



Hugo André Sousa Guerreiro

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Monitorização de Juntas de Dilatação na Ponte Vasco da Gama

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Luis Gomes

Co-Orientador: Professor Doutor Manuel Barata

Júri:

Presidente: Professor Doutor Fernando Coito

Arguente: Professor Doutor Luis Palma

Vogal: Professor Doutor Luis Gomes

Vogal: Professor Doutor Manuel Barata



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Junho de 2012

“Monitorização de Juntas de Dilatação na Ponte Vasco da Gama” © Hugo André Sousa Guerreiro, FCT/UNL, UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Luis Gomes, agradeço a oportunidade de escolha desta dissertação bem como toda a orientação e rigor aplicados na sua execução.

Agradeço ao Professor Doutor Manuel Barata, Professor no ISEL (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa) co-orientador deste trabalho, por toda a colaboração prestada.

Ao meu colega Rogério Campos Rebelo, estou grato por toda a ajuda no aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço à empresa Gestiponte (Operação e Manutenção das Travessias do Tejo, S.A.) a disponibilidade de meios técnicos e humanos indispensáveis para a concretização desta dissertação.

E pessoalmente aos meus pais, irmã e restante família, os meus mais profundos agradecimentos pela ajuda, por acreditarem e me tornarem uma pessoa melhor e capaz de concluir este objectivo de vida que é a dissertação de mestrado.

Aproveito ainda para expressar a mais sincera gratidão aos amigos e colegas de trabalho pela orientação, apoio e aconselhamento transmitidos.

Resumo

Esta dissertação consiste, principalmente, no estudo e implementação de um protótipo de monitorização das juntas de dilatação de tipo *Éole*, na ponte Vasco da Gama, ou seja, no desenvolvimento de um software de monitorização em tempo real que indique em que estado de degradação se encontra a junta de dilatação.

Actualmente, existe uma equipa técnica a exercer a monitorização *in situ* das juntas que não utiliza qualquer tipo de equipamento específico, dependendo apenas da prática do técnico, que, ao ouvir o som produzido pela passagem de viaturas na junta de dilatação, conclui em que estado esta se encontra. Torna-se crítica a rapidez e periodicidade com que estas vistorias são efectuadas, já que, se o diagnóstico for demorado ou errado põe em risco a integridade da junta, conduzindo a aumento de custos de manutenção e deterioração da qualidade de serviço da ponte, uma vez que torna inevitável o condicionamento do trânsito na ponte.

Ao protótipo em estudo compete a eventual substituição da equipa técnica para monitorização das juntas, de forma permanente, continuada e em tempo real. Através da análise do som produzido pela passagem de viaturas na junta será possível concluir se é necessária a intervenção de uma equipa técnica para manutenção e vistoria da mesma.

Na análise e estudo dos sons adquiridos *in situ* foram utilizados os ambientes computacionais Matlab7 e SoundForge8. O Matlab foi utilizado para efectuar os cálculos e análises aos conjuntos de treino adquiridos, possibilitando mais tarde a aplicabilidade da mesma análise para apresentação de dados em tempo real. O SoundForge, foi utilizado como forma de manipular os sons adquiridos em bruto, eliminando os sons não desejados e isolar os mais relevantes para se obter conclusões fiáveis. Finalmente, o protótipo foi desenvolvido em LabView8, apresentando uma interface ao utilizador muito perceptível e beneficiando de uma facilidade na aquisição do som e integração dos algoritmos desenvolvidos em Matlab.

Palavras-chave: Monitorização, Classificação, Som, Inspeção, Danos Estruturais, Busca de Padrão.

Abstract

This dissertation consists mainly in the study and implementation of a prototype for monitoring of *Éole* type expansion joints at Vasco da Gama Bridge, by other words, in the development of a software application to monitor in real time on which state of degradation the expansion joint is.

Currently, a technical team implements an in-situ monitoring of the joints, not using any specific equipment, but relying only on the expertise of the technicians, who based on the sound produced by the passage of vehicles on the board conclude on the degradation status of the joint. It is critical to increase the frequency with which these surveys take place, because, if the diagnosis is delayed or wrongly performed jeopardizes the integrity of the joint. This will lead to increased maintenance costs and bridge damage, as at the end is inevitable the conditioning of traffic on the bridge.

The goal of prototype under study is to be the replacement of the technical team responsible to monitor the joints permanently, continuously and in real time. Through the analysis of the sound produced by the passage of vehicles on expansion joint, it will be concluded if there is a need of the technical team for maintenance and inspection of the same expansion joint.

In the analysis and study of sounds acquired in situ, it was used Matlab7 and SoundForge8. Matlab was used to perform calculations and analysis on the training sets acquired, allowing the applicability of this analysis for presentation of data in real time. The SoundForge, was used as a way to manipulate the acquired raw sounds, eliminating unwanted sounds and isolating the most important to obtain reliable conclusions in the training samples group generation. Finally, the prototype was developed in LabView, presenting a very noticeable user interface and benefiting from a facility in the acquisition of sounds and on Matlab algorithms integration.

Keywords: Monitoring, Classification, Sound, Inspection, Structural Damage, Pattern Search.

Índice

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – MOTIVAÇÃO	1
1.2 – OBJECTIVOS	2
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
CAPITULO 2 – CONTEXTUALIZAÇÃO.....	5
2.1 – A PONTE VASCO DA GAMA.....	5
2.2 – A JUNTA DE DILATAÇÃO	6
2.3 – DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	8
2.4 – MONITORIZAÇÃO EXISTENTE	11
2.4.1 – <i>Inspecções Periódicas</i>	11
2.4.2 – <i>Inspecções Automatizadas</i>	13
2.5 – AQUISIÇÃO DE DADOS	13
2.6 – TRANSDUTORES PARA AQUISIÇÃO DE SINAL	15
2.6.1 – <i>Acelerómetros</i>	15
2.6.2 – <i>Microfones</i>	16
2.6.3 – <i>Dimensionamento de Microfones</i>	18
CAPITULO 3 – CLASSIFICADORES	27
3.1 – APRENDIZAGEM AUTOMÁTICA.....	27
3.2 – ALGORITMOS DE APRENDIZAGEM.....	28
3.2.1 – <i>Classificadores Baseados em Exemplos</i>	28
3.2.2 – <i>Classificadores Baseados em Redes Neurais</i>	30
3.2.3 – <i>Classificadores Baseados em Algoritmos Genéticos</i>	34
3.2.4 – <i>Classificadores Baseados em Árvores de Decisão</i>	35
3.2.5 – <i>Classificadores Baseados em Conjuntos Difusos</i>	38
CAPITULO 4 – INSPECÇÕES	43
4.1 – ANÁLISE OBJECTIVA	43
4.2 – INSPECÇÕES NO LOCAL	47
4.2.1 – <i>Primeira Inspecção</i>	47
4.2.2 – <i>Segunda Inspecção</i>	51
4.2.3 – <i>Terceira Inspecção</i>	56

4.2.4 – <i>Inspecção Simulada</i>	57
4.2.5 – <i>Conclusões</i>	58
CAPITULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO	61
5.1 – ANÁLISES TEMPORAIS	61
5.1.1 – <i>Detecção de Amostra</i>	62
5.1.2 – <i>Janela de Captura</i>	63
5.1.3 – <i>Janela de Análise</i>	66
5.1.4 – <i>Localização de Impacto</i>	68
5.1.5 – <i>Amostras Rejeitadas</i>	72
5.2 – ANÁLISES EM FREQUÊNCIA.....	73
5.2.1 – <i>Busca de Padrão</i>	74
5.2.2 – <i>Classificação de Estado Estrutural</i>	77
5.3 – CONCLUSÕES	80
CAPITULO 6 – RESULTADOS E CONCLUSÕES	81
6.1 – IMPLEMENTAÇÃO	82
6.2 – VALIDAÇÃO	82
6.3 – CONCLUSÕES	84
CAPITULO 7 – BIBLIOGRAFIA	87

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Passadiço de Acesso à zona inferior da Junta de Dilatação.....	2
Figura 2.1 – Junta de Dilatação Analisada.....	6
Figura 2.2 – Imagem Inferior da Junta de Dilatação (esquerda), Corte Transversal (Direita) (SETRA 2005).	7
Figura 2.3 – Painel (SETRA 2005).....	7
Figura 2.5 – Evolução de Deterioração das Juntas de Dilatação.	8
Figura 2.4 – Suportes Metálicos (SETRA 2005).....	8
Figura 2.6 – Exemplo de Perda de Parafusos.....	9
Figura 2.7 – Exemplo de Ruptura de Painel.....	9
Figura 2.8 – Vista Inferior de Painel e Suportes Metálicos.....	10
Figura 2.9 – Equipamento de análise de nível sonoro (Lima e Brito 2007)	12
Figura 2.10 – Constituição de Microfone (PCB PIEZOTRONICS 2007)	16
Figura 2.11 – Microfone em Campo Aberto (PCB PIEZOTRONICS 2007)	18
Figura 2.12 – Microfone em Campo de Pressão (PCB PIEZOTRONICS 2007).....	19
Figura 2.13 – Microfone em Campo Difuso (PCB PIEZOTRONICS 2007)	19
Figura 2.14 – Curva de Resposta na Frequência (Brüel & Kjær 1996)	21
Figura 2.15 – Diagrama Polar de Microfone Omnidireccional (Shure 2007)	22
Figura 2.16 – Diagrama Polar de Microfone "Shotgun" (Wikipedia n.d.)	23
Figura 2.17 – Diagrama Polar de Microfone Unidireccional (Shure 2007)	23
Figura 2.18 – Diagrama Polar de Microfone Bidireccional (Shure 2007).....	24
Figura 2.19 - Exemplo da Variação da Resposta de um Microfone Normalizado a 0° de Incidência (Brüel & Kjær 1996).....	24
Figura 3.1 – Exemplo de Arquitectura de IA (Mitchell 1997)	28
Figura 3.2 – Exemplo de Classificação por Proximidade (Fonseca, Indução de Árvores de Decisão 1996)	29
Figura 3.3 – Modelo Não Linear de Neurónio (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)	31
Figura 3.4 – Exemplo de Pequena RN (Fonseca, Indução de Árvores de Decisão 1996)	32
Figura 3.5 – Limitações de Estruturas de RN's(Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)	33
Figura 3.6 – Operações de AG.....	34

Figura 3.7 – Exemplo de Arvore de Decisão (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)	36
Figura 3.8 – Exemplo de Conjunto Rígido (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)	40
Figura 3.9 – Exemplo de Conjunto Difuso (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)	40
Figura 3.10 – Formatos Típicos de Funções de Pertença(Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006).....	41
Figura 4.1 - AKG C1000 S (AKG 2009).....	45
Figura 4.2 – Adaptador PPC1000 para campos difusos (esquerda) e PB1000 para campo aberto. (AKG 2009).....	46
Figura 4.3 – Diagrama Polar Hipercardióide (esquerda), Diagrama Polar Cardióide (direita). (AKG 2009)	47
Figura 4.4 – Interface de Aquisição	48
Figura 4.5 – Exemplo de JD analisada.....	48
Figura 4.6 – Ilustração do Posicionamento do Microfone em Aquisição (em mm)	49
Figura 4.7 – Ilustração de Configuração de Ligações	49
Figura 4.8 – Exemplo de Amostra Adquirida	50
Figura 4.9 – Placa de Captura de Som UA-25 (Roland 2008).....	52
Figura 4.10 – Interface de Aquisição	53
Figura 4.11 – Configuração dos Dois Microfones em Aquisição (em mm).....	54
Figura 4.12 – Microfones <i>in situ</i>	54
Figura 4.13 – Esquema de Ligações Utilizado	55
Figura 4.14 – Exemplo de Amostra Adquirida	55
Figura 4.15 – Interface de Análise de Localização de Impacto	57
Figura 4.16 – Configuração de Ligações.....	58
Figura 5.1 – Interface de <i>Trigger</i> e Aquisição.....	62
Figura 5.2 – Gráfico Temporal de Detecção de <i>Trigger</i>	63
Figura 5.3 – Análise Espectral de Amostra de Som	64
Figura 5.4 – Estados de Condicionamento de Sinal.....	65
Figura 5.5 – Cálculo de Atraso e Nível de <i>Trigger</i>	66
Figura 5.6 – Gráfico de Amostra e Detecções.....	67
Figura 5.7 – Amostra de Via Esquerda (Esq.), Amostra de Via Central (Centro), Amostra de Via Direita (Dta.).....	68
Figura 5.8 – Classificação de Via de Rodagem e Pontos de Transição	69

Figura 5.9 – Esquematização de Distâncias	69
Figura 5.10 – Classificador Baseado em Árvore de Decisão Utilizado.....	71
Figura 5.11 - Representação de Classificação Algoritmos de Vizinhaça (Guerreiro, Gomes and Campos-Rebelo 2011)	71
Figura 5.12 – Exemplos de Transformadas de Fourier, Amostra de JD em Boas Condições (Esq.), Amostra de JD em Más Condições (Dta.).....	73
Figura 5.13 – Conjunto de Amostras “boas” (Esq.), Conjunto de Amostras “más” (Dta.)	75
Figura 5.14 – Comparativo de Padrões.....	76
Figura 5.15 – Diferença entre Padrões	76
Figura 5.16 – Determinação de Bandas de Frequências Alvo	78
Figura 5.17 – Curva de Calibração (Verde), Curva de Comparação (Azul)	79
Figura 6.1 – Interface de Protótipo (Guerreiro, Gomes and Campos-Rebelo 2011) .	81
Figura 6.2 – Medição de Danos Estruturais em JD em Diferentes Datas (Guerreiro, Gomes and Campos-Rebelo 2011).....	83
Figura 6.3 – Resultados Finais da Análise	84

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Características Estruturais da PVG (Lusoponte 1998)	5
Tabela 2.2 – Níveis de Referência Sonoros	20
Tabela 3.1 – Exemplo de Camadas de uma RN	31
Tabela 4.1 – Especificações do Microfone C1000 S da AKG (AKG 2009).....	45
Tabela 4.2 – Quantidades de Amostras do Conjunto de Treino.....	59

Simbologia e Notações

AA	Aprendizagem automática
AD	Árvores de decisão
AG	Algoritmos Genéticos
CD	Conjuntos Difusos
FCT-UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
FFT	Fast Fourier Transform
IA	Inteligência artificial
IEC	International Electrotechnical Commission
IU	Interface de Utilizador
JD	Junta de Dilatação
MEMS	Micro Electrical-Mechanical Systems
MHz	Mega Hertz
Pa	Pascal
PE	Piezoelétricos
PR	Piezoresistivos
PVG	Ponte Vasco da Gama
RN	Redes Neurais

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Motivação

Apesar de já existir um vasto leque de soluções de monitorização de pontes, poucas são as soluções de monitorização de juntas de dilatação, e mesmo as que existem, tornam-se muito dispendiosas. As soluções mais comuns para monitorizar as juntas de dilatação de uma ponte necessitam de uma grande quantidade de sensores por junta, sensores esses que se irão multiplicar pelo número de juntas existente ao longo de uma ponte, implicando um ainda maior número de dispositivos de análise e gravação como meio de suporte a estes sensores. Com o comprimento destas vias, poderá resultar numa instalação dispendiosa, complexa e com possíveis problemas derivados da distância. Posto isto, grande parte das monitorizações são feitas apenas com vistorias regulares às juntas, por parte de técnicos qualificados que nem sempre dispõem de disponibilidade atempada.

Este trabalho de dissertação consiste na detecção de falhas nas juntas de dilatação na Ponte Vasco da Gama (PVG), permitindo uma detecção antecipada de defeitos e obtendo a *posteriori*, uma melhor gestão de recursos, redução de custos de manutenção, aumento de segurança e nível de qualidade disponibilizada aos utentes. Uma vez que, as juntas de dilatação são dos componentes constituintes de uma ponte que requerem mais manutenção, as juntas da Ponte Vasco da Gama (PVG) (tipo EOLE) não são excepção. Como o nível de qualidade das pontes em Portugal é medido, tomando como referencia o congestionamento, com uma prévia detecção de defeitos nas juntas, evita-se o corte das vias e conseqüente condicionamento de tráfego na ponte.

No desenvolvimento deste trabalho vão ser consideradas três fases distintas: a aquisição de sons, análise de sons adquiridos e desenvolvimento de protótipo para classificação do estado das juntas.

A primeira fase vai consistir na aquisição de sons; para isto vão ser necessários dispositivos de aquisição e digitalização de som, bem como o prévio dimensionamento das suas características. A instalação na PVG será realizada numa posição inferior à junta de dilatação em análise, exactamente por baixo do

pavimento e no interior do pavimento da ponte, tal como é possível ver na Figura 1.1.

Na segunda fase temos a análise dos sons adquiridos, que vai incluir o tratamento de dados (neste caso som) previamente adquiridos, e cálculos associados, tais como a sua caracterização espectral, como forma de detectar quais os elementos nas amostras de som recolhidas que nos permitam caracterizar o estado das juntas.

A terceira fase vai ser o culminar das duas fases anteriores, tratando-se da implementação de uma aplicação protótipo, que vai colocar em prática todas as teorias defendidas anteriormente.

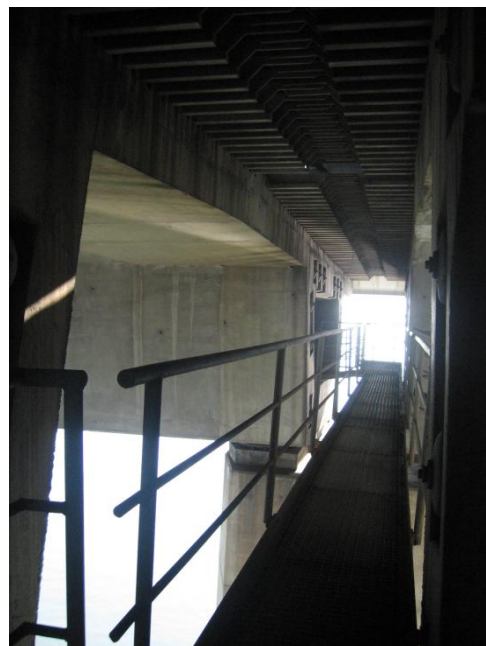


Figura 1.1 – Passadiço de Acesso à zona inferior da Junta de Dilatação.

1.2 – Objectivos

Pretende-se com esta dissertação, o desenvolvimento de um algoritmo capaz de determinar o estado estrutural em que se encontram as juntas de dilatação analisadas. Dada a constituição das diferentes juntas, é também relevante diferenciar os estados das três vias que constituem a faixa de rodagem. Sabendo em tempo útil qual é o verdadeiro estado da junta, torna-se possível enviar uma equipa responsável pela sua manutenção, reparando de forma mais atempada e actuando junto dos elementos que mais necessitam de intervenção. Com isto, é obtida uma melhor gestão dos recursos humanos necessários para o efeito e uma redução dos custos de manutenção, devido a reparação atempada das juntas. Tudo isto contribuindo para um aumento do nível de qualidade prestado aos utentes, por evitar que problemas se agravem, reduzindo o número de cortes de via e a duração dos mesmos.

Tornou-se ainda necessário o estudo dos tipos de dispositivos de aquisição bem como dos algoritmos de classificação existentes, como meio de fundamentar as decisões a serem tomadas.

Com o desenvolver desta dissertação surgiram novos objectivos, tornando-se essenciais para alcançar os resultados finais pretendidos. Após inspecções no local e análise das juntas de dilatação (JD) a serem monitorizadas, surgiu a necessidade de classificar o seu estado estrutural ao longo da JD. Posteriormente e depois de analisadas as amostras sonoras recolhidas no local, foi imperativa a validação de amostras para classificação para que se fossem contornadas todas as variáveis não controladas (tais como diferentes velocidades, veículos), restando abordar a mais-valia que representa a detecção automática de padrão, tratando-se de um objectivo que surgiu da necessidade de facilmente se adaptar o mesmo algoritmo a diferentes JD.

1.3 – Estrutura da Dissertação

Esta tese, para além deste capítulo introdutório (Capítulo 1) e da bibliografia (Capítulo 7), é ainda constituída por mais cinco capítulos. Nesta secção encontra-se apresentada uma breve descrição do que cada capítulo representa e refere.

O Capítulo 2 é destinado à contextualização desta dissertação, começando por caracterizar genericamente a Ponte Vasco da Gama, bem como os seus elementos em estudo, salientando-se ainda o tipo e constituição das juntas de dilatação em foco, para que seja referenciado o problema e a sua evolução. São ainda retratados os tipos de monitorizações aplicadas em estruturas similares à Ponte Vasco da Gama, descrevendo as soluções e técnicas já existentes no mercado para a resolução do problema actual.

Ainda neste capítulo, são apresentadas as características dos sinais pretendidos, visando a monitorização estrutural das juntas de dilatação e detecção de anomalias relacionadas com as mesmas. De seguida, são identificados os tipos de tecnologia de aquisição de sinais, com base na análise de vibração ou som. Tanto nos acelerómetros como nos microfones, são

descritos quais os parâmetros de escolha e os objectivos das diferentes configurações existentes.

No capítulo 3, para além de definido o conceito de aprendizagem automática de uma máquina, encontram-se descritos diversos tipos de algoritmos de aprendizagem e classificação automática, salientando princípios de funcionamento, particularidades e pontos fortes passíveis de aplicação nos fundamentos desta dissertação.

Depois da contextualização e estudadas possíveis ferramentas a aplicar, o capítulo 4 é dedicado à descrição de uma série de inspecções feitas no local, sendo abordado as configurações do material utilizado, tanto nas inspecções no local, como em ambiente laboratorial, a possibilidade de utilização de uma inspecção simulada com o objectivo de testar e comprovar resultados e métodos de monitorização.

Seguindo-se o capítulo 5, onde está descrito todo o processo de implementação desde os métodos e algoritmos utilizados, até ao funcionamento da aplicação protótipo desenvolvida.

Esta dissertação é então culminada com o capítulo 6, onde são apresentados os resultados obtidos utilizando os algoritmos desenvolvidos, material e parametrizações escolhidas. Reforçando e comprovando a viabilidade e aplicabilidade desta monitorização automatizada em tempo real, quando aplicada às juntas de dilatação da PVG.

Capítulo 2 – Contextualização

2 – Introdução.

Neste capítulo iremos descrever brevemente a ponte Vasco da Gama e os tipos constituintes de juntas de dilatação, bem como os fundamentos postos em causa para a escolha das ferramentas utilizadas neste projecto, tanto a nível de hardware como software.

2.1 – A Ponte Vasco da Gama.

Tendo sido construída em cerca de três anos, a Ponte Vasco da Gama foi inaugurada antes da realização da exposição mundial Expo98 (4 de Abril de 1998). Permitindo a travessia sobre o rio Tejo, na área da Grande Lisboa, esta estabelece a ligação entre Montijo e Alcochete a Lisboa e Sacavém. Com cerca de 17km de comprimento torna-se a mais longa ponte da Europa e a 5ª mais extensa no mundo. Seguidamente é possível visualizar algumas das características estruturais da PVG:

Comprimento total da travessia	17.185 m
Comprimento total das estruturas em ponte e viadutos	12.345 m
Comprimento do acesso até Sacavém	945 m
Comprimento do Viaduto Norte	488m (11 vãos)
Comprimento do Viaduto da Expo	672m (12 vãos)
Comprimento da Ponte Principal	826 m
Comprimento do vão principal	420 m
Altura dos pilares do vão principal	148 m
Altura livre para a navegação	47 m
Comprimento do Viaduto Central	6.531m (80 vãos)
Comprimento do Viaduto Sul	3.825m (84 vãos)
Comprimento do acesso até ao Montijo	3.895 m
Número de caixotões	81
Volume total de betão	730.000 m ³
Peso do aço em armaduras	100.000 toneladas
Total de vigas - tabuleiro pré-fabricadas	150
Volume total de movimentação de terras	1.400.000 m ³
Área total de tapete betuminoso	400.000 m ²
Número máximo de trabalhadores	3.300
Prazo da construção	Fevereiro de 1995 a Março de 1998

Tabela 2.1 – Características Estruturais da PVG (Lusoponte 1998)

Tratando-se de um empreendimento de grandes dimensões, origina que qualquer investimento tome grandes proporções. Uma vez que já tem mais de 11 anos de existência torna-se crítica a necessidade de monitorização constante, para que se possa traduzir numa redução de custos em manutenção, tendo em conta que os gastos resultantes da manutenção irão aumentar tendencialmente com o passar do tempo, a menos que se adoptem técnicas inovadoras de monitorização estrutural.

2.2 – A Junta de Dilatação

As juntas de dilatação têm como princípio de funcionamento a absorção de dilatações ou retracções entre materiais envolventes. No caso em análise, destinam-se a preencher os espaços entre as muitas secções dos viadutos. Quando a PVG foi projectada e construída, a sua localização contraiu alguma polémica por se situar numa área protegida do estuário do Tejo. Como tal, os engenheiros e projectistas tiveram o cuidado de optar por juntas de dilatação que emitsem baixos níveis de ruído (quando percorridas por veículos) para que a fauna local não fosse afectada. Para que as juntas cumpram as especificações e requisitos, devem encontrar-se no mais perfeito estado de conservação, reafirmando a relevância da monitorização em tempo real.

Posto isto, o tipo de junta analisada e que actualmente se encontra em funcionamento na PVG, é a ÉOLE. Sendo um produto da empresa francesa Freyssinet, como se pode visualizar na Figura 2.1, trata-se de uma junta de dilatação modular, sendo constituída por diversos conjuntos de peças variáveis, consoante a largura e comprimentos pretendidos.

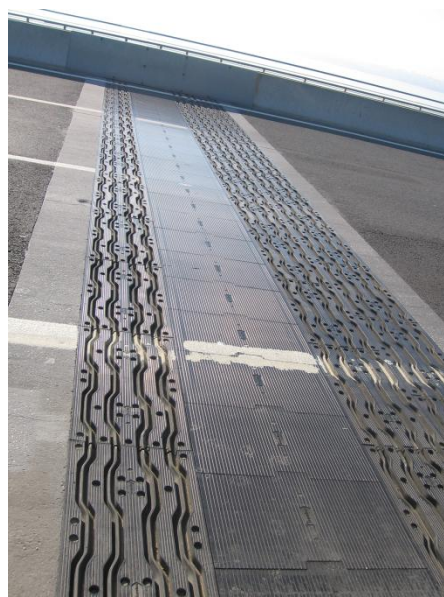


Figura 2.1 – Junta de Dilatação Analisada

2.2.1 – Elementos Constituintes

Como foi referido atrás, as juntas de dilatação são compostas por diversas peças, que de forma modular, constituem os mais variados modelos. Sendo compostas por painéis em borracha, estes são apoiados por meio de suportes metálicos a vigas alternadamente chumbadas no betão dos viadutos a unir, de forma a permitir um deslizamento consoante a dilatação e refracção dos viadutos adjacentes. Na Figura 2.2, podemos ter uma melhor percepção da constituição das juntas de dilatação analisadas, pois vai ser crucial na compreensão do problema.

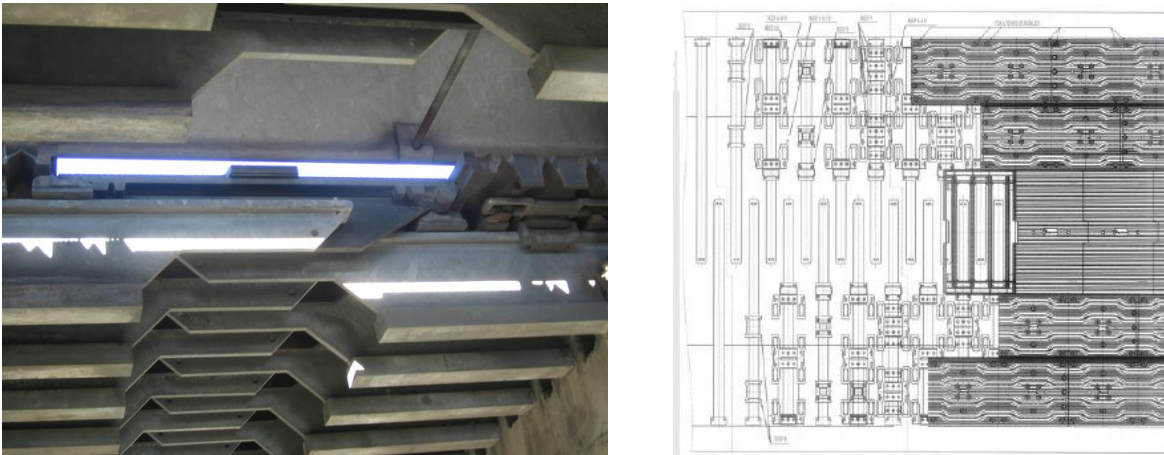


Figura 2.2 – Imagem Inferior da Junta de Dilatação (esquerda), Corte Transversal (Direita) (SETRA 2005).

Apesar dos inúmeros elementos constituintes das Juntas de Dilatação, apenas vão ser referenciados os que apresentam um desgaste mais significativo e detecção crítica, tais como:



Figura 2.3 – Painel (SETRA 2005)

Painéis em borracha que preenchem o pavimento entre os viadutos, parafusos de fixação dos painéis aos suportes metálicos;



**Figura 2.4 –
Suportes
Metálicos
(SETRA 2005)**

Suportes metálicos deslizantes responsáveis pela ligação dos painéis em borracha as vigas fixas em ambas as extremidades dos viadutos;

Faltam ainda referir os não menos importantes parafusos que vão fixar os painéis aos suportes, uma vez que cada junta comporta mais de 700.

2.3 – Descrição do Problema

Como já foi referido anteriormente, este projecto consiste em desenvolver um método de monitorização em tempo real das juntas de dilatação da PVG, para melhor compreendermos a evolução da deterioração, bem como as suas causas e efeitos, observe-se o fluxograma da Figura 2.5.

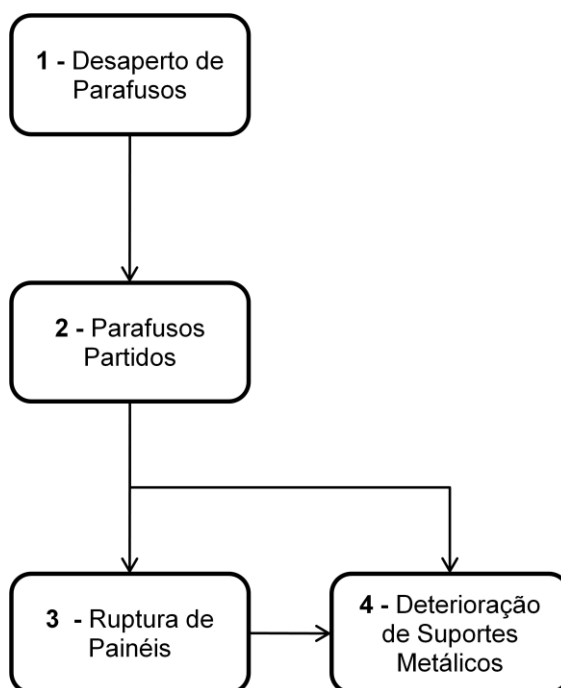


Figura 2.5 – Evolução de Deterioração das Juntas de Dilatação.



Figura 2.6 – Exemplo de Perda de Parafusos

1. O desaperto dos parafusos de fixação dos painéis de borracha é resultante de trepidações e vibrações, originadas pela passagem de veículos. Nesta fase embrionária é possível a monitorização de folgas, com uma curta intervenção de reaperto evita-se que o problema se agrave;
2. Depois de stress e vibrações continuadas, é inevitável que os parafusos se partam, conduzindo a um aumento exponencial das folgas e ocorrência da mesma anomalia;



Figura 2.7 – Exemplo de Ruptura de Painel

3. A falta de fixação dos painéis irá conduzir à sua ruptura, nesta fase já é requerida a substituição integral do painel danificado uma intervenção mais prolongada;



Figura 2.8 – Vista Inferior de Painel e Suportes Metálicos.

4. Estarão satisfeitas as condições para a perda de suportes metálicos, mesmo que não impliquem a substituição do painel correspondente, o mesmo terá que ser temporariamente removido para substituição dos suportes. De salientar que, com a ruptura dos painéis em borracha aumentam as infiltrações para os suportes, resultando no aumento da corrosão destes suportes e os restantes componentes na parte inferior da junta.

Descrevendo a evolução de deterioração das juntas de dilatação, torna-se evidente que quanto mais cedo for detectada a anomalia e reparada, menor será o custo de reparação e tempo despendido para a mesma, traduzindo-se numa melhoria da qualidade prestada aos utentes, mesmo que não se verifique uma quebra estrutural da junta e conseqüente diminuição do nível de segurança.

2.4 – Monitorização Existente

Actualmente a monitorização pode ser dividida em dois grupos: a inspecção humana e a monitorização automatizada. Apesar da monitorização automatizada já se encontrar abundantemente aplicada a todo o tipo de estruturas, incluindo pontes, em muitos dos casos ainda é impraticável optar apenas por sistemas de monitorização puramente automatizados. Sendo mais habitual optar por soluções mistas, aplicando sistemas de monitorização automáticos como forma de gestão e complementados pelas incontornáveis inspecções periódicas por parte de equipas técnicas *in situ*. (Lima e Brito 2007)

2.4.1 – Inspeções Periódicas

Em relação às inspeções periódicas, devem abranger uma lista exaustiva de possíveis anomalias. Tomando o exemplo das experiencias levadas a cabo na auto-estrada A6 Villalba – Villacastín – Adanero, por (Bosh e Rodríguez 1997) da sociedade espanhola concessionária de auto-estradas Iberpistas S.A., consistiram em comprovar ou detectar:

- A separação dos bordos da junta;
- O estado de limpeza entre as placas;
- O desaguar das caleiras de drenagem;
- Possíveis defeitos de assentamento ou de concavidades por meio de instrumentos de percussão;
- Perda de selagem nas caixas de fixação;
- Fissuração do pavimento nas proximidades da junta.

Já (Ramberger 2002) adopta uma outra perspectiva, sendo a opinião do autor um complemento da anterior, considerando que a inspecção deve abranger a verificação dos seguintes pontos:

- Danos na protecção anti-corrosiva;
- Fissuras visíveis em elementos metálicos por fadiga;
- Danos nos elementos de selagem;
- Funcionamento dos elementos de ligação;
- Obstrução ou danos nos elementos no sistema de drenagem;
- Estado do pavimento adjacente.

Na grande maioria dos pontos referidos acima, a inspecção é levada a cabo por meios visuais e auditivos, podendo o técnico fazer-se munir de equipamentos tais como binóculos, equipamento de vídeo, sonómetro, suta, chave dinamométrica, entre outros (Lima e Brito 2007).

Considerando os objectivos desta dissertação, é possível verificar no estudo levado a cabo por (Lima e Brito 2007), a referência à utilização por parte do inspector de um martelo, para verificação da integridade de materiais das JD por percussão. Ainda no mesmo estudo revela que, a integridade das juntas de dilatação é determinada através de um som cavo e de baixa frequência, indicativo de falta de aderência ou espaços vazios, em antítese a um som sólido e limpo, sendo também a intensidade do som medido (através de um sonómetro) uma característica determinante.



Figura 2.9 – Equipamento de análise de nível sonoro (Lima e Brito 2007)

Apesar das inspecções periódicas serem incontornáveis, é difícil assegurar uma inspecção contínua e efectiva, por grande parte dos artigos a inspeccionar implicarem um corte de via (por razões de segurança) e pela elevada quantidade de mão-de-obra que exige. Por outro lado, é contraproducente a detecção tardia de anomalias, pois irá conduzir a um aumento de custos de manutenção.

2.4.2 – Inspeções Automatizadas

As inspeções automatizadas são habitualmente conhecidas por monitorização estrutural, no caso em foco nesta dissertação que são as juntas de dilatação, pelos dados obtidos existe ainda muito pouco aplicado às mesmas. Numa estrutura do tipo e envergadura da PVG é mais usual existir monitorização em tempo real da temperatura ambiente, direcção e sentido do vento, quantidade de tráfego ou utentes, que em muito pouco revela o estado da estrutura a monitorar. No entanto, é também possível encontrar monitorizações mais objectivas no ponto de vista desta dissertação, sendo comum encontrar monitorizações de:

- Vibração, usualmente medidas por acelerómetros agregados a diferentes pontos das estruturas;
- Força tênsil, medida por sensores de carga ou força, sendo amplamente utilizados na análise das forças exercidas em cabos de pontes suspensas;
- Expansão, através do uso de elastómeros e medindo quantitativamente a expansibilidade de diversos elementos constituintes da estrutura, muito aplicados na análise de stress de múltiplos tipos de juntas de dilatação.

Em muitos dos casos, é compreensível que não se opte por uma inspeção automatizada, uma vez que seria muito dispendioso a sua aplicação integral em estruturas da dimensão da PVG, tornando-se relativamente pouco relevante nos seus primeiros anos de vida em que a sua manutenção é menos dispendiosa.

2.5 – Aquisição de Dados

Neste ponto irão ser referidas quais as formas de aquisição de sinais que existem no mercado e que contemplem os objectivos pretendidos, descrevendo quais as suas vantagens e desvantagens, mencionando quais os parâmetros de escolha na tecnologia elegida para a implementação deste projecto, bem como a descrição do hardware utilizado face as suas capacidades.

2.5.1 – Características de Sinais

Como já foi referido anteriormente, actualmente a monitorização existente na PVG é feita através de uma equipa técnica que se faz deslocar ao local a fim de inspeccionar os elementos suspeitos. São realizados dois tipos de inspecções:

Visuais, a fim de detectar a inexistência de parafusos de fixação nos painéis das juntas de Dilatação, encontrarem rupturas em painéis tal como nos demais elementos constituintes da junta;

Sonoras, com o objectivo de verificar se existem algumas folgas provocadas pelo desaperto ou inexistência de parafusos de fixação, bem como qualquer outra anomalia nos elementos metálicos da junta. Estas anomalias são tipicamente caracterizadas por um som metálico e agudo estimulado pela travessia de veículos na junta de dilatação, ao detectar a irregularidade o técnico também tem a percepção da sua localização.

As anomalias detectadas em ambas as inspecções, também o serão detectáveis através da análise de vibrações resultantes das passagens dos veículos na junta de dilatação. O afrouxamento ou inexistência de parafusos, bem como anomalias nos componentes metálicos da junta de dilatação são detectáveis (tal como pela equipa técnica) pelo ressoar metálico e agudo, resultando em vibrações audíveis.

Nos painéis em borracha que constituem o pavimento da junta de dilatação, não será detectada a sua ruptura, até porque a mesma é um resultado de folgas ou ausência de parafusos e suportes defeituosos, bem como a erosão sofrida pelo uso ou pelos elementos. Como tal, o objectivo será detectar atempadamente e evitar a substituição precoce dos painéis, tratando-se da peça mais cara na constituição global da junta de dilatação.

2.6 – Transdutores para Aquisição de Sinal

Tento em vista os objectivos desta dissertação, irão ser salientados os meios mais adequados de aquisição e os seus parâmetros de escolha, resumindo a dois tipos de sensores relevantes e os seus dispositivos de recolha e análise de sinais resultantes.

2.6.1 – Acelerómetros

Actualmente no mercado o meio mais comum de aquisição de vibrações é com acelerómetros, embutidos nas estruturas a analisar. Trata-se de um transdutor que se destina à transformação da energia mecânica, resultante das vibrações existentes, em energia eléctrica. Estes requerem um estudo aprofundado e minucioso, para que as suas características e posicionamentos sejam adequados para adquirir os sinais e frequências relevantes. Existem quatro tipos de tecnologias em acelerómetros:

Piezoelétricos (PE), sendo os mais utilizados na medição de vibrações e impactos, disponíveis em várias gamas de frequências (até 30kHz). Tratando-se de um acelerómetro activo, necessita de uma fonte de energia exterior, o que posteriormente poderá revelar um problema e um aumento dos custos de implementação;

Piezo-resistivos (PR), trata-se de sensores de baixa sensibilidade, indicados para a medição de impactos (pelo que são muitos utilizados em testes de colisão automóvel). Possuindo uma grande largura de banda (até 130kHz) e capazes de adquirirem sinais com acelerações muito baixas, tornam-se ideais para medições em condições de variações lentas.

Capacitivo, possuindo uma largura de banda relativamente estreita (de 15Hz a 3kHz), confere-lhe uma enorme sensibilidade, sendo usados na medição de vibrações de baixa frequência, bem como movimentos, trabalhando nas mais adversas condições.

Microacelerómetros, trata-se de uma tecnologia recente e com grande expansão. Referidos como MEMS (Micro Electrical-Mechanical Systems), já são amplamente utilizados, permitindo simultaneamente medições de movimentos e vibrações em múltiplos eixos. Estão disponíveis num variado leque de escolhas, pois o fabricante só tem que traçar um compromisso entre a sensibilidade e

aceleração máximas pretendidas. As suas aplicações mais recentes são na robótica, biomédica e multimédia (é o caso dos telemóveis), dada a sua compacta dimensão.

2.6.2 – Microfones

Os microfones têm como objectivo a medição de variações de pressão no ar, água ou outro meio, semelhantes às vibrações que o ouvido humano consegue detectar. Geralmente, um ouvido humano saudável, é capaz de detectar uma gama de frequências compreendidas entre os 20Hz e os 20KHz. Contudo, poderá ser de fulcral importância em engenharia, que sejam detectadas frequências fora do espectro do ouvido humano.

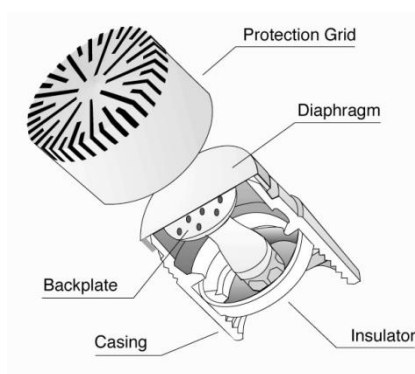


Figura 2.10 – Constituição de Microfone (PCB PIEZOTRONICS 2007)

Existe no mercado um vasto leque de microfones, providenciando múltiplas opções, tais como a supressão de ruído, amplificação e aumento de sensibilidade em determinadas gamas de frequências alvo.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é possível obter percepção da constituição básica de um microfone e apesar de existirem muitas outras tecnologias de microfones no mercado, irão apenas ser focadas as que são passíveis de ser aplicadas nos objectivos desta dissertação. Existem três tipos principais de microfones:

Dinâmicos, funcionam segundo um princípio de indução magnética, assemelhando-se a um altifalante “invertido”. As ondas de som irão incidir numa

membrana, que se encontra ligada a uma bobine móvel, convertendo o sinal sonoro num sinal eléctrico. Uma vez que depende de uma membrana, esta não vai possuir a mesma dinâmica para todo o espectro de frequências. Dimensionados para gamas de frequências muito limitadas, a sua dinâmica é semelhante a um filtro (passa-baixo, passa-banda ou passa-alto), conforme a resposta da membrana tornam-se muito resistentes a ruído e frequências indesejáveis.

Piezoeléctricos, sente as ondas sonoras através de um cristal de quartzo e através de um circuito integrado piezoeléctrico, converte o som num sinal eléctrico. Este tipo de microfones é caracterizado por ter muito baixa sensibilidade, contudo torna-se perfeito para a medida de grandes amplitudes de som, sendo ideal para a aquisição de sons resultantes de impactos e explosões.

Capacitivos, tal como os microfones dinâmicos possuem uma membrana, mas para conduzir as ondas sonoras a um “eléctrodo” polarizado, produzindo variações capacitivas e resultando num sinal eléctrico. Sendo os mais utilizados nas mais diversas áreas, dispõem de dimensionamentos para todas as gamas de frequências e sensibilidades necessárias. Apesar de necessitar de uma fonte de alimentação, por já conter um pré-amplificador integrado e requerer que o diafragma dos eléctrodos seja polarizado, muitos dos dispositivos de captura e análise de som já dispõem de alimentação dedicada a microfones capacitivos, intitulada de *phantom*. Embora este tipo de microfone geralmente funcione com uma vulgar pilha de 9V, com a alimentação *phantom* (48V DC) obtemos um cancelamento de ruído e balanceamento do sinal. Todas estas características tornam estes microfones, apesar de mais dispendiosos, passíveis de serem utilizados tanto em laboratórios como em campo, e ideais para todo o tipo de ambientes desde que se opte pela configuração correcta.

2.6.3 – Dimensionamento de Microfones

A escolha do microfone correcto é das mais importantes decisões a tomar neste tipo de aplicação, sendo crucial que seja adquirida o máximo de informação relevante, para que mais rapidamente se atinjam conclusões precisas. Na selecção de um microfone é necessário respeitar certos parâmetros tais como o campo de aplicação, resposta dinâmica e resposta na frequência que definiram qual o tipo de microfone a optar. Como tal, irão ser focados apenas os seguintes três parâmetros.

2.6.3.1 – Campo de Aplicação

Determinando o objectivo, tipo de som e ambiente em que o microfone vai operar, distinguem-se em três áreas de aplicação:

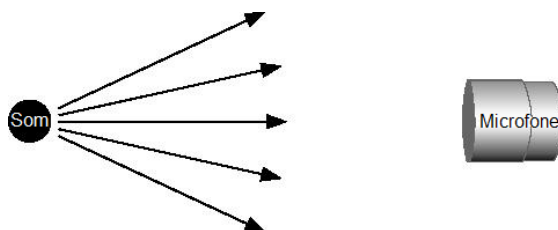


Figura 2.11 – Microfone em Campo Aberto (PCB PIEZOTRONICS 2007)

- Campo Aberto, trata-se do tipo de aplicação mais utilizada, descrevendo quando se pretende que o microfone seja preciso na medição de sons com uma única origem e direcção, quando o ângulo de incidência do som no microfone é de 0° (tal como indica a Figura 2.11), apontando o microfone directamente para a origem do som, atenuando sons resultantes de ecos e reflexões. Neste tipo de aplicações são amplamente utilizados microfones capacitivos, pela sua precisão

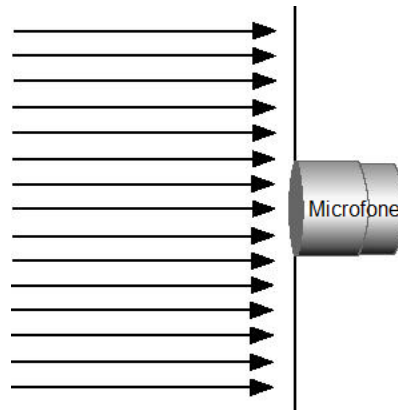


Figura 2.12 – Microfone em Campo de Pressão (PCB PIEZOTRONICS 2007)

- Campo de Pressão, quando se pretende um microfone capaz de medir sons caracterizados por terem a mesma amplitude independentemente do ângulo e posição no campo de medida (Figura 2.12). O que acontece quando o campo de medida é pequeno, tratando-se de uma cavidade ou superfície, relativamente pequena quando comparado com o comprimento de onda do som. O microfone mede sons geralmente provenientes de uma única fonte, sendo amplamente utilizado na medida de pressões exercidas em paredes, asas de avião, ou no interior de estruturas.

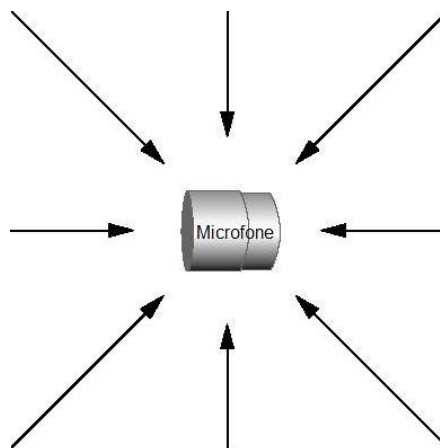



Figura 2.13 – Microfone em Campo Difuso (PCB PIEZOTRONICS 2007)

- Campo difuso, este tipo de microfones a utilizar são intitulados microfones omnidireccionais, possibilitando a medição de sons de múltiplas direcções, origens e reflexões (ilustrado na Figura 2.13). Ao reagir

aproximadamente com a mesma sensibilidade para todas as direcções, tornam-se ideais para medições de som ambiente e das suas reflexões, como por exemplo em igrejas.

2.6.3.2 – Resposta Dinâmica

O principal critério de descrição de um som é baseado tanto na sua amplitude máxima, como nas flutuações que possam ocorrer. A amplitude mais baixa que o ouvido humano consegue diferenciar é cerca de $20\mu\text{Pa}$, ou em decibéis 0dB, na Tabela 2.2 é possível ver níveis de referência sonoros para melhor percepção das grandezas implicadas.



0 dB	=	2,00E-05 Pa	>>	Limite audível
60 dB	=	0,02 Pa	>>	Ruído de Escritório
80 dB	=	0,2 Pa	>>	Ruído de uma Loja
94 dB	=	1 Pa	>>	Camião Pesado
100 dB	=	2 Pa	>>	Martelo Hidraulico
120 dB	=	20 Pa	>>	Descolar de Avião
140 dB	=	200 Pa	>>	Limite da Dor

Tabela 2.2 – Níveis de Referência Sonoros

Apesar de se representar unidades de pressão em Pascal (Pa), é mais comum trabalhar-se em decibéis (escala logarítmica) de modo a facilitar cálculos, e por melhor se relacionar ao ouvido humano. Na escolha de um microfone torna-se importante, garantir que consiga captar a amplitude máxima do som pretendido evitando-se a saturação, sem que para isto se perca sensibilidade nos níveis de pressão sonora a registar, ao se menosprezar estas condicionantes incorre-se no risco de perda de informação sonora crucial à extracção de conclusões. É necessário optar-se por um equilíbrio, um microfone que suporte elevada potência sonora raramente vai saturar, mas também vai ter uma fraca sensibilidade. O inverso também se aplica, com uma sensibilidade elevada vai-se correr o risco de saturação do microfone, aumentando também a permeabilidade ao ruído de baixa frequência.

2.6.3.3 – Resposta na Frequência

A resposta na frequência representa a gama de frequências que o dispositivo consegue captar, bem como a sua sensibilidade. Como não existe o microfone perfeito, existe apenas o mais adequado à solução pretendida, estes dispositivos são dimensionados para actuarem numa gama de frequências específica como forma de se obter uma melhor performance e informação (frequências) relevante. No entanto, podem ser estudadas as respostas para baixas e altas frequências, apesar de alguns microfones serem mais abrangentes.

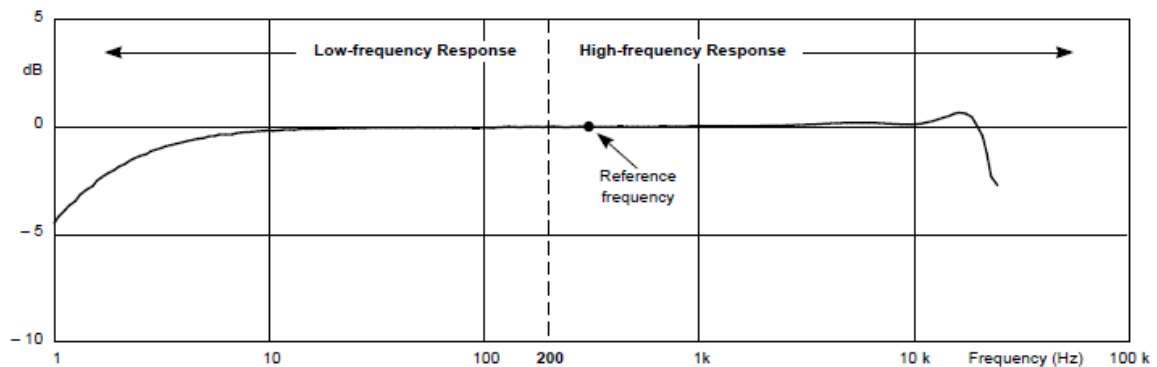


Figura 2.14 – Curva de Resposta na Frequência (Brüel & Kjær 1996)

Os microfones são otimizados para ter uma resposta na frequência constante, de acordo com o campo de aplicação em que operam. Evidenciando-se as diferenças nas respostas em altas frequências, até porque geralmente abaixo dos 1kHz, a resposta do microfone nos diferentes campos de aplicação apenas diferem em menos de 0,1dB. Vulgarmente, os microfones têm sensivelmente a mesma resposta, independentemente do campo de aplicação, em frequências compreendidas entre os 10Hz e os 1kHz.

Actualmente a IEC (*International Electrotechnical Commission*) tem normalizada a frequência de referência a partir da qual se consideram as baixas e altas frequências, bem como as tolerâncias e classes dos dispositivos de medida. Pelas normas IEC 651 e IEC 1094-4, é determinada uma frequência de referência entre os 200Hz e os 1kHz (variando de fabricante para fabricante),

dividindo a resposta dos microfones a frequências baixas e altas. No caso da Brüel & Kjær, é considerada a frequência de referência de 250Hz, tal como se pode verificar na Figura 2.14.

2.6.3.4 – Características Resultantes

A resultante das características trata-se do culminar e cruzamento dos três pontos anteriores, nas restrições à escolha do microfone ideal à solução pretendida. Tanto a reacção às direcções do som, como a resposta dinâmica e respostas em frequência podem ser representadas por meio de diagramas polares. Seguidamente, estão representados diagramas ideais de três tipos distintos de microfones:

- Microfones Omnidireccionais (Figura 2.15), apresentam sensibilidade igual em qualquer direcção, cobrindo uma área de 360°, são ideais para a captação de som ambiente, sendo aplicáveis em campos difusos. A sua abrangência é um ponto forte em certas aplicações, mas uma desvantagem noutras, pois vai ser muito susceptível a sons indesejados.

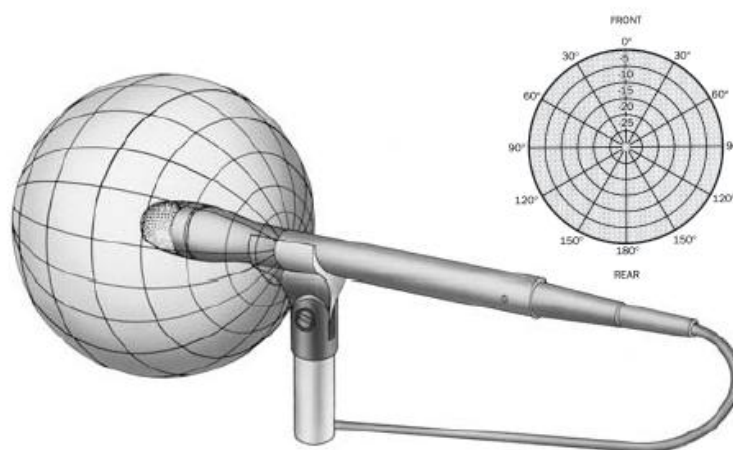


Figura 2.15 – Diagrama Polar de Microfone Omnidireccional (Shure 2007)

- Microfones Unidireccionais, estão concebidos para captar uma gama de sons provenientes de uma direcção exacta, e atenuando outros de outras direcções. Sendo eficazes num ângulo máximo de 130° , traduzindo-se em cerca de 65° na frente do microfone, fazendo com que capturem apenas 1/3 do som ambiente captado por um microfone omnidireccional. Pela figura é possível perceber porque são usualmente intitulados por microfones cardióide, pelo seu

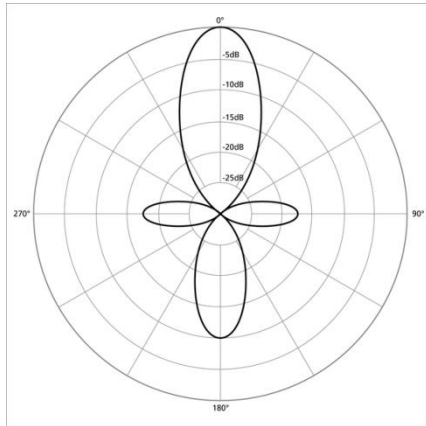


Figura 2.16 – Diagrama Polar de Microfone "Shotgun" (Wikipedia n.d.)

diagrama polar se assemelhar ao formato de um coração. Ainda na gama dos microfones unidireccionais, existem os microfones intitulados de *shotgun*, pela sua elevada sensibilidade num ângulo de incidência bastante reduzido, tal como é perceptível através do seu diagrama polar na Figura 2.16.

diagrama polar se assemelhar ao formato de um coração. Ainda na gama dos microfones unidireccionais, existem os microfones intitulados de *shotgun*, pela sua elevada sensibilidade num ângulo de incidência bastante reduzido, tal como é perceptível através do seu diagrama polar na Figura 2.16.

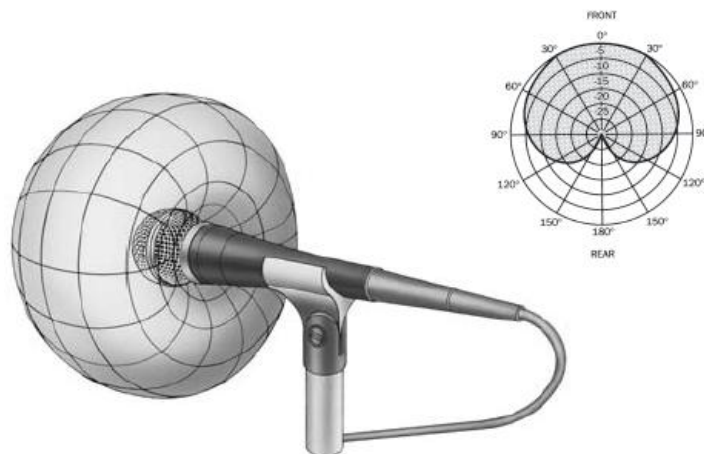


Figura 2.17 – Diagrama Polar de Microfone Unidireccional (Shure 2007)

- Microfones Bidireccionais (Figura 2.18), apesar de deterem uma resposta semelhante à do microfone cardióide, possuem elevada sensibilidade a 180°. Tornando-se ideais para captação de som de duas fontes em simultâneo.

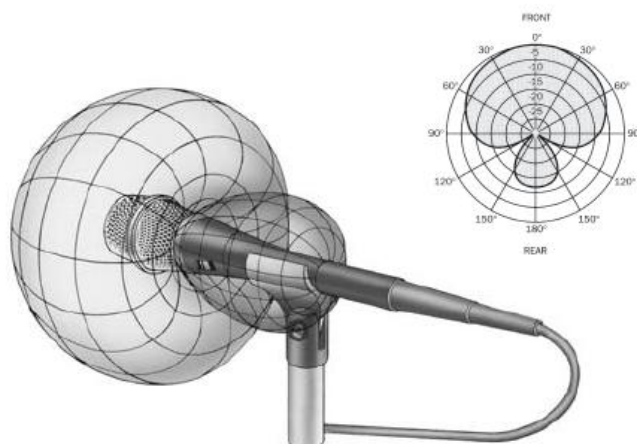


Figura 2.18 – Diagrama Polar de Microfone Bidireccional (Shure 2007)

Resumindo, dependendo do seu campo de aplicação, estes dispositivos vão ter respostas diferentes, variando a sua sensibilidade em função do ângulo de incidência e das suas respostas à frequência e dinâmica. Analisando-se o diagrama polar (Figura 2.19), verifica-se que o mesmo microfone aparentemente omnidireccional para frequências abaixo dos 10kHz, tem um comportamento semelhante a um microfone direccional a partir dos 20kHz.

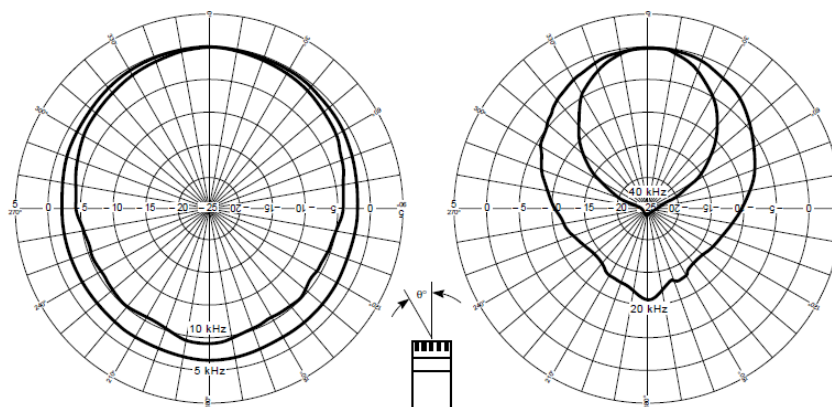


Figura 2.19 - Exemplo da Variação da Resposta de um Microfone Normalizado a 0° de Incidência (Brüel & Kjær 1996)

No caso particular desta dissertação, torna-se relevante a utilização de microfones pela extraordinária dinâmica e capacidade de captarem uma grande gama de frequências. Contudo, visto que esta dissertação apenas aborda uma fase de protótipo, num produto final seria relevante a utilização de acelerómetros, isto por representarem um custo reduzido e uma solução mais robusta e com maior durabilidade. Até porque, as áreas onde se irão situar os microfones ou acelerómetros, apresentam grandes variações térmicas, vento, chuva e até de salinidade.

Capítulo 3 – Classificadores

3 – Introdução

Neste capítulo irá ser focada a importância da implementação de classificadores, bem como as suas vantagens e desvantagens. Por muita informação que se obtenha sobre determinado problema, tornou-se desde há muito uma ciência construir sistemas inteligentes e capazes de determinar padrões e anomalias, para que automaticamente se tome uma conclusão ou acção. Desta necessidade nasceram termos como aprendizagem automática e inteligência artificial (IA), representando tanto a origem como a vanguarda de classificadores.

Posto isto, irão ser alvo de estudo os algoritmos tanto de aprendizagem como de classificação, analisando a sua aplicabilidade a esta dissertação.

3.1 – Aprendizagem Automática

A área de aprendizagem automática (AA), mundialmente conhecida por *Machine Learning*, representa a construção de programas que automaticamente melhorem o seu desempenho com a experiência. Passível de ser aplicada em vários ramos, tais como em engenharia, estatística, inteligência artificial, filosofia, biologia, entre muitos outros. Sendo a aprendizagem composta por muitas fases e processos, torna difícil a sua definição, podendo ser delimitada pelo ganho de conhecimento através de estudo, ensino ou experiência. Pode-se então afirmar que uma máquina aprende alterando a sua estrutura, programa ou dados, quando a sua futura performance é aperfeiçoada. A AA é frequentemente referida por modificações em sistemas que empregam e melhoram tarefas associadas a IA, tais como reconhecimento, diagnóstico, planeamento, controlo, predição entre outras.

Na Figura 3.1, encontra-se representado um exemplo de uma arquitectura típica de um agente de IA. Este agente é capaz de perceber e modelar variáveis de ambiente e calcular as acções apropriadas, antecipando os seus efeitos. De notar que, cada um destes componentes é passível de se

aperfeiçoar, sendo possível que cada um represente um subsistema e um mecanismo diferente de aprendizagem (que irá ser evidenciado mais à frente).

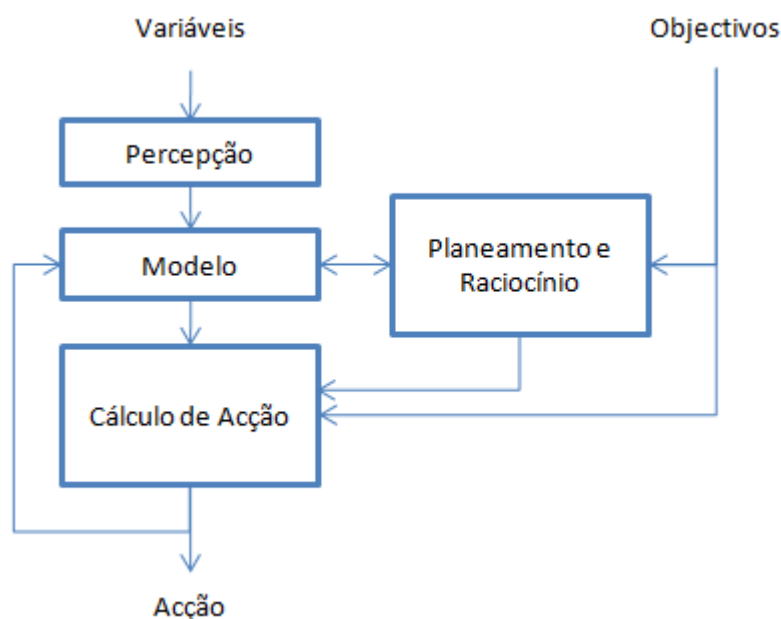


Figura 3.1 – Exemplo de Arquitectura de IA (Mitchell 1997)

3.2 – Algoritmos de Aprendizagem

Os algoritmos de aprendizagem também são conhecidos por algoritmos de decisão, ou classificadores, por serem aplicáveis em diversas técnicas tanto na descoberta de conhecimento como para a construção de uma generalidade de classificadores automáticos.

3.2.1 – Classificadores Baseados em Exemplos

Também conhecidos por classificadores do tipo *nearest neighbor*, têm como princípio de funcionamento a utilização de vários exemplos a classificar para aprendizagem, possibilitando a construção de classificadores automatizados. Para a classificação de uma nova amostra, este classificador procura o exemplo mais parecido e estima a classe da amostra recolhida, atribuindo-lhe uma classe.

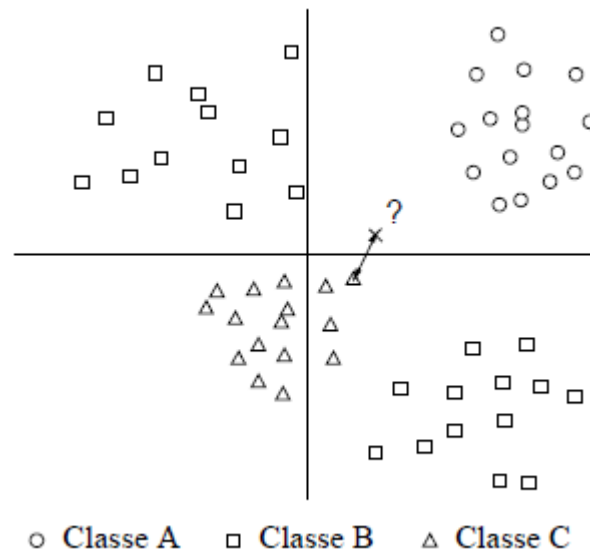


Figura 3.2 – Exemplo de Classificação por Proximidade (Fonseca, Indução de Árvores de Decisão 1996)

Tendo como principal vantagem a extrema facilidade de adição de novo conhecimento, através da adição das novas amostras aos exemplos previamente memorizados, esta informação recente será actualizada com um processamento mínimo. Contudo, da concepção destes algoritmos, nascem algumas questões que merecem ser equacionadas.

3.2.1.1 – Exemplos a Guardar

Os exemplos a guardar devem ser seleccionados, para que se evite o armazenamento de quantidades abismais de informação, o que iria conduzir a uma lentidão na pesquisa e classificação de novas amostras. Como forma de contornar este problema, são passíveis de serem guardados grupos de exemplos padrão que representem a classe desejada, apesar de se limitar a facilidade de integração de novo conhecimento. Actualmente, já se encontram disponíveis diversos estudos que abrangem e amenizam este inconveniente, através da análise de quando deverão ser alterados o grupo de exemplos padrão onde se irá basear a classificação posterior.

3.2.1.2 – Medição de Semelhança

Através da medida de semelhança entre vectores heterodimensionais e misturando tanto propriedades contínuas como discretas, são levantados diversos inconvenientes. Com a inserção de conhecimento irrelevante, incorre-se no risco de desenvolver ambiguidades passíveis de originarem desinformação, conduzindo a falsas classificações.

3.2.1.3 – Comparação de Amostras

As amostras recolhidas serão comparadas e classificadas, de acordo com a classe que possuir maior semelhança e/ou com a classe mais reiterada de um conjunto de exemplos padrão.

3.2.2 – Classificadores Baseados em Redes Neurais

As redes neuronais (RN), apesar de surgirem com grande ênfase nos anos 60, caíram no esquecimento nos 20 anos que se seguiram devido às limitações que possuíam na sua aprendizagem. Só com o aparecimento do método de aprendizagem intitulado de *back-propagation*, nos anos 80, voltariam a ganhar um lugar de destaque no contexto de algoritmos de aprendizagem e classificação.

Uma RN pode ser descrita por um algoritmo de processamento paralelo e distribuído, composto por unidades de cálculo simples com a capacidade de armazenar e utilizar conhecimento experimental. Têm o objectivo de replicar o funcionamento do cérebro humano, assemelhando-se a ele na medida em que:

- O conhecimento é adquirido pela RN a partir do ambiente envolvente por meio de um processo de aprendizagem;
- As interligações entre neurónios, também conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para o armazenamento de conhecimento.

As RN's apresentam grande fiabilidade, mesmo quando os conjuntos de treino apresentam um elevado ruído ou informação sensorial complexa, tal como dados provenientes de câmaras ou microfones. (Mitchell 1997)

3.2.2.1 – Princípio de Funcionamento

Constituída por neurónios, cada um representa uma unidade de processamento de informação, a sua composição consiste em:

- Sinapses, caracterizando o conjunto de ligações entre neurónios, quantificadas por um peso;
- Somador, responsável pela adição dos sinais de entrada num neurónio, depois de quantificados pelos pesos respectivos;
- Função de Activação, limitando a amplitude do sinal de saída de cada neurónio.

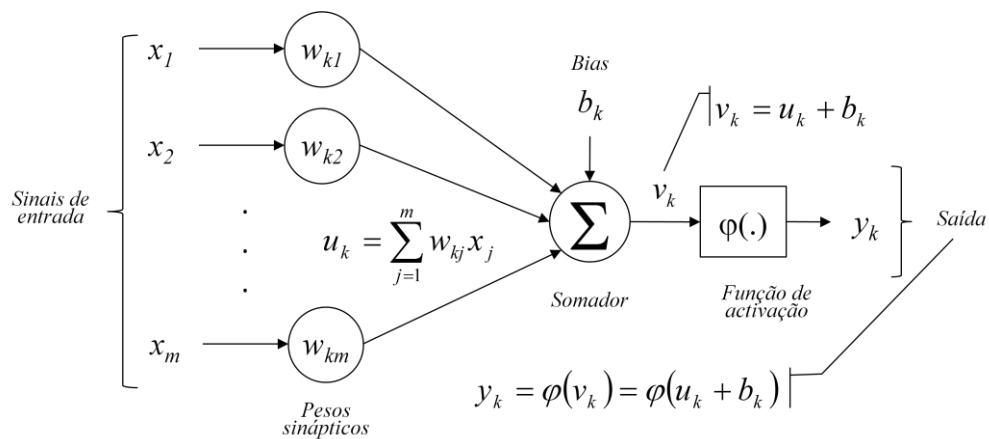


Figura 3.3 – Modelo Não Linear de Neurónio (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)

No seu modelo mais elementar, uma RN é constituída por três tipos de camadas de neurónios (Tabela 3.1), pelo que todas as camadas influenciam o resultado obtido. Para redes neuronais mais simples é possível suprimir a camada intermédia.

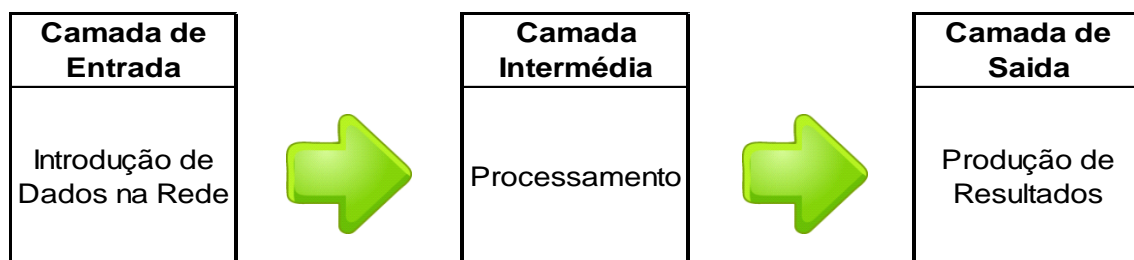


Tabela 3.1 – Exemplo de Camadas de uma RN

Simplificando a representação de um neurónio e ao analisar uma RN, torna-se mais fácil a distinção entre as diferentes camadas que a constituem, como é possível verificar na Figura 3.4:

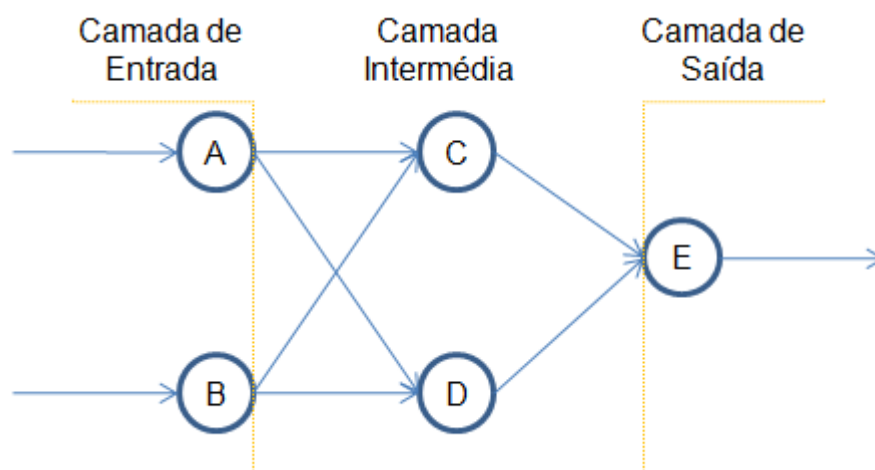


Figura 3.4 – Exemplo de Pequena RN (Fonseca, Indução de Árvores de Decisão 1996)

Tal como era de prever, não existe apenas um tipo de configuração de RN, a configuração correcta deverá ser dimensionada para que se obtenha uma aprendizagem mais eficaz.

3.2.2.2 – Estrutura de uma Rede Neuronal

Na construção de uma estrutura de uma RN, existem requisitos mínimos a considerar no número de camadas que permite. Tal como na vida real, existem limitações entre cérebros, como por exemplo o chimpanzé que é incapaz de fazer distinções e cálculos que são triviais para o ser humano. Numa RN artificial, é necessária uma estrutura adequada, caso contrário poderá ser impossível para a rede determinar um resultado válido ou consumir muito tempo no seu treino. Posto isto, existem as seguintes limitações na estrutura de uma rede, tal como o problema do ou-exclusivo que necessita de uma rede constituída no mínimo por duas camadas, tal como é possível verificar na tabela seguinte:


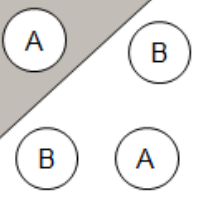
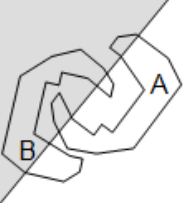
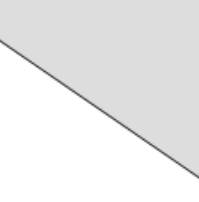
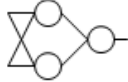
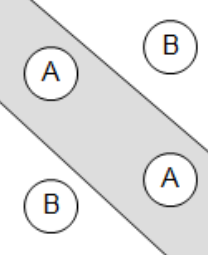
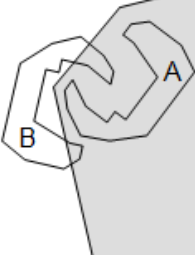

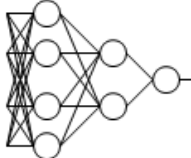
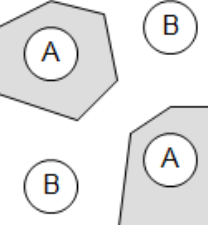
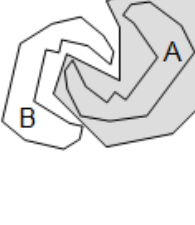
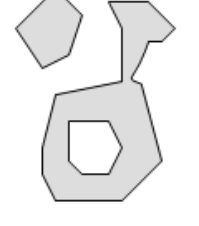
Estrutura	Tipo de regiões de decisão	Problema do ou-exclusivo	Classes com regiões entrecruzadas	Regiões mais gerais
<p>Uma camada</p> 	Semi-plano			
<p>Duas camadas</p> 	Regiões convexas abertas ou fechadas			
<p>Três camadas</p> 	Qualquer tipo de regiões			

Figura 3.5 – Limitações de Estruturas de RN's(Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)

3.2.2.3 – Métodos de Aprendizagem

As RN's proporcionam um método prático de aprendizagem, aplicável a todo o tipo de dados, quer estes sejam reais, discretos ou vectoriais. Com o algoritmo de aprendizagem *back-propagation*, através de um conjunto de treino (conjunto de amostras das quais se sabe a classe) quando aplicado a uma RN, é calculada a diferença entre a classe obtida e a desejada. Esta diferença representa o erro obtido, sendo propagado da camada de saída para a camada de entrada (originando o nome *back-propagation*). De seguida são reajustados os valores dos pesos e dos patamares dos neurónios das diversas camadas, visando a diminuição do erro obtido através da utilização do método do gradiente. Apesar do algoritmo de aprendizagem *back-propagation* ser o mais conhecido, existe uma grande variedade de outros algoritmos aplicáveis

consoante as suas vantagens, desvantagens e objectivo.(Fonseca, Indução de Árvores de Decisão 1996)

3.2.3 – Classificadores Baseados em Algoritmos Genéticos

O aparecimento dos Algoritmos Genéticos (AG) baseou-se na teoria de Darwin sobre a evolução das espécies, em que as mais aptas sobrevivem e prosperam, enquanto as espécies menos aptas são suprimidas de forma natural. Constituindo uma aproximação aos classificadores automáticos, o seu princípio é extremamente simples, baseando-se em três passos:

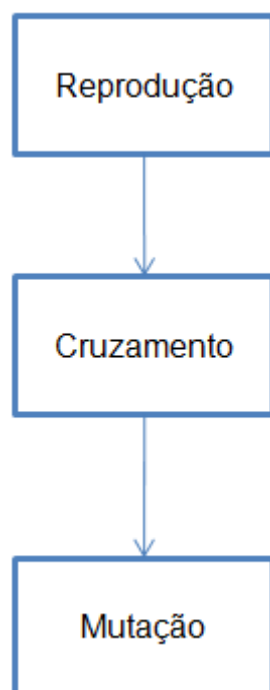


Figura 3.6 – Operações de AG

- Reprodução constitui o primeiro passo, criando um conjunto de classificadores de forma completamente aleatória e codificados na forma de “genes” (considerando-se um gene uma sequência de bits que codifica um conjunto de valores). Apesar de ser uma geração aleatória de genes, é possível impor critérios para que se evite a criação de genes deficientes, com o objectivo de melhorar a sua performance. Sendo assim, cada gene é escolhido ou descartado aleatoriamente para reprodução consoante a probabilidade da sua qualidade na resolução do problema;

- Cruzamento trata-se da reprodução entre dois genes previamente seleccionados, cruzando a informação genética de forma aleatória, é então criado um novo gene a partir de elementos dos seus progenitores;
- Mutação designa-se pela forma de criar novos genes passíveis de construir novas e diferentes propostas de evolução que fujam da normalidade. Aqui também a informação genética dos novos genes é alterada de forma aleatória, permitindo o desvio de situações em que seria impossível a evolução apenas por cruzamento.

Os AG têm sido aplicados na optimização de programas, funções e até outros classificadores, pelos seus alicerces se basearem nas leis da evolução na sobrevivência do mais apto e eliminação dos menos adaptados. (Fonseca, Indução de Árvores de Decisão 1996)

3.2.4 – Classificadores Baseados em Árvores de Decisão

Os classificadores baseados em árvores de decisão (AD) encontram-se entre os métodos mais utilizados e práticos, para inferência indutiva. Consistem num método de aproximar valores discretos a funções alvo, pelo que cada função é representada por uma AD, sendo também possível interpreta-las como um conjunto de condições (“se”), com o objectivo de se tornarem mais legíveis. A aplicabilidade destes métodos estende-se a um vasto espectro de áreas, desde casos de diagnóstico clínico até à avaliação de risco de concessão de empréstimos. (Mitchell 1997)

Generalizando, uma AD baseia-se na sucessiva divisão do problema a classificar em vários subproblemas de dimensão menor, até que uma solução para cada um dos problemas mais simples seja encontrada. Tendo em conta este princípio, os classificadores baseados em AD procuram formas de dividir o universo em vários subconjuntos, até que cada um deles represente apenas uma classe ou demonstre uma notória maioria sem que sejam justificadas as divisões posteriores. (Fonseca, Indução de Árvores de Decisão 1996)

3.2.4.1 – Princípio de Funcionamento

As AD atingem uma classificação de uma instância recorrendo a múltiplos atributos (nós), ordenando-os ao longo da árvore, desde a raiz até à última “folha” que determinará o resultado da classificação.

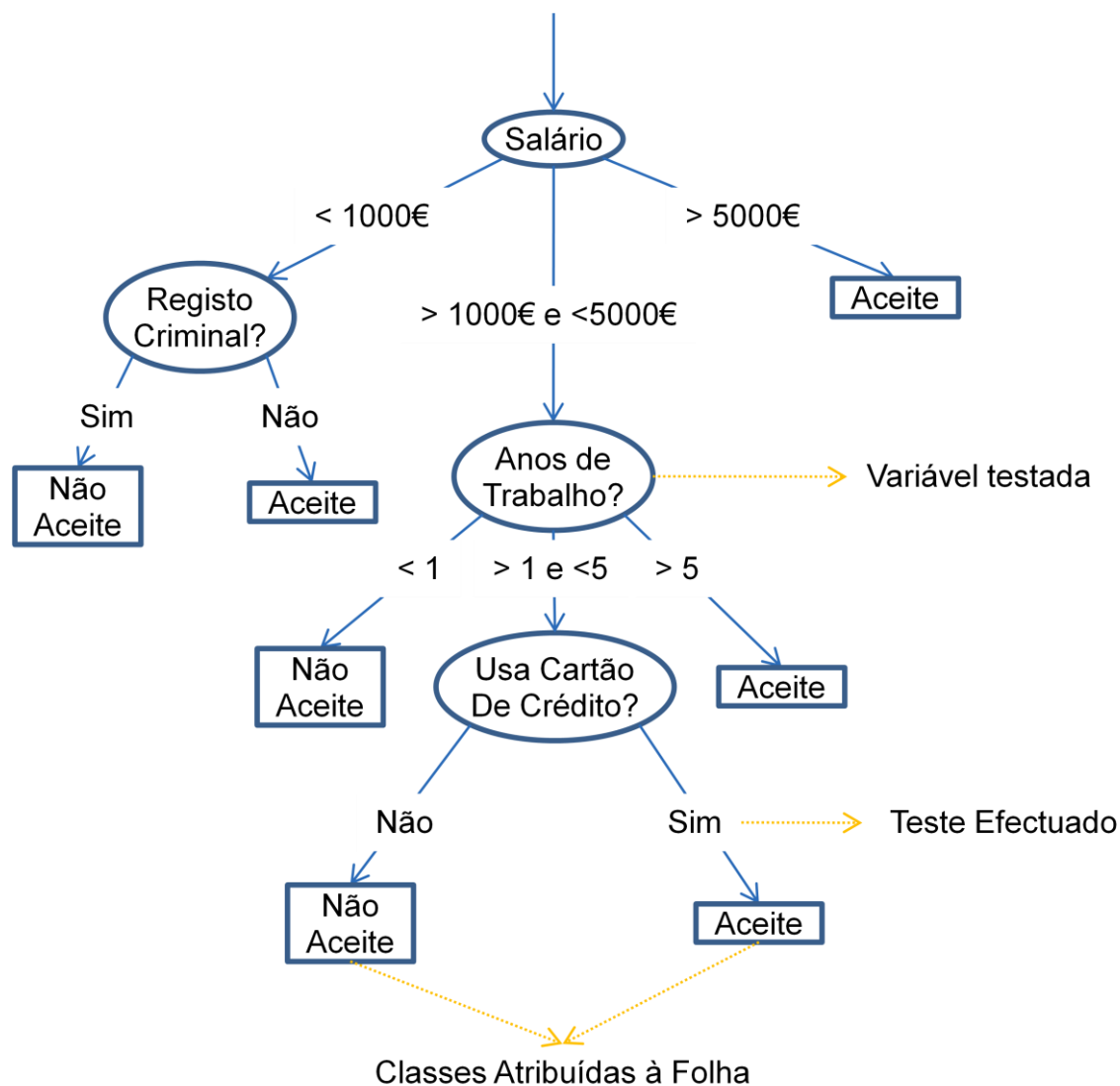


Figura 3.7 – Exemplo de Árvore de Decisão (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)

Na Figura 3.7, está representado um exemplo de AD, apesar de meramente ilustrativo, tem como objectivo a avaliação de risco de concessão de um empréstimo genérico. É possível verificar que cada nó irá corresponder a um teste de um atributo, tal como cada ramo descendente irá interpretar cada um dos valores possíveis do atributo a testar. A instância é classificada testando

todos os nós na árvore, desde a sua raiz até à classe atribuída pela folha, depois de percorridos os seus possíveis ramos e subárvores.

Apesar de todos aos classificadores baseados em AD se inspirarem no mesmo princípio, existem inúmeras possibilidades para a sua construção, sendo necessária cautela na implementação da AD mais eficaz e eficiente. Subsistem alguns aspectos a ter em conta, na escolha de um algoritmo de construção de uma AD, sendo alguns destacados pela sua importância:

- Critério na escolha do atributo a utilizar em cada nó, como por exemplo na Figura 3.7 o atributo “Salário”. Qualquer instância a classificar pode ser descrita por um número fixo de atributos a testar, sendo aconselhável a escolha de atributos de teste com menor número de ramos ou valores possíveis;
- Cálculo da partição do conjunto de exemplos, depois de escolhidos quais os atributos de teste, torna-se aconselhável a redução do número de testes a efectuar a cada atributo, impedindo que a AD se ramifique demasiado, correndo o risco de influenciar o seu desempenho;
- Decidir que o seu nó é uma folha, quando o caminho percorrido pelos ramos possíveis da árvore já abrange informação suficiente para que resulte numa classificação;
- Critério de selecção da classe a atribuir a cada folha, através num conjunto de amostras de treino, determinar qual a classe a impor a cada folha.

Estão caracterizados apenas alguns dos aspectos a ter em conta na construção de um classificador baseados em AD, muitos outros tais como aplicação de janelas sobre o conjunto de treino e a aplicação de processos de redução de árvores denominados processos de poda, são capitais no desempenho deste tipo de classificadores. (Fonseca, Indução de Árvores de Decisão 1996)

3.2.4.2 – Vantagens

Apesar de ainda existir muita matéria a dissertar sobre AD, visto o objectivo desta tese, resta apenas salientar quais as principais vantagens dos classificadores baseados em AD:

- Podem ser aplicadas a qualquer tipo de dados, sendo até mesmo possível testar em simultâneo diferentes grandezas ou tipo de dados, bastando dissecar os atributos relevantes do conjunto treino;
- A estrutura final deste tipo de classificadores bastante simples, possibilitando que seja guardada ou posteriormente manipulada;
- Geralmente robustos e insensíveis a erros de classificação no conjunto de treino;
- A mais importante vantagem a sua fácil percepção, pelo que são amplamente utilizadas para uma melhor compreensão sobre o conjunto de treino a classificar.

3.2.5 – Classificadores Baseados em Conjuntos Difusos

Os classificadores baseados em Conjuntos Difusos (CD) nascem de um conceito matemático, introduzido em 1965 pelo professor L. A. Zadeh, com o motivo de melhorar as analogias entre a humanidade e a máquina, nas formas de pensar, intuir, e relacionar as emoções das pessoas.(Terano, Asai and Sugeno 1991)

Os algoritmos baseados em CD (“*Fuzzy Sets*”) têm como propósito, estender a lógica computacional a conceitos subjectivos do tipo “muito quente”, “alto” ou “baixo”. Até porque, o universo pode não se limitar a ser visto “preto” ou “branco”, mas sim em tons de cinzento (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006). Uma vez que a mais notável característica dos CD é a capacidade de determinarem a quantidade de ambiguidade no pensamento humano, ou seja, a habilidade de calcularem o grau de incerteza nas classificações desejadas.

Todas estas características fazem dos CD, ideais na monitorização e detecção de falhas na definição de parâmetros de problemas, pelo que, em modelos constituídos por parâmetros intrinsecamente imprecisos, é adequada a utilização de classificadores baseados em CD.(Ribeiro 2006)

3.2.5.1 – Princípio de Funcionamento

Ao passo que muitos outros algoritmos de decisão se limitam a classificar objectivamente, os classificadores baseados em CD são capazes de quantificar qual o grau de incerteza de um parâmetro a classificar. Para uma melhor compreensão, irá ser abordado o seu método de funcionamento.

Tomando como exemplo a classificação de meia-idade de um indivíduo, os algoritmos baseados em CD tornam-se relevantes ao equacionar questões da ordem:

- Entre que idades se pode considerar uma pessoa como sendo de “meia-idade”?
- Se considerarmos o intervalo 35-55 como sendo a “meia-idade” poderemos dizer que alguém de 35 é definitivamente de “meia-idade”?
- Fará sentido que alguém na véspera de completar 35 anos seja definitivamente “jovem” e no dia seguinte totalmente de “meia-idade”?
- No entanto, alguém com 25 anos é certamente “jovem” tal como alguém com 65 anos é “idoso” sem incerteza.

Em resposta a estas dúvidas, existem dois tipos de aproximações, a tradicional através de um conjunto rígido e a aproximação por um conjunto difuso.

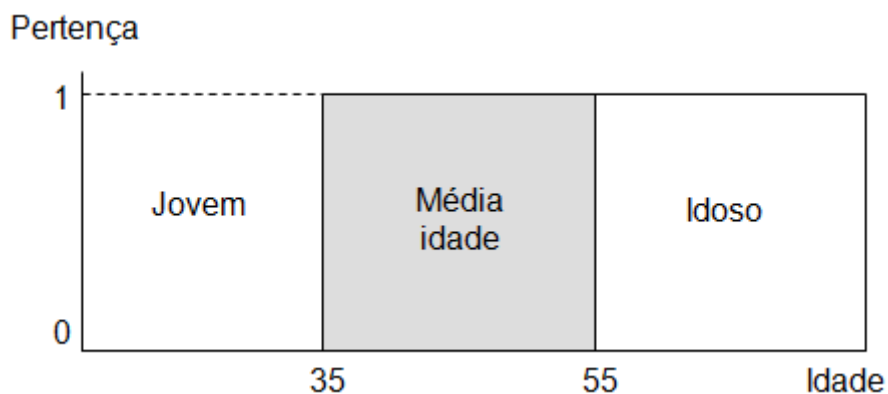


Figura 3.8 – Exemplo de Conjunto Rígido (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)

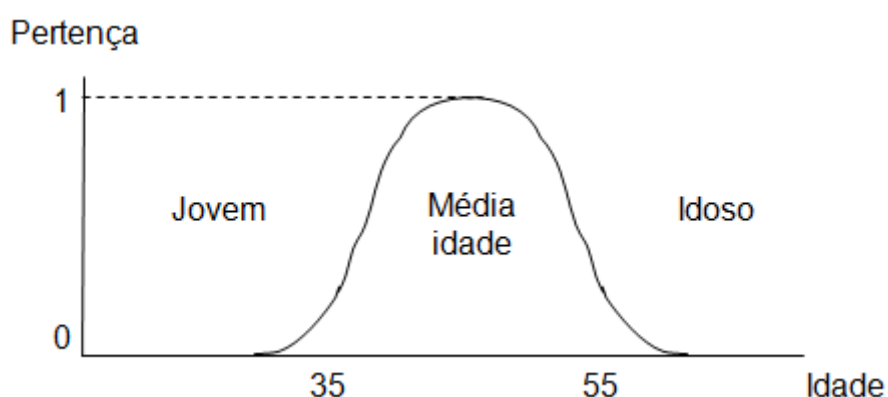


Figura 3.9 – Exemplo de Conjunto Difuso (Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)

Tal como é possível depreender das figuras acima, a grande generalidade dos classificadores têm um comportamento semelhante ao conjunto rígido, realçando a grande vantagem dos CD, que permitem classificar quantitativamente o parâmetro desejado. No exemplo da Figura 3.9 através da análise da função de pertença do CD, é possível verificar que para uma idade de 45 anos o indivíduo recebe a classificação máxima para meia-idade. O mesmo já não acontece para qualquer outra idade, gradualmente aumentando à medida que a pessoa a classificar se aproxima dos 45 anos e reduzindo a partir daí.

Outra das vantagens dos CD, é a possibilidade da utilização de diferentes funções de pertença na sua construção, estas funções serão definidas consoante o parâmetro a classificar e o objectivo pretendido. Na Figura 3.10 estão referenciadas os formatos típicos de funções de pertença.

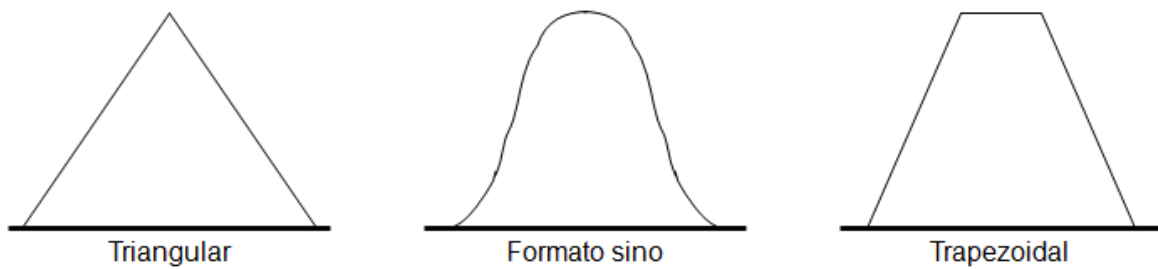


Figura 3.10 – Formatos Típicos de Funções de Pertença(Fonseca, Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial 2006)

De referir que, uma solução pode incorporar a aplicação de algoritmos baseados em CD em simultaneamente em diversos parâmetros, e como múltiplas funções de pertença por parâmetro.

3.2.5.2 – Vantagens

Apesar de já terem sido referidas algumas das vantagens dos algoritmos baseados em CD, resta salientar que na sua construção estes suportam:

- Paralelismo, permitindo um controlo complexo por combinação de regras simples, facultando a utilização de inferência em paralelo;
- Controlo Lógico, sendo adequado à aquisição de conhecimento a partir de peritos humanos, pois permite a definição de regras em linguagem comum;
- Controlo Linguístico, possibilitando a fácil compreensão das regras pelos operadores, facilitando a interpretação do efeito de cada uma.

É possível optar por três ambientes de aplicação dos CD, tais como sistemas de máquinas, sistemas humanos e até mesmo sistemas mistos, com os objectivos:

- Expressão de experiencias humanas, tal como o senso comum;
- Construção de modelos de sentimentos e linguística do ser humano;

- Copiar o reconhecimento humano de padrões ou conhecimento geral,
- Conversão de informação para uma fácil compreensão;
- Compressão de grandes quantidades de informação;
- Construção de modelos humanos de comportamento e psicologia;
- Desenvolvimento de modelos de sistemas sociais.

Capítulo 4 – Inspeções

4 – Introdução

Neste capítulo serão analisadas as questões na concepção de um protótipo de monitorização das juntas de dilatação da PVG, descrevendo a evolução deste estudo, desde as análises prévias, passando pela escolha de equipamento até ao desenvolvimento dos algoritmos, captura e análise de sinais. Serão ainda descritas as inspeções no local bem como as conclusões a extrair das mesmas, referindo-se também de que modo as inspeções laboratoriais foram implementadas e levadas a cabo.

4.1 – Análise Objectiva

A análise objectiva do problema proposto começa por reunir o máximo de informação possível, determinando parâmetros piloto para um estudo e concepção bem sucedido. Junto da equipa da concessão Lusoponte responsável pela detecção e reparação de juntas de dilatação (JD) defeituosas na PVG, foi importante aferir que o estado de conservação das JD, actualmente é determinado por meio de:

- Inspeção Visual, dependendo da falha ou inexistência de parafusos de fixação, condição dos componentes e piso;
- Inspeção Auditiva, sendo bastante perceptível o tipo de som de uma junta de dilatação defeituosa quando um veículo a atravessa, sendo este som dotado de características metálicas e de alta frequência.

Na concepção de um sistema automatizado de monitorização, compreende-se a aproximação ao tipo de análise humana empregada, contudo uma inspeção visual automatizada estará condenada por ser impraticável detectar a existência de parafusos partidos, entre outras anomalias. Assumindo-se então, a implementação de um sistema automatizado de análise sonora ou vibração, detectando parâmetros idênticos ou similares aos que a equipa técnica aplica.

Tomando como exemplo o trabalho levado a cabo pelo orientador desta dissertação (Gomes, et al. 2000), optou-se pelo desenvolvimento de um protótipo com base em análise sonora, também com o objectivo de aproximação aos actuais meios de inspecção técnicos. Com esta decisão, foi descartada a utilização de acelerómetros e consequente análise de vibrações, também porque iriam necessitar de um estudo muito mais aprofundado e dispendioso para que fossem atingidos resultados fidedignos, não se justificando por se tratar de desenvolvimento de um protótipo.

4.1.1 – Material de Aquisição

O processo de escolha do material de aquisição, depois de tomada a decisão de análise de som, é iniciado pela escolha do microfone a utilizar. Tal como é referido no parágrafo 2.6.3, é necessário definir pelo menos o campo de aplicação, resposta dinâmica e resposta em frequência. Neste caso de aplicação o microfone foi seleccionado:

- Tendo em conta um campo de aplicação misto, até porque para além de se pretender uma aquisição do som envolvente pela dimensão da JD, poderá ser necessário a aquisição de som localizado em pontos-chave. Ou seja, o microfone deve operar tanto num campo difuso como em campo aberto, sendo capaz de assumir tanto as características de cardióide como omnidireccionais;
- Abrangendo uma gama dinâmica elevada, para evitar a saturação do microfone, na ocorrência de grandes impactos nas juntas de dilatação passíveis de ocorrer na passagem de veículos pesados sobre as mesmas. Admitindo que o ouvido humano é capaz de distinguir sons com amplitudes desde os 0dB até aos 140dB, o dispositivo de aquisição abrange estes limites;

- Assumindo que o ouvido humano consegue distinguir sons com frequências compreendidas entre os 20Hz e os 20kHz, o microfone deverá abranger toda esta gama de frequências com o mínimo de atenuação.

Apesar de uma solução final requisitar a obtenção de um microfone industrial, com uma maior resistência mecânica e aos elementos, para esta solução de teste optou-se por um microfone profissional por ser utilizado apenas para implementação do protótipo e análise do problema.

Após revistos os requisitos anteriores e pesquisa de mercado, foi escolhido o microfone C1000 S da AKG, tratando-se de um microfone bastante dinâmico, menos dispendioso que os congêneres industriais e com experiência comprovada em ambientes profissionais distintos. Analisando as suas especificações técnicas no Web site (AKG 2009):

<i>Polar pattern</i>	<i>cardioid, hypercardioid (with PPC 1000 mounted)</i>
<i>Frequency range</i>	<i>50 to 20,000 Hz</i>
<i>Sensitivity</i>	<i>6 mV/Pa (-44 dBV)</i>
<i>Max. SPL for 1% THD</i>	<i>137 dB</i>
<i>Equivalent noise level (CCIR 468-3)</i>	<i>32 dB</i>
<i>Equivalent noise level</i>	<i>21 dB-A</i>
<i>Signal/noise ratio (A-weighted)</i>	<i>73 dB</i>
<i>Impedance</i>	<i>200 ohms</i>
<i>Recommended load impedance</i>	<i>≥2000 ohms</i>
<i>Powering</i>	<i>9 to 52 V phantom power to DIN 45596 or internal 9 V battery</i>
<i>Current consumption</i>	<i>approx. 2 mA</i>
<i>Connector</i>	<i>3-pin XLR</i>
<i>Finish</i>	<i>matte silver enamel</i>
<i>Dimensions</i>	<i>34 dia. x 220 mm / 1.4 dia. x 8.7 in.</i>
<i>Net weight</i>	<i>320 g / 11.3 oz.</i>
<i>Shipping weight</i>	<i>650 g / 1.4 lbs.</i>



Figura 4.1 - AKG C1000 S (AKG 2009)

Tabela 4.1 – Especificações do Microfone C1000 S da AKG (AKG 2009)

Segundo os requisitos mínimos requeridos, é possível destacar da tabela as características mais relevantes deste microfone:

- Padrão polar (*Polar Pattern*), tanto representa um padrão polar cardióide como hipercardióide mediante a utilização de adaptadores, ou seja, com o conversor PB1000 o microfone fica configurado para som ambiente puro e com o PPC1000 assume características de um hipercardióide, também funcionando sem nenhum destes adaptadores para características mistas. Sendo capaz de funcionar tanto em campo difuso como aberto;

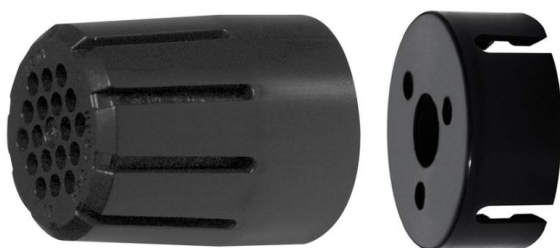


Figura 4.2 – Adaptador PPC1000 para campos difusos (esquerda) e PB1000 para campo aberto. (AKG 2009)

- Gama de Frequências (*Frequency Range*), sendo um microfone com múltiplos propósitos, é eficaz para frequências compreendidas entre 50Hz e 20kHz. Apesar de ser pretendida uma gama de frequências desde 20Hz não é crítica começar apenas em 50Hz, uma vez que os sons que se pretendem diferenciar possuem características de frequências elevadas;
- Sensibilidade (*Sensitivity*) com 6mV/Pa, torna este microfone um dos mais sensíveis dos analisados;
- Resposta Dinâmica, garantindo que não satura até 137dB torna este microfone mais que adequado, uma vez que o limite máximo audível pelo ouvido humano é 140dB;
- Outras características tais como o baixo ruído, elevado rácio do sinal *versus* ruído, possibilidade de alimentação externa (*phantom power*) para amplificação e ligações 3 vias para atenuação de ruído virão a ser todas uma mais-valia.

Após analisadas as especificações do microfone e respectivos diagramas polares (Figura 4.3), determina-se que o microfone C1000 S da AKG se adequa perfeitamente aos objectivos propostos.

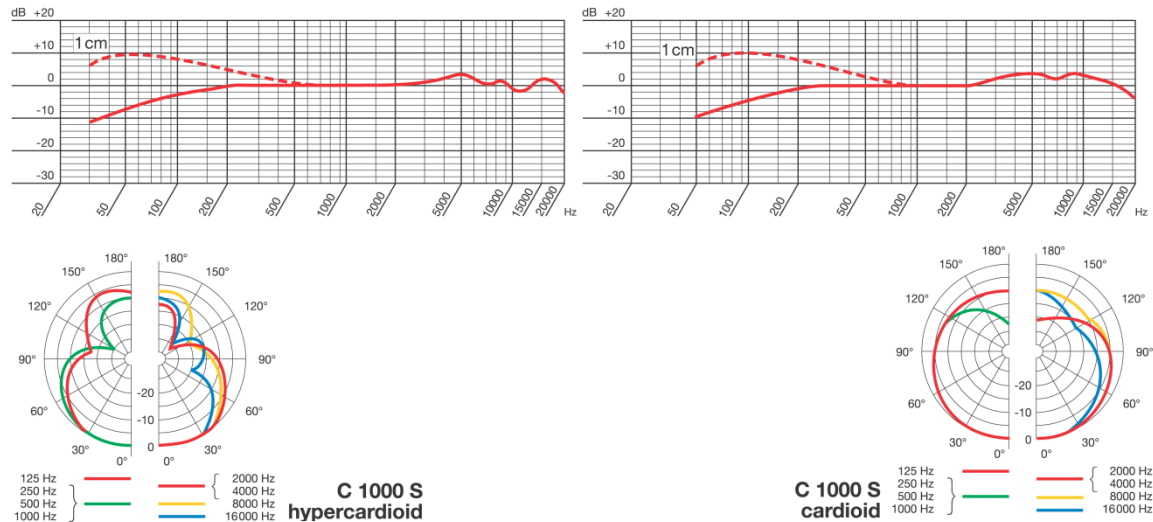


Figura 4.3 – Diagrama Polar Hipercardióide (esquerda), Diagrama Polar Cardióide (direita). (AKG 2009)

4.2 – Inspeções no Local

As análises *in situ* são o que mais contribuem para a recolha das informações mais relevantes a qualquer estudo deste género, quer sejam compostas por reuniões, entrevistas ou recolha de dados. Foi com este princípio que foram conduzidas uma série de três visitas ao local de estudo, fazendo-se acompanhar por uma equipa técnica da Lusoponte, testemunhando-se em primeira mão os objectivos pretendidos.

4.2.1 – Primeira Inspeção

A primeira visita ao local foi executada com o intuito de recolha de amostras de som e demais informação, adquirindo contacto com o ambiente de estudo, a sua dimensão e implicação. Para que a recolha de amostras fosse possível, reuniu-se algum material para a captura de som, nomeadamente um microfone e um computador portátil. Já que a primeira fase deste protótipo

consiste na aquisição de amostras para análise, foi desenvolvida uma aplicação em LabView apenas para aquisição de som, respeitando a frequência de amostragem desejada. Foi optado o ambiente de programação gráfica do LabView para desenvolvimento do protótipo, pelas ferramentas de análise de som e vibração que dispõe.

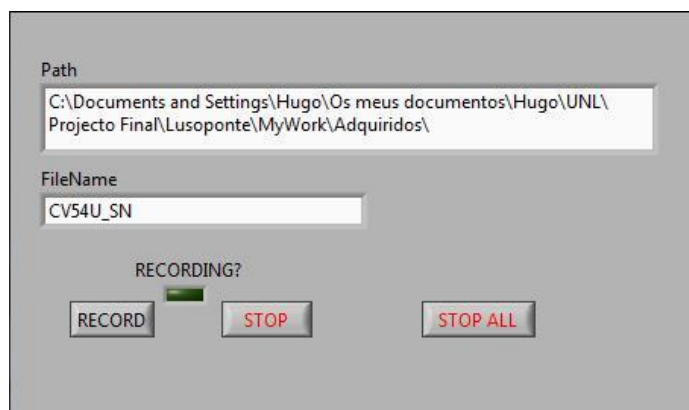


Figura 4.4 – Interface de Aquisição

Face à capacidade da placa de aquisição do computador portátil, foi apenas possível adquirir sinais a uma frequência de amostragem de 22050Hz, tendo sido utilizado para o efeito uma versão embrionária do protótipo final (Figura 4.4) que apenas efectuava a aquisição de som.

4.2.1.1 – Configuração para Aquisição

Na decisão da configuração de aquisição é necessário discriminar todas as condicionantes, desde a intensidade do som e posição do microfone relativamente à sua origem até aos dispositivos de aquisição.

A imagem à direita permite ilustrar a constituição de uma das juntas de dilatação analisadas, a recolha de som irá ser feita num plano inferior, com acesso através de uma escada e passadiço dedicados à inspecção e manutenção.



Figura 4.5 – Exemplo de JD analisada

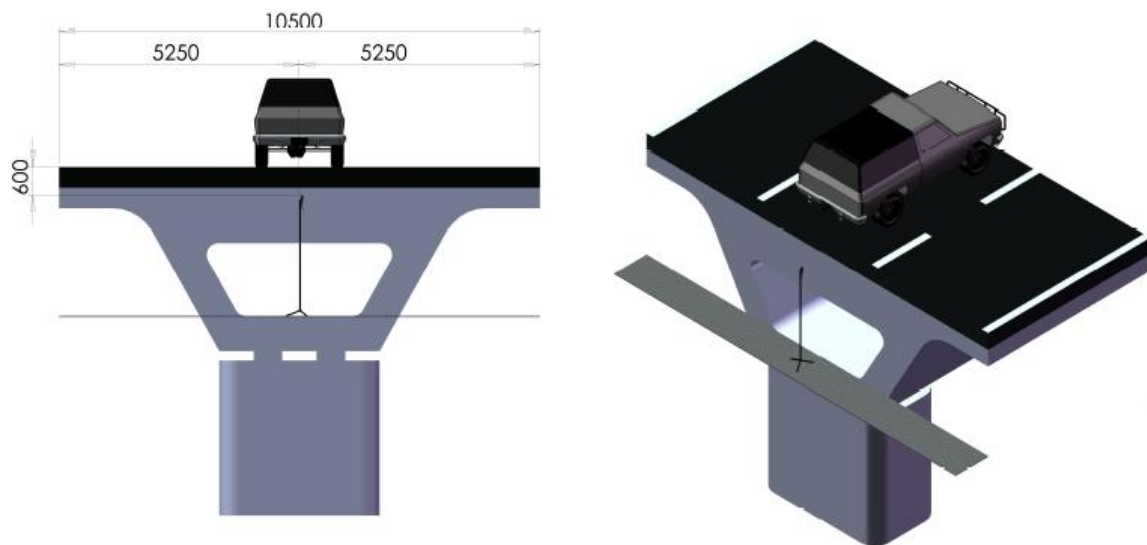


Figura 4.6 – Ilustração do Posicionamento do Microfone em Aquisição (em mm)

Tal como é possível verificar pela Figura 4.6, optou-se por posicionar o microfone exactamente a meio da faixa de rodagem central e com um distanciamento relativamente baixo da zona de impacto, uniformizando os sons retirados nas três faixas que compõem a JD. A Figura 4.7 serve para melhor se compreender que tipo de ligações foram utilizadas, verifica-se que apesar de o microfone contemplar características como ligações balanceadas (vulgarmente conhecidas como XLR) e pré-amplificação (*phantom*), não serão utilizadas por se tratar apenas de uma visita para ganhar contacto e definir estratégias.

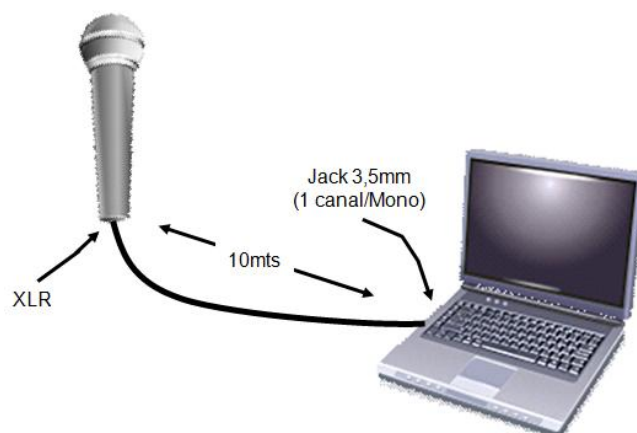


Figura 4.7 – Ilustração de Configuração de Ligações

4.2.1.2 – Conhecimentos Adquiridos

Apesar do objectivo principal desta análise *in situ* visar a recolha de amostras de som, também serviu para adquirir contacto com o caso de estudo e localizar características determinantes ao seu desenvolvimento. Após analisada a dimensão e composição das juntas de dilatação, confirmou-se que a largura útil em que circulam viaturas é cerca de 10,5 metros com comprimento variável e oscilante. E tratando-se de um tipo de juntas modulares, sendo constituídas pela junção de painéis de borracha entre outros componentes, concluiu-se que quando fosse detectado um defeito também seria importante circunscrever a sua localização na junta de dilatação. Saliendo-se o facto de a faixa de rodagem direita apresentar um nível de deterioração mais elevado que nas outras duas faixas, por ser percorrida com mais frequência por veículos pesados. Posto isto, com apenas um microfone seria impossível circunscrever a faixa de rodagem com defeito, revelando a necessidade de um conjunto de dois microfones para este novo objectivo.

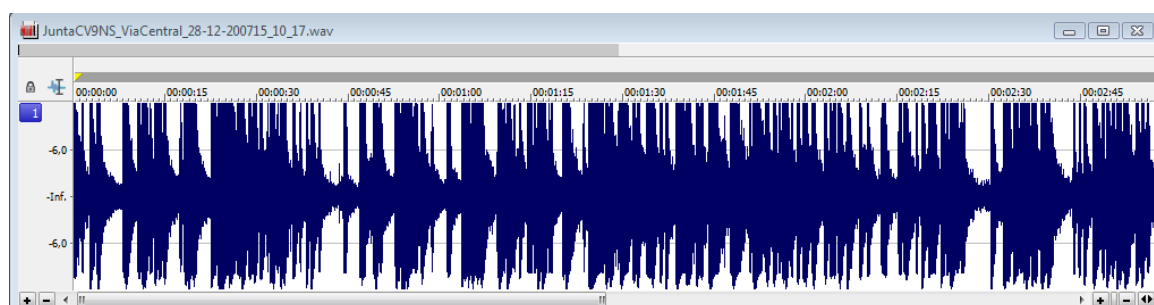


Figura 4.8 – Exemplo de Amostra Adquirida

Depois de análises laboratoriais aos sons adquiridos, concluiu-se que os objectivos da sua aquisição tinha sido infrutífera, por os mesmos se apresentarem saturados, ficando isto a dever-se a uma dificuldade na regulação de sensibilidade dos microfones, por limitação da placa de som do computador portátil utilizado no momento da aquisição das amostras. Concluindo-se que seria imprescindível a obtenção de uma placa de aquisição de som capaz de suportar dois canais, pelos motivos salientados anteriormente e teria ainda de possuir uma regulação da sensibilidade dos microfones.

Apesar das amostras adquiridas se encontrarem comprometidas devido a saturação, é possível deduzir que durante a transição de um veículo irão surgir o número de impactos correspondes ao número de eixos que o veículo possui, constituindo uma forma de diferenciar um veículo pesado de um ligeiro.

4.2.2 – Segunda Inspeção

Depois da visita anterior e análise laboratorial mostrou-se crucial levar a cabo uma segunda análise *in situ*, cobrindo todos os requisitos levantados na primeira visita. Tal como se concluiu na primeira inspeção ao local, mostrou-se crítica a utilização de uma placa dedicada à aquisição das amostras de som, bem como a utilização de um conjunto de dois microfones. Seguindo estes requisitos, foi adquirido mais um microfone AKG C1000S e uma placa de aquisição de som semi-profissional da *Edirol by Roland*.

4.2.2.1 – Configuração para Aquisição

Tal como já foi referido no parágrafo anterior, a configuração para aquisição de amostras de som nesta inspeção irá ser conseguida por meio de dois microfones ligados a uma placa de aquisição de som, que por sua vez será ligada a um computador portátil para armazenamento amostras recolhidas.

Na análise ao local anterior, determinou-se que os 22050kHz de amostragem não seriam suficientes para cobrir o espectro, visto terem-se verificado componentes de frequência elevada (na ordem dos 15kHz) com grande capacidade de discriminar o estado das juntas de dilatação. Aplicando-se o teorema de Nyquist, é sabido que a frequência de amostragem de um sinal deve ser igual ou maior a duas vezes a frequência máxima do sinal amostrado, aplicando a fórmula abaixo é obtida uma frequência de amostragem de 44100kHz.

$$W_s \geq 2 \times W_{m\acute{a}x} \geq 2 \times 22050Hz \geq 44100Hz$$

Na pesquisa de mercado por placas de aquisição de som, foi posta em causa a obtenção de um modelo industrial pela sua robustez e performance, contudo nesta fase de protótipo optou-se por uma placa semi-profissional por já deter a performance necessária e ser menos dispendiosa. Posto isto, adquiriu-se a placa de som UA-25 da *Edirol by Roland*, que uma vez sendo semi-profissional possui:

- Um baixo grau de ruído;
- Pré-amplificação para os microfones (*phantom*);
- Entrada de microfone do tipo XLR para atenuação de ruído e balanceamento de sinal;
- Sendo capaz de uma frequência de amostragem até 96kHz suporta a frequência de amostragem desejada;
- Alimentação USB, permitindo uma fácil portabilidade.



Figura 4.9 – Placa de Captura de Som UA-25 (Roland 2008)

Tornou-se ainda necessário o aperfeiçoamento da aplicação de aquisição de som, sendo crítica a visualização em tempo real do sinal que está a ser adquirido, para que torne possível o ajuste em tempo real da sensibilidade e pré-amplificação aplicada aos microfones. Apesar da placa de aquisição já incorporar um detector de picos, a fim de evitar saturação, esta funcionalidade não foi utilizada por se pretender recolher o máximo de informação do sinal.

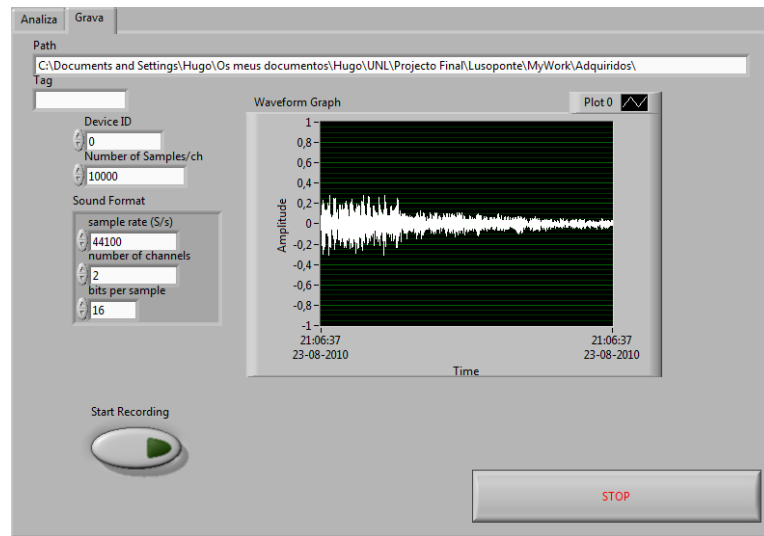


Figura 4.10 – Interface de Aquisição

A aplicação representada pela Figura 4.10 foi uma versão de um melhoramento da utilizada anteriormente, possibilitando a gravação de dois canais em simultâneo através de som estéreo, bem como a visualização em tempo real do som que está a ser adquirido permitindo o ajuste da sensibilidade dos microfones evitando a saturação do sinal.

Pelos objectivos extrapolados na visita anterior, destacam-se a necessidade da localização da proveniência do som, para que seja apurado o estado da junta consoante a origem do mesmo. Tornando obrigatória a utilização de um conjunto mínimo de dois microfones, por agora salienta-se apenas o estudo da localização dos microfones em relação à faixa de rodagem. Uma vez que cada JD da PVG é atravessada por três faixas de rodagem, foi aplicado o mesmo princípio ao seccionamento de zonas em que é apurado o estado da JD, sendo optado pela seguinte disposição de microfones.

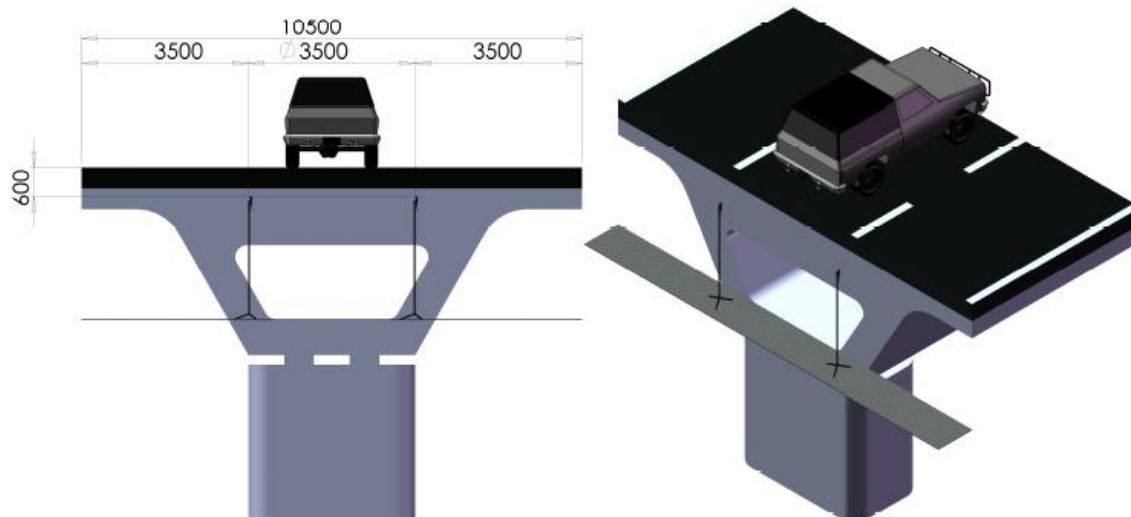


Figura 4.11 – Configuração dos Dois Microfones em Aquisição (em mm)

Foi então escolhida a configuração de microfones da Figura 4.11 tendo em conta a sua cobertura face à área da JD a analisar, e consequentemente para que resultasse na maior quantidade de informação a obter nos sinais de ambos os canais, facilitando assim a tarefa de discriminação da proveniência do som e do estado da faixa de rodagem em que é originado, durante a passagem de veículos.



Figura 4.12 – Microfones *in situ*

Para que melhor se compreenda como os microfones representados na Figura 4.12 foram ligados, pela Figura 4.13 é possível verificar que nesta análise optou-se pelas ligações balanceadas do tipo XLR, permitindo usufruir da pré-amplificação disponível nos microfones (*phantom*), contribuindo para uma amplificação de sinal e diminuição de ruído.

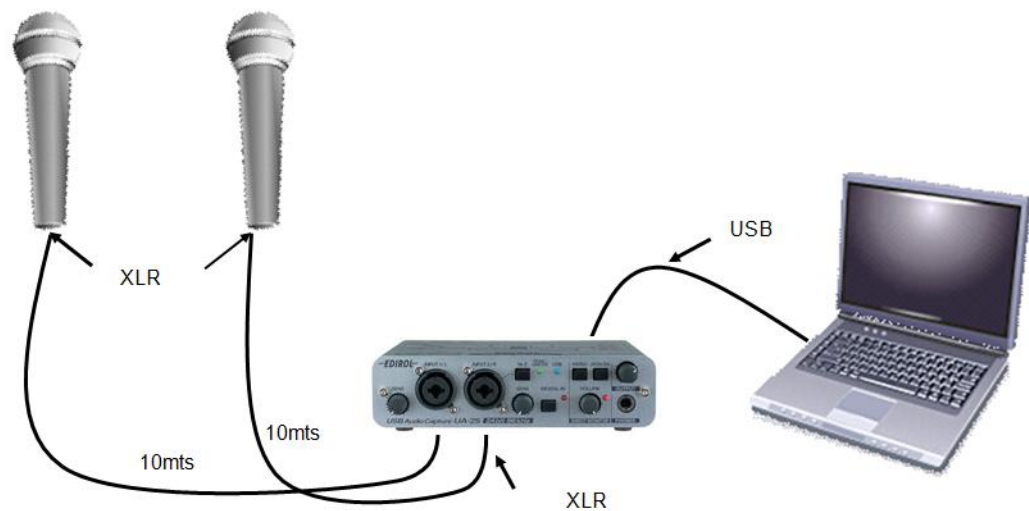


Figura 4.13 – Esquema de Ligações Utilizado

4.2.2.2 – Conhecimentos Adquiridos

Após análise laboratorial das novas amostras de som adquiridas *in situ*, já foi possível extrapolar informação relevante para a implementação do algoritmo que irá integrar o protótipo. Cobrindo análises de padrões na determinação do estado estrutural das JD analisadas, localização de impacto gerado pela transição de veículos, bem como parâmetros de discriminação de amostras válidas. Tal como é possível visualizar na Figura 4.14, desta vez o som adquirido não apresenta qualquer tipo de saturação, e sendo dois canais (estéreo) estão perfeitamente sincronizados.

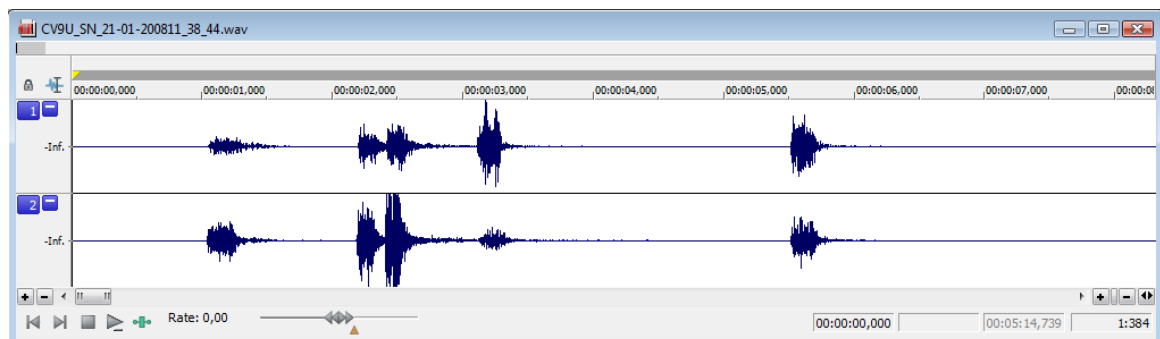


Figura 4.14 – Exemplo de Amostra Adquirida

No entanto, na data em que foi levada a cabo esta inspecção a concessionária Lusoponte aguardava por diverso material para proceder a obras de acondicionamento e reparação nas JD analisadas. Sendo assim, com as amostras recolhidas torna-se mais difícil efectuar uma análise de padrões, por não se possuírem amostras de uma JD em perfeitas condições. Posto isto, tornou-se indispensável o agendamento de uma nova análise *in situ*, para que seja viável a recolha de som de uma JD em boas condições, de modo a que as amostras adquiridas constituam uma referência de uma JD em boas condições.

4.2.3 – Terceira Inspeção

Esta inspecção consistiu num complemento da anterior, até porque foram utilizadas as mesmas ferramentas, recursos e configurações. Servindo para que fosse obtida uma referência de JD em boas condições, esta análise foi executada após o acondicionamento e reparação das mesmas.

Após analisadas a JD em conjunto com a equipa técnica responsável pela sua integridade, concluiu-se que o desgaste de uma JD evolui de forma progressiva, tal como está exemplificado no ponto 2.3. Apesar de uma JD se encontrar relativamente em boas condições, é possível detectar pontualmente alguns sons típicos de uma junta de dilatação em más condições, concluindo-se que seria impraticável e pouco perceptível determinar a integridade estrutural de uma JD através de uma única amostra de som.

Apesar do protótipo ainda não se encontrar finalizado nesta fase, foi possível testar com sucesso a detecção de localização de impacto, a fim de localizar os danos na JD. É ainda possível verificar, que foi adicionado um gráfico em tempo real da FFT (*Fast Fourier Transform*), como forma de perceber de que como as componentes na frequência do som adquirido são afectadas pelos sucessivos impactos, provocados pelos veículos. Para que isto fosse passível de ser testado, foram aplicados melhoramentos ao protótipo que anteriormente apenas serviu para aquisição de som, ilustra-se na Figura 4.15 a sua Interface ao Utilizador (IU).

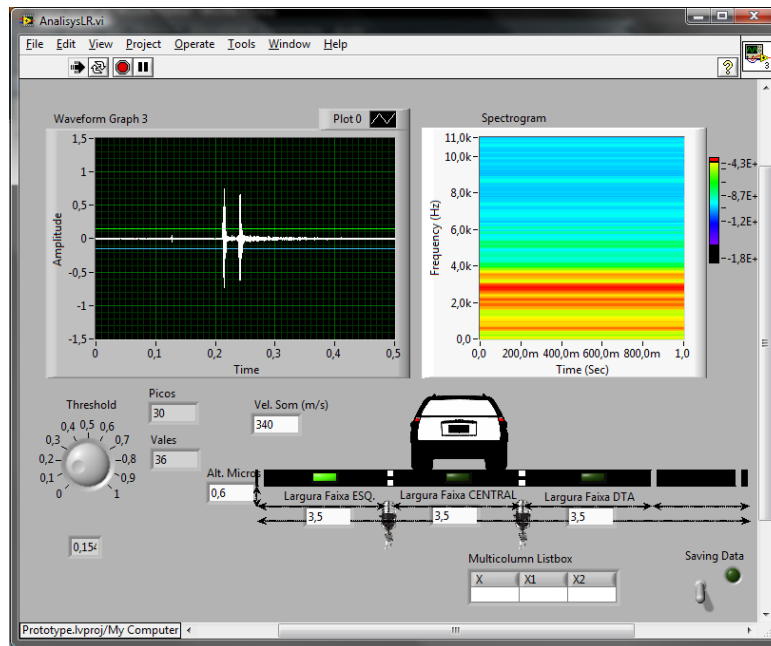


Figura 4.15 – Interface de Análise de Localização de Impacto

4.2.4 – Inspeção Simulada

Como todas as inspeções no local requerem que seja feito algum condicionamento de via de rodagem, como medida de segurança das pessoas envolvidas, foi necessário testar o protótipo durante a sua implementação recorrendo a uma simulação das inspeções anteriores. Esta forma de análise laboratorial veio a revelar-se crucial no desenvolvimento desta dissertação, através da simulação das inspeções anteriores, foi possível atingir um ambiente fidedigno e capaz de preservar todas as variáveis presentes *in situ*.

Preservando ao máximo toda a configuração de aquisição de som utilizada nas inspeções no local, apenas foi necessário substituir os microfones como dispositivos de aquisição, por um dispositivo de reprodução do som digitalizado através da utilização de um leitor de Discos Compactos. Foi seleccionado o formato de digitalização do som que mais informação preserva, optando-se pelo formato *wave*, passível de ser reproduzido em grande parte dos leitores com o mínimo de compressão de dados. Na Figura 4.16, facilmente se verifica as diferenças entre a configuração utilizada na inspeção anterior e na inspeção simulada.

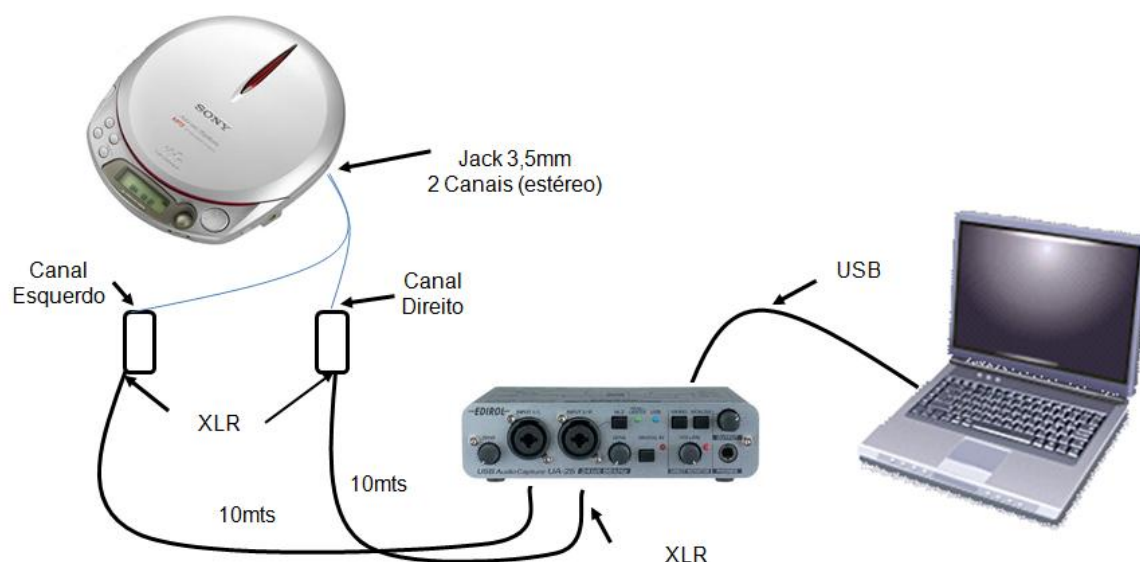


Figura 4.16 – Configuração de Ligações

Na configuração acima e em relação às inspeções reais, é espectável alguma perda de sinal e aumento de ruído, ficando isto a dever-se à utilização de mais duas ligações por canal e mais um cabo. No entanto esta deterioração do sinal, face a uma inspeção no local, pelos resultados obtidos no momento do teste revelou-se praticamente nula.

4.2.5 – Conclusões

Apesar de a primeira inspeção não ter grande significado em termos de recolha de amostras, teve uma grande importância na medida em que muitos dos conceitos ficaram estabelecidos em resultado da informação obtida.

Na sequência das duas inspeções ao local foram recolhidas várias amostras de som, num total de cerca de 20 minutos de gravação por junta de dilatação.

Posteriormente em análise laboratorial dos sons adquiridos, foram separados todos os sons de contacto de veículos com as JD como forma de construir um conjunto de treino. No entanto, é importante salientar que as amostras do conjunto de treino foram meticulosamente seleccionadas, como forma de garantir a validade do conjunto de treino descartando impactos múltiplos e simultâneos na mesma junta de dilatação, veículos pesados e motociclos por razões esclarecidas no ponto 5.1.5 desta dissertação.

Apesar de os tempos de aquisição de amostras terem sido sensivelmente os mesmos, o número de amostras irá oscilar não só com o número de amostras mas também com a intensidade de tráfego, resultando nos seguintes números de amostras que constituem o conjunto de treino utilizado:

	JD	Nº de Amostras
Inpeção 2	CV9U	66
	CV54D	46
	CV54U	143
Inpeção 3	CV81D	52
	CV27D	50
	CV27U	76
Total:		433

Tabela 4.2 – Quantidades de Amostras do Conjunto de Treino

Capítulo 5 – Implementação

5 – Introdução

Este capítulo tem como objectivo a demonstração do desenvolvimento do protótipo final, bem como todos os algoritmos que o constituem. Serão ainda comprovadas opções e etapas que conduziram este protótipo, assim como os seus motivos.

Para o desenvolvimento deste protótipo foram utilizadas diversas ferramentas, tal como o Matlab e o LabView, respectivamente pelo seu poder de análise de sinais e ferramentas que dispõem. O Matlab foi única e exclusivamente utilizado para análise de sinal pela sua exímia capacidade de cálculo matemático, enquanto o LabView já foi utilizado também para a construção de uma interface gráfica mais agradável ao utilizador.

Com este capítulo ficam apurados quais os métodos utilizados para a detecção e localização de impacto e resultantes janelas de captura, precavendo uma validação de amostras adquiridas em tempo real que perfazem as análises temporais desenvolvidas. Ficam também ilustradas as análises em frequência levadas a cabo nesta dissertação, uma vez que são constituídas por uma busca de padrão como forma de traçar o perfil dos defeitos a detectar.

5.1 – Análises Temporais

A primeira abordagem de um sinal é feita através de uma análise temporal, representando os condicionamentos de sinal, janelas de aquisição e análise. Através do estudo do comportamento dos sinais no tempo e extrapolando o máximo de informação nesta fase preliminar, torna-se possível aumentar a robustez e precisão dos algoritmos resultantes. Vai ser também através de uma análise em tempo real, que vão ser detectados eventos e classificadas amostras como válidas para análises posteriores.

5.1.1 – Detecção de Amostra

A detecção de amostra foi realizada segundo o princípio de detecção de impacto, sempre que o sinal a ser monitorizado ultrapassar um nível configurável, como forma de impedir que se analisem períodos em que não existam quaisquer tipos de ocorrências. Neste caso de estudo é aconselhável a aplicação de um nível configurável, devido à grande variedade de JD a analisar, variando os níveis de ruído e impactos consoante o seu tamanho e configuração.

A detecção de impacto ajustável tem ainda como objectivo o desprezo de ruídos indesejados, tais como impactos que ocorram em JD próximas à de análise e veículos de baixo porte pouco relevantes à monitorização pretendida, traduzindo-se num ajuste de sensibilidade de detecção de amostra, este deverá ser feito durante a instalação do protótipo.

Uma vez detectado um impacto é despoletado um evento (*trigger*), dando início à captura e análises posteriores do som adquirido, apesar de ainda não se encontrar validada para análise final.

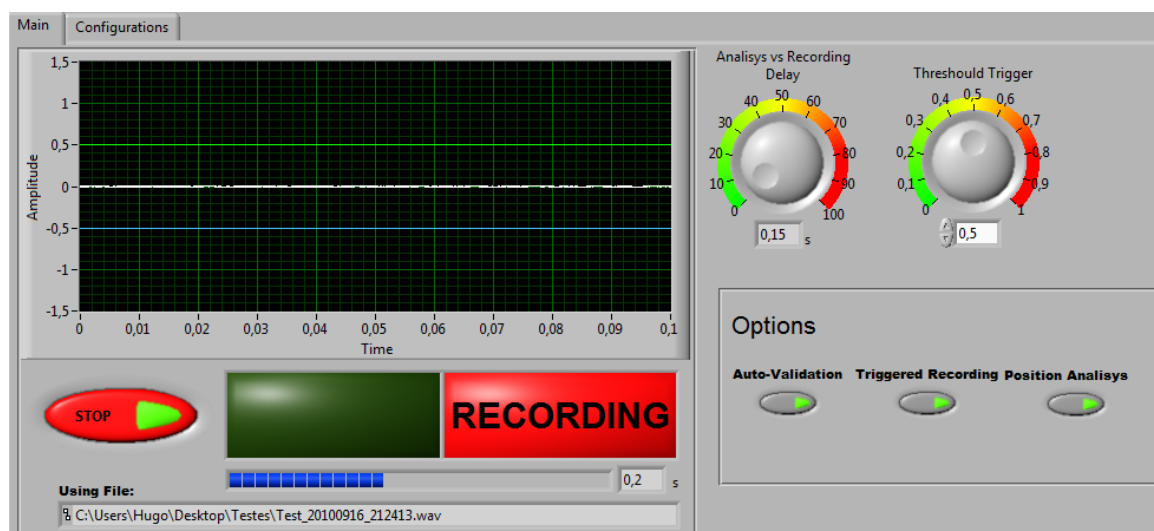


Figura 5.1 – Interface de *Trigger* e Aquisição

Na Figura 5.1, facilmente se verifica o ajuste do *trigger* (*Threshold Trigger*) e a sua representação gráfica feita por duas linhas (verde e azul) sobre o gráfico temporal do sinal, revelando-se também necessário a atenuação ajustável do atraso entre a detecção e o início de captura de amostra (*Analysis vs Recording Delay*).

5.1.2 – Janela de Captura

O conceito de janela de aquisição surge do princípio de que não será viável a captura infinita de som após a detecção de impacto, isto acontece por não existirem capacidades infinitas de armazenamento e velocidades ilimitadas de processamento, reduzindo-se o tamanho da amostra ao estritamente necessário e relevante como um meio de se atingir um melhor desempenho.

Após estudo do máximo número de impactos validos para análise, aplicando os mesmos princípios e conceitos que a equipa técnica de inspecção e manutenção das JD utiliza para validação, verificou-se que o som provocado pelo impacto legítimo de um veículo não demoraria mais do que 0,5 segundos para que se desvançam todas as características passíveis de utilização para análise.

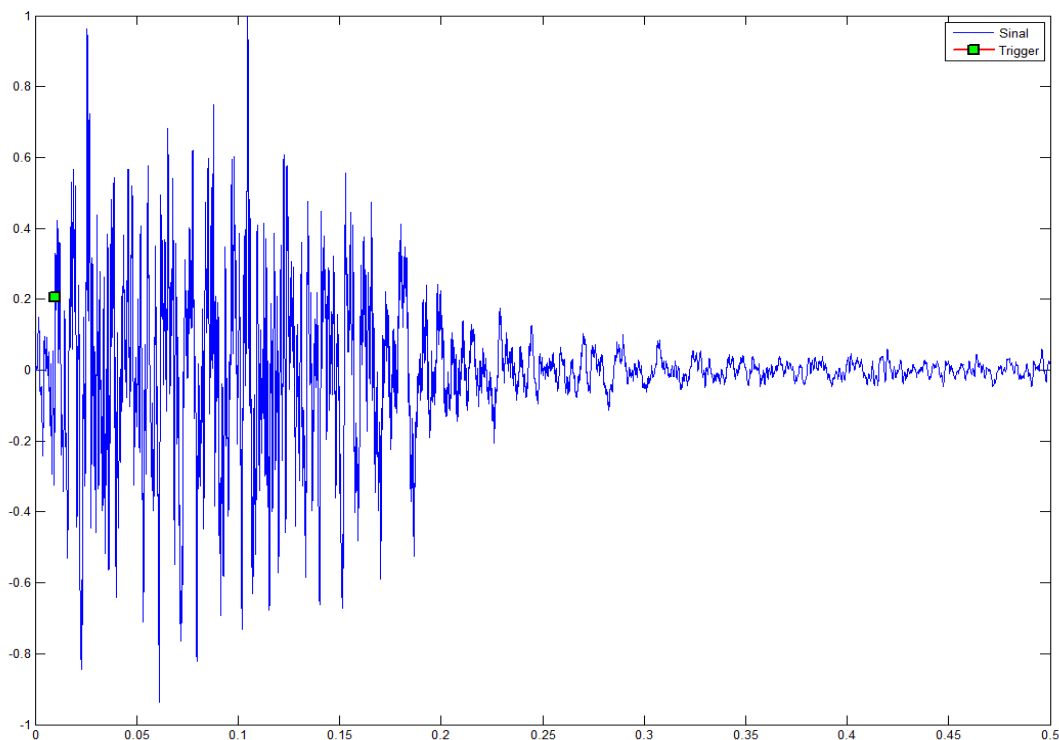


Figura 5.2 – Gráfico Temporal de Detecção de *Trigger*

Na Figura 5.2, está representada a detecção de *trigger* (assinalada a verde), tratando-se de uma amostra recolhida mediante a detecção da mesma, é possível visualizar o atraso entre a gravação e a detecção de *trigger*, permitindo a captura da amostra desde o seu início e não apenas desde a sua detecção.

Na Figura 5.3, verifica-se através da análise espectral da amostra da Figura 5.2 que o tamanho máximo de 0,5s é suficiente para a captura de uma amostra, visto que no final da amostra recolhida apenas se encontra ruído de baixa frequência.

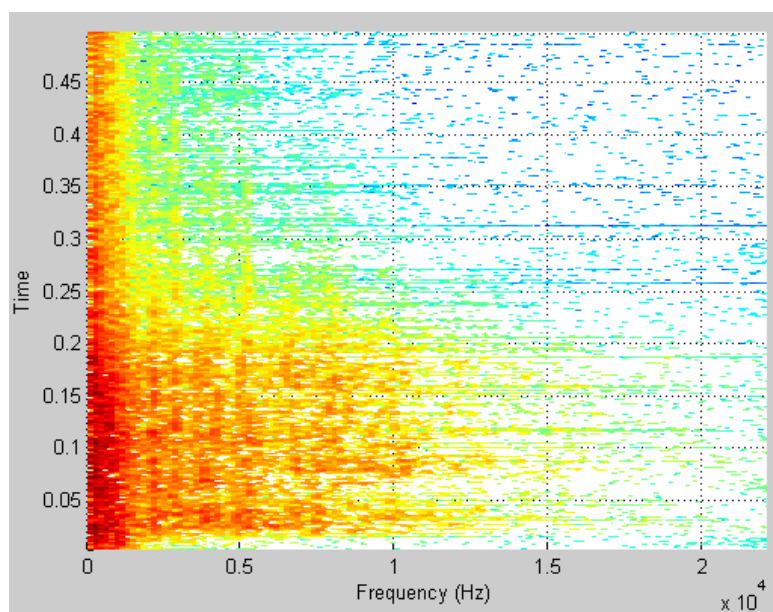


Figura 5.3 – Análise Espectral de Amostra de Som

Os parâmetros de detecção de impacto incluem a sensibilidade e o atraso em relação ao início do impacto, este atraso poderia ser reduzido pela diminuição do nível de detecção, mas com um aumento de sensibilidade incorria-se o risco de detecção de falsas amostras provocadas por ruído ou impactos em JD próximas. Posto este problema, a solução passará por determinar e ajustar o atraso máximo, através da análise do maior espectro possível de amostras.

5.1.2.1 – Calibração de *Trigger*

Optou-se por um *trigger* e atraso variáveis, passíveis de serem reajustados para diferentes juntas de dilatação, para quantificar este ajuste será sempre necessário analisar o máximo número de ocorrências (impactos). Posto isto, foi desenvolvido um algoritmo para determinar a quantidade de atraso a introduzir na detecção de amostras, já que a sensibilidade de detecção apenas

será determinada através de inspecções no local. Partindo da necessidade de facilitar a leitura de um sinal nos ensaios laboratoriais, procedeu-se ao condicionamento de sinal esquematizado Figura 5.4.

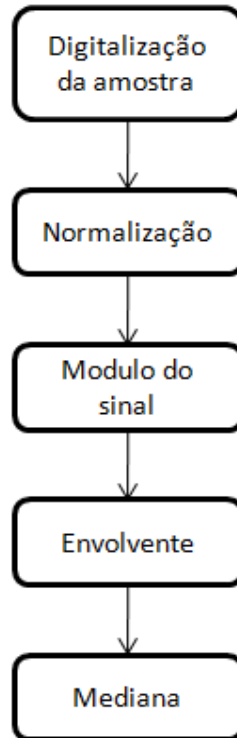


Figura 5.4 – Estados de Condicionamento de Sinal

Após o condicionamento de sinal indicado na Figura 5.4 foram obtidos os sinais apresentados na Figura 5.5, como forma de representação simplificada de todas as parametrizações estabelecidas no protótipo final. No entanto, deve ser salientado que o objectivo desta análise será meramente a calibração dos parâmetros de captura de amostras, através do cálculo do nível de *trigger* e atraso entre o início da amostra e a detecção de amostra (a verde). Traduzindo os valores obtidos no gráfico da Figura 5.5, para um nível normalizado de 0,2 pré-estabelecido pelo nível máximo de ruído visível no final da amostra, obtiveram-se os pontos de detecção a verde, pelo que a media (a amarelo) destes pontos irá representar o nível ideal de detecção e atraso da mesma relativamente ao início da amostra. Na Figura 5.6, está representado a verde o atraso resultante da calibração de *trigger* aplicado a uma amostra.

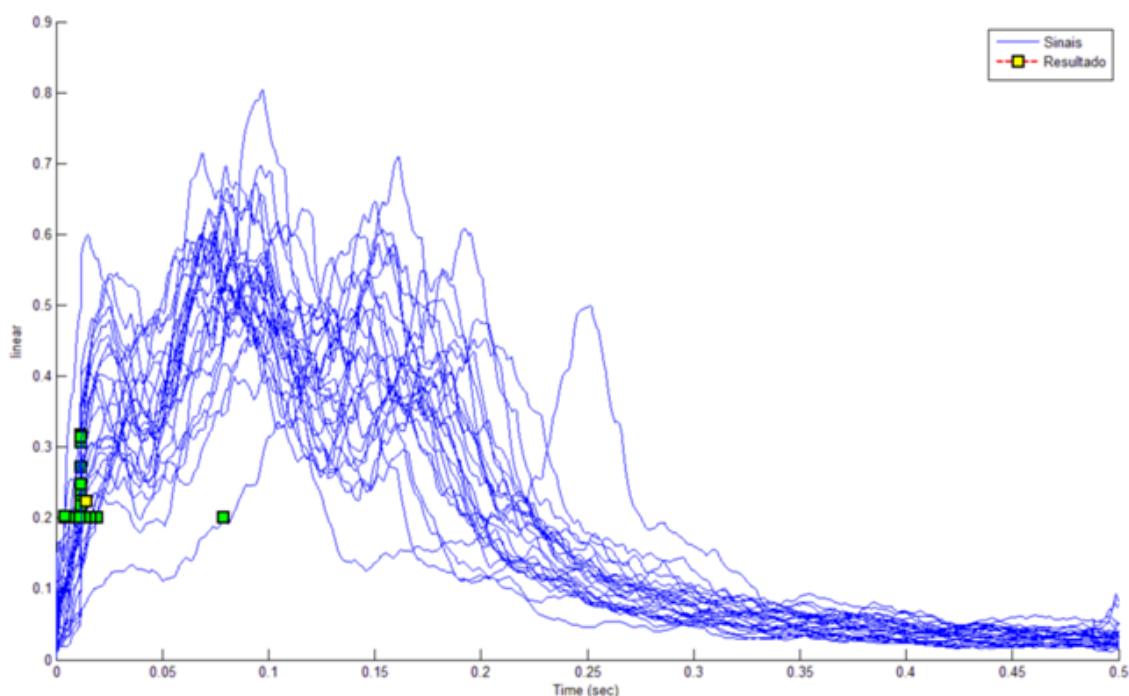


Figura 5.5 – Cálculo de Atraso e Nível de *Trigger*

5.1.3 – Janela de Análise

A necessidade de definição de uma janela de análise deriva da existência de variáveis impossíveis de determinar ou controlar, geradas pela pluralidade de veículos e respectivas velocidades, pesos, número de eixos e distâncias entre os mesmos. Com esta parametrização, restringe-se a análise de cada amostra melhorando a sua eficácia, sendo aplicada onde dispõe de mais informação e menos ruído, desprezando assim todas e quaisquer variáveis passíveis de a afectar negativamente e conseqüentemente acelerando a análise por estudar uma menor quantidade de informação.

Pelos parâmetros de inspecção auditiva que actualmente se aplicam às JD da PVG, para determinação do seu estado estrutural é procurado um tipo de som metálico seguido de uma vibração, após o último impacto gerado pelo veículo. Por esta e pelas razões apresentadas ainda neste parágrafo, chegou-se

à conclusão que a janela de análise seria passível de ser aplicada nos instantes a seguir ao último impacto do veículo.

Posto isto, foi aplicado o mesmo condicionamento da Figura 5.4 para uma parametrização idêntica dos sinais, com o objectivo de determinar o instante em que ocorre o impacto do último eixo do veículo representando o início da janela de análise. O algoritmo resultante irá utilizar as ferramentas desenvolvidas para detecção de *trigger* no início da amostra, bem como a detecção de final de amostra pela determinação do último instante em que o sinal se atenua para um nível abaixo do no nível de *trigger* pré-estabelecido.

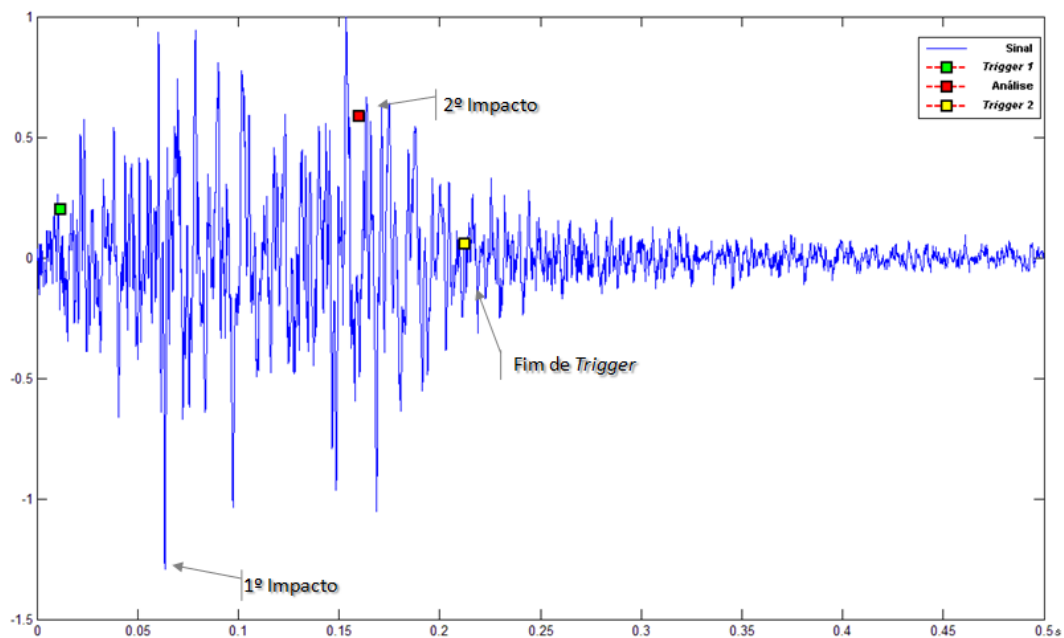


Figura 5.6 – Gráfico de Amostra e Detecções

Nesta fase, se o tempo de início de janela de análise é superior a 0,25s do som adquirido (num total de 0,5s de amostra), será desprezado por interpretar pelo menos uma das seguintes situações anómalas:

- Veiculo pesado;
- Distância entre eixos elevada;
- Velocidade reduzida;
- Ou a passagem simultânea de múltiplos veículos.

A detecção do segundo *trigger* (a amarelo na Figura 5.6) é efectuada como forma de reduzir a busca de impactos, determinado pelo máximo valor do

sinal na segunda metade entre os dois *trigger's* também representados na Figura 5.6.

5.1.4 – Localização de Impacto

Uma vez que as razões da implementação de uma forma de localização de impacto na JD já se encontrarem descritas no ponto 4.2.2, descreve-se em seguida o algoritmo utilizado para o efeito. Visto que as acções de manutenção às JD se efectuarem por via, por necessitarem de condicionamento de via, optou-se por determinar qual a via em que ocorre o impacto. Após determinada a via em que o veículo transitou, e analisada e classificada a amostra resultante, procede-se à atribuição desta classificação à via em questão.

Em termos funcionais, a localização de impacto será utilizada ainda para seleccionar o canal (esquerdo ou direito), para que seja analisado apenas o canal com melhor sinal relativamente ao local onde o impacto teve origem.

Para uma melhor percepção do atraso que ocorre entre os dois microfones, nas figuras que se seguem é possível perceber o atraso entre os dois, bem como a atenuação resultante das diferentes distâncias aos pontos de impacto.

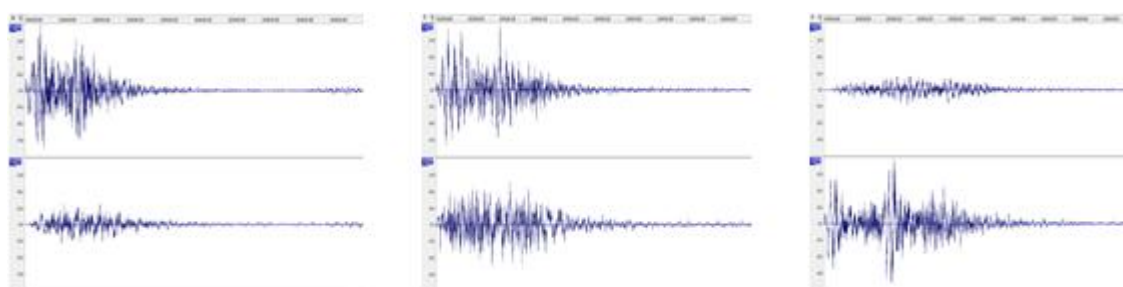


Figura 5.7 – Amostra de Via Esquerda (Esq.), Amostra de Via Central (Centro), Amostra de Via Direita (Dta.)

Pelos gráficos na Figura 5.7, é possível distinguir o atraso entre os impactos respectivamente à via em que ocorrem, também seria possível esta classificação pela diferença de atenuações nos dois canais mas iria dificultar a classificação de via central. Posto isto, apenas irá ser considerado para cálculos

o canal que apresentar menor atenuação e conseqüentemente uma maior quantidade de informação disponível, sendo o sinal atribuído à via classificada.

Admitindo uma disposição dos microfones utilizada representada na Figura 4.11, o algoritmo irá então resultar de cálculos geométricos e classificadores baseados em árvores de decisão. Partindo do princípio que a velocidade do som é cerca de $340,29\text{ms}^{-1}$, medindo a diferença de tempo que ocorre entre impactos do mesmo veículo pelos dois microfones possibilita a localização da origem do mesmo. Ou seja:

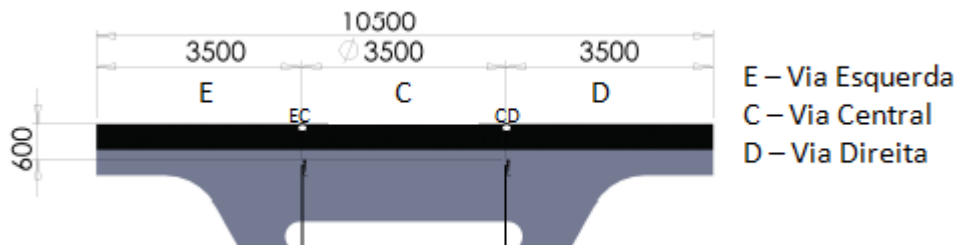


Figura 5.8 – Classificação de Via de Rodagem e Pontos de Transição

$$\begin{cases} \text{Distância Vertical (Dy)} = 0,6\text{m} \\ \text{Distância Horizontal (Dx)} = 3,5\text{m} \end{cases}$$

Começando por identificar as situações limite interpretadas por um ponto de impacto situado exactamente acima do microfone (pontos EC e CD na Figura 5.8) que caracterizam o limite de via, através do cálculo da diferença de tempo que o som leva a atingir os dois microfones, determina-se o máximo tempo possível à classificação de via central. Aplicando-se então o teorema de Pitágoras à Figura 5.8, obtém-se o seguinte esquema:

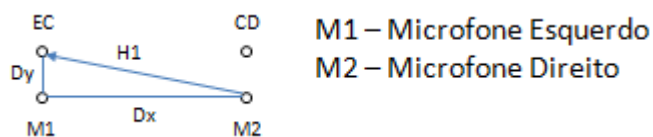


Figura 5.9 – Esquematização de Distâncias

Na Figura 5.9, consiste na esquematização das distâncias que o som do impacto percorre, para um caso limite de classificação de via central, pelo que H_1 irá representar a distância do ponto de impacto ao microfone direito e D_y a distância (conhecida) ao microfone esquerdo. Ou seja:

$$\begin{cases} H_1 = \sqrt{D_y^2 + D_x^2} \\ H_2 = D_y \\ D_y = 0,6m \\ D_x = 3,5m \end{cases}$$

Pela equação de movimentos de Física elementar e considerando que a velocidade do som é constante ao longo do espaço percorrido por se operar em distâncias relativamente curtas, é sabido:

$$\begin{cases} x = v_0 t \\ v_0 = v_{som} \cong 340,29ms^{-1} \end{cases}$$

Aplicando às equações das distâncias percorridas pelo som acima:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\sqrt{D_y^2 + D_x^2}}{v_{som}} \\ t_2 = \frac{D_y}{v_{som}} \end{cases}$$

Como se pretende obter a diferença de tempo limite para uma classificação de via de rodagem central:

$$\Delta t_c = t_1 - t_2 = \frac{\sqrt{D_y^2 + D_x^2}}{v_{som}} - \frac{D_y}{v_{som}} = 8,672 \times 10^{-3}s$$

Estando definido o valor limite de tempo para a classificação de via central, é passível a aplicação de um classificador baseado em árvores de decisão:

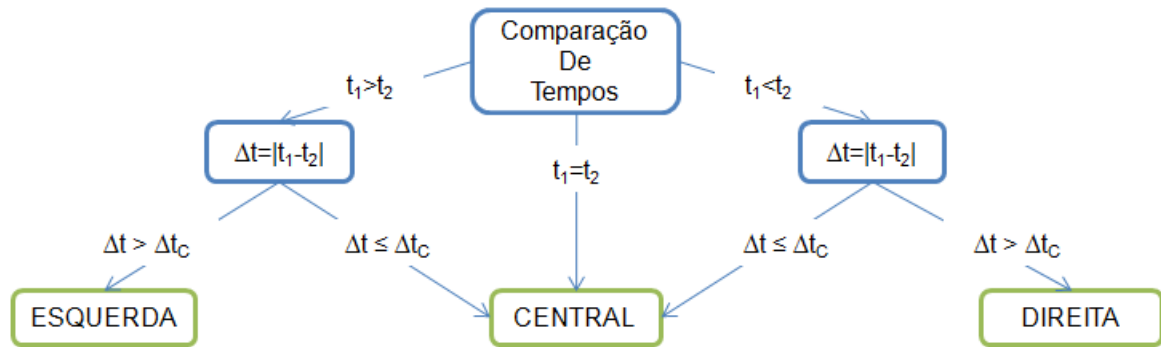


Figura 5.10 – Classificador Baseado em Árvore de Decisão Utilizado

Tal como é possível concluir pela Figura 5.10, através da aplicação da diferença limite (Δt_c) entre os instantes de tempo t_1 (do microfone esquerdo) e t_2 (do microfone direito) em que é detectado o mesmo impacto, através dos cálculos trigonométricos, leis da Física e da árvore de decisão da Figura 5.10, torna possível determinar em que via ocorreu o impacto.

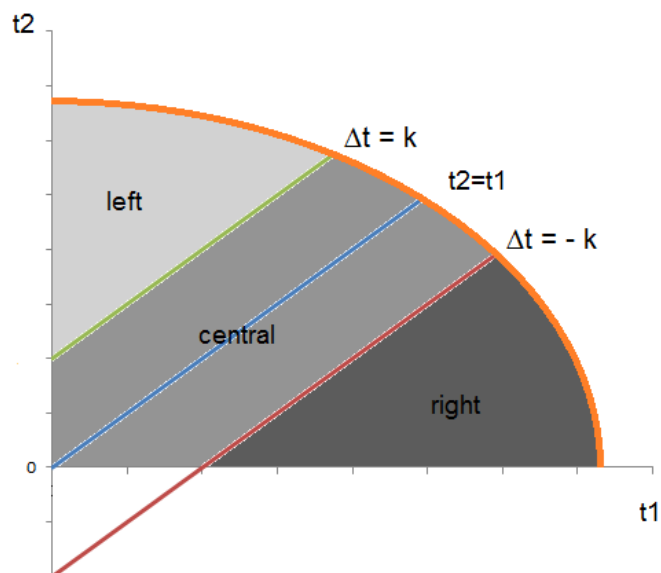


Figura 5.11 - Representação de Classificação Algoritmos de Vizinhança (Guerreiro, Gomes and Campos-Rebelo 2011)

Veja-se a Figura 5.11 adaptada de (Guerreiro, Gomes and Campos-Rebello 2011) resultante do trabalho desta dissertação, que representa a classificação do local de impacto através de classificadores por proximidade (*nearest neighbor*).

5.1.5 – Amostras Rejeitadas

Este parágrafo sintetiza quais os tipos de amostras a rejeitar, bem como os seus objectivos.

A necessidade de classificação de amostras rejeitadas surgiu como resultado das inspecções ao local e análises preliminares dos sinais adquiridos, tendo como motivo a normalização de amostras face às diferentes variáveis ambiente, causadas pela diversidade de veículos que transitam as JD, tais como:

- Pesos diferentes;
- Velocidades de transição diversas;
- Comprimentos diferentes;
- Pontos de transição distintos;
- Tempos mortos, em que nenhum veículo percorre a JD;
- Múltiplas transições em simultâneo.

Todos estes pontos são passíveis de afectarem negativamente a busca de um padrão, dificultando pelo seu princípio aleatório e tornando crítica a detecção dos diferentes casos. No entanto, dada a elevada frequência com que os veículos percorrem as JD em análise, é preferível rejeitar todas as amostras passíveis de afectar negativamente os resultados, uma vez que irão sempre existir futuras amostras susceptíveis a análise.

Posto isto, e em resultado das inspecções ao local, foi determinado que as amostras analisadas deveriam desprezar os seguintes casos:

- Motociclos ou veículos de peso igualmente reduzido, visto que o som resultante reter relativamente pouca informação, sendo por vezes confundidos com transições de veículos em outras JD adjacentes;

- Veículos longos ou pesados, pela reduzida diferença entre sinal e ruído que produzem, originando por vezes sinais bastante saturados;
- Transições múltiplas, pela interferência entre duas ou mais transições e pela incoerência resultante da localização dos impactos. Sendo estabelecido que durante os mesmos 0,5 segundos de captura e análise de um impacto não poderá ocorrer outro, sob o risco de rejeição de amostra.

5.2 – Análises em Frequência

As análises em frequência partiram da impossibilidade da determinação do estado estrutural das JD por meios de análises temporais, sendo neste ponto descrito os algoritmos responsáveis pela análise de padrões e classificação do estado estrutural das JD.

Iniciando-se sempre pela determinação de parâmetros que discriminem entre os sons pertencentes a JD em bom estado e sons de impactos em JD em mau estado, analisando-se as transformadas de Fourier e sua evolução no tempo.

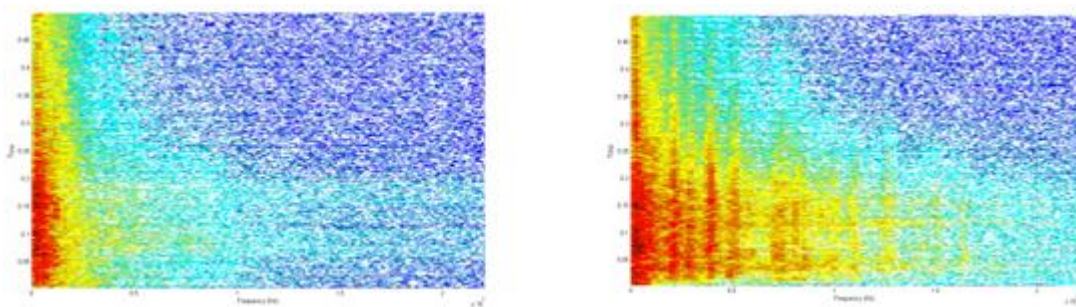


Figura 5.12 – Exemplos de Transformadas de Fourier, Amostra de JD em Boas Condições (Esq.), Amostra de JD em Más Condições (Dta.)

Os casos da Figura 5.12 representam situações distintas, em que sem grande dificuldade é possível distinguir qual das JD se encontra em boas

condições. Contudo nem sempre é assim, uma vez que na mesma JD é possível obtermos sons característicos de uma JD em boas condições e em más condições estruturais.

Apesar disto, serve para concluir de que forma se aborda a análise em frequência destas amostras: no espectrograma da direita (Figura 5.12) é possível verificar o ressoar metálico em frequências que rondam os 5000Hz, podendo isto designar as bandas de frequência chave em que se revelam as anomalias que se pretendem detectar. No entanto, será necessária cautela, pois nem sempre será a mesma JD a inspeccionar e nem sempre será o mesmo componente da JD a ter defeito. Querendo isto dizer, que apesar da classificação das JD pela análise de bandas de frequência chave ser muito discriminativa, nem sempre poderão ser utilizadas para as diferentes JD as mesmas bandas de frequências chave para o mesmo tipo de anomalia.

As outras possíveis causas das diferenças proeminentes entre os espectrogramas da Figura 5.12, serão o peso e velocidade dos veículos que apesar de se encontrar já minimamente parametrizado pela rejeição de algumas amostras, poderão ocorrer situações passíveis de induzir em erro.

Por estes motivos, torna-se imperativa a análise de um leque mais alargado de amostras, em JD com classificações distintas, para aquisição de uma visão mais abrangente e ao mesmo tempo mais concisa.

5.2.1 – Busca de Padrão

Após análise de diferentes amostras recolhidas, tornou-se crítico o desenvolvimento de um algoritmo capaz de descobrir um padrão entre as mesmas, com o objectivo de traçar e agilizar a abordagem e estratégia da inspecção de grandezas responsáveis pela classificação estrutural das JD.

Antes do estudo e aplicação deste algoritmo, será necessário efectuar algumas parametrizações, aperfeiçoando a sua eficácia, performance e determinando a aplicabilidade de outras análises. Como tal, a busca de padrão será em frequência e serão aplicadas as parametrizações determinadas até aqui, ou seja, serão consideradas apenas as amostras válidas para análise e os 0,25s que seguem ao último impacto registado por cada amostra (ver ponto 5.1.3).

Para a detecção de um padrão de referência, as amostras adquiridas foram separadas entre o conjunto de sons característicos de uma JD em boas condições, e o conjunto de sons típicos de uma JD em más condições estruturais.

Depois de separadas e como já se encontram aplicadas parametrizações às amostras recolhidas, aplicou-se então a FFT (*Fast Fourier Transform*) na mesma janela de análise aos dois conjuntos de amostras.

Como o princípio de busca de padrões se baseia na atenuação de situações esporádicas e amplificação de situações reincidentes, procedeu-se à sobreposição das FFT's nos diferentes conjuntos, através da média das potências espectrais frequência a frequência. Para aquisição de uma melhor percepção, este efeito foi também aplicado ao longo da janela de análise, havendo sido seccionada em 10 secções de 0,025s e estudada a sua evolução na frequência e ao longo da janela de análise.

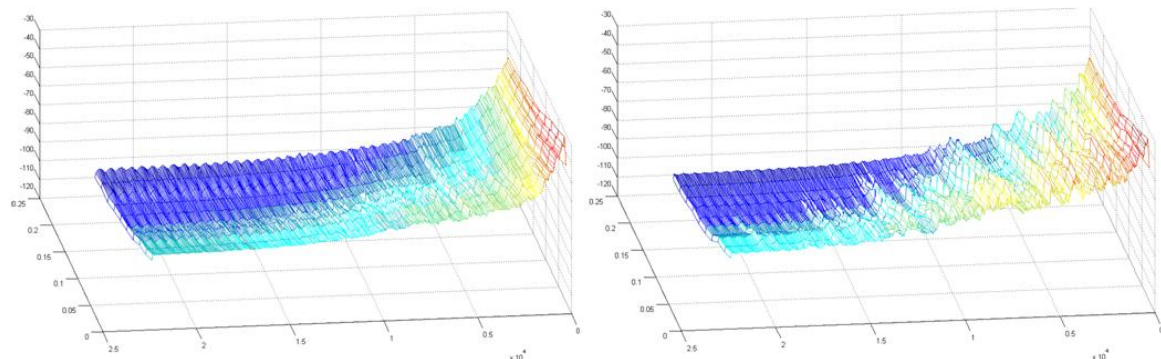


Figura 5.13 – Conjunto de Amostras “boas” (Esq.), Conjunto de Amostras “más” (Dta.)

Com a aplicação do algoritmo de busca de padrão resultam os gráficos das transformadas de Fourier na Figura 5.13, representando grandezas de tempo, potência espectral e frequências. Comparando visualmente ambos os gráficos, denota-se uma potência espectral maior e bandas de frequências com picos de potência para casos de amostras discriminativas de JD defeituosas (gráfico à direita).

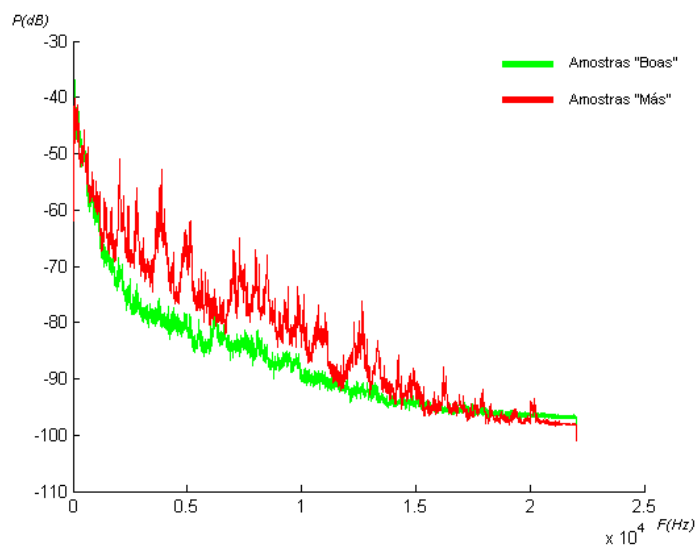


Figura 5.14 – Comparativo de Padrões

Comparando os padrões para as *FFT*'s aplicadas à totalidade da janela de análise (Figura 5.14), é possível verificar o mesmo que havia sido concluído pela Figura 5.13, sendo agora praticável delinear o método de classificação de JD, sendo mais fácil perceber as dissimilaridades entre os dois padrões encontrados, através da representação gráfica do módulo da diferença (Figura 5.15).

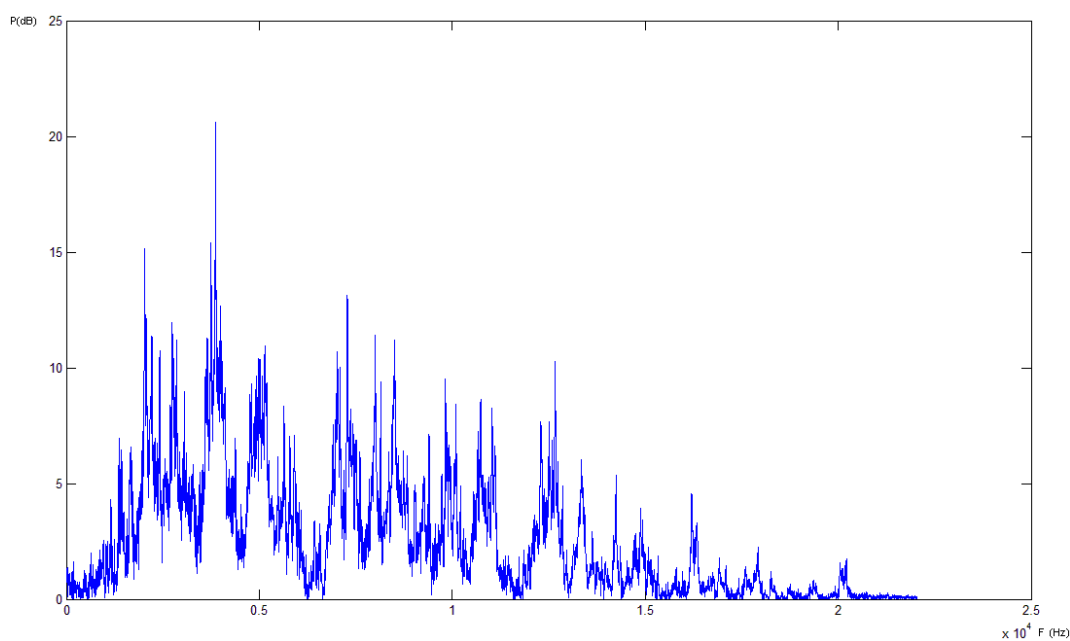


Figura 5.15 – Diferença entre Padrões

Apesar do objectivo principal deste algoritmo focar a busca de características passíveis de determinar o estado estrutural de uma JD, na sua expansão às JD restantes poderá ser relevante a sua aplicabilidade como calibração da aplicação final ao ambiente e JD a inspeccionar.

5.2.2 – Classificação de Estado Estrutural

A classificação estrutural das JD será conduzida a partir da análise do ponto anterior, pelo que é possível distinguir alguns caminhos diferentes para atingir os objectivos propostos por esta dissertação. Como se trata de um dos últimos algoritmos a serem aplicados ao sinal, utiliza muitos dos outros já desenvolvidos anteriormente.

5.2.2.1 – Classificação por Gamas de Frequências

O método de classificação por gamas de frequências consiste na medição da potência espectral em bandas chave de frequências, que sejam passíveis de discernir o estado estrutural da JD em análise. No entanto, será sempre necessária uma “calibração” das bandas de frequências, uma vez que as JD são compostas por vários módulos e é possível uma oscilação das gamas de frequência consoante o defeito que apresentam. A pré-determinação das bandas de frequências a analisar pode ser levada a cabo pela aplicação do algoritmo descrito no ponto 5.2.1, sendo um dos princípios de classificação mais promissor.

Analisando o gráfico da Figura 5.15, pretende-se determinar quais as bandas de frequências e respectivas potências que representem um estado estrutural típico de defeito.

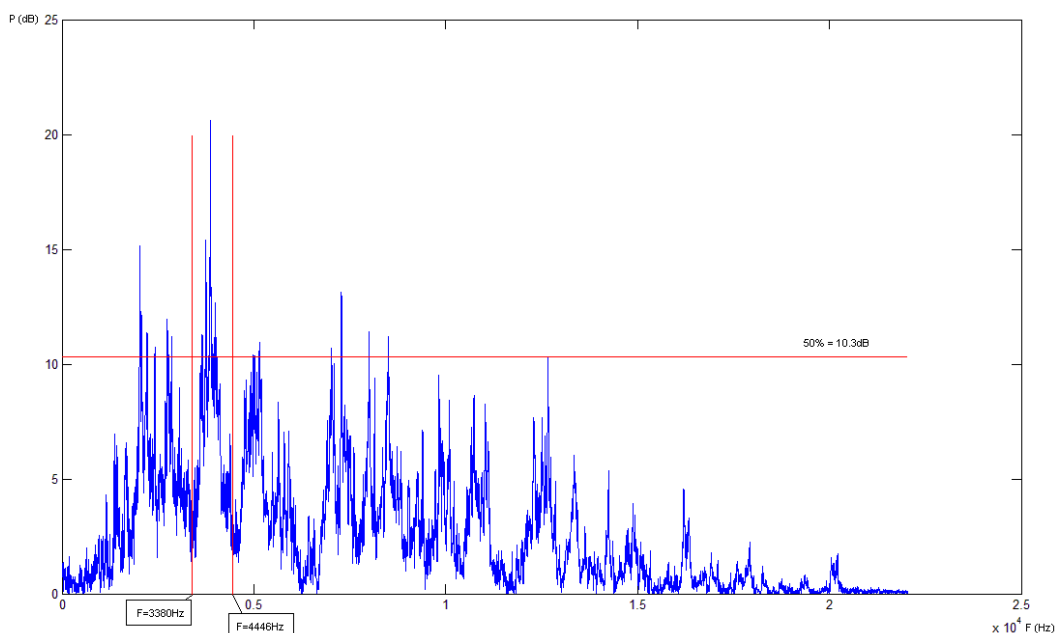


Figura 5.16 – Determinação de Bandas de Frequências Alvo

Tal como é exemplificado na Figura 5.16, são detectados vários picos para uma tolerância de 50% e o pico máximo encontra-se compreendido entre os vales situados a 3380Hz e 4446Hz. Se a potência de uma amostra ultrapassar os 10,3dB na banda de frequências, esta será classificada como uma amostra típica de uma JD defeituosa. Dependendo que a determinação de tolerâncias e bandas de frequência, irá carecer de calibração no momento da instalação.

No entanto, apesar de muito promissor este algoritmo padece de uma lacuna, pois com a variação dos possíveis defeitos a serem detectados também variam as bandas de frequências em que os mesmos podem ser classificados. Corre-se o risco de não detectar o verdadeiro estado estrutural da JD, dado que, apesar de ser possível uma calibração, nada garante que posteriormente se detecte uma falha originada num módulo ou peça diferente. Embora se trate de um algoritmo bastante promissor, fica a faltar a sua validação em JD diferentes e com falhas distintas.

5.2.2.2 – Classificação por Potência Espectral

A classificação por densidade de potência espectral consiste na contagem de amostras com uma potência espectral acima de um limite previamente estabelecido. Necessitando também de uma pré-calibração no momento em que a JD a monitorar se encontra num estado estrutural aceitável, este algoritmo poderá ser aplicado a qualquer JD, uma vez que é imune a variações de tamanhos, defeitos e localizações dos mesmos.

Como pré-calibração este algoritmo também se fará munir da busca de padrão (ponto 5.2.1) que representa a calibração deste algoritmo à JD a monitorar, bastando aplicá-lo quando a equipe técnica determinar que a mesma JD se encontra num relativo bom estado de conservação. Determinando-se a curva de calibração, caberá também à equipa técnica estabelecer a percentagem de tolerância, resultando a curva de comparação tal como é visível na Figura 5.17.

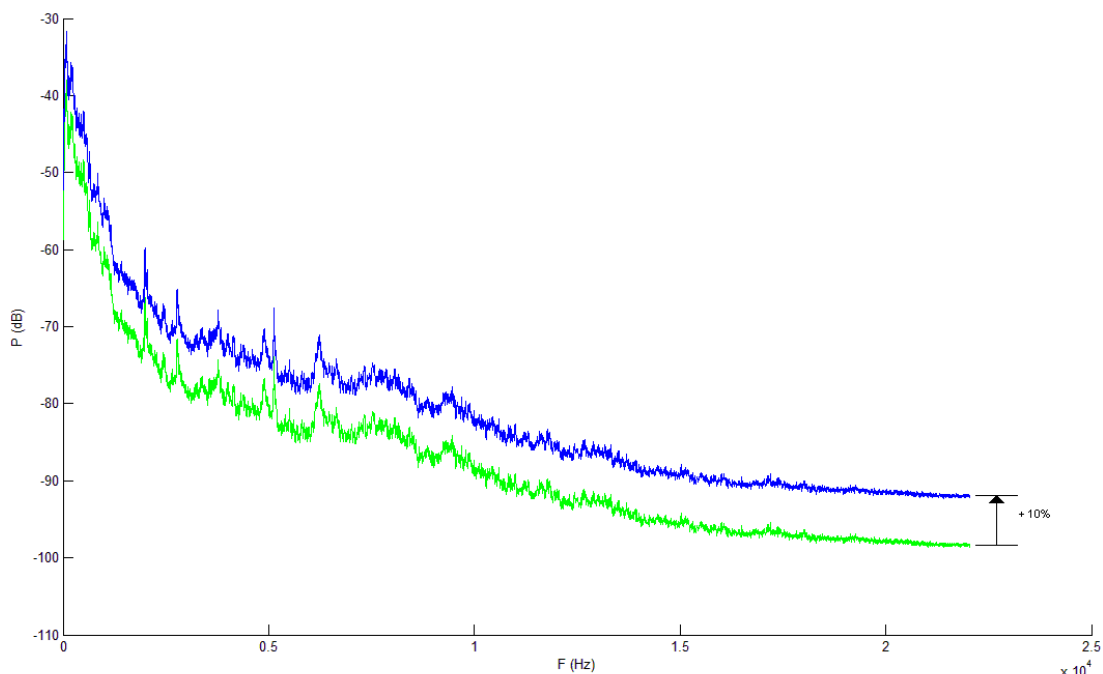


Figura 5.17 – Curva de Calibração (Verde), Curva de Comparação (Azul)

No fundo, este algoritmo irá em muito assemelhar-se ao algoritmo de Busca de Padrão, diferenciando-se apenas no momento da classificação. Tal como o algoritmo do parágrafo 5.2.1, irá ser calculada da mesma forma a curva resultante dos últimos sons de impacto adquiridos, traçando-se assim uma curva característica por via da JD monitorizada.

A classificação será determinada pela contagem do número de amostras da curva resultante que se encontram acima da curva de comparação (Figura 5.17), correspondendo directamente a uma percentagem representativa do estado estrutural da JD.

5.3 – Conclusões

Salientada a importância do desenvolvimento de um algoritmo de busca de padrão, como forma de acentuar e descobrir as características determinantes na classificação do estado estrutural das vias de rodagem das JD. Resta concluir que apesar de o método de classificação por bandas de frequências ser muito promissor, tem mesmo assim algumas falhas pela possibilidade de existirem defeitos que passaram despercebidos no momento de atribuição das bandas de detecção ou na transição entre JD. Já no método de classificação por potência espectral, qualquer defeito fora do normal será sempre passível de ser detectado, contudo a sua precisão pontual é mais baixa que no método referido anteriormente.

A escolha do método de classificação será reforçada numa validação posterior, num maior espectro de JD e defeitos, contudo nos testes laboratoriais o método de classificação por potência espectral mostrou-se o mais robusto e passível de ser aplicado.

Capítulo 6 – Resultados e Conclusões

6 – Introdução

Este capítulo irá focar os resultados obtidos, estudados através da implementação de um protótipo, e correspondente validação através de inspeções laboratoriais precavendo todas as condições de uma inspecção no terreno para simulação da mesma.

Na Figura 6.1, está ilustrada a interface do protótipo desenvolvido de forma a testar e validar todos os algoritmos, bem como os respectivos classificadores, apresentando em tempo real a informação do nível de dano estrutural de uma JD discriminando as respectivas faixas de rodagem, em vez de simplesmente avaliando se a JD está em BOAS ou MÁS condições. A equipa de manutenção será informada se alguma JD apresenta um nível de dano crítico, e qual a respectiva faixa de rodagem. Ao se informar a equipa responsável sobre qual a JD que requer uma intervenção prioritária, abre-se o caminho para uma redução de custos pela interrupção do escalonamento do problema. A qualidade do serviço prestado ao utente será melhorada, por um planeamento mais eficaz e pela diminuição dos tempos em que vias de rodagem são fechadas para reparação das JD.



Figura 6.1 – Interface de Protótipo (Guerreiro, Gomes and Campos-Rebello 2011)

6.1 – Implementação

A implementação do protótipo final foi levada a cabo pela integração em LabView dos *scripts* de análise feitos em MatLab, para uma redução do tempo de análise e aumento de consistência nos resultados obtidos. A detecção, aquisição e localização dos sons produzidos por veículos a transitar nas JD em tempo real foi implementada por algoritmos desenvolvidos em LabView, sendo as restantes análises efectuadas por meio de *scripts* de Matlab.

Nesta fase optou-se pela utilização do algoritmo de classificação por potência espectral com o propósito de garantir a integridade dos sons adquiridos, bem como resultados mais estáveis. Foi colocada em causa também a cobertura e desempenho deste algoritmo face a diferentes tipos de irregularidades a detectar em JD com propriedades distintas das analisadas.

6.2 – Validação

Para que o protótipo desenvolvido fosse validado, foi levada a cabo uma simulação laboratorial das inspecções feitas no terreno, por meio da configuração apresentada no parágrafo 4.2.4, recreando as condições no local pela reprodução das amostras adquiridas. Posto isto, através da validação do protótipo torna-se possível também a validação dos demais algoritmos que o compõem, abrangendo a sua validação as três faixas de rodagem de três JD distintas.

Tal como foi anteriormente referido no parágrafo 4.2.3, mostrou-se impraticável a classificação do estado estrutural de uma JD pela análise de uma amostra. Ficando isto a dever-se ao facto de as JD em questão serem modulares, afectando directamente o tipo de som produzido consoante a local de passagem dos mais diversos veículos. Posto isto, como forma de aferir qual seria o número necessário de amostras para que fosse estabelecido um nível de classificação estrutural estável, determinou-se que 25 amostras seriam suficientes para que fosse alcançada a estabilidade, no entanto seriam utilizadas 50 amostras para uma classificação mais robusta. Assim, será considerado como classificação estrutural de uma faixa de rodagem de uma determinada JD, a média do resultado da sua classificação nas últimas 50 amostras.

6.2.1 – Resultados

Através da reprodução dos sons adquiridos nas mesmas JD em diferentes alturas, tornou-se possível validar os diversos algoritmos que constituem o protótipo, simulando-se mais de três meses de deterioração estrutural das JD e condensando esta mesma informação em poucos minutos.

Os gráficos da Figura 6.2 representam o resultado das últimas 100 análises validadas e o progresso dos danos estruturais pela média dos últimos 50 resultados, através de amostras recolhidas em diferentes datas e separando os seus resultados pelas faixas de rodagem que constituem a mesma JD.

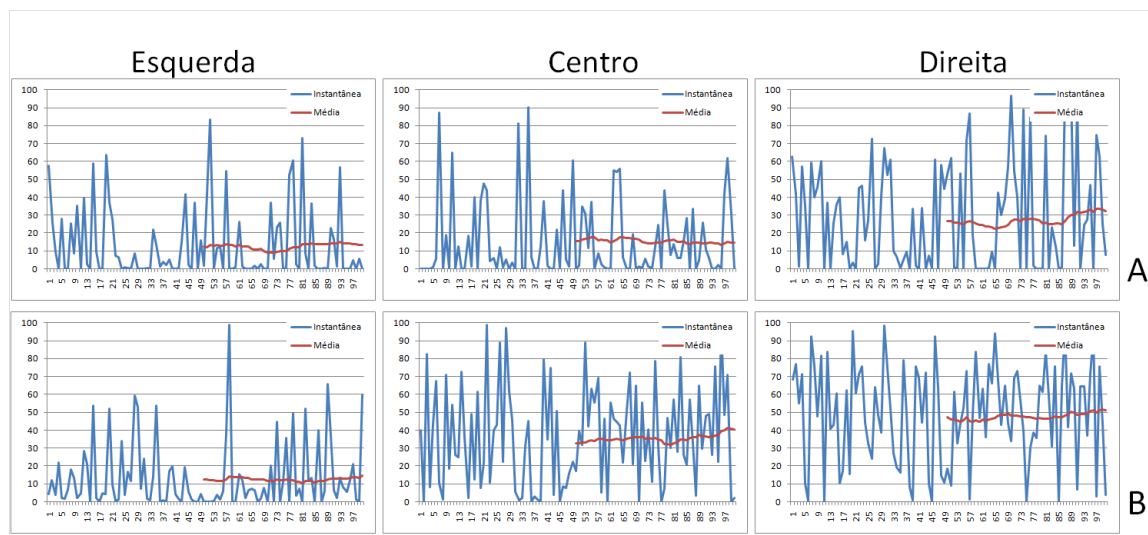


Figura 6.2 – Medição de Danos Estruturais em JD em Diferentes Datas (Guerreiro, Gomes and Campos-Rebello 2011)

Os gráficos “A” da Figura 6.2 representam os resultados da análise às amostras recolhidas numa JD em que tinham decorrido poucos dias após uma acção de manutenção, pelo que a equipa de manutenção a consideraria em boas condições. Já os gráficos “B” da Figura 6.2, apresentam os resultados da análise em amostras recolhidas passados cerca de três meses sem qualquer tipo de manutenção, e na mesma JD dos gráficos “A”.

	ESQUERDA	CENTRAL	DIREITA
A	13,44%	14,59%	32,21%
B	14,71%	40,50%	51,29%

Figura 6.3 – Resultados Finais da Análise

Ao se examinar os resultados da análise às amostras recolhidas da JD com poucos dias desde última manutenção (“A” na Figura 6.3), é possível deduzir pela tabela que a JD apresentava um dano estrutural de 13,44% na faixa esquerda, 14,59% na faixa central e 32,21% na faixa direita. Passados cerca de três meses desde a última manutenção na mesma JD, obteve-se um dano estrutural de 14,71% na faixa esquerda, 40,50% na faixa central e 51,29% na faixa direita. Os valores obtidos concluem-se válidos, comparando os mesmos com a avaliação por parte da equipa de manutenção no momento da recolha de dados, e com isto os algoritmos de análise e classificação também se concluem válidos.

A progressão de danos estruturais visualizada nos resultados obtidos, é uma causa directa das regras de trânsito que estabelecem que os veículos deverão sempre que possível circular nas faixas à direita e uma maior intensidade de tráfego de veículos pesados nas mesmas faixas, resultando num ritmo de deterioração superior nas faixas de rodagem à direita

6.3 – Conclusões

Esta dissertação mostra que é possível a avaliação do nível de dano estrutural de uma JD, por análise do som produzido pelos veículos ao percorrê-la. Avaliando o estado estrutural das JD em vez de simplesmente classificar como BOAS ou MÁS, potenciando uma economia de tempo, mão-de-obra e custos pela apresentação em tempo real de qual JD necessita de uma intervenção mais atempada. Considera-se que esta dissertação também conseguiu atingir o objectivo de aperfeiçoar o conhecimento científico em inspecções sonoras, quando aplicada a monitorização das mais diversas estruturas.

Foi possível acelerar as análises baseadas na frequência, através de análises temporais como forma de tratar as amostras adquiridas, rejeitando sons com muito ruído e com informação de baixa relevância.

O desenvolvimento do algoritmo de busca de padrão (ponto 5.2.1) possibilitou a aplicabilidade deste método de monitorização a outras áreas ou estruturas, sendo também esta a principal razão da utilização do método de classificação por potência espectral (ponto 5.2.2.2) em vez da classificação por bandas de frequência (ponto 5.2.2.1). A eficiência do protótipo foi validada pela coerência entre resultados obtidos e a avaliação técnica feita pela equipa de manutenção, tal como os algoritmos aqui referenciados.

Nesta dissertação também se mostrou possível através de análise temporal dos sons de impacto produzidos pelos veículos a transitar as JD, não só determinar o seu estado estrutural, mas também diferenciar qual a localização do dano estrutural atribuído às três faixas que compõem a JD.

Em suma, este sistema de monitorização possibilita uma avaliação em tempo real de possíveis problemas em JD e qual a sua localização, conduzindo não só a uma redução de custos de manutenção pelo atraso da progressão de danos com intervenções antecipadas, bem como uma melhoria de qualidade prestada ao utilizador pela redução de tempos de bloqueio de faixas de rodagem para manutenções.

Apesar de já se encontrar referido no ponto 2.6.3.4, é importante voltar a salientar a viabilidade de aplicação desta dissertação quando utilizados acelerómetros como dispositivos de aquisição sensorial. Isto porque todos os algoritmos aplicados ao som serão também aplicáveis na análise de vibrações adquiridas por acelerómetros, possivelmente variando apenas as frequências e intensidades adquiridas. A utilização de microfones nesta dissertação prende-se ao facto de se encontrar na fase de protótipo, a utilização de acelerómetros seria vantajosa principalmente do ponto de vista dos custos implicados numa solução final quando aplicada em todas as JD da PVG, até porque os acelerómetros serão mais robustos a intempéries.

Capítulo 7 – Bibliografia

- AKG. *Produtos de Aquisição de Audio*. 2009. http://www.akg.com/site/products/powerslave,id,759,pid,759,nodeid,2,_language,EN,view,prop.html.
- Bosh, José M^a Morena, e Félix Álvarez Rodríguez. *Inspección, conservación e sutución de juntas. Experiencias en la autopista Villalba-Adanero. Jornadas sobre Apoyos, Juntas e Equipamientos de Puentes*. Madrid: Asociación Técnica de Carreteras, 1997.
- Brüel & Kjær. *Microphone Handbook Vol. 1*. Brüel & Kjær. Julho de 1996. <http://www.bksv.com/doc/ba5105.pdf>. BA 5105 –12.
- Fonseca, José Manuel. “Apontamentos das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial.” Monte da Caparica - Portugal: Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2006.
- . “Conjuntos Difusos.” n.º Acetados das Aulas Teóricas de Percepção Sensorial. Monte da Caparica - Portugal: Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2006.
- . “Indução de Árvores de Decisão.” *Tese de Mestrado*. Monte da Caparica - Portugal: Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 1996.
- Gomes, Luis, Anikó Costa, Dirk Tilsner, Carlos Soares, and Carmen Morgado. *Energy savings in the melting process of an electric arc furnace*. Bratislava, Slovak Republic: CSD2000 - IFAC Conference on Control Systems Design, 2000.
- Guerreiro, Hugo, Luis Gomes, and Rogério Campos-Rebelo. *Bridge Expansion Joints Monitoring System*. Lisbon - Portugal: Intelligent Engineering Systems (INES), 2011 15th IEEE International Conference, 2011.
- Lima, João Marques, e Jorge de Brito. *Inspeção e diagnóstico de juntas de dilatação em obras de arte rodoviárias*. Vols. nº 28 - pp. 59 a 72. CEG - Universidade do Minho, 2007.

- Lusoponte. *Projecto e Estatísticas de Construção*. 1998. <http://www.lusoponte.pt> (acedido em 2010).
- Mitchell, Tom M. *Machine Learning*. MacGraw-Hill. (0-07-042807-7), 1997.
- Nilsson, Nils J. *Introduction to Machine Learning*. 1996. <http://ai.stanford.edu/~nilsson/MLBOOK.pdf>.
- PCB PIEZOTRONICS. *Microphone Handbook*. PCB PIEZOTRONICS, INC. 2007. http://www.pcb.com/Linked_Documents/Vibration/Microphone_handbook.pdf (accessed 2007).
- Ramberger, Gunter. *Structural bearings and expansion joints for bridges*. Zurich, Switzerland: IABSE - AIPC - IVBH, 2002.
- Ribeiro, Rita A. *Journal of Decision Systems - Fuzzy Space Monitoring and Fault Detection Applications*. Vols. 5 (2-3), pp. 267-286. Monte de Caparica - Portugal: Universidade Nova de Lisboa, UNINOVA-Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias, 2006.
- Roland. *Página de Interfaces de Audio Profissional*. Edirol by Roland. 2008. <http://www.rolandcorp.com.au/products/productdetails.aspx?p=704>.
- SETRA. *Joint de Chaussée de Ponts-Routes - Éole - Freyssinet France*. Service d'Études Techniques des Routes de Autoroutes. 2005. <http://portail.documentation.equipement.gouv.fr/dtrf/pdf/pj/Dtrf/0003/Dtrf-0003797/DT3797.pdf>.
- Shure. *Microphone Techniques, Live Sound Reinforcement*. 2007. http://www.shure.com/idc/groups/public/documents/webcontent/us_pro_mics_for_music_sound_ea.pdf.
- Terano, Toshiro, Kiyoji Asai, and Michio Sugeno. *Fuzzy Systems Theory and Its Applications*. London: Academic Press Limited. (0-12-685245-6), 1991.
- Timothy, J. Ross. *Fuzzy Logic With Engineering Applications*. USA: McGraw-Hill. (0-07-113637-1), 1995.
- Wikipedia. *Microphone*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone> (accessed 2009).