aplicação crescente das tecnologias de ultrassons em três principais vertentes: deteção de fugas, inspeções mecânicas e inspeções elétricas [76]. A deteção de fugas consiste na localização destas em sistemas pressurizados e sistemas de vácuo. Estas fugas podem ocorrer em diversos pontos do sistema, como em válvulas, purgadores e tubos. As inspeções mecânicas referem-se à deteção e análise de alterações no funcionamento de equipamento mecânico, como por exemplo motores, de tal forma a que seja possível planear e proceder a ações corretivas caso seja necessário. A vertente das inspeções elétricas, que das três é a menos estudada e aplicada, permite a deteção de defeitos em componentes de sistemas elétricos, uma vez que a estes defeitos está associada a emissão de ultrassons que são posteriormente analisados de forma a perceber qual o defeito em causa.



Figura 5.2 - Inspeção a linhas aéreas pela deteção de ultrassons propagados pelo ar [77]

5.2- Funcionamento do detetor de ultrassons

O funcionamento do detetor de ultrassons utilizado nesta dissertação está descrito no diagrama de blocos da figura 5.3.

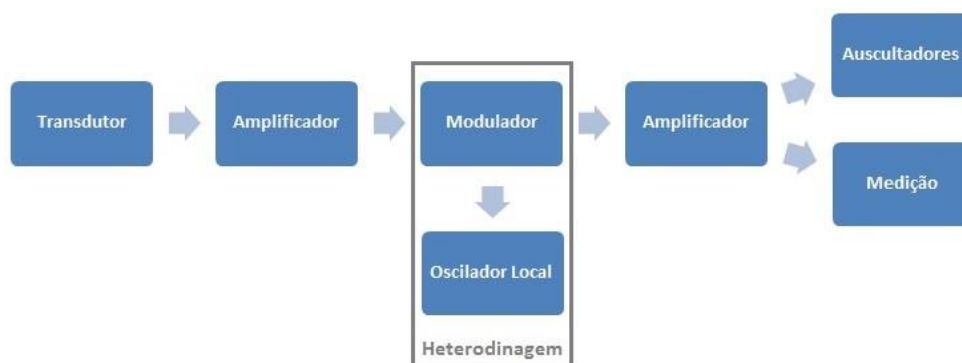


Figura 5.3 - Diagrama de blocos relativo ao funcionamento do detetor de ultrassons

As ondas de ultrassons são captadas por um sensor piezoelétrico que no diagrama é identificado pelo bloco *Transdutor*. A energia mecânica proveniente das ondas de ultrassons é convertida em sinais elétricos pelo transdutor, sendo estes seguidamente amplificados, tal como indicado pelo bloco *Amplificador*. Como estes sinais se encontram a frequências demasiado elevadas para que seja possível ao utilizador ouvir o som correspondente através dos auscultadores, o sinal de ultrassom passa por um processo de heterodinagem, descrito na subsecção 5.2.2 e representado pelos blocos *Modulador* e *Oscilador Local*. O sinal interno

proveniente do oscilador permite ao utilizador definir a frequência de acordo com as especificidades da inspeção em causa. O sinal que sai *Modulador* é amplificado e enviado para o circuito de medição e para os auscultadores.

5.2.1- Piezoeletricidade

Define-se como efeito piezoelétrico a característica apresentada por alguns materiais que quando deformados mecanicamente produzem cargas elétricas. O efeito inverso também pode ocorrer, isto é, quando sujeitos a uma determinada tensão elétrica os materiais deformam-se mecanicamente. Os primeiros materiais identificados como piezoelétricos foram o quartzo, a turmalina e os sais de *Rochelle* [78]. A partir de 1940 certas cerâmicas, em particular a titanite de bário e a titanite de zircônio, têm sido fabricadas como materiais piezoelétricos [78]. Uma das condições elementares para que um cristal seja piezoelétrico é este não possuir um centro de simetria, uma vez que o efeito piezoelétrico tem origem na anisotropia do cristal e na resposta não uniforme a um estímulo externo que daí resulta [79]. Quando impostas determinadas condições externas ao material piezoelétrico, ocorre a separação espontânea de carga dentro da estrutura cristalina, num fenómeno que se designa por polarização espontânea e que resulta do deslocamento dos iões positivos em relação aos iões negativos dentro do cristal [80]. Esta situação leva à criação de um dipolo elétrico e conseqüente aparecimento de uma tensão elétrica [80].

Sensores piezoelétricos

Os instrumentos de deteção de ultrassons captam as ondas ultrassónicas através de sensores piezoelétricos. Um sensor é um dispositivo que converte um estímulo em um sinal que pode ser medido. Idealmente os sensores monitorizam parâmetros de um sistema sem que ocorra troca de energia entre o sensor e o sistema a ser medido. Porém, para ser possível medir determinado parâmetro de um sistema, é necessário interagir energeticamente com esse sistema, adicionando ou retirando-lhe energia [80]. Então, um sensor é um transdutor que deve ter uma impedância de entrada elevada e que pode ser definido como um dispositivo que transforma um tipo de energia noutra [80]. No caso dos transdutores piezoelétricos, ocorre a transformação de energia mecânica em energia elétrica e vice-versa, comportando-se assim como sensores de deformação, que ao serem estimulados pelas ondas mecânicas ultrassónicas produzem energia elétrica. Uma das principais vantagens destes sensores relativamente aos sensores de deformação tradicionais é a sua alta sensibilidade, que permite que deformações inferiores a $0,1\mu\text{m/m}$ possam ser facilmente percetíveis [80].

5.2.2- Heterodinagem

Os instrumentos de deteção de ultrassons permitem obter informação de três formas distintas e complementares:

- Analiticamente, pela análise espectral dos sons recolhidos utilizando um *software* adequado;
- Quantitativamente, pela quantificação em tempo real da intensidade sonora do ultrassom captado;
- Qualitativamente, pela possibilidade que oferece ao utilizador de “ouvir” os ultrassons através do uso de auscultadores.

Como já foi escrito, o ouvido humano não é capaz de ouvir sons dentro da gama de frequências na qual se encontram os ultrassons. Assim, para que a instrumentação de ultrassons tenha a capacidade de fornecer a informação da forma qualitativa anteriormente descrita, é necessário que o sinal de ultrassom captado seja processado de tal forma que se torne audível para o ser humano. Isto é conseguido através de um processo eletrônico designado por heterodinagem.

No processo de heterodinagem, o sinal que se encontra numa determinada gama de frequências é deslocado para uma outra gama, num conceito baseado numa das propriedades da transformada de *Fourier*, nomeadamente a que se refere ao produto no domínio do tempo de um sinal por uma onda sinusoidal e a translação do sinal que daí resulta [81]. Para compreender este processo, considere-se o caso muito simples ilustrado na figura 5.4, onde está representado um multiplicador analógico.

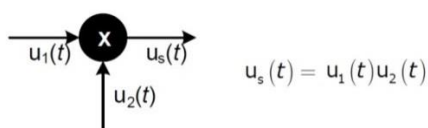


Figura 5.4 - Multiplicador analógico [81]

Nesta situação, a saída $u_s(t)$ é igual ao produto das entradas $u_1(t)$ e $u_2(t)$. Admita-se agora que as entradas $u_1(t)$ e $u_2(t)$ são duas sinusoides, tal como consta das expressões 5.1 e 5.2.

$$u_1(t) = Y_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \quad (5.1)$$

$$u_2(t) = Y_2 \cdot \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (5.2)$$

A multiplicação destas sinusoides terá como resultado $u_s(t)$ tal como indicado na expressão 5.3.

$$u_s(t) = [(Y_1 Y_2)/2] \cdot \cos[(w_1 t + \varphi_1) + (w_2 t + \varphi_2)] + [(Y_1 Y_2)/2] \cdot \cos[(w_1 t + \varphi_1) - (w_2 t + \varphi_2)] \quad (5.3)$$

Assim, considerando como exemplo que $f_1 = 40\text{kHz}$ e $f_2 = 30\text{kHz}$, ter-se-á na saída duas outras sinusoides, uma com frequência de 10kHz e outra com frequência de 70kHz . Este princípio encontra-se ilustrado na figura 5.5, em que a multiplicação de uma senoide de frequência f_1 com uma outra de frequência f_2 resulta num sinal de saída composto por duas sinusoides, uma de frequência $f_1 - f_2$ e outra de frequência $f_1 + f_2$.

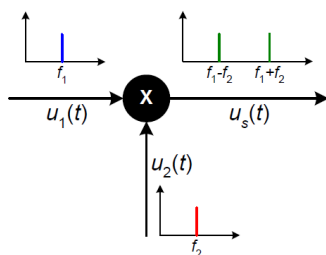


Figura 5.5 - Multiplicação de duas sinusoides de frequências f_1 e f_2 [81]

De salientar que isto não é apenas válido para a multiplicação de duas sinusóides. Na verdade, o produto de um sinal de entrada, sendo este sinusóide ou não, por uma sinusóide pura tem como consequência duas réplicas do sinal, simétricas em frequência da sinusóide que multiplica, tal como representado na figura 5.6 [81]. Esta é então a ideia basilar que permite deslocar o sinal de ultrassons para a gama de frequências audível permitindo obter a informação qualitativa anteriormente referida.

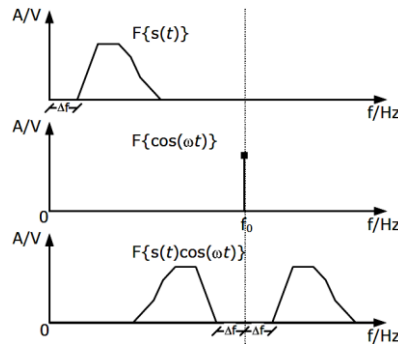


Figura 5.6 - Multiplicação de um sinal por uma sinusóide pura [81]

5.3- Ultraprobe 10000 Touch

O *Ultraprobe 10000 Touch*, figura 5.7, é desenvolvido pela empresa estadunidense *UE Systems* e foi o detetor de ultrassons utilizado na presente dissertação, tendo sido cedido pelo Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) para a realização dos ensaios laboratoriais.



Figura 5.7 - *Ultraprobe 10000 Touch* [82]

Este aparelho é capaz de detetar ultrassons numa gama de frequências compreendida entre os 20kHz e os 100kHz, sendo a utilização possível para diversos fins, tais como a deteção de fugas em sistemas de ar comprimido, inspeções mecânicas e a existência de fenómenos de arco elétrico, trilhamento e efeito de coroa em sistemas elétricos. Devido às diversas aplicações possíveis, existem diversos módulos adaptáveis para utilização nas

inspeções, que permitem tanto a detecção de ultrassons propagados pelo ar como de ultrassons propagados em estruturas.

5.3.1- Módulos e acessórios

Dos elementos identificados na figura 5.7 destacam-se os seguintes:

- **Módulo base - *Trisonic™ Scanning Module***: é o módulo base do equipamento e é utilizado para detecção de ultrassons propagados pelo ar. Este módulo utiliza uma matriz de três transdutores piezoelétricos para detetar os ultrassons propagados pelo ar [82][83]. Esta matriz permite obter uma maior focagem além de intensificar o sinal de forma que as emissões de ultrassons possam ser detetadas [82][83].
- **Módulo estetoscópico - *Stethoscope (Contact) Module***: este módulo possui uma haste em metal que é utilizada como guia sonoro, sendo sensível aos ultrassons gerados no interior de uma estrutura [82][83]. A haste é estimulada pelos ultrassons e transfere o sinal para o transdutor piezoelétrico localizado na carcaça do módulo [82][83].
- **Módulo de longo alcance - *Long Range Module***: é um módulo com forma cônica que permite aumentar a distância de detecção relativamente ao restante módulos [82][83]. O módulo LRM-15 revela-se como sendo ideal para localizar fenómenos elétricos ou fugas que se encontrem a distâncias elevadas [82][83]. Assim, espera-se que este módulo seja particularmente útil na detecção de fenómenos elétricos nas linhas aéreas.
- **Transdutor magnético remoto - *RAM/RAS-TM Magnetic Mount Transducer***: este módulo é uma sonda de contacto com cabo e que é magneticamente montável [82][83]. A inspeção com este módulo é feita aplicando a sonda na superfície de teste, sendo este o único módulo que permite detetar ondas superficiais.
- **Auscultadores - *Headset***: permitem “ouvir” os ultrassons após este passar pelo processo de heterodinagem. Estes auscultadores foram concebidos de forma a bloquearem os sons intensos que muitas vezes se encontram em ambientes industriais, de forma que o utilizador possa ouvir facilmente os sinais correspondentes aos ultrassons. De facto, estes auscultadores permitem uma atenuação superior a 23dB do ruído de baixa frequência [82][83].
- **Gerador e emissor de ultrassons - *WTG-1 Warble Tone Generator***: este gerador e emissor de ultrassons é utilizado para validar a sensibilidade da instrumentação antes, e por vezes depois, da inspeção [82][83]. Pode também ser utilizado em certas inspeções, nas quais, para detetar uma fuga, se inunda uma determinada área com ultrassons que irão fluir pelas fugas existentes [82][83].
- **Sonda de focagem - *Rubber Focusing Probe***: este acessório é uma sonda de borracha em forma de cone que atua como um escudo relativamente a sons presentes no ambiente de inspeção e que constituem ruído. É utilizado para estreitar o campo de receção do módulo base *Trisonic™ Scanning Module* [82][83].
- **Kit de extensão estetoscópico - *Stethoscope Extension Kit***: este *kit*, para utilização com o módulo estetoscópico, consiste em três hastes de metal que permitem ao utilizador obter um alcance adicional de 78,7cm [82][83].

5.3.2- Funcionalidades

A instrumentação de detecção de ultrassons *Ultraprobe 10000 Touch* tem as seguintes funções principais:

- Quantificações no mostrador da máquina das grandezas detetadas, tal como exemplificado na figura 5.8;
- Gravação de som em formato .WAV;
- Armazenamento dos dados recolhidos durante a inspeção em cartão de memória SD, para posterior transferência para computador.



Figura 5.8 - Mostrador do *Ultraprobe 10000 Touch* [83]

A *UE Systems* fornece também um *software*, o *UE Spectralyzer*, com uma interface bastante acessível e que permite analisar ficheiros de som. Além de permitir visualizar um determinado sinal sonoro numa escala temporal, desempenha também função de analisador espectral possibilitando a obtenção do conteúdo espectral dos sinais.

5.4- Inspeções com o *Ultraprobe 10000 Touch*

Um dos aspetos importantes a ter em conta aquando da realização de uma inspeção por ultrassons é a frequência de resposta do transdutor do equipamento de detecção. A frequência a que o transdutor responde deve ser ajustada de acordo com o tipo de inspeção a realizar. Definida essa frequência o detetor de ultrassons detetará de forma ótima sinais com igual frequência, com um erro aproximado de 2kHz. Por exemplo, definida uma frequência de 40kHz, a resposta do transdutor será ótima para sinais entre os 38kHz e os 42kHz. A resposta a sinais com frequências fora deste intervalo será desprezável. Esta possibilidade disponibilizada pelo equipamento de ultrassons é de grande utilidade dado que permite ao utilizador selecionar a frequência do sinal de interesse ao mesmo tempo que é reduzida a interferência de outros sinais não relevantes para a inspeção. Na tabela 5.1 encontram-se as frequências recomendadas para vários tipos de inspeções [57]. De notar que essas frequências servem apenas como um ponto de partida, podendo ser necessário proceder a ajustamentos para conseguir detetar o ultrassom de forma ótima.

A instrumentação de ultrassons permite ainda o ajuste da sensibilidade do detetor relativamente ao NIS dos sinais de ultrassons a detetar. Quanto maior a sensibilidade, menor o NIS que é possível detetar.

Tabela 5.1 – Frequências recomendadas para diferentes tipos de inspeções [57]

Tipo de inspeção	Frequência recomendada (kHz)
Elétrica através de ultrassons propagados pelo ar	40
Deteção de fugas através de ultrassons propagados pelo ar	40
Mecânica através de ultrassons propagados em estruturas	30
A válvulas através de ultrassons propagados em estruturas	25
Deteção de fugas em armários fechados, paredes e situações semelhantes	20

5.4.1- Inspeção visual

Ao inspecionar fenómenos de arco elétrico, *tracking* e efeito de coroa, podem haver indicadores da presença destes fenómenos que são observáveis por inspeção visual, como é exemplo a descoloração do material onde ocorrem [57]. Neste tipo de inspeção é necessário tomar as devidas precauções relativamente às radiações ultravioletas emitidas pelo arco elétrico e que são prejudiciais para o olho humano [57].

5.4.2- Inspeção em BT

A principal preocupação em sistemas BT é o arco elétrico. Normalmente, em sistemas cujo nível de tensão se encontra na gama das centenas de volts, os equipamentos são inspecionados com recurso à termografia, permitindo assim identificar pontos quentes que indicam a existência de valores elevados de resistência associados a potencial falha dos equipamentos. No entanto, se o equipamento onde se verifica um ponto quente estiver coberto, nem sempre é possível detetar esse mesmo ponto. Recorrendo à tecnologia de deteção por ultrassons é normalmente possível ultrapassar esta limitação. Assim, o método mais eficaz para inspeções em sistemas de baixa tensão consiste em combinar a termografia com a tecnologia de ultrassons [57].

5.4.3- Inspeção em MT e AT

Em níveis de tensão superiores os defeitos elétricos são mais severos e além do arco elétrico verificam-se problemas relacionados com o efeito de coroa destrutivo e o trilhamento elétrico. Todos estes fenómenos emitem ultrassons que são detetáveis e que indicam situações de falha ou pré-falha no equipamento. Em inspeções realizadas nestes níveis de tensão, os equipamentos a inspecionar encontram-se muitas vezes a distâncias consideráveis. Daqui resulta a importância do módulo de longo alcance da instrumentação de ultrassons, que permite duplicar a distância de deteção relativamente aos módulos *standard*.

5.4.4- Método “Grosso a Fino”

Os ultrassons propagados pelo ar são mais intensos junto da fonte emissora de ultrassons. Então, ao inspecionar um local, numa primeira fase é importante inspecionar toda a área em causa, sendo assim possível aproximar-se da fonte de interesse ajustando o nível de sensibilidade do detetor [57]. Inicialmente o local deve então ser analisado com o detetor de

ultrassons à máxima sensibilidade. Detetado um sinal de ultrassons, a sensibilidade é progressivamente reduzida até que se localiza exatamente o local associado à emissão deste sinal. Em muitas situações existem várias fontes de ultrassons no local a inspecionar, pelo que além dos ajustes progressivos de sensibilidade é importante tirar partido dos acessórios complementares para utilização com o detetor de ultrassons, nomeadamente a sonda de focagem que permite bloquear ultrassons dispersos, reduzindo a área de receção do módulo *Trisonic*.

É necessário ter em atenção que os ultrassons detetados podem não indicar imediatamente a fonte respetiva. De facto, os ultrassons captados podem resultar de deflexão sónica [57]. Fala-se em deflexão sónica quando são feitas leituras falsas resultantes da reflexão das ondas sonoras provenientes de determinadas fontes sonoras. É assim importante que o utilizador se mova para a frente e para trás em todas as direções, fazendo um varrimento completo do espaço e garantindo assim que os ultrassons detetados não são resultado de deflexão.

Capítulo 6

Laboratório de Alta Tensão

As atividades laboratoriais da presente dissertação foram desenvolvidas no LAT da FEUP, onde é possível realizar ensaios a diversos equipamentos utilizados em redes elétricas de AT, nomeadamente ensaios a isoladores, transformadores, cabos, disjuntores e equipamentos de trabalhos em tensão. O LAT situa-se no edifício J da FEUP, pertencente ao departamento de engenharia eletrotécnica.

6.1- Constituição do LAT

Os principais elementos do LAT são os equipamentos destinados a ensaios à onda de impulso e a ensaios à frequência industrial, além dos componentes que visam a implementar e garantir as devidas medidas de segurança.

6.1.1- Equipamento de ensaio à onda de impulso

Estes ensaios são também muitas vezes designados por ensaios ao choque. Para este tipo de ensaios existe no LAT um gerador de choque, figura 6.1, da marca *Haefely* e que é capaz de produzir uma onda de frente rápida normalizada (1,2/50 μ s) com uma tensão máxima de 1200kV.

A torre do gerador de choque tem 12 andares. Cada um destes andares é constituído por um condensador, duas esferas de descarga e três resistências. O condensador é de 75 μ F e tem capacidade de acumular até 100kV. As duas esferas de descarga têm como função permitir a realização da descarga em cada andar. Relativamente às três resistências, uma delas é a resistência de carga e as outras duas são resistências de paralelo, tendo estas como função permitir o controlo da forma da onda aplicada.

Ao topo da torre está ligado, por intermédio de uma resistência, o divisor de tensão, figura 6.2. Este é constituído por vários condensadores e tem como função possibilitar a medição da tensão durante o ensaio, por parte da instrumentação de medida. Assim, durante os ensaios o divisor de tensão encontra-se ligado à torre e também ao equipamento a ensaiar.

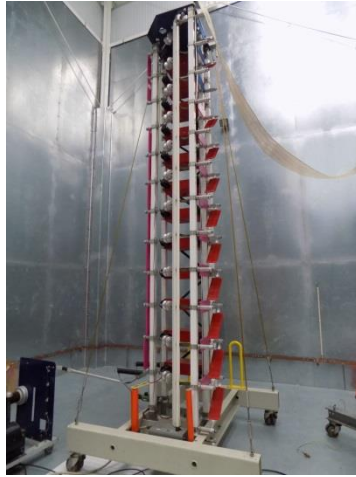


Figura 6.1 - Torre do gerador de choque

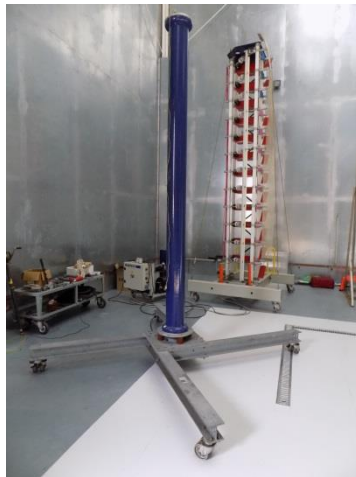


Figura 6.2 - Divisor de tensão utilizado em ensaios à onda de impulso

A torre é alimentada por uma unidade de retificação, figura 6.3, que possibilita o carregamento dos condensadores. Esta unidade é alimentada através do quadro de comando do LAT e gera a alta tensão necessária para carregar os condensadores da torre.



Figura 6.3 - Unidade de alimentação do gerador de choque

Na figura 6.4 é apresentada a unidade de controlo deste equipamento, que permite definir, entre outros, a tensão de ensaio pretendida e a velocidade de carregamento dos condensadores. Nesta mesma figura está presente ainda a unidade de análise, o Sistema Digital de Análise do Impulso (DIAS), elemento responsável pelo tratamento da informação proveniente do divisor de tensão. É também esta unidade que atua sobre um mecanismo na torre que permite alterar as distâncias entre as esferas de descarga existentes em cada um dos andares.



Figura 6.4 - Unidade de controlo e DIAS

6.1.2- Equipamento de ensaio à frequência industrial

O sistema de ensaio à frequência industrial é constituído por quatro unidades principais: o transformador, o divisor de tensão, o regulador e o controlador.

O transformador, presente na figura 6.5, é da marca *Phenix* e é composto pelo acoplamento vertical de duas unidades. A potência máxima do transformador é 300kVA, atingindo assim uma tensão máxima de ensaio de 600kV com uma intensidade de corrente 0,5A.



Figura 6.5 - Transformador *Phenix* de 300kVA

O divisor de tensão, figura 6.6, permite transformar a tensão aplicada pelo transformador numa tensão que permita a realização de uma medição segura por parte dos equipamentos destinados a tal fim. Isto é conseguido através de capacidades em série.



Figura 6.6 - Divisor de tensão utilizado em ensaios à frequência industrial

O regulador, na figura 6.7, apresenta um funcionamento semelhante a um autotransformador. Este componente alimenta o transformador, sendo a sua tensão controlável através do controlador, presente na figura 6.8. Este controlador permite ao operador definir a tensão a aplicar ao objeto de ensaio e a velocidade de subida/descida desta.

É ainda importante referir as esferas de calibração, que são utilizadas periodicamente de forma a verificar a correta calibração dos valores apresentados pelo voltímetro do controlador. Caso seja necessário, estas esferas permitem ainda proceder a essa mesma calibração. Este equipamento é constituído por duas esferas de cobre, que apresentam um diâmetro de 0,75m. Uma destas esferas encontra-se acoplada a um mecanismo que a permite deslocar verticalmente, ao passo que a outra está acoplada a uma semiesfera de alumínio, tal como é observável na figura 6.9.



Figura 6.7 - Regulador [84]

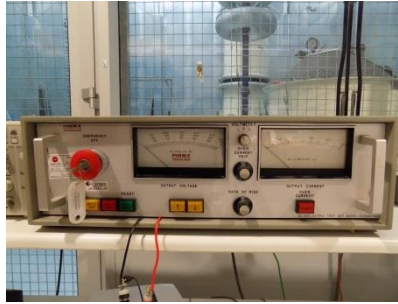


Figura 6.8 - Controlador



Figura 6.9 - Montagem das esferas de calibração [84]

6.1.3- Medidas de segurança

As medidas de segurança adotadas no LAT podem ser classificadas em medidas de segurança passivas e ativas.

Medidas de segurança passivas

As medidas de segurança passivas estão relacionadas com aspectos construtivos do LAT que visam diminuir os riscos inerentes aos ensaios em níveis elevados de tensão. As medidas construtivas adotadas focaram-se no revestimento interior do LAT, na criação de barramentos e nas terras de proteção [84].

Assim, foi construída uma gaiola de *Faraday* em torno da estrutura da sala de ensaios. Nas paredes do edifício foram colocadas chapas metálicas zincadas com espessura de 1,5mm, estando estas eletricamente interligadas, tanto por soldadura como por tranças metálicas, permitindo desta forma um escoamento seguro para a terra das cargas elétricas que se formam durante os ensaios [22]. Para que seja garantida a equipotencialização de todas as partes, existe um barramento anelar composto por barras de cobre com secção de 5*50 mm [22][84]. Este barramento encontra-se ligado à terra através de 3 pontos [22]:

- Ligação às fundações metálicas do edifício, com uma impedância aproximada de $0,7\Omega$, sendo que esta medição foi realizada num mês de verão;
- Ligação à terra exterior ao edifício, criada exclusivamente para o laboratório;
- Ligação à terra do posto de transformação que alimenta o laboratório.

Além deste barramento, que assume importância preponderante, existe um outro constituído por um fio de cobre de 10mm^2 , que garante a interligação de todas as partes metálicas pela parte superior da gaiola. Este anel secundário está ligado ao anel principal por 4 baixadas, tal como a exemplificado na figura 6.10 [22].

O anel principal encontra-se colocado a uma altura de 20cm do pavimento, fixado à parede do LAT através de isoladores, como se observa na figura 6.11. Tal não se verifica apenas junto ao portão de acesso, onde o barramento está assente no chão, existindo uma tinta isoladora entre o barramento e a chapa de forma a evitar o contacto direto entre as chapas zincadas e o barramento [84]. Existem ainda pontos concebidos para ligar as terras dos equipamentos e das estruturas utilizadas nos ensaios, como os da figura 6.12.

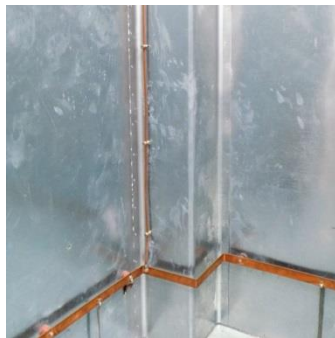


Figura 6.10 - Baixada para ligação dos barramentos principal e secundário



Figura 6.11 - Fixação do barramento principal à parede do LAT



Figura 6.12 - Exemplo de pontos para ligação de terras dos equipamentos e estruturas utilizados nos ensaios

Medidas de segurança ativas

Estas medidas têm como objetivo evitar acidentes provocados por erros humanos e estão implementadas no quadro de comando presente na figura 6.13, através de interruptores e sensores de contacto, associados por condições lógicas. Neste quadro existem três níveis de segurança, de acordo com a figura 6.13, e que limitam a alimentação dos diversos equipamentos do LAT de acordo com as condições lógicas dos sensores. Na porta de acesso à sala de comando e no portão de acesso ao LAT existem sensores de fecho que levam à interrupção da alimentação dos equipamentos caso ocorra abertura da porta ou do portão aquando de um ensaio.

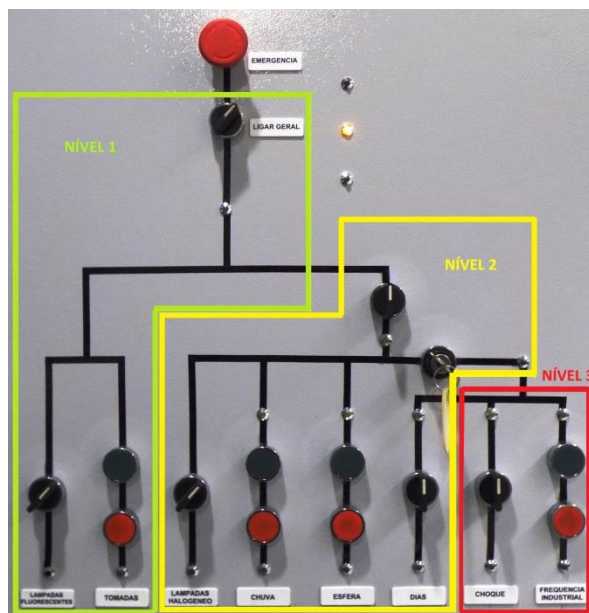


Figura 6.13 - Quadro de comando

No primeiro nível de segurança é possível ligar as lâmpadas fluorescentes do LAT e utilizar as tomadas de usos gerais situadas no interior da sala de ensaios. Tanto a porta de acesso à sala de comando como o portão de acesso ao LAT podem estar abertos neste nível de segurança. Verificando-se que tanto a porta como o portão estão abertos, não é possível realizar as ações correspondentes ao nível 2 e nível 3.

No segundo nível de segurança é possível alimentar alguns dos equipamentos, como a iluminação de halógeno, a tomada de ligação do sistema de chuva artificial e ainda a tomada de alimentação da esfera de calibração. Este nível de segurança está sujeito a que o portão de acesso ao LAT esteja fechado e a que seja acionado um interruptor sem retenção, podendo a porta de acesso à sala de comando estar aberta. Existe ainda um subnível de segurança, que permite acesso ao DIAS e que requer a manobra de um interruptor com auxílio de uma chave.

Para realizar as ações correspondentes ao nível 3, que permitem alimentar o gerador de choque e o transformador, tanto a porta de acesso à sala de comando como o portão de acesso ao LAT devem estar fechados. Este nível de segurança garante que caso se verifique a abertura da porta ou do portão, a alimentação do gerador de choque e do transformador é imediatamente cortada, interrompendo assim o ensaio. Neste nível de segurança existe

também um encravamento mecânico entre a alimentação do gerador de choque e a do transformador, levando a que quando um deles está ativo não seja possível alimentar o outro.

6.2- Montagens para ensaios à frequência industrial

A montagem dos isoladores para realização de ensaios a alta tensão, neste caso à frequência industrial, segue normas estabelecidas pela CEI. Nas subsecções que se seguem enunciam-se os critérios estabelecidos nas normas aplicáveis e que devem ser cumpridos durante os ensaios a realizar.

6.2.1- Isoladores de suporte

De acordo com a norma IEC60168, os isoladores de suporte devem ser apoiados verticalmente sobre uma estrutura de metal em forma de U. Esta estrutura deve ter um comprimento mínimo igual ao dobro da altura do isolador e uma largura aproximadamente igual ao diâmetro das ferragens metálicas do isolador. A abertura desta estrutura metálica deve estar direcionada para o solo. Tem-se ainda que, para isoladores com alturas inferiores a 1,8m, a estrutura metálica deve estar a pelo menos 1m de altura em relação ao solo. Para isoladores maiores, essa mesma altura deve ser no mínimo de 2,5m.

Na parte superior do isolador apoia-se, na horizontal, um tubo condutor, perpendicularmente à estrutura metálica. O comprimento deste tubo deve ser de pelo menos 1,5 vezes a altura do isolador, sendo que este deve prolongar-se no mínimo 1m para cada lado do eixo do isolador. O diâmetro do tubo deve ser 1,5% da altura do isolador, sendo o valor mínimo de 25mm.

A tensão de ensaio é aplicada na ponta do tubo condutor. A estrutura metálica deve ser ligada à terra.

6.2.2- Cadeias de isoladores

De acordo com a norma IEC60383, as cadeias de isoladores a ensaiar na posição vertical devem ser fixadas, pela sua parte superior, a uma estrutura ligada à terra. A parte superior da cadeia deve estar distanciada pelo menos 1m desse mesmo ponto de fixação.

Na parte inferior da cadeia é colocado, na horizontal, um tubo condutor com um comprimento mínimo de 1,5 vezes a altura da cadeia, sendo 1 m o valor mínimo. O tubo deve ainda prolongar-se, no mínimo, 1 m para cada lado do eixo da cadeia de isoladores. É a este tubo que ligará a fonte de tensão. Este deve ter um diâmetro igual a 1,5% a altura da cadeia, sendo o valor mínimo igual a 25mm, devendo ainda ser colocado o mais próximo possível da cadeia de isoladores, sem no entanto ultrapassar uma distância mínima de 0,5 vezes o diâmetro da cadeia. Todos os materiais circundantes à cadeia de isoladores devem estar distanciados de 1,5 vezes a altura da mesma, sendo o distanciamento mínimo igual a 1m.

Capítulo 7

Ensaio Laboratoriais

As atividades laboratoriais da presente dissertação foram desenvolvidas no LAT da FEUP, descrito no capítulo anterior. Neste capítulo são descritos os componentes ensaiados, o procedimento adotado e são ainda analisados os resultados obtidos.

7.1- Caracterização dos isoladores ensaiados

Nos testes laboratoriais realizados foram ensaiados três isoladores de suporte do mesmo tipo e duas cadeias de isoladores, também do mesmo tipo.

7.1.1- Isoladores de suporte

Apesar de os três isoladores de suporte ensaiados serem do mesmo tipo e produzidos pelo mesmo fabricante, os três diferem quanto à sua condição.

SuporteOK

Este isolador, presente na figura 7.1, encontra-se em bom estado de funcionamento, pelo que é designado por *SuporteOK*.



Figura 7.1 - Isolador *SuporteOK*

As características técnicas fornecidas pelo fabricante para os isoladores do tipo correspondente ao isolador *SuporteOK* encontram-se na tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Características técnicas do isolador *SuporteOK* utilizado nos ensaios [85]

Fabricante	Cerisol
Referência do fabricante	RD115
Referência EDP	R-85
Material do dielétrico	Porcelana
Diâmetro da gola (mm)	73
Raio da gola (mm)	12,5
Linha de fuga nominal (mm)	600
Altura (mm)	225
Força de rutura mecânica à flexão (kN)	10
Tensão suportável ao choque atmosférico, a seco (kV)	172
Tensão suportável à frequência industrial, sob chuva (kV)	77
Tensão especificada de perfuração (kV)	145

Na figura 7.2 encontra-se o desenho técnico correspondente.

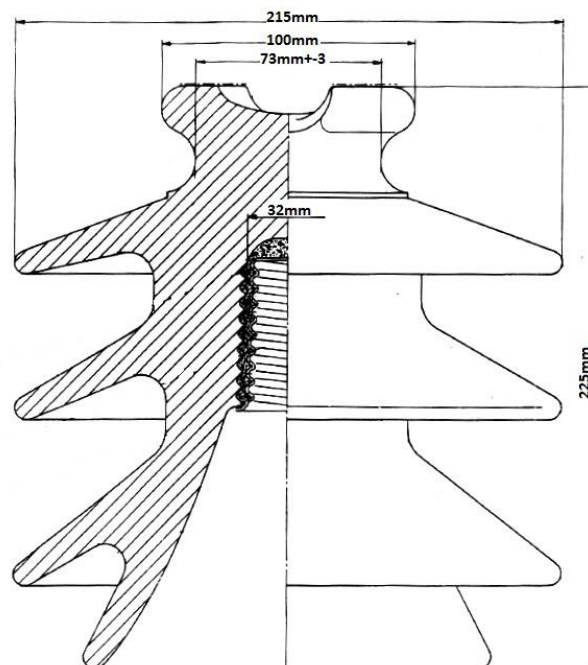


Figura 7.2 - Desenho técnico do isolador *SuporteOK* [86]

SuporteDanificado

Este isolador apresenta marcas resultantes de descargas elétricas, tanto na superfície exterior como no seu interior, tal como é observável na figura 7.3. É também visível que o isolador se encontra partido no bordo da saia superior. Devido a estes factos, o isolador passa assim a ser designado por *SuporteDanificado*.



Figura 7.3 - Isolador *SuporteDanificado*

SuportePerfurado

O último isolador de suporte a ensaiar foi perfurado pela parte superior com um recurso a uma broca de 4mm, tendo resultado a perfuração observável na figura 7.4. Esta perfuração atingiu uma profundidade de 4,3cm, sendo que num dos ensaios preliminares o isolador perfurou por completo até ao componente metálico existente no seu interior e que tem como função permitir a sua fixação. Este isolador passa assim a ser designado por *SuportePerfurado*.



Figura 7.4 - Isolador *SuportePerfurado*

7.1.2- Cadeias de isoladores

Tal como acontece para os isoladores de suporte, apesar destas cadeias serem do mesmo tipo e produzidas pelo mesmo fabricante, diferem quanto à sua condição.

CadeiaOK

Ambas as cadeias testadas são constituídas por três isoladores do mesmo tipo, cujas características técnicas se encontram na tabela 7.2 e no desenho técnico da figura 7.5. Relativamente à *CadeiaOK*, figura 7.6, esta é constituída apenas por elementos em boas condições de funcionamento.

Tabela 7.2 – Características dos isoladores constituintes das cadeias testadas nos ensaios [85]

Fabricante	Cerisol
Referência do fabricante	P2501E
Referência EDP	U70BS
Material do dielétrico	Porcelana
Diâmetro do espigão (mm)	16
Distância mínima entre espigão e topo da campânula (mm)	127
Diâmetro da saia (mm)	255
Comprimento da linha de fuga (mm)	300
Tensão máxima suportada (kN)	70
Tensão suportável ao choque atmosférico, a seco (kV)	110
Tensão suportável à frequência industrial, sob chuva (kV)	42
Tensão especificada de perfuração (kV)	115

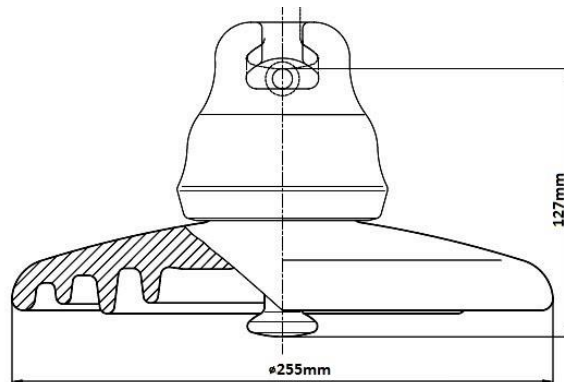


Figura 7.5 - Desenho técnico dos isoladores constituintes das cadeias de isoladores ensaiadas [85]

Figura 7.6 - Cadeia de isoladores *CadeiaOK*

CadeiaPerfurada

Esta cadeia de isoladores difere da *CadeiaOK* no facto de que o isolador que se encontra na posição inferior foi substituído por um outro em que foi realizada uma perfuração que atravessou todo o corpo do elemento, com uma broca de 4mm, tal como é observável em pormenor na figura 7.7. Assim, esta cadeia de isoladores é designada por *CadeiaPerfurada*.



Figura 7.7 - Cadeia de isoladores *CadeiaPerfurada*

7.2- Procedimento

Os isoladores foram ensaiados à frequência industrial, ou seja, aplicando uma onda de tensão com frequência de 50Hz. Assim, as montagens foram realizadas de acordo com as recomendações das normas para este tipo de ensaios e para o tipo de isoladores em causa.

Quanto à metodologia de teste adotada, esta foi concebida de forma a ser possível perceber o comportamento dos ultrassons provenientes dos isoladores, tanto a tensões próximas daquelas a que os isoladores são normalmente utilizados na rede como a tensões mais reduzidas e também substancialmente mais elevadas.

7.2.1- Montagens

Nas figuras 7.8 e 7.9 encontram-se as montagens realizadas para os ensaios dos isoladores de suporte e das cadeias de isoladores, respetivamente.

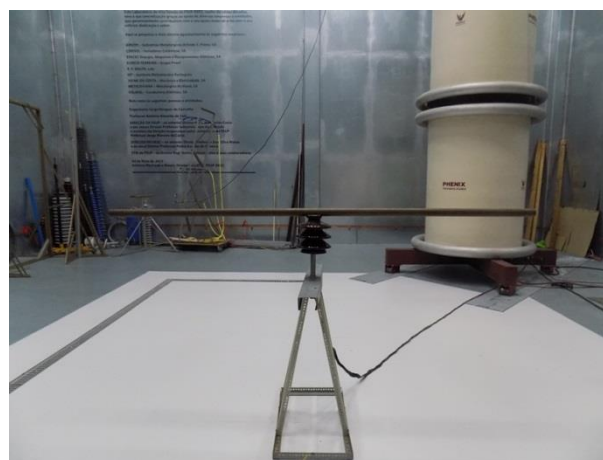


Figura 7.8 - Montagem para os ensaios com os isoladores de suporte

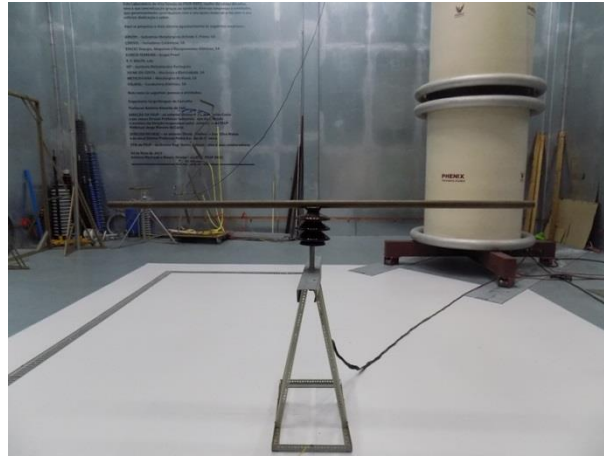


Figura 7.9 - Montagem para os ensaios com as cadeias de isoladores

As imagens foram captadas pela perspetiva do local onde se encontrava o detetor de ultrassons. De notar que na figura 7.8 o tubo condutor se encontra colocado paralelamente à sala de comando, ao contrário do que acontece normalmente nos ensaios realizados no LAT, em que este se encontra colocado perpendicularmente à referida sala. Esta medida foi adotada de forma a reduzir a interferência que eventuais fenómenos de efeito de coroa nas pontas do tubo pudessem representar nos ultrassons captados.

Nos casos em que tal era possível e aplicável, os isoladores foram colocados de forma que os seus defeitos estivessem direcionados para o local onde se encontrava a máquina de ultrassons. Exemplificando, no caso da *CadeiaPerfurada*, a cadeia de isoladores foi colocada de tal forma que a perfuração estava orientada para a sala de comando.

Na figura 7.10 é possível ter uma perceção clara do local onde se encontrava o detetor de ultrassons relativamente ao local das montagens (zona de testes).



Figura 7.10 - Localização do detetor de ultrassons relativamente à zona de testes [22]

7.2.2- Metodologia de teste

Os ensaios visando a captação dos ultrassons regeram-se pelo seguinte procedimento, aplicado a cada um dos isoladores ensaiados:

- Registo prévio das condições atmosféricas na sala de ensaios;
- Partindo de um valor inicial nulo, elevou-se gradualmente a tensão aplicada em patamares de 4kV até aos 60kV (ou menos, no caso de ocorrer descarga disruptiva);
- Em cada nível de tensão foi realizada a captação dos ultrassons emitidos. A máquina de captação de ultrassons, que por questões de segurança não pôde ser colocada no interior da sala de ensaio, encontrava-se na sala de comando, junto à porta que permite aceder à sala de ensaio, e com o sensor direcionado para o isolador;
- Gravação de todo o ensaio com máquina termográfica *Flir A325*, presente na figura 7.11 e cujas características técnicas se encontram na tabela II.1 do anexo II, para posterior comparação com os ultrassons recolhidos.



Figura 7.11 - Camara termográfica *Flir A325* [87]

Toda a sala de ensaio foi ainda inspecionada com a máquina de captação de ultrassons de forma a garantir que não existia ruído proveniente de outras fontes que pudesse interferir com os resultados dos ensaios. A principal preocupação neste ponto provinha do tubo condutor utilizado na montagem e da possível interferência nos resultados resultante do efeito de coroa neste. Para despistar esta possibilidade, foi realizada uma montagem que consistia em colocar apenas o tubo condutor sob tensão e captar os ultrassons emitidos por este. Verificou-se que, para os níveis de tensão em causa, a intensidade sonora dos ultrassons emitidos era diminuta. Concretizando, para uma tensão aplicada de 60kV, o sinal de ultrassons captado tinha um NIS de 1dB, ou seja, muito inferior aos NIS verificados durante os ensaios aos isoladores.

7.3- Análise de resultados

Para cada um dos isoladores ensaiados procedeu-se a uma análise dos ultrassons obtidos, começando por analisar a evolução do NIS destes últimos e estabelecendo uma relação entre esta e o aumento da tensão. De seguida, e recorrendo ao *software UE Spectralyzer 4.2*, é feita uma análise temporal e espectral das ondas ultrassónicas obtidas. Por fim, são analisadas as imagens obtidas por termografia.

7.3.1- Isoladores de suporte

Nível de intensidade sonora

A evolução do NIS dos ultrassons captados, com o aumento da tensão, para os três isoladores de suporte ensaiados encontra-se presente no gráfico da figura 7.12. Os resultados em detalhe encontram-se na tabela III.1 do anexo III.

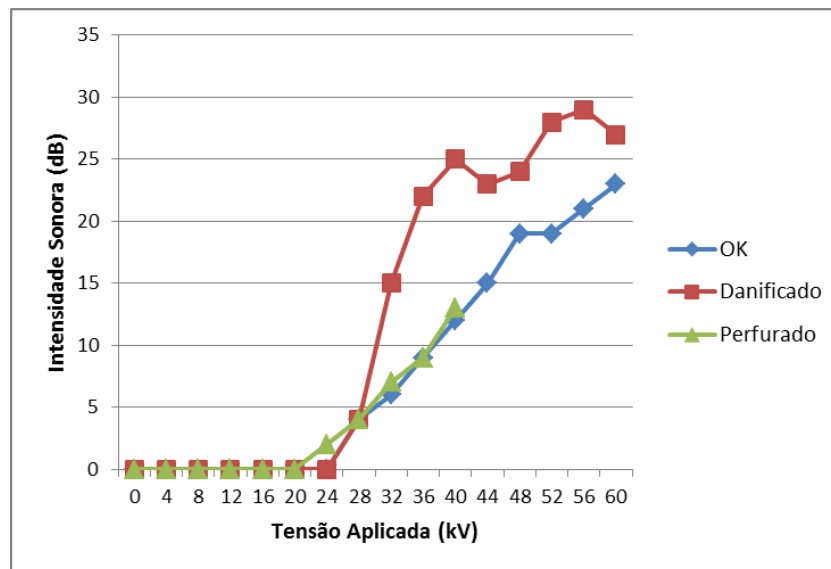


Figura 7.12 - Evolução do NIS com a tensão aplicada durante o ensaio aos isoladores de suporte

Verifica-se então que, para o isolador *SuportePerfurado*, o primeiro patamar de tensão em que são captados ultrassons é o de 24kV. Já para o isolador *SuporteOK*, tal como para o isolador *SuporteDanificado*, foram captados ultrassons no patamar de tensão imediatamente superior, ou seja, quando a tensão aplicada tinha o valor de 28kV. De notar que a aplicação mais usual destes isoladores é em linhas de 30kV, ou seja, um nível de tensão já superior aqueles em que foram detetados os primeiros ultrassons nestes ensaios. O isolador *SuporteOK* e o isolador *SuporteDanificado* foram ensaiados até aos 60kV, ao contrário do que se verificou para o isolador *SuportePerfurado*, dado que neste último ocorreu perfuração próximo dos 44kV.

É também observável que, a partir do momento em que o NIS deixa de ter valor nulo, este tende a aumentar com o incremento da tensão aplicada, tornando-se claro que existe uma relação entre os fenómenos elétricos e os ultrassons captados.

Constata-se ainda que, a partir dos 28kV, o isolador *SuporteDanificado* apresenta NIS superiores aos restantes dois isoladores quando considerado o mesmo patamar de tensão, devido à maior severidade das descargas parciais que ocorrem na sua superfície em resultado da degradação existente e que facilita a condução elétrica.

Já para o isolador *SuportePerfurado*, o NIS dos ultrassons captados até ao momento em que ocorre a perfuração é muito semelhante ao que acontece para o isolador *SuporteOK*. É importante recordar que o único defeito que o isolador *SuportePerfurado* apresenta é no seu interior, e que este se prolonga até à superfície no local onde o tubo condutor é colocado para realização dos ensaios. Assim, os ultrassons emitidos por este defeito serão consideravelmente atenuados, tanto pelo material cerâmico que constitui o isolador como pelo tubo condutor

Análise temporal

Como referido anteriormente, para o isolador *SuportePerfurado* a primeira deteção de ultrassons verificou-se aos 24kV, enquanto que para os isoladores *SuporteOK* e *SuporteDanificado* esta verificou-se aos 28kV, embora com NIS ainda muito reduzidos para os três casos. As ondas sonoras correspondentes encontram-se nas figuras 7.13, 7.14 e 7.15. Por comparação com a figura 4.15, verifica-se que os ultrassons detetados resultam de descargas parciais na superfície dos isoladores. Verifica-se também, para o isolador *SuporteDanificado*, periodicidade nos picos do NIS.

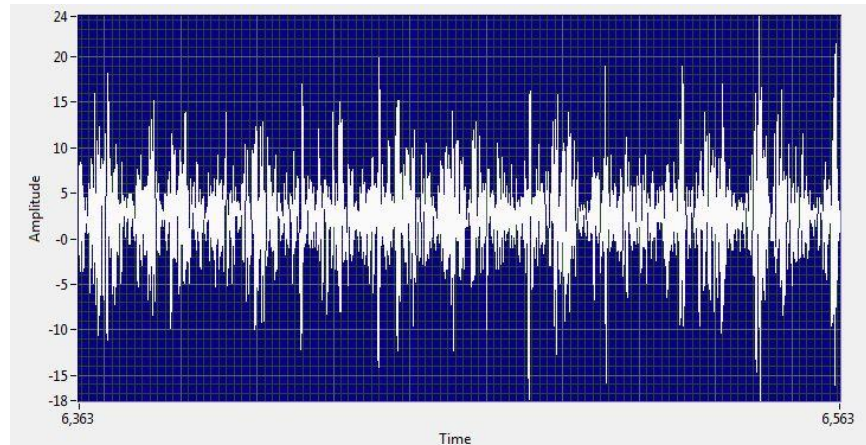


Figura 7.13 Amostra dos ultrassons captados para o isolador *SuporteOK* com uma tensão aplicada de 28kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

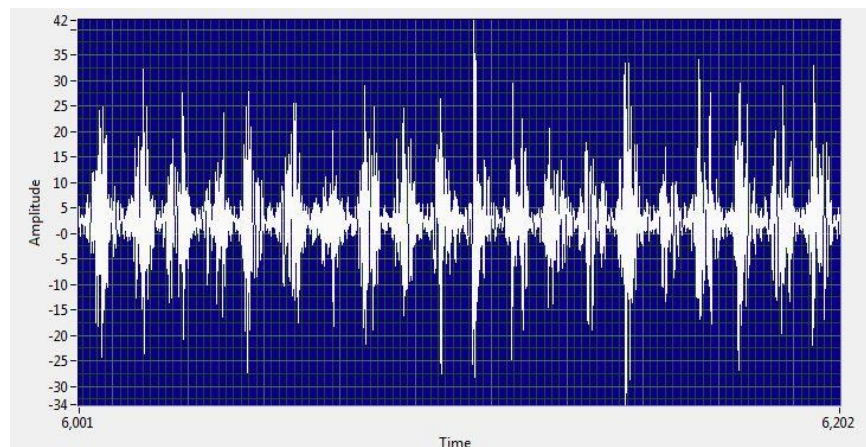


Figura 7.14 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador *SuporteDanificado* com uma tensão aplicada de 28kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

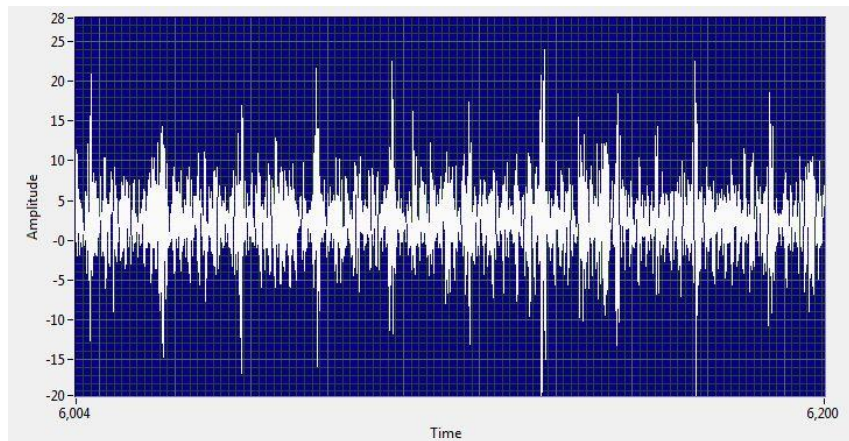


Figura 7.15 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador *SuportePerfurado* com uma tensão aplicada de 24kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

Para tensões superiores, as descargas parciais na superfície dos isoladores tornam-se mais severas, e a periodicidade anteriormente referida, que para o caso isolador do *SuporteOK* no patamar de tensão de 28kV era pouco evidente, torna-se agora perceptível no patamar de tensão de 40kV, tal como se observa na figura 7.16. No caso do isolador *SuporteDanificado*, essa periodicidade torna-se ainda mais evidente, tal como se comprova na figura 7.17.

No que se refere ao isolador *SuportePerfurado*, os ultrassons emitidos nos 40kV são os que apresentam um conteúdo temporal mais disperso, isto é, sendo possível identificar os picos de intensidade, o conteúdo existente entre estes é também ele bastante significativo, sendo este um fator indicativo da presença de outros fenómenos elétricos além das descargas parciais. Recorde-se que este isolador tem uma perfuração vertical desde o seu topo, no local onde é apoiado o tubo condutor, até um componente metálico no seu interior, estabelecendo-se assim um caminho condutor pelo interior do isolador e pelo qual podem ocorrer descargas elétricas de carácter irregular levando à emissão de ultrassons também eles de carácter irregular. Estes ultrassons, apesar de atenuados devido a razões anteriormente referidas, são também captados, originando a onda presente na figura 7.18.

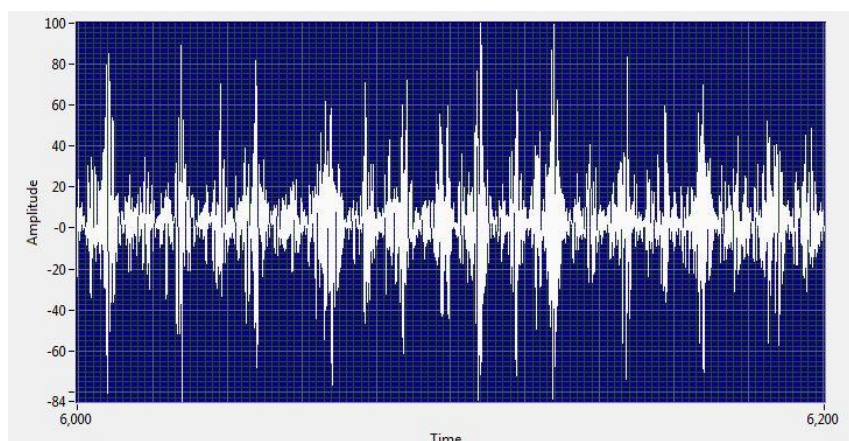


Figura 7.16 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador *SuporteOK* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

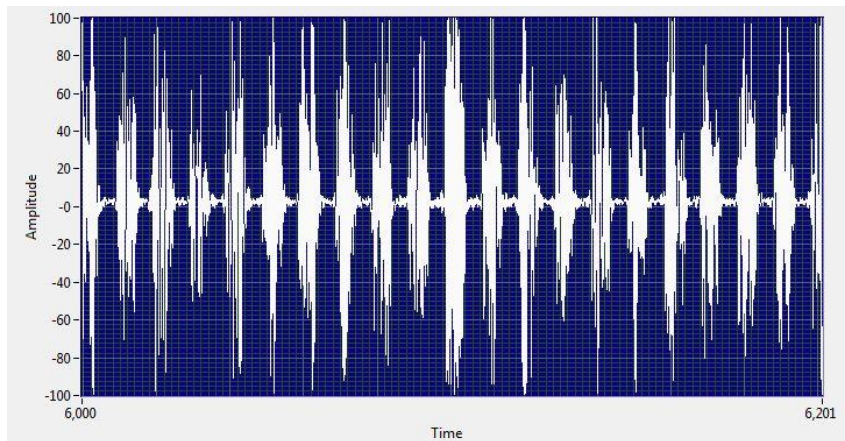


Figura 7.17 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador *SuporteDanificado* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

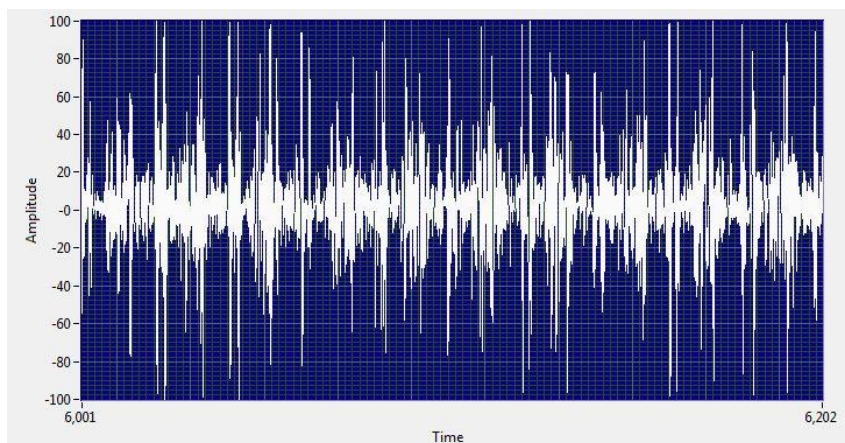


Figura 7.18 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador *SuportePerfurado* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

Nas figuras 7.19 e 7.20 estão os ultrassons obtidos para uma tensão de ensaio de 60kV. Tal como era expectável, constata-se que elevando ainda mais a tensão aplicada aos isoladores, o padrão sonoro resultante das descargas parciais torna-se mais evidente, em especial para o isolador *SuporteOK*, pois para o *SuporteDanificado* esse padrão era já facilmente identificável em níveis de tensão inferiores. Ainda relativamente à questão da periodicidade, note-se que a um período de tempo de aproximadamente 5ms com um NIS reduzido, segue-se um período de tempo de igual duração com um NIS considerável, confirmando assim a ocorrência de descargas parciais na superfície dos isoladores, como analisado e explicado em detalhe na secção 7.4.

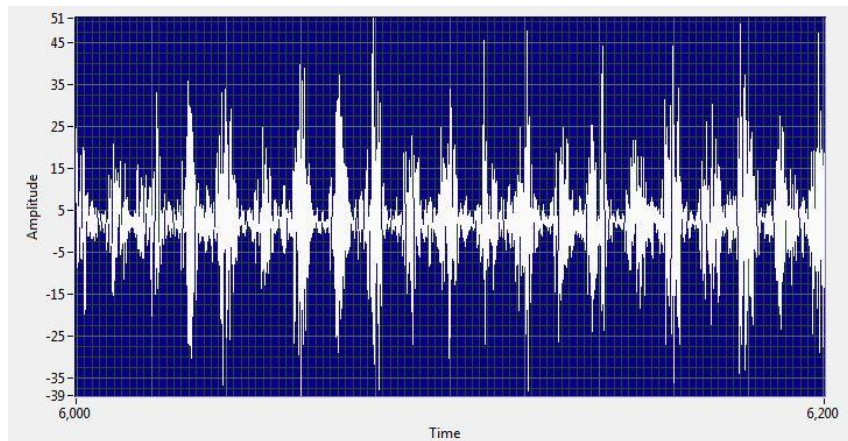


Figura 7.19 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador *SuporteOK* com uma tensão aplicada de 60kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

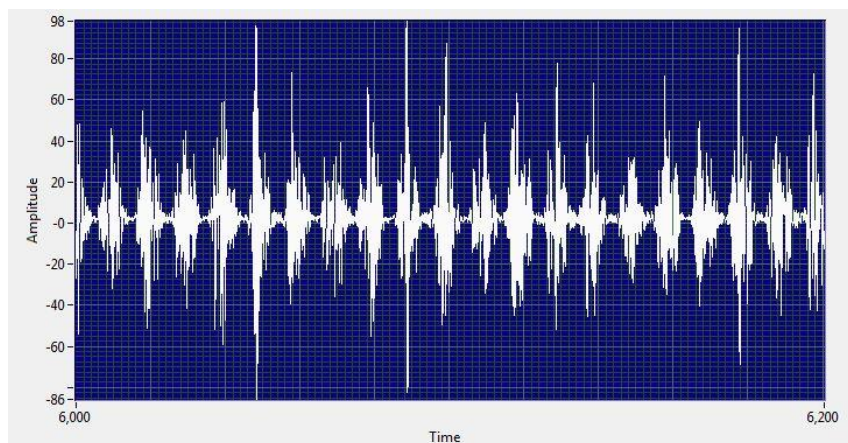


Figura 7.20 - Amostra dos ultrassons captados para o isolador *SuporteDanificado* com uma tensão aplicada de 60Kv. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

Análise espectral

Relativamente à análise espectral, evidenciam-se os picos às frequências de 50Hz e 100Hz obtidos para os diferentes níveis de tensão, tal como é observável nas figuras 7.21, 7.22 e 7.23, para o caso dos 40kV. Comparando estas figuras com a figura 4.16, na qual também se evidencia a frequência fundamental e os primeiros harmónicos desta, confirma-se novamente a ocorrência de descargas parciais superficiais. No entanto, e apesar de estes serem comuns a todos os isoladores, são mais pronunciados para o isolador *SuporteDanificado*, tal como era expectável, pois tal como visto anteriormente é para este que os picos periódicos do NIS são mais evidentes.

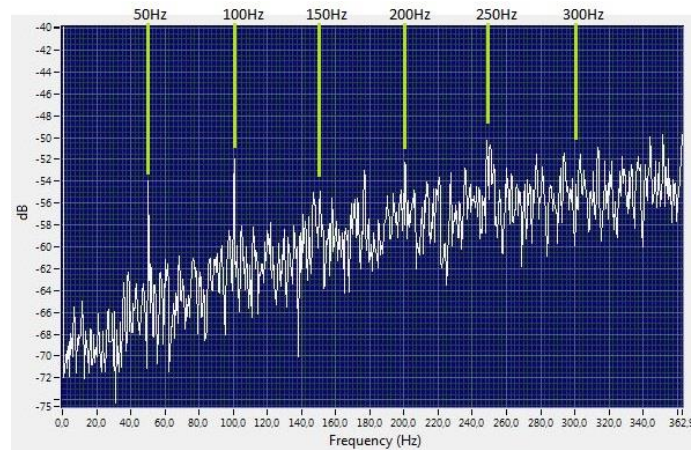


Figura 7.21 - Espectro de frequências da onda sonora obtida para o isolador *SuporteOK* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abscissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).

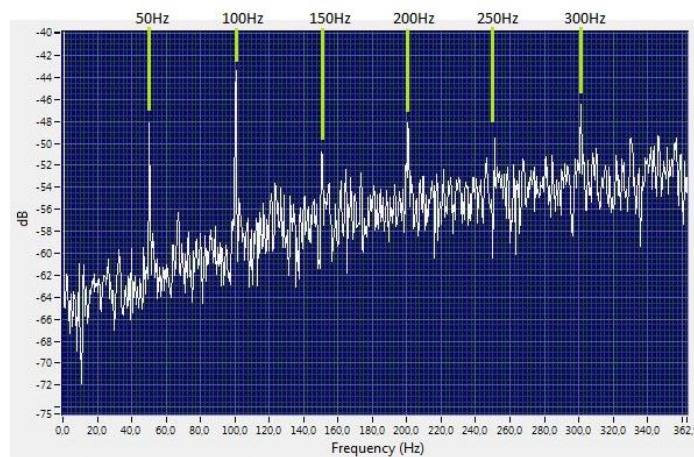


Figura 7.22 - Espectro de frequências da onda sonora obtida para o isolador *SuporteDanificado* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abscissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)

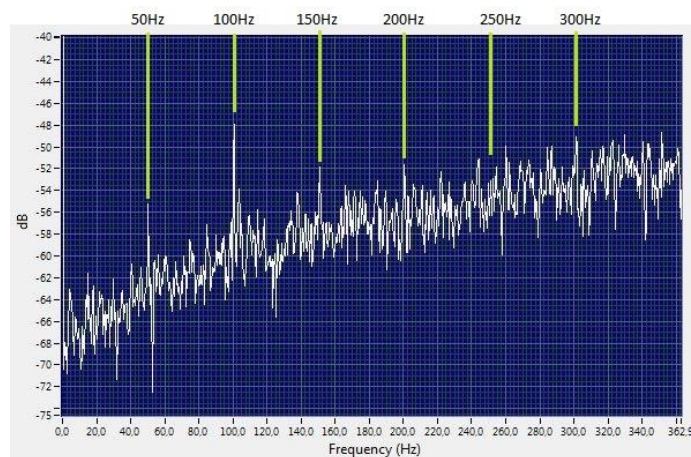


Figura 7.23 - Espectro de frequências da sonora obtida para o isolador *SuportePerfurado* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abscissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB)

Termografia

Na figura 7.24 encontram-se as imagens termográficas obtidas para os três isoladores de suporte no final dos respectivos ensaios.

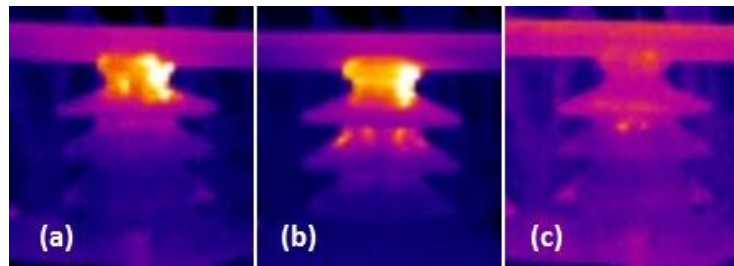


Figura 7.24 - Imagens termográficas para *SuporteOK* (a), *SuporteDanificado* (b) e *SuportePerfurado* (c) no final dos respectivos ensaios

Tanto para o isolador *SuporteOK* como para o *SuporteDanificado* verifica-se, com o decorrer do ensaio, aquecimento na parte superior do isolador junto ao tubo condutor, tal como era expectável, devido às descargas que ocorrem entre este e a superfície do isolador. No entanto, para o isolador *SuporteDanificado* este aquecimento prolonga-se pelo isolador. Isto acontece devido à degradação que se verifica na superfície isolante, estabelecendo-se nesta caminhos condutores que facilitam a ocorrência de descargas elétricas levando ao consequente aquecimento da superfície.

Quanto ao isolador *SuportePerfurado*, o aquecimento da superfície exterior é muito menor quando em comparação com os outros dois, pois a perfuração interna leva a que descargas elétricas ocorram preferencialmente no interior do isolador, não causando um aquecimento da superfície exterior tão pronunciado. Note-se que os fenómenos que ocorrem no interior do isolador não são facilmente detetados recorrendo à termografia, pois se estes não forem intensos o suficiente o calor libertado pelos mesmos não é detetado pela camera termográfica.

7.3.2- Cadeias de isoladores

Nível de intensidade sonora

A evolução dos NIS dos ultrassons captados, com o aumento do nível de tensão, para as duas cadeias de isoladores é dada pelo gráfico da figura 7.25. Na tabela III.2 do anexo III é possível consultar os resultados em detalhe.

Observa-se então que, tanto para a *CadeiaOK* como para a *CadeiaPerfurada*, os primeiros ultrassons foram captados aos 24kV. Recorde-se que estes isoladores são aplicados em linhas de 15kV e 30kV, sendo que nos ensaios realizados não foram captados quaisquer ultrassons para os níveis de tensão próximos dos 15kV. De notar ainda que ambas as cadeias foram ensaiadas até aos 60kV, não tendo ocorrido contornamento até esta tensão.

Tal como acontecia para os isoladores de suporte, verifica-se que a partir de determinado nível de tensão o NIS tende a aumentar com o aumento da tensão aplicada, confirmando-se novamente a relação entre a severidade dos fenómenos elétricos e o NIS dos ultrassons captados.

Quanto à evolução do NIS para cada uma das cadeias e das conclusões que daí poderiam advir, verifica-se que de uma forma geral, essa evolução é semelhante em ambos os casos,

não sendo assim possível tirar conclusões sob o estado das cadeias de isoladores com base neste critério.

Por fim, comparando os NIS obtidos para este caso com aqueles que foram obtidos para os isoladores de suporte e cuja evolução está presente na figura 7.12, verifica-se que os valores obtidos para as cadeias de isoladores são mais elevados, podendo isto dever-se às partes metálicas que fazem parte da sua constituição.

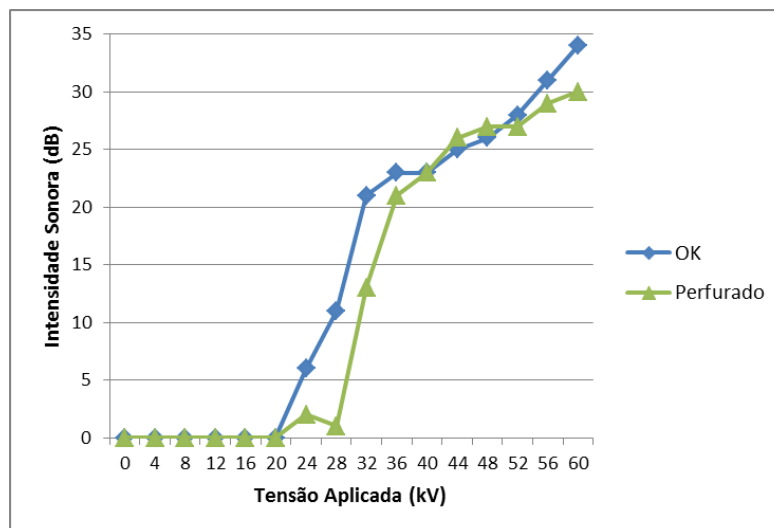


Figura 7.25 - Evolução da intensidade sonora com a tensão aplicada durante o ensaio às cadeias de isoladores

Análise temporal

Para os 24kV, o primeiro patamar de tensão para o qual foram detetados ultrassons, as ondas obtidas para cada uma das cadeias de isoladores tomam a forma que se observa nas figuras 7.26 e 7.27. Comparando novamente com a figura 4.15, verifica-se que tal como acontecia para os isoladores de suporte, os ultrassons captados resultam de descargas parciais na superfície dos isoladores. É mais uma vez notório um padrão em ambas as ondas, nomeadamente a ocorrência de picos de intensidade, sendo estes facilmente identificáveis.

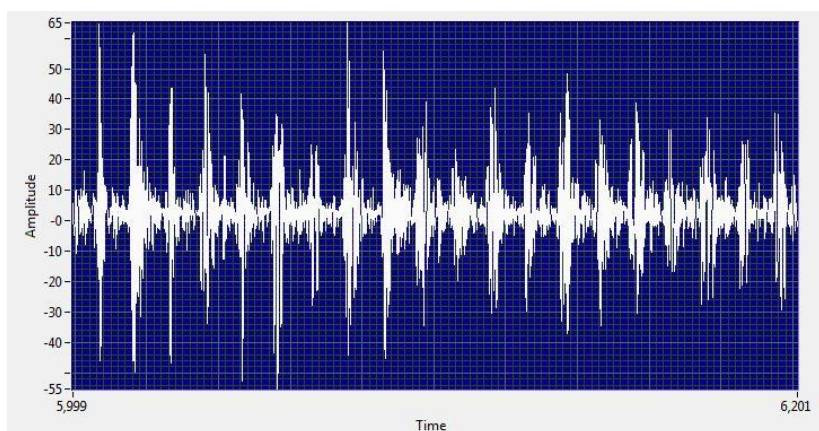


Figura 7.26 - Amostra dos ultrassons captados para a CadeiaOK com uma tensão aplicada de 24kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

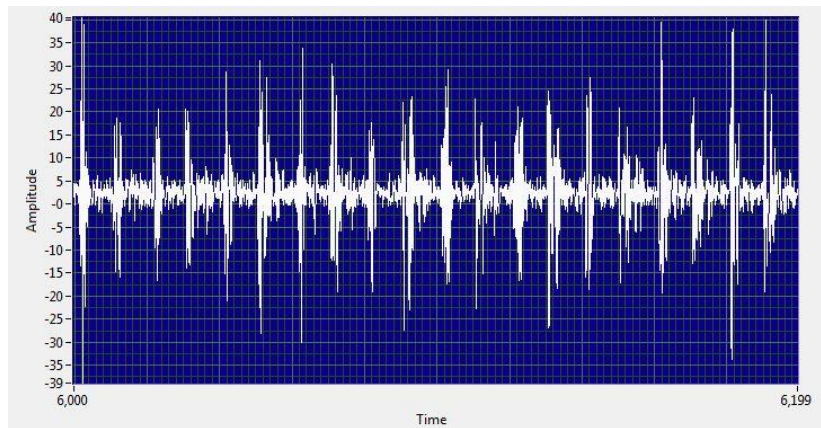


Figura 7.27 - Amostra dos ultrassons captados para a *CadeiaPerfurada* com uma tensão aplicada de 24kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

Para níveis de tensão superiores a periodicidade entre picos mantém-se, tal como se pode observar nas figuras 7.28 e 7.29, correspondentes ao patamar de tensão de 40kV.

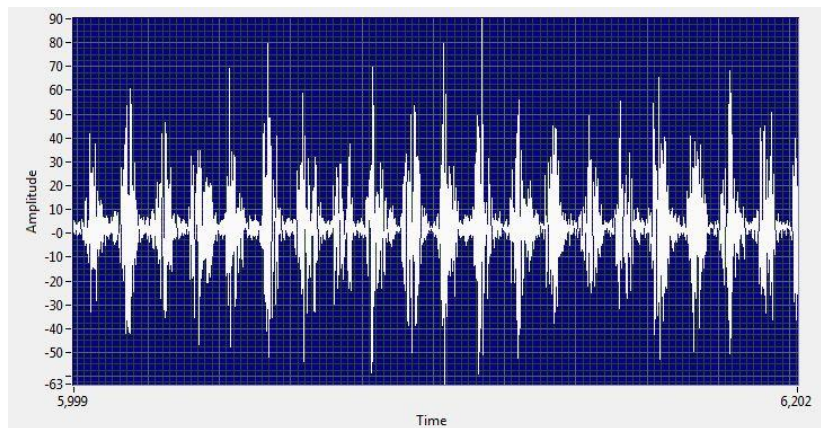


Figura 7.28 - Amostra dos ultrassons captados para a *CadeiaOK* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

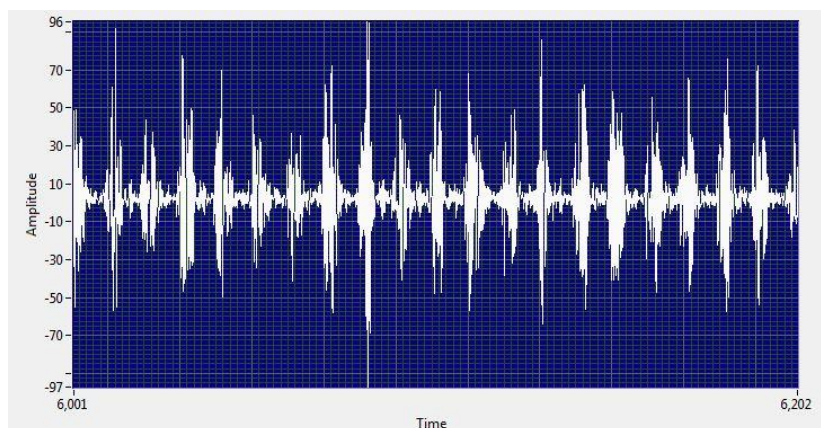


Figura 7.29 - Amostra dos ultrassons captados para a *CadeiaPerfurada* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abcissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

Nas figuras 7.30 e 7.31 estão os ultrassons obtidos para uma tensão aplicada de 60kV. Mantendo-se o padrão correspondente à ocorrência de descargas parciais superficiais, continua também a não ser possível identificar, pela análise das formas de onda, qual a cadeia que se encontra em boas condições e qual se encontra perfurada.

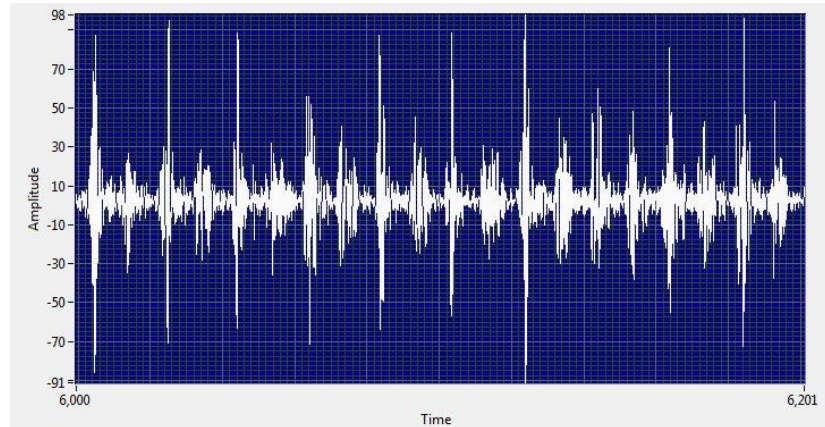


Figura 7.30 Amostra dos ultrassons captados para a *CadeiaOK* com uma tensão aplicada de 60kV. Eixo das abscissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

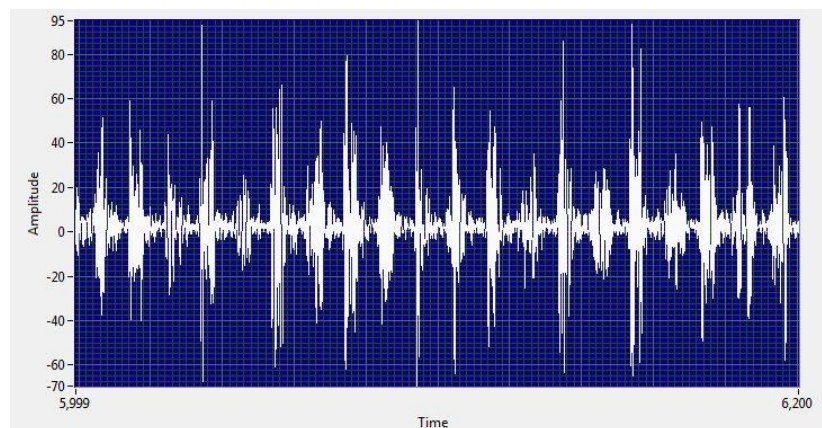


Figura 7.31 - Amostra dos ultrassons captados para a *CadeiaPerfurada* com uma tensão aplicada de 60kV. Eixo das abscissas: Tempo (s); Eixo das ordenadas: Amplitude (% da capacidade de visualização da amplitude)

Análise espectral

Em relação à análise espectral, esta constitui mais uma confirmação da ocorrência de descargas parciais superficiais, evidenciando-se os picos aos 100Hz obtidos para os diferentes níveis de tensão. No entanto, apesar de este pico ser comum tanto para a *CadeiaOK* como para a *CadeiaPerfurada*, outros harmônicos múltiplos de 50Hz evidenciam-se para a *CadeiaPerfurada* mas não para a *CadeiaOK*, tal como exemplificado nas figuras 7.32 e 7.33, referentes ao patamar de 40kV, e 7.34 e 7.35, referentes ao patamar de tensão de 60kV.

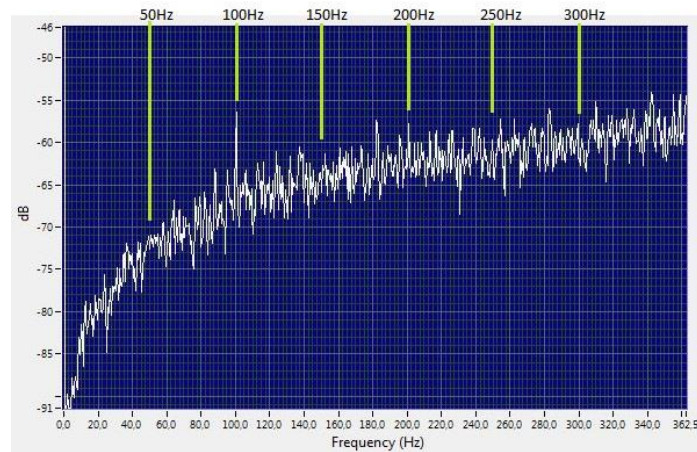


Figura 7.32 - Espectro de frequências da sonora obtida para a *CadeiaOK* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abscissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).

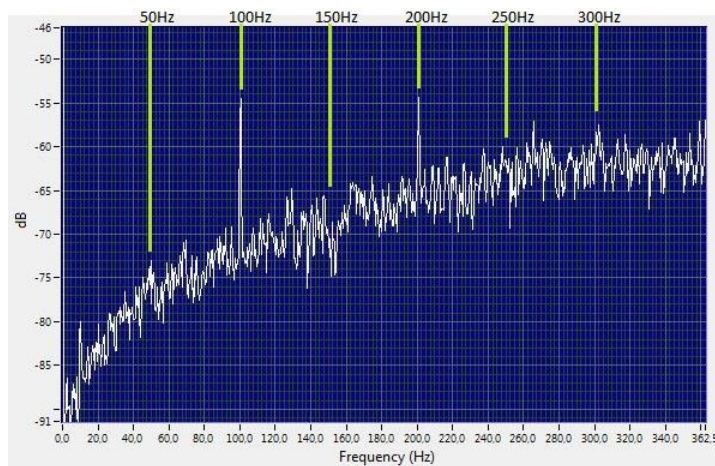


Figura 7.33 - Espectro de frequências da sonora obtida para a *CadeiaPerfurada* com uma tensão aplicada de 40kV. Eixo das abscissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).

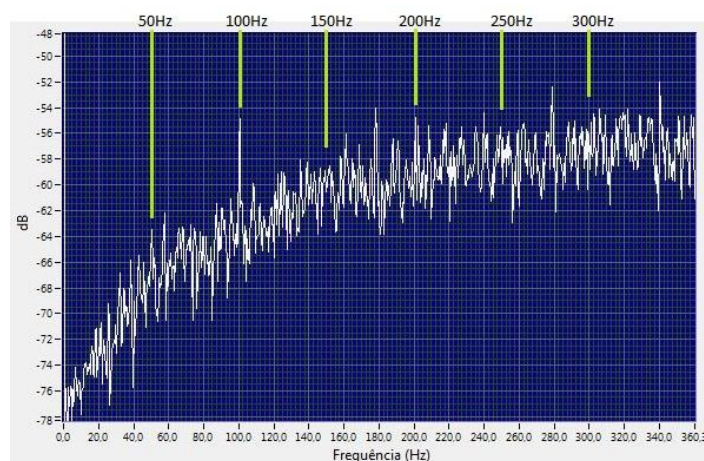


Figura 7.34 - Espectro de frequências da sonora obtida para a *CadeiaOK* com uma tensão aplicada de 60kV. Eixo das abscissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).

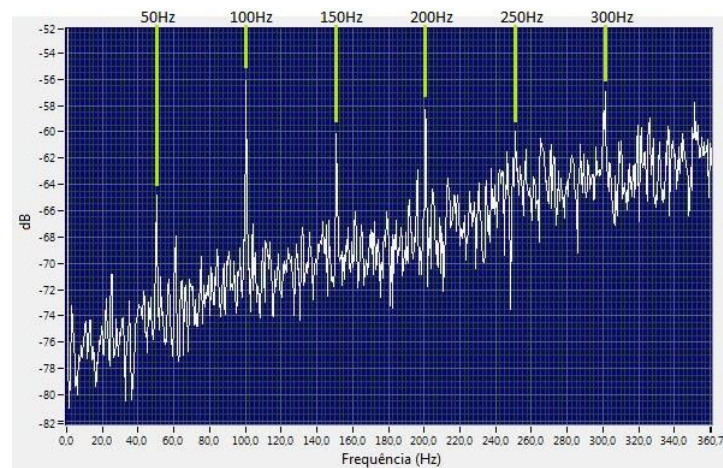


Figura 7.35 - Espectro de frequências da sonora obtida para a *CadeiaPerfurada* com uma tensão aplicada de 56kV Eixo das abcissas: Frequência (Hz); Eixo das ordenadas: Amplitude (dB).

Assim, a disparidade entre os espectros de frequência obtidos para a *CadeiaPerfurada* e para a *CadeiaOK* é o principal indicador de que o estado em que se encontra a primeira não é o correspondente ao que garante um adequado funcionamento da mesma.

Termografia

Na figura 7.36 encontram-se as imagens termográficas obtidas para os dois isoladores no final dos respetivos ensaios.

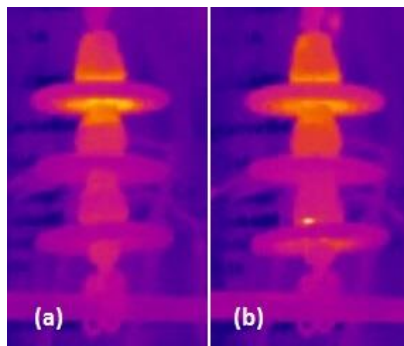


Figura 7.36 - Imagens termográficas para *CadeiaOK* (a) e *CadeiaPerfurada* (b)

Tanto para a *CadeiaOK* como para a *CadeiaPerfurada* verifica-se, com o decorrer do ensaio, aquecimento na parte superior da cadeia. No entanto, para a *CadeiaPerfurada* é observável um ponto quente no local onde o isolador que se encontra na posição inferior da cadeia foi perfurado, sendo assim possível identificar este defeito pelo recurso à termografia.

7.4- Conclusões

A primeira conclusão a retirar dos resultados obtidos durante os ensaios laboratoriais e expostos ao longo deste capítulo é que existe de facto uma relação entre fenómenos elétricos e a emissão de ultrassons. Além de se ter constatado na prática que descargas elétricas originam ultrassons detetáveis utilizando o equipamento adequado, verificou-se ainda que a

severidade dessas descargas relacionam-se com o NIS dos ultrassons por elas originados, sendo que quanto mais severa a descarga mais elevado é o NIS.

Perante os resultados obtidos é também possível concluir que os ultrassons captados durante os ensaios resultaram na sua maioria de descargas parciais na superfície dos isoladores. Este facto foi já constatado na secção 7.3 deste capítulo, pela comparação das ondas sonoras obtidas com as presentes nas figuras 4.15 e 4.16. Essa constatação é também coerente com a literatura, pois tal como referido na subsecção 3.2.5, as descargas parciais superficiais ocorrem no primeiro e terceiro quartos do ciclo da onda sinusoidal de tensão. Atente-se na figura 7.37, onde é possível visualizar em pormenor uma amostra de 20ms dos ultrassons captados durante o ensaio do isolador *SuporteDanificado* para uma tensão de 40kV, e ainda a forma de onda de uma tensão sinusoidal semelhante à aplicada ao isolador. Como seria expectável, existem dois períodos temporais de 5ms em que o NIS é significativo e outros dois períodos, também de 5ms, em que o NIS é quase nulo, sendo este comportamento coerente com a ocorrência de descargas parciais superficiais no primeiro e terceiro quartos da onda de tensão sinusoidal. Isto vai de encontro a um dos objetivos principais da presente dissertação, o de identificar fenómenos elétricos em componentes da rede elétrica pela análise dos ultrassons por estes emitidos.

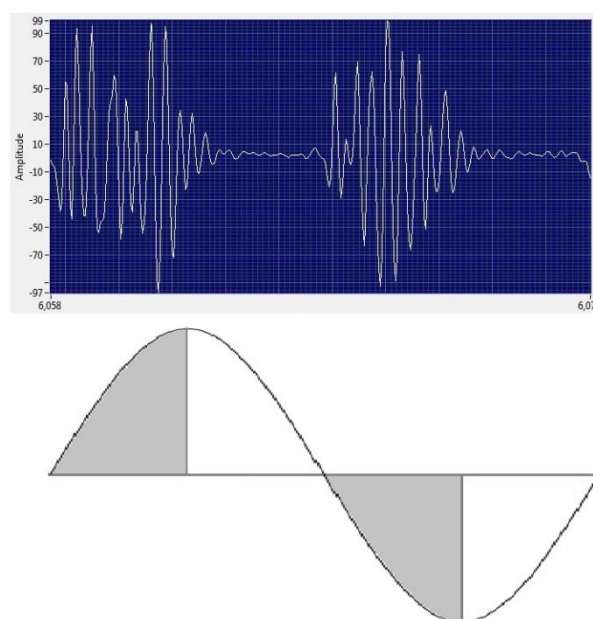


Figura 7.37 - Comparação entre as ondas sonoras obtidas para o isolador *SuporteDanificado* para uma tensão de 40kV e os pontos de descarga admissíveis para descargas parciais superficiais

Consolidada que está a possibilidade de detetar e identificar fenómenos elétricos com base na tecnologia de captação de ultrassons, é importante analisar a aplicabilidade desta tecnologia na caracterização do estado de funcionamento de determinado componente, no caso específico, dos isoladores ensaiados. Assim, para todos os isoladores ensaiados verificou-se a ocorrência de descargas parciais superficiais, não sendo esta simples constatação que permite afirmar se os isoladores se encontram em boas condições ou não. No entanto, realizando uma análise conjunta dos NIS, das formas de onda e dos espectros de frequência dos ultrassons obtidos, foi possível identificar quais os isoladores com e sem defeitos. De notar que esta análise é bastante simplificada pela possibilidade de obter dados para

isoladores em bom estado de funcionamento e com os quais são comparados os dados obtidos para outros isoladores sujeitos a testes.

Por fim, notar que a termografia permitiu também identificar quais os isoladores com e sem defeitos. A maior dificuldade surgiu para o isolador *SuportePerfurado*, sendo que essa dificuldade foi facilmente dissipada pela comparação com os resultados obtidos para o isolador *SuporteOK*.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste último capítulo retiram-se as conclusões que se entendem pertinentes sobre o trabalho desenvolvido e os resultados obtidos e sugerem-se eventuais trabalhos a realizar futuramente relacionados com o tema estudado.

8.1- Conclusões

O presente trabalho tinha como principal objetivo estudar a tecnologia de ultrassons e a sua possível aplicação na deteção de defeitos elétricos em elementos da rede elétrica e na caracterização dos mesmos. Sendo a rede elétrica um sistema de uma dimensão enorme sabia-se à partida que era impossível, no âmbito de uma dissertação, fazer um estudo minucioso da aplicação da tecnologia de deteção de ultrassons a todos os elementos que constituem a rede. Então, e considerando a importância que o correto funcionamento das linhas aéreas representa para a rede elétrica, optou-se pelo estudo destas, incidindo mais especificamente nos isoladores que fazem parte da sua constituição.

De forma a conseguir perceber se de isoladores do mesmo tipo mas em estados diferentes resultariam diferentes padrões de ultrassons obtidos, os isoladores que nos foram facultados pela EDP Distribuição e pela Cerisol foram ensaiados sob tensão a frequência industrial no LAT. Não existindo normas que definam especificamente o procedimento a adotar para estes ensaios, isto é, para os ensaios visando a captação de ultrassons, procurou-se garantir a maior semelhança possível com a situação que se verificaria se o isolador estivesse em funcionamento na rede.

Assim, e depois de realizados os ensaios e analisados os resultados, é possível concluir que a tecnologia de ultrassons é de facto aplicável à deteção de defeitos em componentes das redes de energia elétrica, no caso específico em isoladores cerâmicos aplicáveis em linhas aéreas. Em comparação com a termografia, a tecnologia mais utilizada atualmente em inspeções a linhas aéreas, a inspeção por ultrassons possui a grande vantagem de permitir

identificar o tipo de defeito em causa, disponibilizando assim mais informação para que seja possível optar pela intervenção correta na resolução do problema em causa.

Com isto, resta apenas concluir que a presente dissertação vem confirmar o grande potencial inerente à utilização desta tecnologia, pelo que é recomendada a realização de estudos mais exaustivos de forma a ser possível incorporar a deteção de defeitos elétricos por ultrassons não só em inspeções a linhas aéreas mas a todo o SEE e seus componentes.

8.2- Trabalhos futuros

Com o presente trabalho pretendeu-se contribuir para colmatar a enorme falta de informação que existe relativamente à possibilidade de aplicar a tecnologia de ultrassons à inspeção da rede elétrica. No entanto ainda muito fica por fazer, tanto pela já referida escassez de informação que existe no momento como pela grande quantidade de componentes da rede, fatores e variáveis que é necessário estudar e incorporar para seja possível realizar inspeções à rede com base nesta tecnologia de uma forma realmente eficaz. Assim, alguns trabalhos pertinentes a desenvolver no futuro são:

- Estudo da aplicação da tecnologia de ultrassons a outros componentes da rede, tais como cabos, transformadores, equipamento de proteção, entre outros;
- Estudo da influência de diversos fatores nos fenómenos elétricos e na propagação das ondas de ultrassons, tais como a influência da humidade, da temperatura, da pressão do ar, entre outros;
- Criação de normas que estabeleçam as montagens e procedimentos a adotar para a realização de ensaios em laboratório que visem o estudo de componentes da rede e dos ultrassons que deles provêm.

Estes são três pontos fundamentais a partir dos quais será possível aplicar em inspeções elétricas a deteção de defeitos por captação de ultrassons.

Referências

- [1] Expósito, A. G. (2002). Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España.
- [2] Khalifa, M. (1990). High-voltage engineering : theory and practice. New York: Marcel Dekker.
- [3] ERSE. (n.d.). Actividades do Sector. Disponível em <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/Paginas/default.aspx>. Acesso em Novembro de 2015.
- [4] Lopes, R. da F. (2013). Otimização do Processo de Manutenção de Faixas de Serviço de Linhas de Média e Alta Tensão.
- [5] REN - Rede Eléctrica Nacional. (2014). Relatório & contas 2014.
- [6] EDP. (n.d.). Sistema Eléctrico Português. Disponível em <http://www.edp.pt/pt/aedp/sectordeenergia/sistemaelectricoportugues/Pages/SistElectNacional.aspx>. Acesso em Novembro de 2015.
- [7] ERSE. (n.d.). Caracterização da RND. Disponível em <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/RND%E2%80%93Caracterizacao.aspx>. Acesso em Novembro de 2015.
- [8] Júdez, G.Z. (1972). Redes eléctricas de alta y baja tensión para conducir y distribuir la energía eléctrica. Barcelona: Gustavo Gili, D.L.
- [9] Gonçalves, F. J. P. (2011). Projecto de Execução de Linhas de Média Tensão.
- [10] EDP. (1993). Edição DGE do Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão.
- [11] Nunes, J. M. C. (2005). Projecto de Linhas de Média Tensão, redes de Baixa Tensão, Iluminação Pública e Postos de Transformação.
- [12] Madureira, O. F. das N. (2009). Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial, Ramo Engenharia Electrotécnica.
- [13] EDP Distribuição. (2005). Material para Linhas Aéreas - Armações de aço para postes de betão de MT.
- [14] EDP Distribuição. (2008). MATERIAL PARA REDES - SUPORTES PARA LINHAS AÉREAS- Postes de aço reticulados da série F para linhas aéreas de MT - Características e ensaios.
- [15] EDP Distribuição. (2004). Material para Linhas Aéreas - Armações de aço para postes de betão de AT.

- [16] EDP Distribuição. Materiais para Redes - Suportes para Linhas Aéreas - Postes de aço reticulados da série F para linhas aéreas de AT (60kV).
- [17] Galvão, C. D. de B. S. (2010). Redes eléctricas de média e baixa tensão - Aspectos de projecto, licenciamento e exploração em contexto operacional.
- [18] José Miguel Barbosa Forte. (n.d.). Projecto e Licenciamento de Linhas MT - Armações. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~ee99047/LNMT-Armacoes.html>. Acesso em Novembro de 2015.
- [19] Solidal. (n.d.). Características Técnicas dos Condutores de Energia e Cabos Eléctricos.
- [20] OC Tecnologia. (1987). Condutores Nus para Linhas Aéreas - Cabos de cobre - Características, ensaios e condições para verificação da qualidade.
- [21] Ferreira, J. R. (2004). Linhas De Transmissão (Vol. 23).
- [22] Queirós, J. P. M. (2013). Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais.
- [23] EDP Distribuição. (2008). Instalações Eléctricas - Guia de coordenação de isolamento - Regras de execução e de montagem.
- [24] EDP Distribuição. (2004). Isoladores e Material para Linhas Aéreas - Isoladores rígidos de eixo vertical de ferro de suporte, de vidro, para linhas aéreas de 2a classe - Características e ensaios.
- [25] EDP Distribuição. (2008). Materiais para Linhas Aéreas - Elementos de cadeias de isoladores, de material cerâmico ou de vidro temperado, do subtipo campânula e espigão, para linhas aéreas de 2a e 3a classes - Características e ensaios.
- [26] Mora, N. D., Lucas, J. F. R., Maran, M. A., Correia, E. F., Montemezzo, J. F., Colombari, L. F. dos S., Gonzaga, P. H. (2010). MATERIAIS ELÉTRICOS: Compêndio de Trabalhos.
- [27] Faculdade de Ingeniería - UBA. (2015). Materiales cerámicos.
- [28] Alarcón, J. (n.d.). Tema 1 . Introducción a la Química de los materiales cerámicos.
- [29] Pinto, V. C. (2014). Materiais Electrotécnicos: Isolantes.
- [30] FEUP. (n.d.). Isoladores de Cadeia. Disponível em <https://web.fe.up.pt/~ee97153/Isol.htm>. Acesso em Novembro de 2015.
- [31] Ceron. (n.d.). LINHA DE TRANSMISSÃO 138 kV - ALVORADA D ´ OESTE - ESPECIFICAÇÃO DE ISOLADORES DE DISCO 138 kV.
- [32] José Miguel Barbosa Forte. (n.d.). Projecto e Licenciamento de Linhas MT - Isoladores. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~ee99047/LNMT-Isoladores.html>. Acesso em Novembro de 2015.
- [33] Subcommittee, IEEE Chairman, L. and I. (2010). "Insulators 101."
- [34] EDP Distribuição. (2000). Isoladores e Material para Linhas Aéreas; Isoladores rígidos de eixo vertical de ferro de suporte, de material cerâmico, para linhas aéreas de 2a classe - Características e ensaios .
- [35] OC Tecnologia. (1987). Isoladores e Materiais para Linhas Aéreas - Ferros de suporte para isoladores rígidos de eixo vertical para linhas aéreas de 2a classe - Características.
- [36] EDP Distribuição. (2000). Isoladores e Material Para Linhas Aéreas; Isoladores rígidos de eixo horizontal de ferro de suporte, de material cerâmico, para linhas aéreas de 2a classe - Características e ensaios.
- [37] EDP Distribuição. (2004). Isoladores e Material para Linhas Aéreas - Isoladores rígidos de eixo vertical de ferro de suporte, de vidro, para linhas aéreas de 2a classe.

- [38] EDP Distribuição. (2008). Materiais para linhas aéreas - Elementos de cadeias de isoladores, de material cerâmico ou de vidro temperado, do subtipo campânula e espigão, para linhas aéreas de 2a e 3a classes - Características e ensaios.
- [39] ERSE. (n.d.). Qualidade de Serviço. Disponível em <http://www.erse.pt/pt/electricidade/qualidadedeservico/Paginas/default.aspx>. Acesso em Novembro de 2015.
- [40] Moreira, J. da C. (2005). Aplicação do método RCM às Linhas de Muito Alta Tensão da REN.
- [41] Nyamupangedengu, C., Luhlanga, L. P., & Letlape, T. (2007). Acoustic and HF detection of defects on porcelain pin insulators. energize.
- [42] Smith, J.R. (8 de Outubro de 2015). The 15 "Hottest" Electrical Problems You'll Find Lurking in Facilities. Obtido em 15 de 01 de 2016, de EC&M Electrical Construction & Maintenance: http://ecmweb.com/electrical-testing/15-hottest-electrical-problems-you-ll-find-lurking-facilities#slide-0-field_images-127991
- [43] Classificação dos materiais. (2004) (p. 64)
- [44] Garzon, M. E., & Cárdenas Barrero, M. R. (2012). Diagnóstico de redes de distribución aereas de 11.4 hasta 34.5 kv con la técnica de ultrasonido. Federación Iberoamericana de Mantenimiento, 8.
- [45] Almeida, F. B. de. (n.d.). Ondas Eletromagnéticas Ionizantes. Disponível em <http://www.mundoeducacao.com/fisica/ondas-eletromagneticas-ionizantes.htm>. Acesso em Dezembro de 2015.
- [46] Kuffel, E., & Zaengl, W.S. (1984). High-voltage engineering : fundamentals. Oxford: Pergamon Press.
- [47] Modenesi, P. J. (2007). Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais.
- [48] Paulino, M. E. D. C. (2010). Estado da Arte da Medição com Múltiplos Canais Sincronizados para Avaliação de Descargas Parciais.
- [49] Hicks, S. (n.d.). On-Line Partial Discharge Testing.
- [50] Lagreca, O. (2012). Estudo da Viabilidade da Utilização da Técnica de Ultrassom para Detecção da Ocorrência de Arco Elétrico.
- [51] Junior, E. J. teixeira. (2003). Medição de Descargas Parciais.
- [52] Naidu, M. S., & Kamaraju, V. (1982). High voltage engineering. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- [53] Präss, A. R. (n.d.). O Canal da Física na Internet - Classificação das Ondas
- [54] Filho, V.S. (2000). Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raio x pulsado em materiais dielétricos poliméricos
- [55] Paoletti, G., & Golubev, A. (s.d.). Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems
- [56] Borges, C. L. (2012). Uma Abordagem Alternativa para Inspeção Preditiva Não Invasiva em linha Aérea de Dstribuição de Média Tensão na Área Rural.
- [57] UE TRAINING SYSTEMS, INC, "Airborne Ultrasound: Level 1 - Leaks, Electrical & Mechanical Inspection", UE Systems Inc. - The ultrasound approach, New York, 2007;
- [58] EngePower Engenharia e Comércio Lda. (2012). Inspeção por ultrassom.
- [59] Goodman, M. (n.d.). CONDITION MONITORING: Ultrasound warns of mechanical, electrical problems before failures occur. Disponível em <http://www.ccj-online.com/2q->

- 2013/condition-monitoring-ultrasound-warns-of-mechanical-electrical-problems-before-failures-occur/. Acesso em Dezembro de 2015.
- [60] Guerra, R. (2006). Ondas Sonoras.
- [61] Newton C Braga. (n.d.). Medidas de Nível Sonoro (INS576). Disponível em <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/eletronica/52-artigos-diversos/9299-medidas-de-nivel-sonoro-ins576>. Acesso em Dezembro de 2015.
- [62] Physics, I. B. (2011). Waves – Introduction.
- [63] Holroyd, T. J. (2000). The acoustic emission & ultrasonic monitoring handbook. Oxford: Coxmoor Publishing Company.
- [64] Vitorino, G. M. de S. H. (2010). Modelação das Ondas de Rayleigh.
- [65] Berg, R. E., & Stork, D. G. (1995). The physics of sound.
- [66] Explicatorium. (n.d.). Espectro sonoro- O que é o espectro sonoro? Disponível em http://www.explicatorium.com/CFQ8/Som_Espectro_sonoro.php. Acesso em Novembro de 2015.
- [67] Aulas de Física e Química. (n.d.). O Espectro Sonoro. Disponível em http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html. Acesso em Novembro de 2015.
- [68] Cide@d. (2009). Las ondas. Disponível em <http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/impresos/quincena11.pdf>. Acesso em Novembro de 2015.
- [69] BBC. (n.d.). Waves. Disponível em <http://www.bbc.co.uk/bitesize/higher/physics/radiation/waves/revision/1/>. Acesso em Novembro de 2015.
- [70] Angus, D. H. and J. (2008). Acoustics and Psychoacoustics: Introduction to sound - Part 5. Disponível em <http://www.embedded.com/print/4015868>. Acesso em Novembro de 2015.
- [71] Fernandes, J. C. (2008). Acústica e Ruídos.
- [72] Vladišauskas, A., & Jakevičius, L. (2004). Absorption of ultrasonic waves in air. *Ultragarsas*, 1(1), 46-49
- [73] UE Systems Inc. (2012). EVALUATING WAVE FILES TO DETERMINE THE SEVERITY OF ULTRASONIC EMISSIONS.
- [74] Hielscher - Tecnologia de Ultra-Som. (n.d.). Ultra-som: Aplicações e Processos. Disponível em <http://www.hielscher.com/pt/technolo.htm>. Acesso em Dezembro de 2015.
- [75] Unifem. (n.d.). Ecografia. Disponível em https://www.google.pt/search?q=imagiologia+ultrassons&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAcQ_AUoAWoVChMIgJWc74nlyAIVhQoaCh3CrQQq&biw=669&bih=634#tbm=isch&q=ecografia&imgsrc=hsX-dZ26KBXMHM%3A. Acesso em Dezembro de 2015.
- [76] Bandes, A. (2014). Ultrasound Condition Monitoring.
- [77] AFA-Arc Flash Advisors Ghana. (n.d.). Airborne Ultrasound Testing. Disponível em <http://www.afaghana.com/energy-management/airborne-ultrasound-testing/>. Acesso em Dezembro de 2015.
- [78] Programa de Engenharia Biomédica da COPPE/UFRJ. (2013). Instrumentação e Técnicas de Medidas - Sensores Termoelétricos e Piezoelétricos.
- [79] Materials Research Society. (n.d.). Efeito Piezoelétrico.
- [80] Lima, W. B. de. (2013). Transdutores de Deformação a Base de Sensores Piezoelétricos.
- [81] Lisboa, I. S. T.-U. T. de. (2007). Heterodinagem (Deslocamento na frequência).

- [82] UE Systems Inc - The ultrasound approach. (2010). Instruction Manual - Ultraprobe 15,000...Touch.
- [83] UE Systems Inc. (2012). Instruction Manual - Ultraprobe 10000.
- [84] Soares, N. M. A. (2013). Inspeções periódicas em equipamento para trabalhos em tensão (TET) Ensaio Dielétricos.
- [85] Cerisol Isoladores Cerâmicos SA. (n.d.). Cerisol Isoladores Cerâmicos SA. Disponível em <http://www.cerisol.com/>. Acesso em Novembro de 2015.
- [86] Cerisol Isoladores Cerâmicos SA. (8 de 5 de 1998). R2 115C.
- [87] FLIR. (n.d.). FLIR A325(60Hz). Disponível em http://support.flir.com/DsDownload/Assets/48001-0101_en_40.pdf. Acesso em Janeiro de 2016.

Anexo I

Condutores e Isoladores Aplicados nas Linhas Aéreas da EDP Distribuição

17/SQF/2013 Condutores Nus

A data de atualização deste documento é de 21 de Julho de 2014.

Os documentos com as especificações de referência que deram origem a esta lista são: DMA-C34-120/N; DMA-C34-125/N e DMA-C34-110/E.

Os produtos qualificados pela EDP Distribuição em linhas aéreas, e respetivas empresas fornecedoras, encontram-se na tabela I.1. Foram também considerados condutores que atualmente não são empregues, como o de alumínio-aço com secção de 30mm².

Tabela I.1 – Lista de condutores nus para linha aéreas e fornecedores qualificados pela EDP Distribuição

REFERÊNCIAS EDP		Empresa	REFERÊNCIAS FABRICANTE		
Código EDP	Produto		Fabricante	Código do Fabricante	Resultado da Qualificação
275250	CABO AL/AÇO 30 6X2,36/1X2,36	Cabelte	Cabelte	CABO ACSR 30	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TPG044499P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	ACSR 1+6X2,36 mm GOPHER	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275250-ACSR A1/S1A 30MM2 C4-DMA	Qualificado
275251	CABO AL/AÇO 50 6X3,00/1X3,00	Cabelte	Cabelte	CABO ACSR 50	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	T48620299P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	ACSR 1X3,0+6X3,0 mm 42/7 mm2 ROBIN	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275251-ACSR A1/S1A 50MM2 C4-DMA	Qualificado
275252	CABO AL/AÇO 90 6X4,00/1X4,00	Cabelte	Cabelte	CABO ACSR 90	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	T48150499P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	ACSR 1+6X4,0 75/13 IEC	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275252-ACSR A1/S1A 90MM2 C4-DMA	Qualificado
275253	CABO AL/AÇO 130 12X2,92/7X2,92	Cabelte	Cabelte	CABO ACSR 130 "GUINEA"	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	T48C60299P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	ACSR 7+12X2,92 80/47 IEC	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275253-ACSR A1/S1A 130MM2 GUINEA C1-DMA	Qualificado
275254	CABO AL/AÇO 160 26X2,58/7X2,00	Cabelte	Cabelte	CABO ACSR 160 "PARTRIDGE"	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	T48180699P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	ACSR 7X2,0+26X2,57 136/22 PARTRIDGE	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275254-ACSR A1/S1A 160MM2 PARTRIDGE C1-DMA	Qualificado
275255	CABO AL/AÇO 235 26X3,15/7X2,43	Cabelte	Cabelte	CABO ACSR 235	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TPG046899P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	ACSR 7X2,43+26X3,15 203/32 IEC	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275255-ACSR A1/S1A 235MM2 C1-DMA	Qualificado
275256	CABO AL/AÇO 325 30X3,35/7X3,35	Cabelte	Cabelte	CABO ACSR 325 "BEAR"	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	T48210899P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	ACSR 7X3,35+30X3,35 264/62 BEAR	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275256-ACSR A1/S1A 325MM2 BEAR C1-DMA	Qualificado
279029	CABO NU LIGA ALUMINIO 34,4MM2	Cabelte	Cabelte	CABO AAAC ASTER 34,4	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TAM130399P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	AAAC 7X2,5 ASTER 34,4	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	279029-AAAC AL4 34,4MM2 - ASTER 34,4 C4 - DMA	Qualificado

279030	CABO NU LIGA ALUMINIO 54,6MM2	Cabelte	Cabelte	CABO AAAC ASTER 54,6	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TAM300999P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	AAAC 7X3,15 ASTER 54,6	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	279030-AAAC AL4 55MM2 - ASTER 54,6 C4 - DMA	Qualificado
282176	CABO NU LIGA ALUMINIO 117MM2	Cabelte	Cabelte	CABO AAAC ASTER 117	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TAM170399P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	AAAC 19X2,8 ASTER 117	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	282176-AAAC AL4 117MM2 - ASTER 117 C4 - DMA	Qualificado
282175	CABO NU LIGA ALUMINIO 148MM2	Cabelte	Cabelte	CABO AAAC ASTER 148	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TAM180399P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	AAAC 19X3,15 ASTER 148	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	282175-AAAC AL4 148MM2 - ASTER 148 C4 - DMA	Qualificado
301432	CABO NU LIGA ALUMINIO 288MM2	Cabelte	Cabelte	CABO AAAC ASTER 288	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TPG047099P	Qualificado
		Prysmian	Prysmian	AAAC 37X3,15 ASTER 288	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	301432-AAAC AL4 288MM2 - ASTER 288 C4 - DMA	Qualificado
202974	CABO NU COBRE 16 7X1,70	Cabelte	Cabelte	COBRE NU DURO 16 (7X1,70)	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TC4110599P	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	202974-CABO COBRE NU 16MM2 DMA	Qualificado
275300	CABO NU COBRE 25 19X1,32	Cabelte	Cabelte	COBRE NU DURO 25 (19x1,32)	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TC4120999P	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	207300-CABO COBRE NU 25MM2 DMA	Qualificado
275302	CABO NU COBRE 50 19X1,80	Cabelte	Cabelte	COBRE NU DURO 50 (19x1,80)	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TC4141799P	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275302-CABO COBRE NU 50MM2 DMA	Qualificado
275303	CABO NU COBRE 95 19X2,50	Cabelte	Cabelte	COBRE NU DURO 95 DMA	Qualificado
		General Cable CelCat	Grupo General Cable	TC4160499P	Qualificado
		Quintas & Quintas	Quintas & Quintas	275303-CABO COBRE NU 95MM2 DMA	Qualificado

36/PNC-QD/2008 Isoladores

A data de atualização do documento é 2 de Dezembro de 2013.

Os documentos com as especificações de referência que deram origem a esta lista são: DMA-C66-130/N; DMA-C66-131/E; DMA-C66-132/N; DMA-C66-135/N e DMA-C66-140/E.

A tabela I.2 apresenta os produtos qualificados para aplicação nas linhas aéreas da EDP Distribuição, e respetivas empresas fornecedoras e fabricantes, de acordo com o 36/PNC-QD/2008.

Tabela I.2 – Lista de isoladores e fornecedores qualificados pela EDP Distribuição

REFERÊNCIAS EDP		Empresa	REFERÊNCIAS FABRICANTE		Resultado da Qualificação
Código EDP	Produto		Fabricante	Código do Fabricante	
275856	ISOL CADEIA CAMPÂNULA ESPIGÃO U70BS	AUDIÓNICA	LVIV	PS 70E	Qualificado
		CERISOL	CERISOL	P2 501E	
		RESUL	LVIV	PS 70E	
		TECNERGA	SGD LA GRANJA	E-70-127	
275854	ISOL CADEIA CAMPÂNULA ESPIGÃO U100BS	TECNERGA	SGD LA GRANJA	E-100-127	Qualificado
		RESUL	LVIV	U100BS	
275853	ISOL CADEIA CAMPÂNULA ESPIGÃO U100BLP	RESUL	LVIV	PSV 120B	Qualificado
			CERAMICA SANTA TEREZINHA	8.02.26.01	
		TECNERGA	SGD LA GRANJA	E-100PP-146	
275861	ISOL RÍGIDO EIXO HORIZONTAL RH-85	CERISOL	CERISOL	R3106C	Qualificado
		RESUL	CERAMICA SANTA TEREZINHA	8.05.15.01	
275859	ISOL RÍGIDO EIXO HORIZONTAL RH-102	CERISOL	CERISOL	R3107C	Qualificado
		RESUL	CERAMICA SANTA TEREZINHA	8.05.16.01	
275863	ISOL RÍGIDO EIXO VERTICAL R-70 c/ferro de suporte	CERISOL	CERISOL	RF1 14C	Qualificado
		RESUL	CERAMICA SANTA TEREZINHA	8.03.06.05	
275864	ISOL RÍGIDO EIXO VERTICAL R-85 c/ferro de suporte	CERISOL	CERISOL	RF1 15C	Qualificado
		RESUL	CERAMICA SANTA TEREZINHA	8.03.07.01	
275862	ISOL RÍGIDO EIXO VERTICAL R-102 c/ferro de suporte	CERISOL	CERISOL	RF1 12C	Qualificado

Anexo II

Características técnicas da camara termográfica *Flir A325*

Tabela II.1 – Características técnicas da camara termográfica Flir A325 [87]

Imaging and optical data	
Field of view (FOV) / Minimum focus distance	25° × 18.8° / 0.4 m (1.31 ft.)
Focal length	18 mm (0.7 in.)
Spatial resolution (IFOV)	1.36 mrad
Lens identification	Automatic
F-number	1.3
Thermal sensitivity/NETD	< 0.05°C @ +30°C (+86°F) / 50 mK
Image frequency	60 Hz
Focus	Automatic or manual (built in motor)
Detector data	
Focal Plane Array (FPA) / Spectral range	Uncooled microbolometer / 7.5–13 μm
IR resolution	320 × 240 pixels
Detector pitch	25 μm
Detector time constant	Typical 12 ms
Measurement	
Object temperature range	-20 to +120°C (-4 to +248°F) 0 to +350°C (+32 to +662°F)
Accuracy	±2°C (±3.6°F) or ±2% of reading
Measurement analysis	
Atmospheric transmission correction	Automatic, based on inputs for distance, atmospheric temperature and relative humidity
Optics transmission correction	Automatic, based on signals from internal sensors
Emissivity correction	Variable from 0.01 to 1.0
Reflected apparent temperature correction	Automatic, based on input of reflected temperature
External optics/windows correction	Automatic, based on input of optics/window transmission and temperature
Measurement corrections	Global object parameters
Ethernet	
Ethernet	Control and image
Ethernet, type	Gigabit Ethernet
Ethernet, standard	IEEE 802.3
Ethernet, connector type	RJ-45
Ethernet, communication	TCP/IP socket-based FLIR proprietary and GenICam protocol
Ethernet, image streaming	16-bit 320 × 240 pixels - Signal linear - Temperature linear - Radiometric GigE Vision and GenICam compatible
Ethernet, protocols	TCP, UDP, SNMP, RTSP, RTP, HTTP, ICMP, IGMP, ftp, SMTP, SMB (CIFS), DHCP, MDNS (Bonjour), uPnP
Digital input/output	
Digital input, purpose	Image tag (start, stop, general), Image flow ctrl. (Stream on/off), Input ext. device (programmatically read)

Digital input	2 opto-isolated, 10–30 VDC
Digital output, purpose	Output to ext. device (programmatically set)
Digital output	2 opto-isolated, 10–30 VDC, max 100 mA
Digital I/O, isolation voltage	500 VRMS
Digital I/O, supply voltage	12/24 VDC, max 200 mA
Digital I/O, connector type	6-pole jackable screw terminal
Power system	
External power operation	12/24 VDC, 24 W absolute max
External power, connector type	2-pole jackable screw terminal
Voltage	Allowed range 10–30 VDC
Environmental data	
Operating temperature range	–15°C to +50°C (+5°F to +122°F)
Storage temperature range	–40°C to +70°C (–40°F to +158°F)
Humidity (operating and storage)	IEC 60068-2-30/24 h 95% relative humidity +25°C to +40°C (+77°F to +104°F)
EMC	<ul style="list-style-type: none"> • EN 61000-6-2:2001 (Immunity) • EN 61000-6-3:2001 (Emission) • FCC 47 CFR Part 15 Class B (Emission)
Encapsulation	IP 40 (IEC 60529)
Bump	25 g (IEC 60068-2-29)
Vibration	2 g (IEC 60068-2-6)
Physical data	
Weight	0.7 kg (1.54 lb.)
Camera size (L x W x H)	170 x 70 x 70 mm (6.7 x 2.8 x 2.8 in.)
Tripod mounting	UNC ¼"-20 (on three sides)
Base mounting	2 x M4 thread mounting holes (on three sides)
Housing material	Aluminium
Scope of delivery	
<ul style="list-style-type: none"> • Hard transport case or cardboard box • Infrared camera with lens • Application CD-ROM • Calibration certificate • Ethernet™ cable • Mains cable • Power cable, pig-tailed • Power supply • Printed Getting Started Guide • Printed Important Information Guide • User documentation CD-ROM • Utility CD-ROM • Warranty extension card or Registration card 	

Anexo III

Resultados dos ensaios laboratoriais

Isoladores de suporte

Na tabela III.1 estão resultados obtidos durante os ensaios aos isoladores de suporte.

Tabela III.1 – Tensão aplicada ao isolador e respetivo NIS dos ultrassons captados

Tensão de ensaio (kV)	NIS (dB)		
	<i>SuporteOK</i>	<i>SuporteDanificado</i>	<i>SuportePerfurado</i>
0 até 20	0	0	0
24	0	0	2
28	4	4	4
32	6	15	7
36	9	22	9
40	12	25	13
44	15	23	-
48	19	24	-
52	19	28	-
56	21	29	-
60	23	27	-

Cadeias de isoladores

Na tabela III.2 estão resultados obtidos durante os ensaios às cadeias de isoladores.

Tabela III.2 – Tensão aplicada à cadeia e respetivo NIS dos ultrassons captados

Tensão de ensaio (kV)	NIS (dB)	
	<i>CadeiaOK</i>	<i>CadeiaPerfurada</i>
0 até 20	0	0
24	6	2
28	11	1
32	21	13
36	23	21
40	23	23
44	25	26
48	26	27
52	28	27
56	31	29
60	34	30