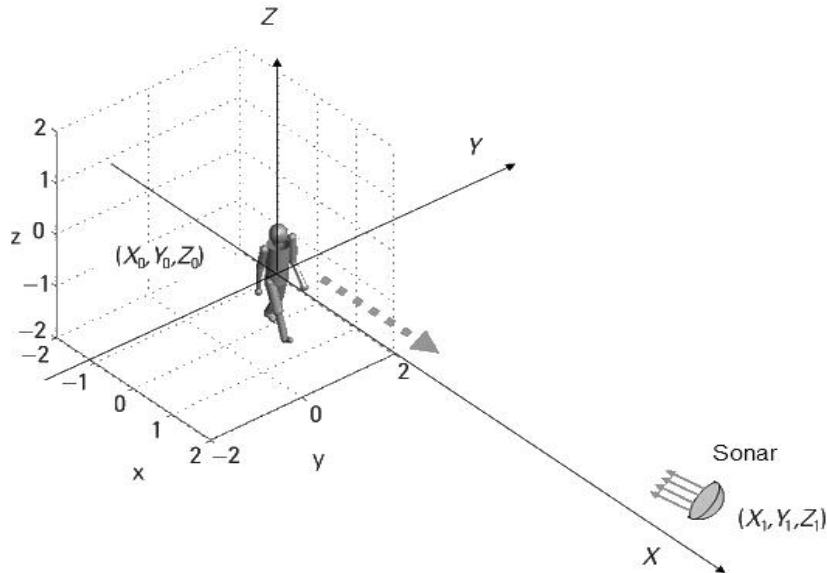


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores**



**Identificação e Análise de Movimento Humano com
Ultrassons**

Nuno Miguel da Conceição Fernandes Verdasca
(Licenciado)

Dissertação de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de
Eletrónica e Telecomunicações

Orientador:

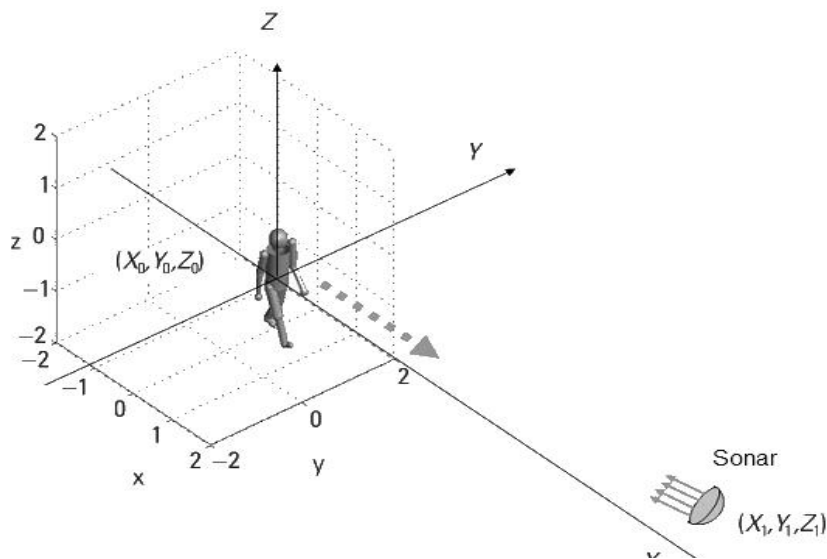
Doutor Paulo Alexandre Carapinha Marques

Júri:

Presidente: Doutor Fernando Manuel Ascenso Fortes

Vogal: Mestre Artur Jorge Ferreira

janeiro de 2013

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores****Identificação e Análise de Movimento Humano com
Ultrassons**

Autor:

(Nuno Miguel da Conceição Fernandes Verdasca)

Orientador:

(Doutor Paulo Alexandre Carapinha Marques)

Orientador

Professor Doutor Paulo Alexandre Carapinha Marques

Área Departamental de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e Computadores

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Instituto Politécnico de Lisboa

Júri da Prova

Presidente do Júri

Professor Doutor Fernando Manuel Ascenso Fortes

Área Departamental de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e Computadores

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Instituto Politécnico de Lisboa

Vogal

Professor Mestre Artur Jorge Ferreira

Área Departamental de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e Computadores

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Instituto Politécnico de Lisboa

Agradecimentos

Uma caminhada raramente se realiza a sós. Existe sempre a intervenção de alguém ou de algo. Alguns destes elementos, por mais insignificantes que possam parecer, trazem sempre alguma marca ao caminho a percorrer. Ora, se isto acontece em qualquer caminhada, numa que durou anos e envolve a formação para a vida e para a futura prática profissional ainda mais.

Uma dissertação, além de ser um trabalho individual, é a última etapa de um aluno de mestrado. No entanto, considero que esta dissertação teve a participação de um grupo de pessoas bastante empenhadas e dedicadas, tanto a nível profissional como pessoal, e a mesma não teria sido possível sem a sua preciosa colaboração. Durante os momentos bons e os menos bons mostraram sempre disponibilidade para ajudar de uma ou outra forma, sem nunca esperarem nada de retorno. A essas pessoas quero deixar uma palavra de apreço e agradecimento.

Início o meu agradecimento pelas pessoas mais importantes na minha vida que, para além do seu apoio e força incondicional em todos os momentos da minha caminhada como estudante e ser humano, possibilitaram os meios económicos para esta longa caminhada. Obrigado Mãe e Pai, obrigado Avós por tudo.

Ao meu Irmão, que para além disso é um amigo, pois nos momentos mais delicados teve sempre uma palavra de apoio para me dar, o meu obrigado. Sem esquecer os momentos de brincadeira e traquinice passados com os meus sobrinhos e afilhados, António e Maria, que me ajudaram sempre a descontraír.

Quero agradecer a um grande homem que tanto admiro, Professor, Orientador e Amigo Paulo Marques. Obrigado por mais uma vez me dar a possibilidade de trabalhar consigo, nesta área onde pretendo aprofundar os meus conhecimentos. Por todas as nossas conversas e debates sobre os mais variados temas, que sempre me transmitiram sabedoria e traziam a inspiração que permitia chegar mais além.

Aos colegas Duarte Carona, João Assunção e Tiago Garcia, que partilharam comigo as quatro paredes do laboratório de I&D e que, no decorrer do tempo entre tantos momentos partilhados, acabaram por se tornar amigos com os quais tive o prazer

de aprender um pouco mais de muitos temas. Colegas que sempre tiveram uma palavra de amizade e carinho para oferecer. As pessoas não se tornam importantes na nossa vida pela quantidade de tempo que nela perduram, mas sim pela qualidade do tempo que nos proporcionam.

Sendo este o último passo da minha caminhada neste Instituto como aluno, quero agradecer a todos aqueles que nestes seis anos, pelo seu companheirismo e amizade, tornaram mais simples atingir os meus objetivos, destacando Cláudio Silva, João Nascimento, José Guerreiro e Mário Lopes. Não só aos que partilharam comigo a sala de aula devo uma palavra de agradecimento. Também algumas pessoas que fizeram parte desta minha caminhada fora deste Campus merecem uma palavra de carinho: Ana Vermelhudo, Francisco Côrte-Real, Mariana Barosa, Mariana Côrte-Real, Nuno Mendes e Pedro Ruivo.

Um agradecimento especial ao Professor Artur Ferreira, por toda a sua disponibilidade para no final das aulas da unidade curricular de Sistemas de Telecomunicações Definidos por Software, me deixar expor as minhas dúvidas pontuais, sobre as analogias que eu fazia entre a matéria que estávamos a lecionar e a sua aplicabilidade neste trabalho ou outros similares.

Pela disponibilidade na cedência de material pertencente ao Grupo de Multimédia e Aprendizagem Automática, conhecido pela sigla M2A, apresento o meu agradecimento aos docentes, Professor André Ribeiro Lourenço e Professor Pedro Miguel Torres Mendes Jorge.

Presto aqui também a minha gratidão à Sociedade Hípica Portuguesa (SHP), em especial ao Hipódromo do Campo Grande, pela sua colaboração na realização dos testes com equídeos apresentados neste estudo. Pela prontidão e imediata disponibilidade para ajudar, deixo um grande abraço ao Engenheiro Manuel Ataíde, secretário-geral do SHP - Hipódromo do Campo Grande, assim como ao Professor de equitação engenheiro Nuno Simão e a todos aqueles que colaboraram na realização deste estudo.

Resumo

Faz-se nesta dissertação a análise do movimento humano utilizando sinais de ultrassons refletidos pelos diversos membros do corpo humano, designados por assinaturas de ultrassons. Estas assinaturas são confrontadas com os sinais gerados pelo contato dos membros inferiores do ser humano com o chão, recolhidos de forma passiva.

O método seguido teve por base o estudo das assinaturas de Doppler e micro-Doppler. Estas assinaturas são obtidas através do processamento dos ecos de ultrassons recolhidos, com recurso à *Short-Time Fourier Transform* e apresentadas sobre a forma de espectrograma, onde se podem identificar os desvios de frequência causados pelo movimento das diferentes partes do corpo humano.

É proposto um algoritmo inovador que, embora possua algumas limitações, é capaz de isolar e extrair de forma automática algumas das curvas e parâmetros característicos dos membros envolvidos no movimento humano.

O algoritmo desenvolvido consegue analisar as assinaturas de micro-Doppler do movimento humano, estimando diversos parâmetros tais como o número de passadas realizadas, a cadência da passada, o comprimento da passada, a velocidade a que o ser humano se desloca e a distância percorrida.

Por forma a desenvolver, no futuro, um classificador capaz de distinguir entre humanos e outros animais, são também recolhidas e analisadas assinaturas de ultrassons refletidas por dois animais quadrúpedes, um canino e um equídeo. São ainda estudadas as principais características que permitem classificar o tipo de animal que originou a assinatura de ultrassons.

Com este estudo mostra-se ser possível a análise de movimento humano por ultrassons, havendo características nas assinaturas recolhidas que permitem a classificação do movimento como humano ou não humano. Do trabalho desenvolvido resultou ainda uma base de dados de assinaturas de ultrassons de humanos e animais que permitirá suportar trabalho de investigação e desenvolvimento futuro.

Palavras-chave: Sonar, movimento humano, detecção humana, *Short-Time Fourier Transform*, micro-Doppler.

Abstract

This dissertation presents the study and analysis of human motion using ultrasonic signals reflected by the various parts of the human body, designated by ultrasonic signatures.

The ultrasonic signatures are confronted with signals generated by the contact of the lower limbs of the human with the ground, collected passively.

The proposed method was based upon the study of Doppler and micro-Doppler signatures. These signatures are obtained by processing the acquired ultrasonic echoes using the Short-Time Fourier Transform and presented in the form of a spectrogram, which can identify the frequency deviations caused by the movement of the various parts of the human body.

An innovative algorithm is proposed and despite its limitations, it is capable of isolating and automatically extracting some of the curves and characteristic parameters of the parts involved in human motion.

The proposed algorithm can analyze the signatures of micro-Doppler of human motion, estimating various parameters such as the number of strides performed the cadence of stride, stride length, the speed which humans are moving and distance walked.

In order to develop a classifier able to distinguish between humans and other animals, ultrasound signatures reflected by two quadrupeds' animals, a dog and a horse were collected and analyzed. One feature that wasn't implemented yet is the classification engine that allows the recognition of the type of animal that originated the ultrasound signature.

With this study it is shown that it is possible the analysis of human motion through ultrasound systems, having as main characteristic the acquisition of signatures that allows the classification of movement as human or non-human. From the work undertaken, resulted an extensive database of ultrasound signatures of humans and animals that will enable endure research and future developments.

Keywords: *Sonar, Human Motion, Human Detection, Short-Time Fourier Transform, micro-Doppler.*

Aos meus Pais, Ana Maria da C. Verdasca e Paulino F. Verdasca

“Não há nada como o sonho para criar o futuro.
Utopia hoje, carne e osso amanhã.”

Victor-Marie Hugo

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	ix
Abstract.....	xi
Índice de Figuras	xix
Índice de Tabelas	xxvii
Lista de Acrónimos.....	xxix
Símbolos	xxxiii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento Geral.....	2
1.2 Motivação e Objetivos.....	6
1.3 Organização do Documento	8
2 Análise de movimento humano através de ultrassons	11
2.1 Estado da Arte	12
2.2 Introdução ao Problema.....	14
2.3 Efeito de Doppler	16
2.3.1 Efeito de Doppler observado no Sonar.....	17
2.3.2 Estimativa e Análise do Desvio de Frequência de Doppler	19
2.4 Efeito de micro-Doppler.....	25
2.4.1 Efeito de micro-Doppler observado no Sonar	26
2.4.2 Estimativa e Análise do Desvio de Frequência de Micro-Doppler	27
2.4.3 Assinaturas de micro-Doppler	28

2.5	Cinemática do Movimento do Corpo Humano	31
2.5.1	Descrição do Movimento Periódico da Caminhada Humana.....	33
2.5.2	Modelação da Secção Transversal Humana	35
2.5.3	Modelo Humano	38
2.6	Análise e Processamento de Sinal	41
2.6.1	Análise conjunta do tempo e frequência.....	42
2.6.2	Short-time Fourier transform.....	44
2.6.3	Análise de Espectrogramas de Humanos.....	49
2.7	Análise ao sinal de <i>backscattering</i>	51
2.7.1	Análise do backscattering de um humano em movimento	51
2.7.2	Clutter	53
2.8	Comparação entre Sistema Radar e Sistema Sonar	55
2.8.1	Equações dos Sistemas	56
2.9	Propriedades da Propagação de Ondas Mecânicas.....	61
2.9.1	Mecanismos de atenuação	62
2.9.2	Mecanismos que afetam a velocidade de propagação do som	66
2.9.3	Turbulência.....	67
2.10	Função de ambiguidade.....	69
2.11	Funcionamento do Sonar Pulsado	72
3	Proposta de Solução	75
3.1	Apresentação da proposta de <i>Hardware</i>	76
3.2	Apresentação da proposta para o <i>Software</i> dos algoritmos.....	78

3.2.1	Solução proposta para o estudo pelo método ativo	78
3.2.2	Solução proposta para o estudo pelo método passivo	80
3.3	Apresentação da proposta de uma base de dados	82
4	Implementação da Solução.....	83
4.1	<i>Software</i> dos Algoritmos Propostos	84
4.1.1	Algoritmo desenvolvido para o estudo do Método Ativo	84
4.1.2	Algoritmo desenvolvido para o estudo do Método Passivo	98
4.2	Descrição do <i>Hardware</i>	100
4.2.1	Sistema Sonar Ativo – Plataforma Sonar	100
4.2.2	Sistema Acústico Passivo	103
4.3	Descrição da Base de Dados Construída.....	104
4.3.1	Constituição da Base de Dados	104
4.3.2	Identificação dos Ficheiros.....	106
5	Resultados	111
5.1	Apresentação dos cenários de teste	112
5.2	Apresentação de Resultados.....	113
5.2.1	Assinatura de diferentes partes do corpo humano	113
5.2.2	Estudo do Movimento do Corpo Humano.....	118
5.2.3	Assinaturas de Doppler com diferentes estilos de caminhada do ser humano, e em direções diferentes.....	132
5.2.4	Assinaturas de Doppler de Quadrúpedes.....	147

5.2.5 Comparação entre as assinaturas de Doppler com Seres Humanos, Caninos e Equídeos	156
6 Conclusões e Trabalho Futuro.....	161
6.1 Conclusões.....	162
6.2 Trabalho Futuro.....	165
Bibliografia e Referências	167
A. APÊNDICES e ANEXOS	177
<i>Apêndice I.</i> Descrição dos cenários de teste	178
<i>Apêndice II. Hardware</i> de Suporte – Sistema Sonar Ativo (Plataforma Sonar).....	183
<i>Apêndice III.</i> Apresentação com maior escala de algumas figuras presentes no seção 5.2	191
<i>Anexo I.</i> Descrição do conteúdo da BD	207

Índice de Figuras

Figura 2-1 - Mudança do comprimento de onda devido ao movimento da fonte em relação ao observador (extraído de [10]).	16
Figura 2-2 - Configuração do sistema sonar biestático (extraído de [10]).	19
Figura 2-3 - Desvio de frequência extraído por um desmodulador em quadratura (extraído de [10]).	20
Figura 2-4 - A fase relativa entre o canal-I e o canal-Q deslocado 90° para determinar se o alvo está a aproximar ou afastar do sonar (extraído de [10]).	24
Figura 2-5 - Comprimentos dos segmentos do corpo humano como uma função da altura H do corpo (extraído de [10]).	31
Figura 2-6 - Ciclo do movimento da caminhada humana (extraído de [10]).	34
Figura 2-7 - Resultados da medição da intensidade reflexiva das roupas (extraída de [59]).	36
Figura 2-8 - Diagramas do domínio tempo-frequência. À esquerda a representação por funções de Fourier e à direita a representação por Wavelets.	48
Figura 2-9 - Pontos referência do corpo humano (extraído de [10]).	52
Figura 2-10 - Dependência da absorção atmosférica em diferentes parâmetros. (a) Dependência com a frequência. (b) Dependência com a temperatura e a humidade. (extraído de [77]).	64
Figura 2-11 - Atenuação causada pela presença de nevoeiro e chuva em função da frequência (extraído de [77]).	66
Figura 2-12 - Atenuação provocada pela turbulência em função da frequência (extraído de [77]).	68
Figura 3-1 - Diagrama de Blocos do <i>hardware</i> .	77

Figura 3-2 - <i>Flowchart</i> do Algoritmo Proposto para o Método Ativo.....	79
Figura 3-3 - <i>Flowchart</i> do Algoritmo Proposto para o Método Passivo.....	80
Figura 4-1 - Exerto de código Matlab, exemplificando o carregamento dos dados presentes no ficheiro <i>mat</i> guardado.....	88
Figura 4-2 - Representação do <i>Clutter</i> num sinal de eco (Espectrograma de um movimento dos braços).....	93
Figura 4-3 - Exemplificação de uma má zona e de uma zona aconselhável para iniciar a pesquisa no espectrograma (Espectrograma de um movimento dos braços). ...	94
Figura 4-4 - Excerto do código, que mostra as variáveis para a configuração da pesquisa.	95
Figura 4-5 - Exemplificação de zonas críticas para a extração das curvas (Espectrograma de um movimento dos braços).	96
Figura 4-6 - Demonstração do resultado da extração das curvas características para um movimento dos membros superiores.	98
Figura 4-7 - Plataforma Sonar.	101
Figura 4-8 - Diagrama de blocos do <i>hardware</i> (extraído de [83]).	101
Figura 4-9 - Microfone utilizado como recetor do sistema passivo.	103
Figura 5-1 - Espectrograma do movimento do membro superior direito de um ser humano.....	115
Figura 5-2 - Espectrograma do movimento do tronco de um ser humano.	116
Figura 5-3 - Espectrograma do movimento das pernas.	117
Figura 5-4 - Sinal transmitido - Sinusoide complexa à frequência de 1 kHz.	119
Figura 5-5 - Sinal recebido, gerado pelas reflexões no corpo humano em movimento.	119

Figura 5-6 - Espectro do sinal transmitido (em cima), e do sinal recebido (em baixo).....	120
Figura 5-7 - Espectrograma do sinal de eco do movimento do ser humano. .	121
Figura 5-8 - Espectrograma (escalonado) do movimento do ser humano.....	123
Figura 5-9 - Corte do espectrograma apresentado na Figura 5-7.....	124
Figura 5-10 - Evolução da potência ao longo do tempo para a $f= 1750$ Hz...	126
Figura 5-11 - FFT da frequência escolhida ($f=1750$ Hz).	126
Figura 5-12 - Sinal recolhido pelo método passivo.....	128
Figura 5-13 - Zona de interesse do sinal recolhido pelo método passivo.	128
Figura 5-14 - Espectro do sinal recolhido (em cima); Espectro do sinal recolhido com <i>zoom</i> (em baixo).	129
Figura 5-15 - Espectrograma (em cima) e Espectrograma com o valor da potência escalonado (em baixo), do sinal recolhido pelo sistema passivo.....	130
Figura 5-16 - Comparação dos dados recolhidos pelo método ativo (a) e método passivo (b), a partir dos seus espectrogramas.....	131
Figura 5-17 - Janela Temporal de Kaiser-Bessel. Do lado esquerdo, a janela com os parâmetros seleccionados pelo utilizador, do lado direito, a janela ajustada, utilizada no processamento dos dados recolhidos, e apresentados nesta secção.....	135
Figura 5-18 – Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar devagar.....	138
Figura 5-19 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano a caminhar devagar.	138
Figura 5-20 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar normalmente.	138

Figura 5-21 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano a caminhar normalmente.....	138
Figura 5-22 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar rápido.....	138
Figura 5-23 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano a caminhar rápido.....	138
Figura 5-24 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a correr.....	139
Figura 5-25 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano a correr.	139
Figura 5-26 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar com estilo de marcha militar.....	139
Figura 5-27 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano com estilo de marcha militar.....	139
Figura 5-28 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a deslocar-se na perpendicular.	141
Figura 5-29 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano deslocar-se obliquamente.	142
Figura 5-30 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a aproximar-se da plataforma.....	143
Figura 5-31 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a afastar-se da plataforma.....	143
Figura 5-32 - Os dois seres humanos a caminhar lado a lado.	144
Figura 5-33 - Os dois seres humanos a caminharem em direções opostas.....	144
Figura 5-34 - Espectrograma da assinatura de Doppler, com os dois seres humanos a afastarem-se da plataforma.....	145

Figura 5-35 - Recorte do espectrograma da Figura 5-34, ilustrando os dois sinais distintos.	145
Figura 5-36 - Espectrograma da assinatura de Doppler, com os dois seres humanos a caminharem em direções opostas.	146
Figura 5-37 - Canino utilizado na recolha de dados.	148
Figura 5-38 - Espectrograma da assinatura de Doppler de um canino a caminhar na direção da plataforma.	149
Figura 5-39 - Espectrograma da assinatura de Doppler de um canino a correr na direção da plataforma.	149
Figura 5-40 - Espectrograma da assinatura de Doppler de um canino a correr, afastando-se da plataforma.	150
Figura 5-41 - Ampliação da zona do <i>Clutter</i> , da Figura 5-7.	151
Figura 5-42 - Ampliação da zona do <i>Clutter</i> , da Figura 5-38.	151
Figura 5-43 - Teste realizado com o canino a caminhar ao lado de um ser humano, em direção da plataforma.	151
Figura 5-44 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um canino a caminhar ao lado de um ser humano, aproximando-se da plataforma.	151
Figura 5-45 - Ampliação do espectrograma da Figura 5-44, onde se identifica a assinatura de Doppler do movimento do canino.	152
Figura 5-46 - Equídeo utilizado na recolha de dados.	153
Figura 5-47 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um equídeo a caminhar no estilo: ‘passe’.	155
Figura 5-48 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um equídeo a caminhar no estilo: ‘trote’.	155

Figura 5-49 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um equídeo a caminhar no estilo: ‘galope’.....	156
Figura A-1 - Fotografia do cenário I (linha de vista do sonar).....	178
Figura A-2 - Fotografia do cenário I (local onde se situava toda a plataforma).	178
Figura A-3 - Planta da área do cenário I.	179
Figura A-4 - Fotografia do cenário II.....	180
Figura A-5 - Fotografia do cenário III.....	181
Figura A-6 - Fotografia do cenário IV.	182
Figura A-7 - Foto do protótipo do núcleo analógico (extraído de [83]).....	183
Figura A-8 - Diagrama de blocos da cadeia de emissão do núcleo analógico (extraído de [83]).....	184
Figura A-9 - Diagrama de blocos da cadeia de recepção do núcleo analógico (extraído de [83]).....	185
Figura A-10 - Diagrama de blocos do gerador de portadora em fase e quadratura (extraído de [83]).....	185
Figura A-11 - Foto do protótipo do núcleo digital (extraído de [83]).....	187
Figura A-12 - Protocolo de comunicação do PC para o sistema sonar (extraído de [83]).	189
Figura A-13 - Protocolo de comunicação do sistema sonar para o PC (extraído de [83]).	190
Figura A-14 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar devagar (Figura 5-18).	191
Figura A-15 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar normalmente (Figura 5-20).....	192

Figura A-16 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar rápido (Figura 5-22).....	193
Figura A-17 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a correr (Figura 5-24).	194
Figura A-18 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar com estilo de marcha militar (Figura 5-26).	195
Figura A-19 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a deslocar-se na perpendicular (Figura 5-28).	196
Figura A-20 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano deslocar-se obliquamente (Figura 5-29).	197
Figura A-21 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a aproximar-se da plataforma (Figura 5-30).....	198
Figura A-22 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a afastar-se da plataforma (Figura 5-31).	199
Figura A-23 - Espectrograma da assinatura de Doppler, com os dois seres humanos a afastarem-se da plataforma (Figura 5-34).	200
Figura A-24 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um canino a caminhar na direção da plataforma (Figura 5-38).	201
Figura A-25 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um canino a correr na direção da plataforma (Figura 5-39).	202
Figura A-26 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um canino a correr, afastando-se da plataforma (Figura 5-40).....	203
Figura A-27 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um equídeo a caminhar no estilo: ‘trote’ (Figura 5-48).	204

Índice de Tabelas

Tabela 2-1 - Comparação das equações de Sonar e Radar	58
Tabela 2-2 - Perda de propagação.	60
Tabela 2-3 - Ambiguidades da PRF.	73
Tabela 4-1 - Tabela dos sinais predefinidos, possíveis de emitir.	85
Tabela 4-2 - Especificações do microfone utilizado no método passivo.	103
Tabela 4-3 - Descrição das variáveis do ficheiro guardado da recolha pelo método ativo.	108
Tabela 5-1 - Parametrização da janela temporal, utilizada para o processamento dos dados apresentados nesta secção.	134
Tabela 5-2 - Parametrização do espectrograma, utilizado após o processamento dos dados apresentados nesta secção.	134
Tabela 5-3 - Resumo das características mais importantes das assinaturas de cada tipo de ser vivo estudado.	157
Tabela A-1 - Características dos transdutores ultrassónicos.	186
Tabela A-2 - Características fundamentais dos três principais blocos do núcleo digital.	188

Lista de Acrónimos

ADEC – Área Departamental de Engenharia Civil

ADEETC – Área Departamental de Engenharia Eletrónica, e
Telecomunicações e de Computadores

AI – *Air Interception*

AR – *AutoRegressive*

ASDIC – *Anti-Submarine Detection and Investigation Committee*

ASV – *Air-to-Surface Vessel*

AWGN - *Additive White Gaussian Noise*

BD – Base de Dados

CW – *Continuous Wave*

DFT – *Discrete Fourier Transform*

DI – *Directivity Level*

DT – *Detection Threshold*

EM – *ElectroMagnetics*

FFT – *fast Fourier transform*

FM-CW – *Frequency Modulation-Continuous Wave*

FOPEN – *FOLIage PENetration*

FT – *Fourier Transform*

GCI – *Ground Controlled Interception*

ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

JTAG – *Join Test Action Group*

JTFA – *Joint Time-Frequency Analysis*

LADAR – *LAser Detection And Ranging*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LOS – *Line Of Sight*

MATLAB ou MAT – *MATrix LABoratory*

MCU – *Microcontroller Unit*

MTI – *Moving Target Indicator*

MUSIC – *MUltiple SIgnal Classification*

NL – *Noise Level*

PDS – *Pulsed Doppler Sonars*

PNG - *Portable Network Graphics*

PRF – *Pulse Repetition Frequency*

PRT – *Pulse Repetition Time*

RADAR – *RAdio Detection And Ranging*

RCS – *Radar Cross Section*

ROC – *receiving operating characteristic*

SL – *Source Level*

SNR – *Signal-to-Noise Ratio*

SONAR – *SOund Navigation And Ranging*

STFT – *Short-Time Fourier Transform*

TL – *Transmission Loss*

TS – *Target Strength*

UHF – *Ultra High Frequency*

WMV – *Windows Media Video*

WVD – *Wigner-Ville Distribution*

Símbolos

A – Abertura da antena

AN – Ruído ambiente, com o sistema sonar

a – Amplitude do sinal recebido

a_t – Amplitude do sinal transmitido

C – Velocidade de propagação

c – Velocidade de propagação da luz ($3 \times 10^8 m/s$)

C_{sound} – Velocidade de propagação da onda sonora

$D(\varphi, \theta)$ - Diretividade do transdutor

D_v – Amplitude da vibração

d – *Receiving Operating Characteristic*

DI – Diretividade do sonar

DT – Limiar de detecção pelo sonar

E_i – Intensidade do campo incidente no alvo

$E_i(n)$ – Eficiência de integração

E_r – Intensidade do campo de dispersão

F – Figura de ruído

f – Frequência do sinal transmitido

f_c – Frequência central do sinal transmitido

f_D – Frequência de Doppler

\hat{f}_D – Valor máximo da frequência de Doppler

f_o – Frequência da portadora do transmissor

f_{PRF} – Frequência de repetição de pulsos

f_{tx} – Frequência do sinal transmitido

G – Ganho da antena

H – Humidade atmosférica

K – Número de alvos pontuais

k – Constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ Watt/Hz}^\circ\text{K}$)

L – Distância entre o recetor e transmissor, na configuração biestática

L' – Número de amostras da janela temporal

L_s – Perdas do sistema

L_a – Perdas atmosféricas

N – Número de amostras do sinal

$N_{droplets}$ – Quantidade de gotículas por cm^3

NL – Nível de ruído no sonar

n – Número de pulsos

n' – Número de acessos integrados

O – Ordem do tempo de computação da FFT

P – Pressão atmosférica

$P_{ax}(r)$ - Pressão acústica sobre o transdutor

$p(D)$ – Probabilidade de deteção

$p(FA)$ – Probabilidade de falso alarme

P_t – Potência do sinal transmitido

R – Distância entre dois pontos

R_u – Distância máxima entre o alvo e o sonar

R_{max} – Distância máxima para uma medição não ambígua

r_R – Vetor da distância do recetor ao alvo, na configuração biestática

r_T – Vetor da distância do transmissor ao alvo, na configuração biestática

$S(f)$ – Sinal no domínio da frequência

$S_D(t)$ – Sinal complexo de Doppler

s_h – Sinal de retorno do ser humano

s_r – Sinal recebido

$s_r(t)$ – Sinal recebido no tempo

$s_t(t)$ – Sinal transmitido no tempo

$s_t^{90^\circ}(t)$ – Sinal transmitido no tempo, com um desvio de fase de 90°

SL – Nível de sinal na fonte do sonar

SN – Ruído inserido pelo próprio sonar

T – Tempo do PRI

T_c – Temperatura em graus Celsius

T_0 – Temperatura padrão (290° K)

T_s – Temperatura de ruído do sistema

T_{sys} – Temperatura do sistema

T_t – Tempo de ida e volta do sinal transmitido

TL – Perdas de transmissão do sonar

TS – Reflexão causada pelo alvo, com sinais sonar

t – Tempo decorrido

t' – Tempo decorrido em relação ao início de cada PRI

t_d – Tempo de atraso (tempo de ida e volta, entre o sistema e o alvo)

$W(t)$ – Janela temporal

v – Velocidade do alvo

v_p – Componente paralela à direção de propagação, da velocidade do vento

v_r – Velocidade radial limite que garante a não ambiguidade

v_s – Velocidade da fonte

$X(f)$ – Sinal na frequência

$x(t)$ – Sinal no tempo

x_c – Sinal de *clutter*

x_n – Sinal de ruído

x_r – Sinal recebido

$\frac{E}{N_0}$ – Relação de energia sinal-ruído

$\frac{S}{N_0}$ – Relação de energia sinal-ruído

α_R – Ângulo de visão do recetor

α_T – Ângulo de visão do transmissor

α_{abs} - Coeficiente de absorção da atmosfera

β_a – Abertura do feixe do transmissor

ρ_a – Eficiência da antena

ρ_a' – Resolução em azimute

ρ_r – Resolução em distância

σ_i – Modulação do RCS

σ_n – Desvio padrão do ruído

ΔR – Intervalo de distância percorrida

Δt – Intervalo de tempo de amostragem

λ – Comprimento de onda

φ – Ângulo de visão

$\delta(x)$ – Função delta de Dirac

θ – Ângulo de observação

τ – Largura do pulso

τ' – Deslocamento no tempo

$\varphi(t)$ – Mudança de fase do sinal recebido

ω – Frequência angular ($2\pi f$)

1 Introdução

Este capítulo apresenta uma breve panorâmica da dissertação e da sua estrutura. Inicia-se com a exposição da relevância que os sistemas de ultrassons têm vindo a ter ao longo dos anos até à atualidade. Abordam-se os objetivos pretendidos face à motivação que levou a concretizá-los, faz-se também uma breve apresentação do estado da arte e, por fim, uma descrição de como o presente documento se encontra organizado.

1.1 Enquadramento Geral

O som é caracterizado por vibrações (variação de pressão) no ar. O ser humano é tipicamente capaz de ouvir sons, numa faixa de frequências compreendida no intervalo de 20Hz até 20kHz, aproximadamente. Os sinais com frequências superiores a 20kHz são designados por ultrassons [1].

O equipamento utilizado para a emissão e captação de sinais na banda dos ultrassons é designado por sonar (do inglês *SOund Navigation and Ranging*, ou “Navegação e Determinação da Distância pelo Som”). Para gerar estes sinais de alta frequência, recorre-se geralmente a cristais piezoelétricos ou cerâmicos, os quais produzem oscilações mecânicas em resposta a impulsos elétricos [2].

A "Teoria do Som" foi publicada pela primeira vez em 1877 pelo cientista inglês Lorde Rayleigh. A publicação deste tratado inaugurou praticamente o estudo da física da acústica moderna [3]. Mas, Daniel Colloden em 1822 já tinha utilizado um sino submerso, para calcular a velocidade do som debaixo de água, no lago de Genebra, na Suíça. Esta investigação levou, por parte de outros cientistas, à invenção de dispositivos de sonar [4, 5].

Lexis Nixon inventou o primeiro dispositivo do tipo sonar de escuta em 1906, como um método para deteção de icebergs. Com a ameaça de guerra submarina, durante a Primeira Guerra Mundial, o interesse no sonar foi aumentando, levando ao desenvolvimento urgente desta tecnologia, entre outros métodos de deteção de eco. Em 1915, Paul Langévin inventou o primeiro dispositivo tipo sonar para deteção de submarinos, com o nome de “*echo location to detect submarines*”, recorrendo às propriedades piezoelétricas do quartzo. Apesar de já ser tarde para ajudar no esforço de guerra, o trabalho de Langévin influenciou os futuros projetos de sonar. Os primeiros dispositivos de sonar desenvolvidos eram dispositivos passivos de escuta. Em 1918, a Grã-Bretanha e os EUA, construíram os primeiros sistemas de sonar ativos, nos quais os sinais eram emitidos e os seus ecos recolhidos [5].

O princípio básico do funcionamento de um sistema de sonar ativo, é descrito pela emissão de ultrassons (ondas mecânicas de alta frequência), efetuada por um

dispositivo ao qual se encontra normalmente acoplado um recetor. O sinal emitido propaga-se no meio envolvente, refletindo-se nos objetos que se encontram na sua trajetória. Parte desse sinal refletido acaba por ser captado pelo recetor [2].

Quando iniciou a Segunda Guerra Mundial, o Comité de Investigação e Detecção Antissubmarino britânico (ASDIC – *Anti-Submarine Detection and Investigation Committee*, sigla que se tornou um nome comumente aplicado aos sistemas de sonar britânicos), desenvolveu esforços para equipar todos os navios da frota britânica com dispositivos de deteção avançada. A utilização do ASDIC mostrou-se naquela altura fundamental no esforço britânico para repelir ataques prejudiciais, provocados por submarinos alemães, tanto em navios de guerra como em navios de mercadorias britânicos, conseguindo desta forma manter a ilha fornecida de munições e alimentos. Durante a Segunda Guerra Mundial, o estudo da utilidade dos ultrassons para fins militares foi aperfeiçoado.

Em simultâneo começava a ser desenvolvido outro sistema de sensoriamento remoto, com base numa melhor compreensão da natureza e propagação da radiação eletromagnética, alcançada pelo físico escocês James Clerk Maxwell durante o século XIX. O físico e meteorologista Sir Robert Alexander Watson-Watt utilizou, com sucesso, transmissões de ondas curtas de rádio para detetar a direção das tempestades que se aproximavam. Outra técnica utilizada por Watson-Watt e a sua equipa, na Estação de Pesquisa Rádio Britânica, foi a medição da altitude da ionosfera (uma camada superior da atmosfera, que pode atuar como refletor de ondas rádio), enviando na sua direção impulsos de curta duração de ondas rádio, medindo o tempo necessário para os sinais retornarem à estação. Como a velocidade das ondas de rádio fora já bem determinada, as medições assim obtidas eram muito exatas. Mais tarde, em 1935, Watson-Watt teve a genial ideia de combinar as técnicas de medição da distância e de determinação da direção, acabando por inventar o radar. O primeiro dispositivo radar (sigla para *Radio Detection and Ranging*, ou Detecção de Distâncias Através de Ondas de Rádio) foi construído em Ditton Park por Watson-Watt [6].

Pouco tempo depois, sem o benefício de um teste preliminar, os cientistas Watson-Watt e Ministry conduziram uma experiência para testar a viabilidade do radar. O aparelho de Watson-Watt foi hábil a detetar aviões a uma distância de 8 *mi* (\approx

12,87 km). Durante o ano seguinte, Watson-Watt melhorou os seus sistemas de radar de modo a poder detetar aviões a distâncias de 70 mi ($\approx 112,65$ km). No período que antecedeu a guerra, rapidamente se aplicou a invenção de Watson-Watt para uso militar e, até ao final de 1938, existiam sistemas de radar primitivos por toda a costa Inglesa. Estas estações capazes de detetar aviões, independentemente da existência de nevoeiros ou nuvens, desempenharam um papel importante na deteção da aproximação de aviões nazis durante a Segunda Guerra Mundial. Até ao final desta guerra, as forças britânicas e norte-americanas, tinham desenvolvido um vasto número de tipos de radar e aplicações, incluindo a interceção ar (AI – *Air Interception*), ar para superfície da embarcação (ASV – *Air-to-Surface Vessel*), interceção controlada de terra (GCI – *Ground Controlled Interception*), e vários avistamentos de armas e rastreamento de radares [6].

Este sistema de sensoriamento remoto, o radar, utilizava analogamente o eco das ondas, mas aqui das ondas de rádio, para a determinação de distâncias e localização de objetos no ar.

No período atrás referido, o desenvolvimento da aplicabilidade dos ultrassons para fins não militares foi notável, em áreas como a metalurgia (ex., para deteção de fissuras e outras anomalias em metais). Estes últimos aparelhos referidos são considerados os precursores dos equipamentos de ultrassonografia utilizados em medicina. A utilização de ultrassons em medicina foi inicialmente aplicada apenas no âmbito terapêutico, tendo sido utilizada empiricamente em diversas áreas, desde o tratamento da artrite reumatóide até a tentativas de remissão da Doença de Parkinson em neurocirurgia [3].

Atualmente, a utilização dos ultrassons estende-se pelas mais diversas áreas, tais como o estudo e pesquisa dos oceanos, na pesca, na medicina, na deteção de velocidade, entre outras [2-5, 7]. Podendo concluir-se que, após capturado o sinal de retorno, o tipo de análise que se lhe irá aplicar, dependerá do tipo de informação que se pretenda retirar.

A marcha humana tem sido estudada nas mais diversas áreas, nomeadamente na engenharia biomédica, na medicina desportiva, em fisioterapia e reabilitação, etc.

Motivado pela análise da performance atlética e biometria, os métodos de como extrair e analisar os vários movimentos do corpo humano têm atraído imensa atenção. Atualmente, o método mais comum para análise do movimento humano passa pelo recurso a sequências de imagens visuais. No entanto, a percepção visual do movimento do corpo humano, pode ser afetada pela distância, variações na iluminação, deformações da roupa, ou oclusões na aparência de segmentos do corpo humano. O radar, como um sensor eletromagnético, tem sido amplamente utilizado para deteção, monitoramento e formação de imagens de alvos de interesse, devido à sua capacidade de longo alcance, excelente desempenho tanto de dia como de noite e à sua aptidão para penetrar paredes e solo, tornando-se por isso uma ferramenta importante na deteção e monitoramento de seres vivos (humanos e animais) [8-10]. Existindo estas características nos sistemas de ondas e face às limitações existentes nos sistemas de imagens, a análise do movimento humano recorrendo a sistemas de radar e sonar, tem vindo a ser ultimamente alvo de alguns estudos [10].

1.2 Motivação e Objetivos

Os ultrassons são cada vez mais utilizados na resolução de problemas da atualidade, sendo uma das áreas que tem vindo a ser alvo de um forte estudo é a deteção de movimento humano por sonar. Esta área tem um forte potencial de aplicabilidade em diversificadas situações [8-10]. A título de exemplo, quando ocorrem calamidades, é muito usual o recurso a equipamentos óticos de imagem e vídeo para encontrar seres vivos em zonas de acesso restrito. Contudo estes sistemas têm graves limitações, uma vez que estão condicionados ao ambiente em que se encontram. Se existir fumo, poeiras no ar ou qualquer outro obstáculo, estes sistemas tornam-se inúteis. Com o recurso aos ultrassons esta limitação é ultrapassada, pois uma onda mecânica/eletromagnética atravessa este tipo de obstáculos e outros similares, podendo permitir extrair informação sobre a presença de seres vivos e uma aproximação do seu número [9]. Das diferentes aplicações dos ultrassons, poderemos referir algumas, tais como:

- Deteção de seres humanos em zonas de risco, facilitando o seu salvamento, com o apoio de um veículo telecomandado e recurso a um meio de comunicação sem fios;
- Monitorização de uma área de interesse, como por exemplo a zona de acampamento de um grupo de fuzileiros, dando-lhe uma maior segurança durante a noite;
- Vigilância em locais de acesso restrito, como empresas, unidades fabris ou armazéns, complementando, ou mesmo substituindo os sistemas óticos.

Nos últimos anos, o radar tem vindo a provar a sua capacidade para deteção de alvos com pequenos RCS (sigla para *Radar Cross Section*), como animais e humanos. Contudo, métodos eficientes da análise das características dinâmicas/cinemáticas de animais e humanos, e da extração dos padrões de movimentos a partir dos retornos do sinal de radar, são ainda um desafio [10].

A deteção e seguimento de seres humanos têm importantes aplicações em operações de segurança e vigilância, como já foi referido anteriormente. Tem sido investigado, em particular o uso de sonar e radar, uma vez que estes sistemas são

capazes de operar em ambientes desfavoráveis aos sistemas óticos. No entanto, uma das limitações destes sensores, quando comparados com os sensores óticos, é os movimentos humanos não poderem ser diretamente visualizados a partir das assinaturas de sonar/radar [8].

Tem recaído um interesse particular sobre o estudo das características do micro-Doppler humano, originado pelos movimentos não rígidos dos braços, pernas e tronco, do corpo humano [11].

Nesta dissertação estudam-se e comparam-se diversas técnicas, apresentadas em bibliografia recente, para a deteção e seguimento de movimentos humanos, através da propagação de sinais sonoros na gama dos ultrassons, de forma ativa e passiva. A solução desenvolvida e defendida nesta dissertação é suportada pelos seguintes pontos:

- Plataforma de sonar¹, que suportou o estudo na área do micro-Doppler;
- Estudo da análise do movimento humano, a partir de dados de micro-Doppler recolhidos;
- Estudo das assinaturas acústicas da passada humana, com recurso a um sistema passivo de receção de sinais na gama do audível;
- Estudo da análise do movimento de caninos e equídeos, a partir de dados de micro-Doppler recolhidos;
- Estudo e implementação de técnicas de processamento de sinal adequadas à deteção e identificação de movimentos humanos.

¹ Plataforma SONAR, realizada pelo Engenheiro Renato Costa e Doutor Paulo Alexandre Carapinha Marques, num projeto no âmbito da Brisa, para classificação de classes de veículos.

1.3 Organização do Documento

Nesta seção faz-se o enquadramento dos temas abordados nesta dissertação, sintetizando os assuntos abordados nos vários capítulos.

Começou-se por efetuar um enquadramento histórico da evolução da utilização dos ultrassons até à atualidade. Foi apresentado o tipo de problemas que contém, o que se pode fazer e onde se pode implementar a solução que se pretende estudar. Foi descrito um pouco da importância da deteção do movimento humano, o que já se faz hoje em dia, e o porquê da utilização dum sistema sonar face a um sistema de radar. Todo este conjunto de temáticas foi abordado no primeiro capítulo.

No capítulo 2 é feita uma introdução teórica a alguns temas de estudo envolvidos onde são descritos os efeitos de Doppler e micro-Doppler. É realizada uma pequena descrição da cinemática do movimento do corpo humano, seguindo-se uma abordagem das técnicas de processamento de sinal para a análise dos dados, retratando também o *backscattering* do sinal transmitido. É ainda efetuada uma abordagem das diferenças entre radar e sonar e, referidas estas, aprofunda-se as propriedades de propagação das ondas mecânicas (as ondas transmitidas por um sonar). Conclui-se este capítulo, efetuando uma abordagem sobre a ambiguidade de um sistema sonar.

No capítulo 3, é apresentada a proposta de solução para o problema que envolve este estudo, abordando tanto a proposta para de *hardware* como *software*, incluindo o processamento de sinal que se propõe realizar, e o porquê de ser importante a construção de uma base de dados.

Apresentada a proposta para solucionar o problema em causa, passa-se a explicar no capítulo 4, toda a sua implementação. Uma das maiores contribuições deste trabalho foi a criação de uma base de dados com inúmeros testes, que permite ter disponível uma biblioteca de resultados que possibilitam no futuro aprofundar este estudo; esta base de dados é aqui apresentada e explicada.

Os resultados do estudo são apresentados no capítulo 5, onde também é realizada uma breve descrição sobre os cenários de teste utilizados para a recolha dos dados e posteriormente um estudo completo com os respetivos resultados obtidos.

O documento termina com o capítulo de conclusões, capítulo 6, onde para além de se exporem as ideias retiradas após a elaboração de todo o estudo apresentado, são sugeridos alguns tópicos como trabalho futuro.

2 Análise de movimento humano através de ultrassons

Pretende-se neste capítulo expor um conjunto de temas que serviram de suporte ao estudo desenvolvido nesta dissertação. Para uma melhor compreensão deste trabalho, dever-se-á ter presente o conhecimento do que é, e o que origina o referido efeito de Doppler, bem como qual a origem do efeito de micro-Doppler. Descreve-se a cinemática do movimento humano, e efetua-se uma apresentação das técnicas de processamento de sinal utilizadas para a análise dos dados. É feita uma ponte entre o radar e o sonar, abordando de seguida as propriedades das ondas mecânicas transmitidas pelo sonar, terminando com uma abordagem teórica da função de ambiguidade de um sistema sonar.

2.1 Estado da Arte

A observação e análise do movimento humano têm, nos últimos anos, vindo a ser alvo de diversos estudos. Quando a observação e análise são efetuadas pela captura de sequências de imagens visuais, existe o problema da perceção visual dos movimentos ser muitas vezes afetada pelas diversas variações do ambiente envolvente, como a iluminação, as deformações da roupa, oclusões da aparência de determinadas partes do corpo humano ou o tamanho do ser humano dentro do cenário. Ao contrário dos sistemas óticos, o recurso à utilização de radar para vigilância tem sido cada vez maior, devido ao seu longo alcance, à alta precisão na medição de velocidades, ao seu excelente desempenho, tanto de dia como de noite, independentemente das condições atmosféricas e ainda à sua capacidade de penetração em objetos sólidos como paredes [9, 12].

Os métodos para deteção de seres humanos recorrendo a sinais de baixas frequências, tipicamente abaixo das poucas centenas de Hertz, gerados pelos seus passos são bem conhecidos. Um ser humano ao caminhar gera vibrações e sinais sonoros de frequência de banda larga, que vão desde os poucos Hertz até às frequências ultrassónicas. Os mecanismos envolvidos na geração de sinais de alta frequência e a possibilidade da sua aplicação para a deteção da passada humana têm sido objeto de estudos científicos [13]. O contacto e o deslizamento de um pé com o solo produzem, tipicamente, sinais de alta frequência [13].

Atualmente existem diversos sistemas para deteção do movimento humano, sejam eles a partir de sistemas óticos, acelerómetros, ou outros sensores. No entanto, o recurso aos ultrassons tem vindo a aumentar devido às suas características, que tornam possível a obtenção de informação independentemente do estado climatérico, do meio envolvente ou da sua luminosidade. A utilização de sonar é semelhante à utilização de radar, diferenciando-se pelo tipo de onda que emitem e pela sua velocidade de propagação. Um sistema sonar quando comparado com um sistema de radar tem um baixo custo de construção, baixo ruído eletrónico, baixo consumo, dimensões e peso mais pequenos, e não necessita de placas de aquisição com elevado ritmo de amostragem.

A utilização de sistemas ativos de ultrassons ainda não é muito usual, apesar de cada vez existirem mais estudos sobre a possibilidade de analisar o movimento de um corpo, identificar o como e de que forma cada um dos seus componentes se move, e recriar estes movimentos a partir de uma animação, com base nos dados derivados do micro-Doppler causado pelo seu movimento.

O presente trabalho apresenta uma abordagem para deteção e caracterização do movimento humano, utilizando métodos ativos e passivos. O método passivo emprega um recetor de sons na gama do audível, que é sensível ao som dos passos. O método ativo utiliza um sonar de onda contínua. Os movimentos humanos têm assinaturas únicas de Doppler e, a sua combinação com as assinaturas acústicas dos passos, aumentam a probabilidade de deteção de presença humana e reduz os falsos alarmes.

2.2 Introdução ao Problema

A identificação humana à distância, baseada no andamento humano, é uma matéria de interesse crescente em biométrica e em visão computacional. A análise da marcha é um método de análise à distância do movimento humano, que oferece uma nova forma de identificação humana. Cada pessoa tem por norma um único padrão de marcha, sendo assim possível reconhecê-la à distância a partir da sua marcha. A maior parte dos esforços na análise da marcha humana, como já foi referido, utiliza sequências de imagens de vídeo. A sua análise por recurso a sistemas de ondas, como o radar e o sonar, tem vindo a ser recentemente objeto de inúmeras investigações, devido às vantagens na deteção e identificação humanas à distância sob quaisquer condições meteorológicas e independentemente da luminosidade existente (seja de dia ou de noite) [10].

No presente documento são expostos resultados do estudo efetuado nesta dissertação sobre a análise por ultrassons do movimento humano, recorrendo a uma plataforma sonar. Um sonar transmite um sinal de onda mecânica na direção de um objeto e recebe o eco de retorno desse objeto. Com base no tempo de atraso do sinal recebido, o radar consegue medir a distância a que se encontra o referido objeto. Caso este esteja em movimento, a frequência do eco recebido estará deslocada da frequência central a que o sinal foi transmitido, sendo este efeito conhecido como efeito de Doppler [10]. O desvio de frequência de Doppler é determinado pela velocidade radial do objeto, isto é, pela componente da velocidade na direção da linha de vista (LOS – *line of sight*). Também é possível calcular a velocidade radial do objeto em movimento, com base no desvio de frequência de Doppler do sinal recebido. Se o objeto, ou qualquer componente estrutural do objeto, contiver um movimento oscilatório, para além do movimento da sua grande massa, esta oscilação irá induzir uma modulação de frequência adicional sobre o sinal de retorno, gerando bandas laterais sobre o desvio de frequência de Doppler do sinal transmitido. Esta modulação de Doppler adicional é designada por efeito micro-Doppler [10, 14-16].

O desvio de frequência de Doppler, induzido pela velocidade radial do movimento do objeto, é normalmente medido no domínio da frequência pela

transformada de Fourier (FT – *Fourier Transform*) do sinal recebido. A medida do desvio da frequência de Doppler permite estimar a velocidade devida ao efeito de micro-Doppler [10].

O efeito de micro-Doppler pode ser usado para determinar as propriedades cinemáticas de um objeto. Por exemplo, a vibração gerada pelo motor de um veículo pode ser detetada a partir da vibração da superfície do corpo do veículo. Ao medir as características de micro-Doppler da vibração superficial, podemos avaliar a velocidade do motor em análise e utilizar essa avaliação para identificar o tipo de veículo que está na sua origem, tal como seja um tanque com um motor de turbina a gás ou um autocarro com um motor a *diesel*. O efeito de micro-Doppler observado num objeto pode ser definido como sendo a sua assinatura, isto é, o conjunto de características distintas do objeto e estão representadas na modulação complexa da frequência do sinal que é refletido. Esta modulação é originada pelas componentes estruturais do objeto e está representada no domínio conjunto do tempo e da frequência de Doppler [10].

2.3 Efeito de Doppler

Em 1842, o matemático e físico austríaco Christian Doppler descreveu um fenómeno sobre o efeito da cor da luz das estrelas, afirmando que a cor vinda da fonte de luz era alterada pelo seu movimento. Uma fonte de luz ao deslocar-se na direção de um observador aparenta ser mais azul, enquanto ao afastar-se do observador aparenta ser mais vermelha. Pela primeira vez o fenómeno conhecido como efeito de Doppler fora descoberto. Considerando este efeito é possível afirmar que, a relação da frequência (ou comprimento de onda) gerada por uma fonte e a frequência captada por um recetor, depende da velocidade a que a fonte se desloca em relação ao recetor. Em 1843, o efeito de Doppler foi comprovado experimentalmente através das ondas sonoras provocadas por um trompetista a ensaiar, enquanto se movia a diferentes velocidades [10]. O movimento da fonte em relação ao observador origina que as ondas que se propagam no sentido do observador sejam comprimidas e as que se propagam em sentido oposto sejam alongadas, de modo que a sua frequência é assim alterada (ver Figura 2-1).

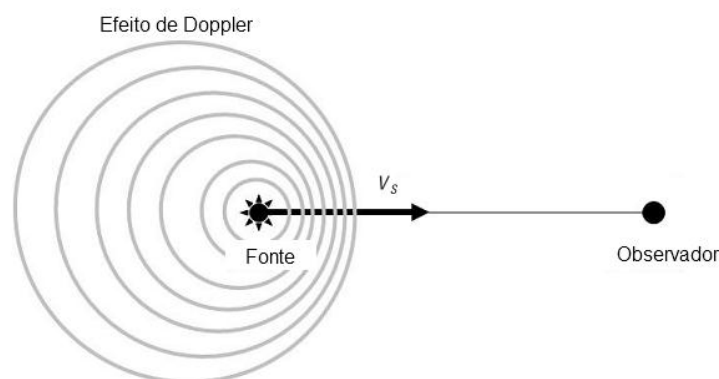


Figura 2-1 - Mudança do comprimento de onda devido ao movimento da fonte em relação ao observador (extraído de [10]).

O comprimento de onda da fonte sonora é definido por:

$$\lambda = \frac{c_{sound}}{c_{sound} \pm v_s} f \quad (2-1)$$

onde C_{sound} é a velocidade de propagação da onda sonora num dado meio, e f é a frequência da onda sonora. No caso de se ter só a fonte a mover-se a uma velocidade v_s em relação ao meio, a frequência percebida pelo observador é:

$$f' = \frac{C_{sound}}{C_{sound} \mp v_s} f \quad (2-2)$$

Se a fonte estiver estacionária e o observador a mover-se com uma velocidade v_o em relação ao meio, a frequência percebida pelo observador é:

$$f' = \frac{C_{sound} \pm v_o}{C_{sound}} f \quad (2-3)$$

Se tanto a fonte como o observador estão a mover-se, a frequência percebida pelo observador é calculada por:

$$f' = \frac{C_{sound} \pm v_o}{C_{sound} \mp v_s} f \quad (2-4)$$

Quando a fonte e o observador se movem um para o outro, os sinais de cima de cada fração em (2-4) são aplicados; quando a fonte e o observador se afastam um do outro, o conjunto inferior de sinais da fração é aplicada.

2.3.1 Efeito de Doppler observado no Sonar

Quando se utiliza um sistema sonar, sabe-se que a velocidade v de um alvo é geralmente inferior à velocidade de propagação c de uma onda mecânica, ou seja, $v \ll c$. Num sistema de sonar onde o transmissor e o recetor se encontram posicionados na mesma localização, ou seja um sistema de sonar monostático, a distância de ida e volta percorrida pela onda é o dobro da distância entre o emissor e o alvo. Neste caso, o movimento da onda consiste em dois segmentos: viagem do transmissor para o alvo, que produz um desvio de Doppler ($-fv/c$), e viagem de regresso do alvo para o

recetor, que produz um outro deslocamento de Doppler ($-fv/c$), onde f é a frequência transmitida. Assim, o desvio total de Doppler é dado por:

$$f_D = -f \frac{2v}{c} \quad (2-5)$$

Se o sonar é estacionário, v será a velocidade radial do alvo ao longo da LOS do sonar, que é definida como positiva quando o objeto se está a afastar do sonar, e como consequência, o desvio de Doppler torna-se negativo.

Num sistema de sonar biestático, que se caracteriza pela transmissão e receção simultâneas, a existência de pelo menos dois transdutores apontadas para a mesma direção exigindo um movimento síncrono por parte destes. O sonar biestático apesar de mais difícil de construir e operar tem a grande vantagem de isolar completamente a emissão da receção, sendo por isto utilizado em situações em que se pretende grande sensibilidade. Como mostra a Figura 2-2, o transmissor e o recetor estão separados por uma distância de linha de base L , que é comparável com a distância máxima que os alvos poderão ter em relação ao transmissor e ao recetor [17]. A distância do transmissor para o alvo é dada por um vetor r_T e a distância do alvo para o recetor é dada pelo vetor r_R . O ângulo biestático φ é definido pelo ângulo entre a linha transmissor-alvo e a linha recetor-alvo. O ângulo de visão do transmissor é α_T e o ângulo de visão do recetor é α_R . O ângulo de visão é definido pelo ângulo entre um vetor referência perpendicular à linha de base transmissor-recetor e o vetor LOS do alvo. Assim, o ângulo $\varphi = \alpha_R - \alpha_T$.

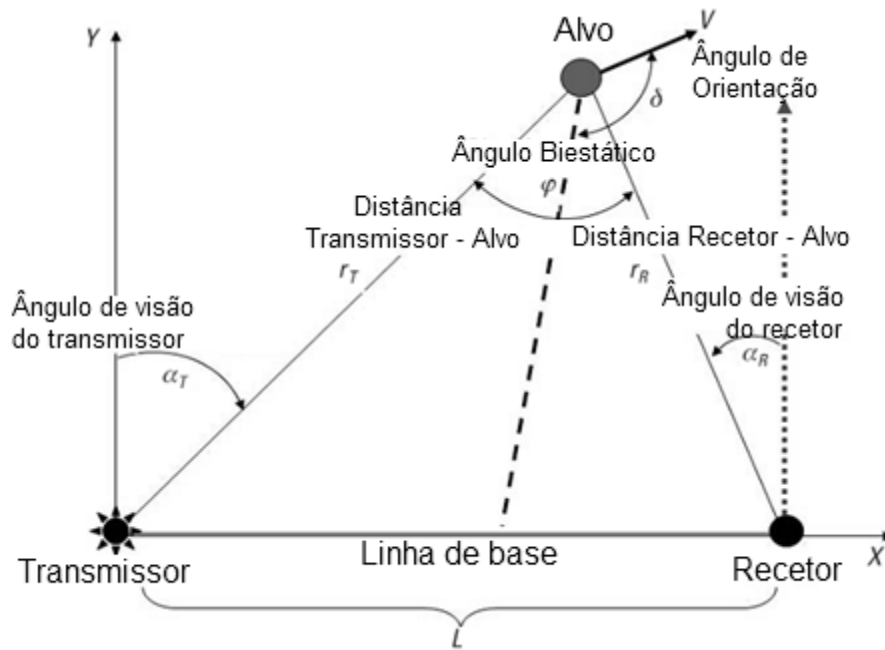


Figura 2-2 - Configuração do sistema sonar biestático (extraído de [10]).

Analisando um pouco mais estas duas configurações, monostática e biestática, mas em sistema radar, pode-se afirmar que é complicado fazer uma comparação rigorosa entre um radar monostático e um radar biestático devido às diferenças das suas geometrias. Contudo, são de seguida apresentadas algumas características e limitações da configuração biestática relativamente à configuração monostática. Em relação à área de cobertura no radar monostático pode ser considerada hemisférica, já no radar biestático é mais ou menos plana. O radar monostático é o mais versátil dos dois, dada a sua capacidade de analisar um grande volume de espaço e devido à sua facilidade de extrair informações do alvo a partir do sinal recebido. Outra vantagem do radar monostático, facilmente perceptível por observação das geometrias atrás descritas, é que este necessita de uma só área para a sua infraestrutura, contra as duas áreas necessárias para o radar biestático, o que implica um custo mais elevado deste último [17].

2.3.2 *Estimativa e Análise do Desvio de Frequência de Doppler*

Os sonares de Doppler utilizam o efeito de Doppler para medir a velocidade radial de um alvo. O desvio de frequência de Doppler pode ser extraído por um

desmodulador em quadratura, que produz uma componente em fase (I) e uma componente em quadratura (Q) a partir do sinal de entrada, como mostra a Figura 2-3.

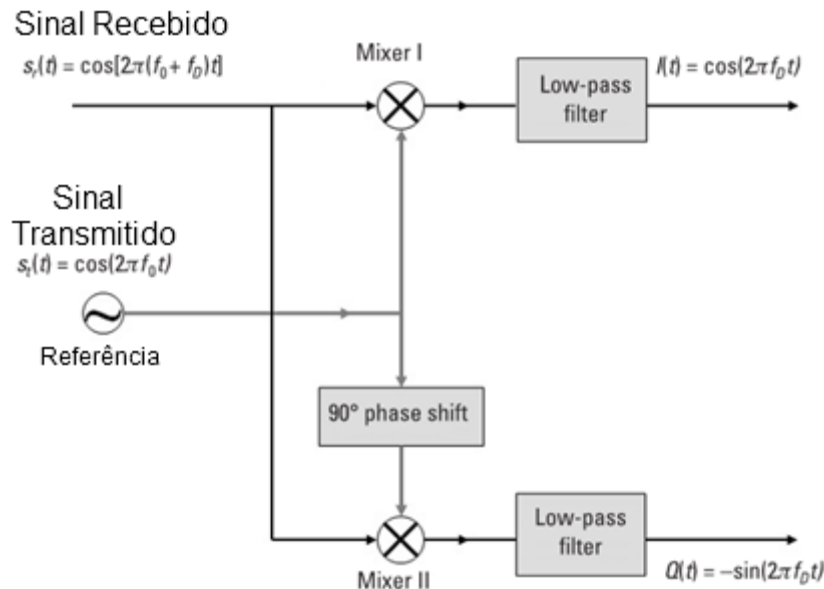


Figura 2-3 - Desvio de frequência extraído por um desmodulador em quadratura (extraído de [10]).

No desmodulador em quadratura, o sinal recebido é dividido por dois misturadores chamados desmoduladores síncronos. No desmodulador síncrono I, o sinal recebido é misturado com um sinal de referência, o sinal transmitido; no outro canal, desmodulador síncrono II, é misturado com o sinal transmitido mas com um desvio de fase de 90°.

O sinal recebido pode ser expresso como

$$s_r(t) = a \cos[2\pi(f_0 + f_D)t] = a \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)] \quad (2-6)$$

onde a é a amplitude do sinal recebido, f_0 a frequência da portadora do transmissor, e $\varphi(t) = 2\pi f_D t$ representa a mudança de fase do sinal recebido, devido ao movimento do alvo. Após a soma do sinal recebido, com o sinal transmitido

$$s_t(t) = \cos(2\pi f_0 t) \quad (2-7)$$

a saída do desmodulador síncrono I fica

$$s_r(t)s_t(t) = \frac{a}{2} \cos[2\pi f_o t + \varphi(t)] + \frac{a}{2} \cos \varphi(t) \quad (2-8)$$

que após uma filtragem passa-baixo, na saída do canal-I obtém-se

$$I(t) = \frac{a}{2} \cos \varphi(t) \quad (2-9)$$

Através da mistura do sinal transmitido mas com desvio de fase de 90°,

$$s_t^{90^\circ}(t) = \sin(2\pi f_o t) \quad (2-10)$$

com o sinal recebido, obtém-se na saída do demodulador síncrono II

$$s_r(t)s_t^{90^\circ}(t) = \frac{a}{2} \sin[4\pi f_o t + \varphi(t)] + \frac{a}{2} \sin \varphi(t) \quad (2-11)$$

ficando a saída do canal-Q, após filtragem passa-baixo

$$Q(t) = -\frac{a}{2} \sin \varphi(t) \quad (2-12)$$

Por fim, e combinando as saídas I e Q, obtém-se um sinal complexo de Doppler com a seguinte estrutura

$$S_D(t) = I(t) + jQ(t) = \frac{a}{2} \exp[-j\varphi(t)] = \frac{a}{2} \exp(-j2\pi f_D t) \quad (2-13)$$

Sendo assim, a frequência de Doppler f_D pode ser estimada a partir do sinal complexo de Doppler $S_D(t)$. Para estimar o desvio de frequência de Doppler de um único sinal sinusoidal, pode ser utilizado o periodograma² para calcular a densidade

² O periodograma é uma estimativa da densidade espectral de um sinal. Na prática, é muitas vezes calculado a partir de uma sequência de comprimento finito usando a transformada rápida de Fourier.

espectral desse sinal, sendo o valor máximo do desvio de frequência de Doppler dado por (2-14) [10, 18, 19].

$$\hat{f}_D = \max_{f_D(k)} \left\{ \left| \sum_{k=1}^N a(k) \exp(-j2\pi f_D(k)) \right|^2 \right\} \quad (2-14)$$

Quando o número de amostras no sinal a analisar é limitada, para se estimar o sinal espectral, o método mais simples é o recurso à transformada rápida de Fourier (FFT – *fast Fourier transform*), que é computacionalmente eficiente e fácil de implementar. No entanto, a sua resolução em frequência é limitada para o inverso do intervalo de tempo do sinal. Aumentar a janela temporal com a técnica de *zero padding* (inserção de zeros) corresponderá a uma maior densidade de interpolação no domínio da frequência, mas não a uma maior resolução em frequência. A maneira usual de se aumentar a resolução em frequência consiste em utilizar a FFT com um sinal com duração real mais longa, sem recurso a *zero padding*. No entanto, o tempo de computação da FFT é da ordem de $O(N \times \log N)$, onde N é o número de amostras no sinal analisado, o que para um grande número de amostras pode ter elevadas exigências computacionais [10].

Com a finalidade de tornar mais eficiente a estimação espectral, usam-se alguns métodos alternativos como autorregressiva (AR – *autoregressive*) e os métodos baseados em auto-vetores (*eigenvector-based*), tais como a classificação de sinal múltiplo (MUSIC – *Multiple Signal Classification*), entre outros métodos de super-resolução para a análise espectral que podem ser usados em estimação de frequência. Contudo, estes requerem também intensivos cálculos matriciais ou técnicas iterativas de otimização [10, 19].

A frequência é determinada pela derivada da função de fase em ordem ao tempo. Assim, a diferença de fase $\varphi(t)$ entre o sinal recebido e o sinal transmitido pode ser utilizada para calcular o desvio de frequência de Doppler f_D do sinal recebido

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (2-15)$$

No entanto, esta frequência é uma frequência instantânea, que apenas é adequada para sinais de monocomponente ou de tom único, e não para sinais de multicomponentes. Para lidar com um sinal com múltiplas componentes, ou seja, um sinal que num dado instante de tempo tem mais de uma frequência, pode ser utilizada uma abordagem que decompõe um sinal com multicomponentes em múltiplos sinais de monocomponentes. Após esta decomposição, pode-se obter uma completa distribuição no tempo e na frequência do sinal de multicomponentes, pelo cálculo da frequência instantânea para cada um dos sinais de monocomponente, e adicionando estas frequências instantâneas [10].

A partir da estimativa da frequência de Doppler, a velocidade radial de um alvo é determinada pela seguinte expressão:

$$v = \frac{\lambda}{2} \hat{f}_D = \frac{c}{2f} \hat{f}_D \quad (2-16)$$

As saídas I e Q do desmodulador em quadratura também podem ser utilizadas para determinar se o alvo se está a aproximar ou a afastar do sonar, comparando a fase relativa do canal-I com a do canal-Q com desvio de fase de 90°, como mostra a Figura 2-4 [10].

Abordando um pouco os sistemas de radar de Doppler, estes incluem radares de onda contínua simples sem modulações (CW – *Continuous Wave*), radares de onda contínua modulada em frequência (FM-CW – *Frequency Modulation-Continuous Wave*) e radares coerentes de Doppler pulsado. Os radares de CW pura só conseguem medir a velocidade, enquanto os radares de Doppler de FM-CW e os radares coerentes de Doppler pulsado podem ter uma ampla largura de banda de frequência, de modo a obterem uma alta resolução em distância e a medir o alcance e as informações de Doppler. Os radares de Doppler coerentes retêm a fase dos sinais transmitidos e acompanham as mudanças de fase nos sinais recebidos, sendo o desvio de frequência de

Doppler proporcional à variação da mudança de fase. Se a mudança de fase é mais do que $\pm\pi$, a frequência de Doppler estimada torna-se ambígua e denomina-se Doppler *aliasing*, que ocorre quando se faz a amostragem no tempo discreto de um sinal no tempo contínuo. O processo de amostragem pode ser representado pela multiplicação do sinal contínuo no tempo $s(t)$ com uma sequência de funções delta $\delta(t)$. Tendo a transformada de Fourier do sinal amostrado no tempo, o sinal discreto amostrado no tempo é transformado no domínio da frequência através da forma discreta da transformada de Fourier:

$$s(t) \sum_n \delta(t - n\Delta t) \Rightarrow S(f) \otimes \sum_m \delta\left(f - \frac{m}{\Delta t}\right) \quad (2-17)$$

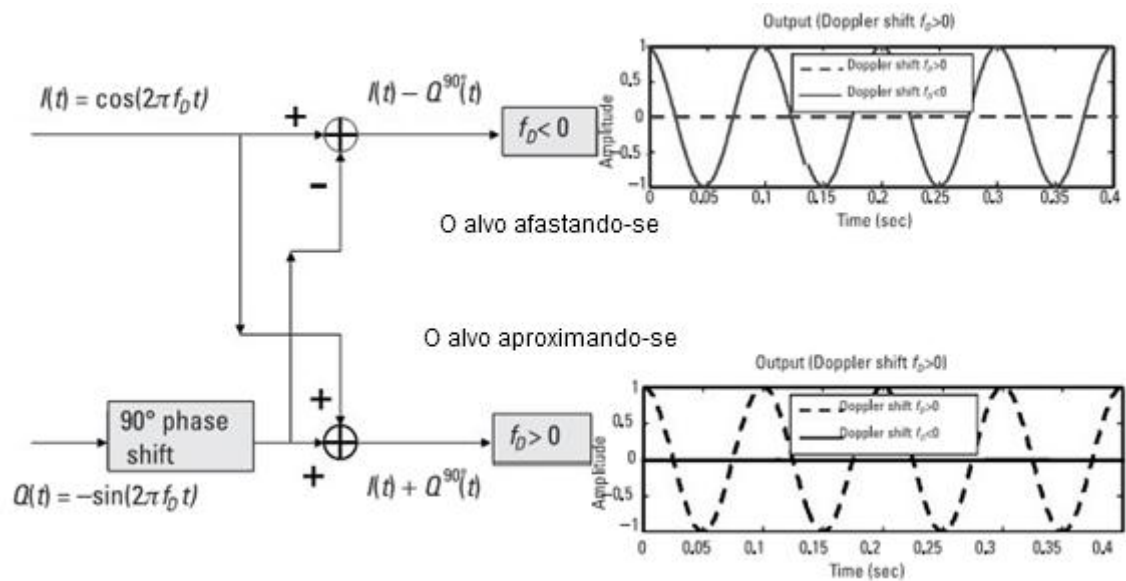


Figura 2-4 - A fase relativa entre o canal-I e o canal-Q deslocado 90° para determinar se o alvo está a aproximar ou afastar do sonar (extraído de [10]).

2.4 Efeito de micro-Doppler

O efeito de micro-Doppler foi originalmente introduzido em sistemas coerentes de radar a *laser* (*light amplification by stimulated emission of radiation*) [10, 16]. Os sistemas de deteção e classificação a laser (LADAR – *Laser Detection and Ranging*) transmitem ondas eletromagnéticas nas frequências óticas, na direção de um objeto e recebem o eco da luz refletida ou *backscattered*, conseguindo deste modo medir a distância que os separa, a velocidade e outras propriedades do objeto, através das modulações do feixe de laser por amplitude, frequência, fase, e até mesmo pela sua polarização [10].

O LADAR coerente, que preserva a informação da fase da onda de luz dispersa em relação a uma onda de laser de referência gerada por um oscilador local, tem uma maior sensibilidade à mudança de fase e é capaz de medir a velocidade do objeto a partir da variação da mudança de fase [10].

Num sistema coerente, uma vez que a fase do sinal de retorno do objeto é sensível à variação da distância, uma mudança de meio comprimento de onda em distância pode causar uma mudança de fase de 360°. Por exemplo, para um sinal de LADAR com um comprimento de onda de $3\mu\text{m}$, uma variação em distância de $1,5\mu\text{m}$ poderá causar uma mudança de fase de 360° [10]. No caso da vibração, sendo a frequência de vibração f_v e a amplitude da vibração D_v , tem-se a máxima variação da frequência de Doppler determinada por

$$\max\{f_D\} = \frac{2}{\lambda} D_v f_D \quad (2-18)$$

Num sistema de alta frequência, mesmo tendo uma variação de vibração f_v muito baixa e uma pequena amplitude de vibração D_v , pode ser o suficiente para causar uma grande mudança de fase, e assim, o desvio de frequência de Doppler pode ser facilmente detetado [10].

Em muitos casos, um objeto ou qualquer componente estrutural de um objeto contém um movimento oscilatório, um micro movimento. A fonte de micro movimento

pode ser uma hélice em rotação de uma avião, as lâminas rotativas do rotor de um helicóptero, uma antena rotativa, o bater das asas das aves, uma pessoa a caminhar com os braços e as pernas balançando, ou outras causas.

O movimento articulado humano é um importante tópico no estudo do micro-Doppler, pois é realizado por uma série de movimentos pelas diversas partes do corpo humano. São micro movimentos complexos devido à alta articulação e flexibilidade do corpo. Caminhar é um exemplo típico de movimento articulado humano.

O micro movimento induz modulações de frequência na frequência da portadora dos sinais transmitidos. Para uma vibração ou rotação periódica pura, um micro movimento gera desvios nas bandas laterais da frequência de Doppler sobre a frequência central da portadora já com desvio de Doppler. Esta modulação contém harmónicas que são determinadas pela frequência da portadora, a variação da vibração e da rotação e o ângulo entre a direção de vibração e a direção da onda incidente. A partir da modulação de frequência pode-se determinar as propriedades cinemáticas de interesse. Embora o uso da modulação provocada por uma hélice ou pelas pás do rotor para a identificação de alvos sejam propostos desde há muito tempo, os métodos de como representar a modulação da frequência variável no tempo como uma assinatura do alvo, como extrair a informação cinemática do alvo a partir da assinatura e como usar a assinatura para a identificação do alvo, são ainda questões pouco aprofundadas.

2.4.1 Efeito de micro-Doppler observado no Sonar

O efeito de micro-Doppler é sensível à banda de frequências do sinal [10]. Para fundamentar a afirmação anterior e, dado que não foi encontrada bibliografia de consulta livre que o permitisse fazer para o sistema sonar, será a mesma fundamentada tendo por base os sistemas de radar. Para um sistema de radar a operar nas bandas de frequência das micro-ondas, o efeito de micro-Doppler pode ser observado se o produto da taxa de variação da oscilação do alvo com o deslocamento da oscilação for suficientemente elevado. Para um radar a operar na banda X (banda compreendida entre os 8GHz e os 12GHz) com um comprimento de onda de 0,03m, um ritmo de vibração

de 15Hz e uma deslocação de $0,003\text{m}$ pode-se induzir um desvio máximo de frequência de micro-Doppler detetável de $18,8\text{Hz}$. Se o radar estiver a operar na banda L (banda compreendida entre os 950MHz e os 1450MHz) com um comprimento de onda de $0,1\text{m}$, para atingir o mesmo desvio máximo de micro-Doppler de $18,8\text{Hz}$, para o mesmo ritmo de vibração de 15Hz , o deslocamento terá de ser de $0,01\text{m}$, o qual pode ser demasiado grande para ser alcançado na prática. Portanto, em sistemas de radar a operar em bandas de frequências baixas, poderá não ser detetável a geração de desvios de micro-Doppler por vibração. No entanto, a geração de desvios de micro-Doppler por rotações, tais como a rotação das lâminas de um rotor, poderão ser detetáveis devido aos seus longos braços rotativos e à sua grande velocidade de ponta [10].

Um radar a operar na banda UHF (*Ultra High Frequency*), banda de frequência compreendida entre os $300 - 1000\text{MHz}$, é amplamente utilizado para penetração em folhagem (FOPEN – *Foliage Penetration*) com a finalidade de detetar alvos sob as árvores. Nestes radares de FOPEN, o desvio de micro-Doppler induzido pela vibração dos alvos é geralmente demasiado pequeno para ser detetado. No entanto, é possível detetar o desvio de micro-Doppler gerado pela rotação das pás do rotor ou pelas hélices. Num radar a operar na banda UHF com um comprimento de onda de $0,6\text{m}$, se a pá do rotor de um helicóptero girar a uma velocidade de 200m/s , o seu desvio máximo de micro-Doppler poderá atingir os 666Hz e é certamente detetável [10].

2.4.2 Estimativa e Análise do Desvio de Frequência de Micro-Doppler

O desvio de micro-Doppler é um desvio na frequência, variável no tempo, que pode ser extraído de um sinal complexo à saída do desmodulador em quadratura usado no processamento de Doppler convencional. Para analisar as características da frequência ao longo do tempo, não é adequada a utilização da transformada de Fourier, pois esta não consegue fornecer a informação da frequência dependente do tempo. Os métodos de análise usados para descrever um sinal, simultaneamente no domínio do tempo e da frequência, são comumente a análise da frequência instantânea e a análise conjunta no tempo e na frequência (JTFA – *joint time-frequency analysis*) [10].

A terminologia da frequência instantânea, definida pela derivada no tempo da função de fase de um sinal variável no tempo, tem sido discutida desde há décadas, pois as funções de amplitude e fase não são únicas. Uma definição bem aceite da frequência instantânea utiliza um par da transformada de Hilbert para formar a parte real e a parte imaginária de um sinal analítico [10]. Assim, o termo instantâneo significa, no sentido de instante de tempo presente e, a sua medição requer apenas o conhecimento do sinal analisado ao longo do passado e não a partir do futuro.

A frequência instantânea obtida pela operação de tempo derivado, produz apenas um valor de frequência num dado instante de tempo. Isto significa que esta é adequada apenas em sinais de monocomponentes e não para sinais de multicomponentes. Um sinal de componente única é um sinal de banda estreita em qualquer momento e, tem energia numa porção contígua no domínio conjunto do tempo e da frequência. Por outro lado, um sinal com multicomponentes tem energia presente em múltiplas bandas de frequências isoladas no mesmo instante de tempo. Para lidar com sinais de multicomponentes, uma abordagem óbvia é a decomposição do sinal de multicomponentes em múltiplos sinais de monocomponentes adicionáveis. A distribuição completa no tempo e na frequência do sinal é obtida pelo cálculo das frequências instantâneas para cada componente de sinal, somando estas frequências instantâneas individuais consecutivamente [10].

A análise conjunta no tempo e na frequência tem sido usada durante décadas para analisar o espectro da frequência variável no tempo. Foi concebida para localizar a distribuição de energia num dado sinal no domínio bidimensional do tempo e frequência, e é bastante apropriada não apenas para sinais de monocomponente mas também para sinais de multicomponentes.

2.4.3 Assinaturas de micro-Doppler

O termo assinatura é habitualmente usado para referir a expressão característica de um objeto ou de um processo.

Ao examinar o fenómeno de Doppler num objeto, distintas características de micro-Doppler proporcionam a evidência da identidade do movimento desse objeto, sendo portanto a assinatura de micro-Doppler de um objeto o conjunto de características distintas desse mesmo objeto em movimento. É uma modulação complexa da frequência, representada no domínio conjunto da frequência de Doppler e do tempo, sendo estas características distintas que conferem a um objeto a sua identidade.

Nos últimos anos, as assinaturas de micro-Doppler foram aplicadas a diversos alvos, de modo a extrair as suas características, detetar e identificar alvos de interesse. Entre as inúmeras referências sobre o efeito de micro-Doppler em radar, algumas delas contribuem para as propriedades teóricas do efeito do micro-Doppler em radar [16, 21-23] e outras contribuem para a extensão das características micro-Doppler monoestáticas para as biestáticas e multiestáticas [24, 25]. Muitas outras referências contribuem para o processamento e análise das assinaturas de micro-Doppler de corpos rígidos com movimento oscilatório e corpos não rígidos com movimento articulado [26-42]. A classificação, reconhecimento e identificação de alvos com base nas assinaturas de micro-Doppler são também temas importantes que têm sido investigados [43-50].

2.4.3.1 *Assinaturas de micro-Doppler do movimento de um corpo não-rígido*

Um corpo não-rígido é um corpo deformável, ou seja, é um corpo cuja distância entre dois dos seus pontos pode variar durante o seu movimento, permitindo deste modo que a forma do corpo possa variar consoante o movimento. No entanto, quando se está a analisar os dados de *backscattering* do movimento de um corpo não-rígido, este pode ser modelado como um conjunto de conexões de segmentos rígidos, o que leva a que o movimento de um corpo não-rígido possa ser representado como o movimento de múltiplos corpos rígidos [10].

Tal como o movimento do corpo humano, também o movimento do corpo dos animais é exemplo de movimento de corpo não-rígido. Porém, quando comparamos o movimento de um bípede com o movimento de um animal quadrúpede, este tem mais opções para os movimentos das suas patas “batendo” no solo [10].

Para se obter uma imagem explícita de radar de um alvo com movimento, deve-se remover o movimento translacional e a componente de movimento oscilatório, de modo a reduzir nestas imagens distribuições reduzidas de Doppler [10].

Uma assinatura de micro-Doppler é, na verdade, a integração de um conjunto de assinaturas de Doppler de segmentos corporais durante um determinado tempo de observação. Ao contrário dos dados cinemáticos capturados pelos sensores de movimentos, os dados históricos do Doppler por radar apenas transportam informação da velocidade radial. Portanto, a partir das assinaturas de micro-Doppler, a animação do modelo do movimento do corpo não pode ser reconstruído. Contudo, as assinaturas de micro-Doppler de radar transportam características distintas dos movimentos do corpo, permitindo ser possível classificar e identificar os corpos e os seus movimentos com base nessas assinaturas [10].

As assinaturas da marcha humana usando sinais de micro-Doppler por radar têm sido matéria de investigação desde a década de 90 [10, 14, 54]. Porém, no que diz respeito a assinaturas de micro-Doppler por radar de animais quadrúpedes, não existem muitos trabalhos publicados [10].

Durante a última década as assinaturas de alvos, usando análise de micro-Doppler dos sinais de radar, tem sido tema de estudos a partir de análises teóricas [10, 14, 16, 27, 51, 54, 55]. As assinaturas de micro-Doppler são representadas no domínio conjunto do tempo e da frequência, o que permite fornecer uma dimensão adicional, para explorar as características de micro-Doppler variáveis no tempo. Estas características exibem a cinemática do movimento de um alvo, permitindo obter uma identificação única desse movimento. Ao analisar cuidadosamente os vários atributos numa assinatura, poderão ser extraídas as informações da cinemática do alvo e estas são a base para descrever o movimento e caracterizar a atividade do alvo [10].

2.5 Cinemática do Movimento do Corpo Humano

A cinemática é a parte da mecânica que descreve o movimento, determinando a posição, a velocidade e a aceleração de um corpo em cada instante [56].

No estudo da cinemática do movimento humano, as dimensões mais importantes são os comprimentos dos segmentos do corpo entre articulações. Contudo, estas dimensões variam de indivíduo para indivíduo. Varia consoante a forma do corpo, o género ou a sua origem racial. Porém, em estudos mais generalistas do movimento humano, ter valores médios para o comprimento desses segmentos é bastante útil para a compreensão das tendências durante o movimento. Na Figura 2-5 é apresentado um esquema que representa o corpo humano, no qual é indicado o comprimento médio dos referidos segmentos, essas medidas são indicadas em função da altura H do corpo. O conhecimento da medida do comprimento destes segmentos é fundamental para a análise cinemática [56].

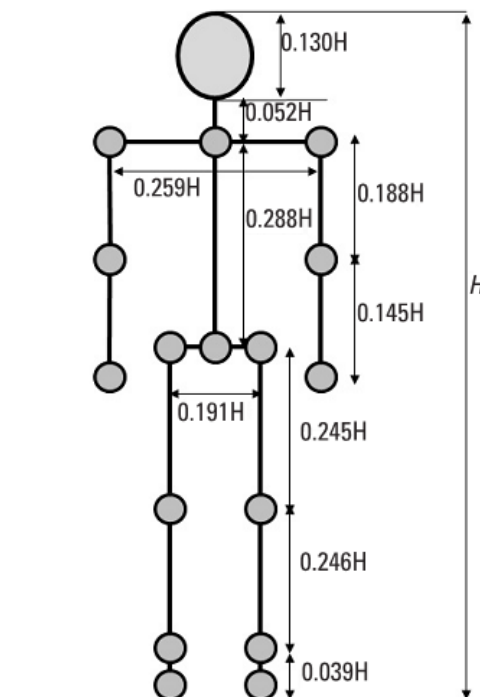


Figura 2-5 - Comprimentos dos segmentos do corpo humano como uma função da altura H do corpo (extraído de [10]).

A cinemática do movimento do corpo humano é normalmente designada como um movimento genérico, isto é, que pode ser dividida em linear (translacional) e angular (rotacional). O movimento de translação considera que todo o corpo se move de forma única, sem a existência de movimento relativo de rotação entre segmentos anatómicos. Se ocorrer ao longo de um segmento reto, designa-se como retilíneo, caso contrário, como curvilíneo. O movimento de rotação ocorre quando existe por parte de um ou mais segmentos do corpo, uma rotação em torno de um eixo instantâneo de rotação, normalmente situado num centro articular.

O movimento do corpo humano trata-se de uma locomoção articulada. Uma locomoção ou movimento articulado é o movimento articular, que descreve o movimento dos segmentos anatómicos, que ocorrem nas articulações. Tanto o movimento dos membros, como todo o movimento inerente à marcha humana, podem ser caracterizados como sendo movimentos periódicos, coordenados conjuntamente pelo cérebro, músculos, nervos, articulações e ossos [10, 57].

A marcha é o principal meio mecânico de locomoção do ser humano. A locomoção permite a translação do homem no espaço. A marcha é um exemplo típico de movimento articulado humano, que pode ser visto como um movimento cíclico, composto por duas fases: a fase de apoio e a fase de oscilação ou balanço. A fase de apoio ocupa aproximadamente 60% deste ciclo. É o tempo em que o membro inferior estabelece uma cadeia cinemática fechada, ou seja, o pé está em contacto com o solo. O resto do ciclo é ocupado pela fase de balanço, e corresponde ao tempo em que o pé está no ar, considerando-se este segmento como uma cadeia cinemática aberta, onde a perna em balanço se prepara para o passo seguinte, existindo uma aceleração seguida de uma desaceleração. Assim, a marcha humana é caracterizada como sendo um movimento periódico, em que alternadamente, cada pé avança de uma posição de apoio para a próxima posição de apoio, e simultaneamente balançando as pernas e os braços, ao mesmo tempo que o centro de gravidade do corpo se move para cima e para baixo, sendo estes movimentos também periódicos. Tendo a marcha humana um modelo comum, cada indivíduo tem na sua marcha características distintas, é por este motivo que é possível reconhecer uma pessoa a uma dada distância apenas a partir do seu estilo de marcha. Outro aspeto que pode ser observado apenas a partir da marcha humana é o

estado emocional. Por exemplo, a marcha de um indivíduo quando se encontra alegre é diferente da marcha de quando está deprimido, o que permite conseguir detetar um comportamento anómalo por parte de um indivíduo, através da sua “marcha emocional” [10].

Os métodos utilizados para a análise da marcha humana podem partir de uma análise visual, de medições com recurso a sensores, ou a partir de um sistema de cinemática o qual mede deslocamentos, velocidades, acelerações, orientações dos segmentos do corpo e os ângulos das articulações. Os diferentes movimentos humanos, tais como andar, correr, ou saltar, têm diferentes padrões no movimento do corpo e conseqüentemente diferentes assinaturas de micro-Doppler. A recolha destas assinaturas não é sensível à distância, nem às condições de luminosidade ou à complexidade do fundo (que são os principais problemas que afetam os sistemas de sequência de imagens). Recolhidas essas assinaturas podem as mesmas ser utilizadas para estimar a periodicidade da marcha, o período da fase de apoio e da fase de balancear [10].

Os parâmetros cinemáticos essenciais do movimento humano, são os parâmetros que descrevem a posição linear (ou deslocamento), a velocidade linear e a aceleração linear. Para descrever completamente quaisquer movimentos humanos num sistema de coordenadas cartesianas 3D, são os três parâmetros cinemáticos atrás referidos que vão definir o modo como a posição de um qualquer ponto do corpo humano varia ao longo do tempo, e utilizados para compreender as características do movimento de qualquer mudança de posição [10]. Para além dos parâmetros lineares, existem também os parâmetros angulares, que incluem as posições angulares (ou orientações) dos segmentos do corpo, também designados de ângulos dos segmentos.

2.5.1 Descrição do Movimento Periódico da Caminhada Humana

A natureza da caminhada humana incide na sua periodicidade. A Figura 2-6 tem a finalidade de ilustrar um ciclo do movimento humano [10].

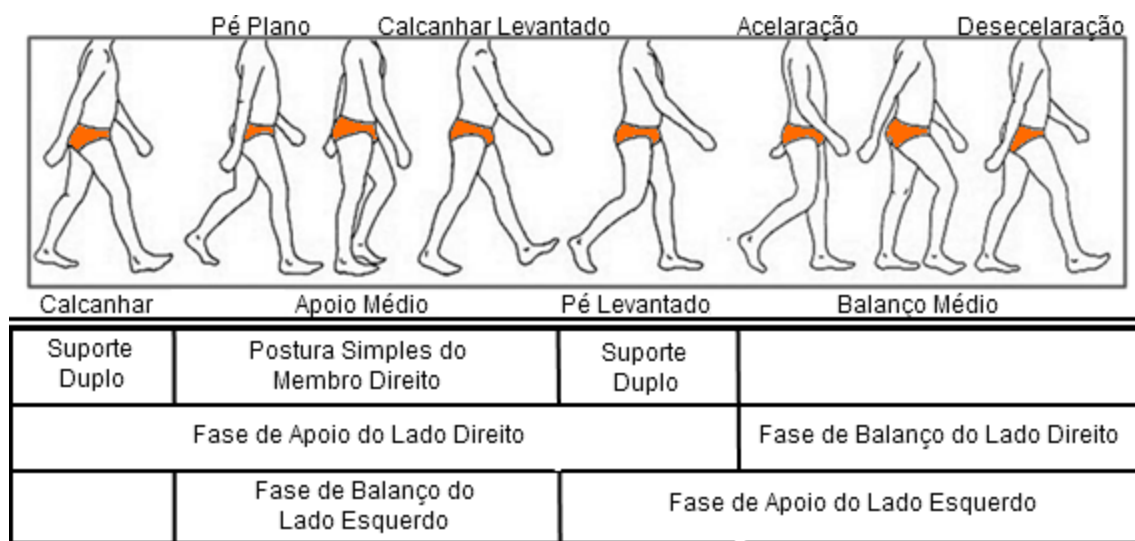


Figura 2-6 - Ciclo do movimento da caminhada humana (extraído de [10]).

Como atrás foi referido a fase de apoio ocupa aproximadamente 60% do ciclo, sendo o resto do ciclo ocupado pela fase de balanço. Na fase de apoio, um pé está em contacto com o solo, sendo que na fase de balanço, este pé é levantado do solo e a perna inicia um movimento de balanço, preparando-se para o passo seguinte. Este movimento cíclico vai-se repetindo durante toda a caminhada realizada pelo ser humano.

A fase de apoio é constituída por três períodos:

- (1) Primeiro apoio duplo, onde ambos os pés estão em contacto com o solo;
- (2) Postura de um único membro, onde apenas um pé está em contato com o solo e o outro está no ar balanceando-se para a frente;
- (3) Segundo apoio duplo, onde ambos os pés tornam a estar novamente em contacto com o solo.

Durante a fase de apoio, ocorrem cinco eventos: calcanhar, pé plano, apoio médio, calcanhar levantado e dedo do pé levantado. O evento calcanhar inicia o ciclo da marcha, e o evento dedo do pé levantado termina a fase de apoio, pois o pé ergue-se do solo.

A fase de balanço não detém nenhum período de suporte duplo, somente um único membro inferior balançando. Contudo, esta fase é formada por três eventos: a aceleração para a frente da perna, o balanço médio quando o pé passa precisamente por

baixo do corpo, e por fim a desaceleração da perna para a estabilização do pé para o próximo impacto do calcanhar com o solo.

2.5.2 Modelação da Secção Transversal Humana

Quando em radar se faz referência a secção transversal humana, essa alusão relaciona-se com o resultado que tem origem no facto de que quando uma onda eletromagnética atinge um objeto, essa onda ser refletida em todas as direções. A energia do sinal emitido é dispersa em todas as direções e a quantidade desta que segue em cada direção depende de alguns fatores, como a forma do objeto em que incide, o tipo de material de que este é composto, a frequência e a polarização do sinal emitido, como também do ângulo de incidência. Fisicamente, o RCS pode ser interpretado como os tempos de ganho da antena da secção transversal efetiva dos alvos e é matematicamente dada pela expressão [58]

$$RCS = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 \quad (2-19)$$

onde E_i é a intensidade no campo incidente no alvo e E_r é a intensidade do campo do campo de dispersão à distância R .

No caso do sonar, o princípio de secção transversal humano é comparável. Pois, quando uma onda mecânica embate num objeto, também existe a sua reflexão e dispersão em todas as direções, sendo a quantidade desta em cada direção, também dependente das características que compõem o objeto, assim como do ângulo com que o sinal incide nesse objeto.

O SCS (*Sonar Cross Section*) humano é difícil de determinar dada a postura do ser humano, o ângulo de incidência da onda, a orientação relativa face ao sonar e a distância deste ao sonar. Estes parâmetros estão constantemente a mudar ao longo da marcha ou de outro qualquer movimento. Acrescentando a estes fatores, há que ter em conta que o tamanho entre humanos também varia e por vezes de forma significativa, desde uma pequena criança a um homem alto. Mas não só a fisionomia do ser humano

em si traz implicações que podem complicar a análise do RCS, o próprio material do seu vestuário pode afetar as propriedades de reflexão e observação do RCS.

Dos estudos existentes que analisam o RCS no humano, referimos alguns. No ano de 2005, Yamada, Tanaka e Nishikawa [59], concluíram que o RCS humano varia consoante a sua orientação, que como seria expectável o índice de reflexão do corpo humano é maior na parte da frente ou na parte de trás do corpo comparativamente com os lados do corpo. Outra importante questão analisada foi o tipo de roupa usada, que também impõe um impacto significativo nos valores de reflexão, como se pode observar na Figura 2-7. Mas não só o tipo de constituição do vestuário influencia os valores do RCS, o facto deste se encontrar enrugado ou não também tem influência. Neste estudo, demonstra-se que uma camisa amassada apresenta um índice de reflexão superior a uma camisa “lisa”, como seria de esperar. Por fim, neste estudo conclui-se que, em geral, os humanos têm RCS baixos, gerando retornos de sinal muito fracos, o que faz dos seres humanos alvos difíceis de detetar [59]. Como é expectável de se concluir, o mesmo acontece no caso do sonar, pois se a área de reflexão é menor, logo os sinais de retorno gerados serão mais fracos e conseqüentemente a deteção também mais difícil.

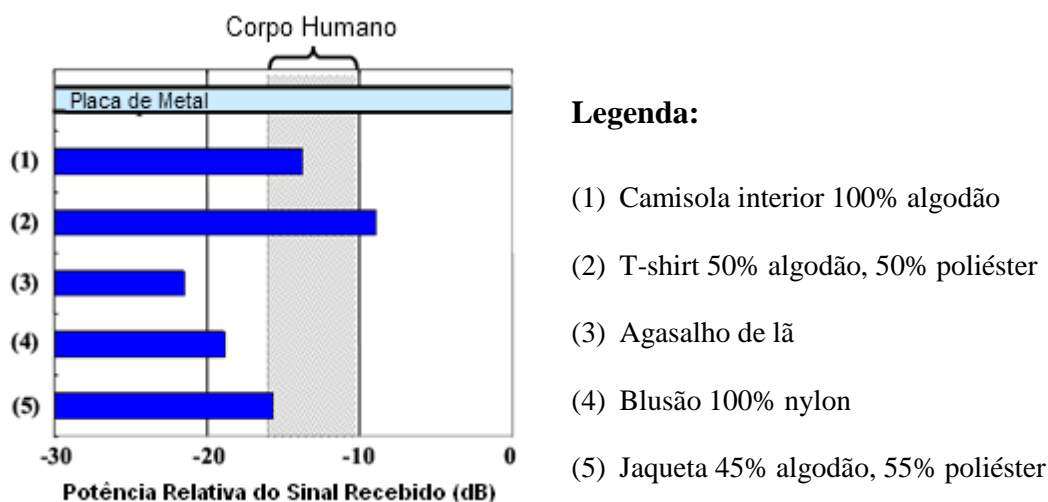


Figura 2-7 - Resultados da medição da intensidade reflexiva das roupas (extraída de [59]).

Em 2007, um grupo de três investigadores da *U.S. Army Research Laboratory* aplica modelos eletromagnéticos computacionais do corpo humano, para realizar

simulações numéricas por computador da assinatura do corpo humano por radar, analisando o RCS humano em diversas configurações de ângulos, frequência e polarização [60]. Apesar de serem simulações, ou seja, que podem fugir à realidade, foram retiradas deste estudo, um conjunto de conclusões:

- O RCS da frente do corpo situa-se entre -10 e 0 dBsm³;
- Quando o ser humano está na posição de “ajoelhado” produz mais variações de RCS com ângulo de azimute comparativamente quando este está na posição de pé, a razão desta diferença deve-se ao facto existir um maior número de centros de dispersão no primeiro caso mencionado;
- Como o tronco é mais ou menos plano, as costas acabam por proporcionar um forte retorno relativo, o que produz um RCS maior quando comparado com as superfícies curvas, mais características das outras partes do corpo;
- A variação angular do RCS torna-se mais rápida com o aumento da frequência de transmissão;
- A média do RCS encontra-se numa faixa estreita dos -4 a 0 dBsm para quase todas as frequências e posições do corpo, possivelmente porque a principal contribuição para o retorno do radar provém do tronco;
- A forma do corpo não tem grande influência sobre a média do RCS.

Até ao presente, a maioria dos estudos nesta área, limitaram-se a usar uma variedade de aproximações probabilísticas. Geisheimer e Marshall em [55], fizeram uma aproximação do RCS de cada parte do corpo, ponderando cada uma de acordo com a sua área percentual da superfície total do corpo. Como é evidente, a refletividade de cada parte do corpo pode mudar, dependendo da densidade, do tamanho, da forma e do ângulo de incidência. Por exemplo, a refletividade da cabeça pode ser significativa quando comparada com a do tronco, apesar da diferença de tamanho. Já Van Dorp e

³ Medida em decibéis da RCS dos alvos por metro quadrado.

Groen em [51], no seu estudo, levaram em conta todos estes mesmos fatores excluindo a densidade. No seu trabalho, descrito em [51], cada parte do corpo humano é dimensionada sob a forma aproximada de uma esfera ou de um cilindro, onde para a obtenção das suas expressões analíticas tem-se em consideração o tamanho da parte do corpo em questão e o ângulo de incidência.

2.5.3 Modelo Humano

Os seres humanos são alvos complicados de analisar através de sonar, devido ao seu complexo movimento originado pelas diferentes partes do corpo, assim como as diferentes trajetórias e diferentes velocidades que o corpo pode tomar. A modelação da cinemática humana é ainda mais difícil de analisar, pois existe uma infinidade de diferentes movimentos humanos, tendo todos eles uma cinemática diferente, tais como correr, andar, saltar, nadar, rastejar, jogar golfe, etc. Mesmo dentro da mesma classe de movimento, como por exemplo andar, só o facto de transportar uma carga ou alterar a trajetória pode alterar a cinemática [10, 61, 62]. No estudo que se apresenta neste documento, é focado aquele que se pode considerar como o movimento humano mais comum, a marcha.

Ao longo dos últimos anos, inúmeras pesquisas têm sido realizadas para analisar e descrever o modelo matemático da marcha humana [10, 51]. O modelo desenvolvido por Boulic, Thalmann e Thalmann [63] (doravante referido como o "modelo Boulic") é usado para determinar o perfil dos alvos em distância. Este modelo foi um dos primeiros modelos de marcha completos, e é relativamente fácil de implementar, tendo sido demonstrado ser aplicável em radar por Van Dorp [51] que comparou medições e modelações de espectrogramas humanos [10].

Os trabalhos de Geisheimer e Van Dorp mostraram que um alvo humano pode ser dividido em partes e a resposta total obtida é a soma das respostas de cada parte do corpo, ou seja, o princípio de sobreposição pode ser aplicado à modelação humana. Assim, o retorno de radar a partir de um alvo humano pode ser modelado matematicamente como

$$s_h(n, t) = \sum_{i=1}^K a_{t,i} \text{rect} \left(\frac{t' - t_{d,i}}{\tau} \right) e^{j[-2\pi f_c t_{d,i} + \pi \gamma (t' - t_{d,i})^2]} \quad (2-20)$$

onde, K é o número de alvos pontuais, ou seja, as partes do corpo que compõem o alvo; o tempo t é definido como $t = T(n - 1) + t'$ em termos do intervalo de repetição do impulso (PRI – *Pulse Repetition Interval*) T , do número de pulsos n e do tempo em relação ao início de cada PRI, t' ; τ é a largura do pulso; c é a velocidade da luz; γ é a *slope* do chirp; f_c a frequência central transmitida; e t_d é o tempo de atraso de ida e volta entre o sistema e o alvo, definido em termos de distância ao alvo, R , como $t_d = \frac{2R}{c}$.

A amplitude $a_{t,i}$ é definida a partir da equação de alcance do radar como

$$a_{t,i} = \frac{G \lambda \sqrt{P_t \sigma_i \sigma_n}}{(4\pi)^{1,5} R_i^2 \sqrt{L_s} \sqrt{L_a} \sqrt{T_{sys}}} \quad (2-21)$$

Onde são incluídos vários fatores que variam de acordo com a distância ao alvo R_i e a sua geometria. Por exemplo, o ganho da antena G varia de acordo com o ângulo de incidência, e as perdas atmosféricas, L_a , variam com a distância. Por simplicidade, assume-se que estes parâmetros são constantes, juntamente com o sinal transmitido de potência P_t , o comprimento de onda λ , as perdas do sistema L_s , a temperatura do sistema T_{sys} , e o desvio padrão do ruído σ_n . A modulação do RCS σ_i , não é uma tarefa trivial e é digna de consideração mais detalhada.

Em sonar, a equação de alcance toma outro aspeto

$$DT = SL - 2TL + TS - (NL - DI) \quad (2-22)$$

onde, DT (*Detection Threshold*) representa o limiar de deteção; SL (*Source Level*) o nível de sinal da fonte; TL (*Transmission Loss*) equivale às variáveis L do radar, ou seja, as perdas de transmissão; a variável TS (*Target Strength*) reproduz o valor representativo da reflexão causada pelo alvo; as variáveis DI (*Directivity Level*) e NL (*Noise Level*) traduzem os valores da diretividade e do ruído, respetivamente. Na seção

2.8, estas variáveis serão melhor explicadas quando se fizer a comparação do sistema sonar com o sistema radar.

2.6 Análise e Processamento de Sinal

As técnicas mais comuns para o processamento do sinal para o problema em análise, no que diz respeito à sua representação, passam por duas alternativas: a representação no domínio do tempo e a representação no domínio da frequência.

A representação temporal do sinal ao longo do tempo, $s(t)$, indica a variação da amplitude do sinal com o tempo; já a representação no domínio da frequência, também mencionada como análise espectral $S(f)$, permite verificar a existência das diferentes componentes de frequência no sinal, bem como obter as magnitudes correspondentes. Estas duas representações relacionam-se através da transformada de Fourier definida por:

$$S(f) = \mathfrak{F}\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (2-23)$$

Contudo, apesar da transformada de Fourier ser o método mais comum para analisar as propriedades da forma de onda de um sinal no domínio da frequência, esta não mostra a distribuição da magnitude e fase da frequência num dado intervalo de tempo. Quando um sinal é refletido por um alvo em movimento, com rotação, o espectro de frequência do sinal pode indicar a presença de modulação micro-Doppler. Este efeito de micro-Doppler é observável no espectro pelos desvios de frequência em relação à frequência central. Havendo ausência da informação do tempo localizado, a transformada de Fourier é incapaz de fornecer a informação da modulação da frequência no tempo variado [16].

Um método mais adequado para analisar espectros de Doppler variáveis no tempo, induzidos por micro movimentos, é a análise no domínio conjunto do tempo-frequência, tendo este uma transformada no tempo e frequência, que fornece a informação da frequência localizada dependente do tempo [10, 15]. Partindo deste conhecimento, foi desenvolvida uma tecnologia baseada em assinaturas bidimensionais de micro-Doppler, no tempo e frequência, para análise das características da modulação micro-Doppler ao longo do tempo e para representar a informação do tempo e de

Doppler [10, 64]. O sinal deve ser analisado por meio de uma transformada de alta resolução no tempo e frequência, a qual permite caracterizar o comportamento temporal e espectral do sinal analisado [10, 16]. Por exemplo, ao examinar a informação de tempo e o sinal do desvio de micro-Doppler causado por um movimento, a direção do movimento num tempo específico pode ser determinada [16].

As transformações de tempo-frequência incluem duas tipologias de transformadas, as transformadas lineares, tais como a *Short-Time Fourier Transform* (STFT) e as transformadas bilineares, tais como a *Wigner-Ville Distribution* (WVD).

2.6.1 Análise conjunta do tempo e frequência

A forma mais intuitiva para realizar a análise de sinais no tempo e na frequência, em simultâneo, é obtida dividindo o sinal em pequenos segmentos e determinar o espectro de cada um desses segmentos através da transformada de Fourier. Esta representação, descrita pela equação (2-24), designada por STFT (*Short-time Fourier Transform*), tem uma função de janela W , deslizante no tempo e de tempo limitado, que tem a finalidade de segmentar o sinal, onde a sua resolução é determinada pelo tamanho desta janela [10, 16, 65].

$$STFT(\tau', f) = \int [x(t) \cdot W(t - \tau')] \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-24)$$

O tipo de janela que se utiliza é relevante para a análise do sinal. Normalmente são utilizadas janelas do tipo gaussianas, de Hamming, de Hanning, de Blackman, de Kaiser, entres outras [65].

Existe uma relação de compromisso entre a resolução no tempo e a resolução em frequência, pois uma janela maior origina uma maior resolução em frequência, mas implica uma resolução mais pobre no tempo, e o contrário também se verifica. Quando se pretende uma maior resolução temporal a janela W tem de ser o mais pequena possível, o que provoca uma diminuição da resolução em frequência [10, 16].

O sinal resultante da STFT é observado através do espectrograma, o qual é definido como o módulo ao quadrado da STFT, como se pode observar pela equação (2-25). Esta é uma ferramenta popular para a análise no tempo-frequência de um sinal [10, 16, 65]. Ou seja, através do espectrograma, o sinal que era representado originalmente apenas numa dimensão, passa a ser representado em duas dimensões: tempo, τ' , e frequência, ω .

O espectrograma, ou qualquer outra representação tempo-frequência quadrática, é tipicamente visualizado como uma imagem, onde a intensidade representa a energia, e os eixos x e y são respetivamente, o tempo e a frequência [10, 65].

$$\text{Espectrograma}(\tau', f) = |\text{STFT}(\tau', f)|^2 \quad (2-25)$$

Quando a janela utilizada é o próprio sinal invertido, estamos na presença da WVD [5] a qual é determinada pela equação (2-26). O recurso à transformada de WVD de um sinal $s(t)$, é definida como a transformada de Fourier da função de auto-correlação no tempo-dependente:

$$\text{WVD}(t, \omega) = \int s\left(t + \frac{\tau'}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau'}{2}\right) e^{-j\omega\tau'} d\tau \quad (2-26)$$

onde, $s(t + \tau'/2)s^*(t - \tau'/2)$ pode ser vista como uma função de auto-correlação no tempo-dependente.

A WVD bilinear consegue melhor resolução no domínio conjunto do tempo-frequência comparativamente com qualquer transformada linear [10, 16]. No entanto sofre de um problema de interferência de *cross-term*, que não representa qualquer informação do sinal, ou seja, a WVD de dois sinais não é a soma das suas WVD individuais [10, 16, 65]. Se um sinal contém mais do que uma componente no domínio conjunto do tempo-frequência, a sua transformada de WVD irá conter termos cruzados [10, 16]. Apesar da sua limitação, a WVD é importante, pois serve de base para outras representações no domínio conjunto do tempo e frequência, e possui diversas propriedades matemáticas importantes, como a que preserva o deslocamento no tempo e em frequência, tendo sempre como resultado valores reais [65].

2.6.2 *Short-time Fourier transform*

Nesta seção ir-se-á aprofundar um pouco mais a STFT, uma vez que foi a transformada utilizada no presente estudo.

O método tradicional de análise do espectro de Doppler consiste na utilização de algoritmos baseados na transformada rápida de Fourier. Tratando-se o sinal de Doppler de um sinal discreto obtido de forma contínua, teoricamente de tamanho infinito, a aplicação de qualquer método de estimação espectral é feita a segmentos do sinal. Dada a natureza não estacionária do sinal, resultante do movimento humano, a aplicação de algoritmos de FFT requer a sua segmentação por aplicação de janelas temporais (recorde-se que se define como sinal estacionário aquele que possui sempre a mesma frequência, ou frequências, ao longo de todo o período de tempo para o qual for definido). Atendendo às características não estacionárias do sinal Doppler, as janelas temporais a aplicar devem ter uma curta duração, de modo a não atenuar a não estacionariedade no segmento do sinal em análise. Outra característica relevante é o recurso a janelas deslizantes com o objetivo de aumentar a resolução temporal dos estimadores espectrais e diminuir a variância das estimativas. O mecanismo que vai ao encontro destas necessidades toma a designação de transformada de Fourier no tempo-curto (*Short-time Fourier Transform*). Porém, a aplicação das janelas temporais, seguida da aplicação de transformadas de Fourier, induz componentes de frequência não integrantes do sinal original, as quais alterarão a estimação da frequência média e largura de banda do espectro [67].

A FFT é um eficiente algoritmo computacional, publicado em 1965 por Colley e Tukey, que reduz a complexidade algorítmica do cálculo da transformada de Fourier discreta (DFT – *Discrete Fourier Transform*). Por sua vez a DFT é uma transformada que decompõe uma sequência de valores em componentes de diferentes frequências, sendo esta operação útil em diversos campos, mas a aplicação computacional direta da sua definição torna muitas vezes esta operação demasiado lenta, daí o recurso à FFT. Devido a DFT ter uma abrangente aplicabilidade nos mais variados ramos da ciência, a implementação da FFT encontra-se extensivamente estudada, fazendo frequentemente

parte das bibliotecas de funções fornecidas pelos fabricantes de *hardware* ou *software* de processamento de sinal.

A transformada de Fourier veio mostrar que qualquer função periódica pode ser representada como uma soma infinita de funções exponenciais complexas periódicas, sendo por isso atualmente utilizada em inúmeras aplicações de processamento de sinais. Com o recurso à transformada de Fourier, uma função que esteja no domínio do tempo, passa a estar representada no domínio da frequência, no qual o seu conteúdo é mais facilmente analisado. Esta passagem de domínios ocorre porque após aplicar a transformada, a função original fica na forma de funções de seno e cosseno de duração infinita.

Seja $x(t)$ uma função contínua de variável real t , a sua transformada de Fourier, designada por $\mathfrak{F}\{x(t)\}$, fica definida pela equação [68]:

$$X(f) = \mathfrak{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-27)$$

ou seja, o produto interno entre o sinal $x(t)$ e um conjunto de exponenciais complexas, que constituem uma base ortonormada. Na equação (2-27), t representa o tempo e f representa a frequência. Tendo $X(f)$, $x(t)$ pode ser obtido usando a transformada inversa de Fourier, definida por:

$$x(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{X(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad (2-28)$$

Estas duas últimas equações são válidas se a função $x(t)$ for contínua e integrável e se por sua vez $X(f)$ for integrável. Na transformada de Fourier o x representa o sinal no domínio do tempo e na transformada inversa de Fourier o X representa o sinal no domínio da frequência.

Para uma sequência de duração finita, é possível desenvolver uma representação alternativa da transformada de Fourier, designada por transformada discreta de Fourier:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(n) e^{-j2\pi k/N}, n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2-29)$$

A passagem de um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência através da FT, é computacionalmente bastante exigente, sendo portanto esta mudança de domínio realizada pela DFT, com recurso ao algoritmo da FFT. Sendo a DFT para sinais finitos no tempo, uma representação de Fourier completa do sinal [68, 69].

As funções de seno e cosseno são funções infinitas e bem adaptadas para a análise de sinais estacionários (sinais cujo conteúdo da frequência não varia no tempo). Contudo, não são apropriadas para a análise de sinais não-estacionários (transientes), isto é, sinais cuja resposta em frequência varia no tempo. Nenhuma informação de frequência está disponível no domínio temporal do sinal, nem qualquer informação de tempo está disponível no domínio da frequência. A transformada de Fourier possui resolução máxima em frequência mas nenhuma resolução no tempo, isto significa que é possível determinar todas as frequências existentes num sinal, mas não se consegue determinar quando é que estas estão presentes. Deparando com este problema, e tomando em consideração o que já fora mencionado no início deste subcapítulo, surge também aqui a STFT como solução. Esta transformada possibilita todo um mecanismo para se obter uma melhor localização no tempo e frequência na decomposição de um sinal [70, 71].

Como já referido para a equação (2-24), a STFT de um sinal $x(t)$ permite a análise de um sinal no domínio do tempo e frequência e é definida por:

$$STFT(\tau', f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot W(t - \tau')] \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (2-30)$$

onde $x(t)$ é o sinal e $W(t - \tau')$ é a função da janela temporal centrada em τ' .

Em análise de sinais, existem várias escolhas possíveis para a função da janela temporal $W(t)$, sendo as que melhor se adaptam aquelas que possuem um suporte compacto e regularidade razoável. No caso particular de a janela utilizada ser a Gaussiana, a STFT resultante é também conhecida como transformada de Gabor. Os deslocamentos feitos pela janela temporal na STFT servem de base para a transformada.

Quando se observam num sinal frequências baixas é necessário uma longa observação no tempo, ao invés, quando se observam frequências altas apenas é preciso uma curta observação no tempo. O princípio da incerteza de Heisenberg, da física quântica, estabelece que não se pode obter a informação exata da frequência de um sinal e o instante/local exato no tempo/espaço onde essa frequência ocorreu. O que se pode saber é o intervalo de tempo em que determinadas bandas de frequência existem. Considerando o atrás referido, não é possível obter simultaneamente alta resolução no tempo e na frequência, por outras palavras, não se pode representar um sinal como um ponto no espaço tempo-frequência.

Outra característica da STFT é que a janela temporal aplicada é a mesma para todas as frequências, o que faz com que a resolução obtida na análise do sinal seja também a mesma em todas as localizações de tempo-frequência. Posto isto, será importante fazer uma breve comparação com a transformada de Wavelet, que não tem este problema, sendo esta a principal vantagem face à STFT. A janela temporal da Wavelet varia com a frequência, e deste modo, obtêm-se funções base curtas para as frequências altas e funções base longas para as frequências baixas. A Figura 2-8 tenta ilustrar um diagrama no domínio conjunto do tempo-frequência, para as funções de Fourier e de Wavelet [72].

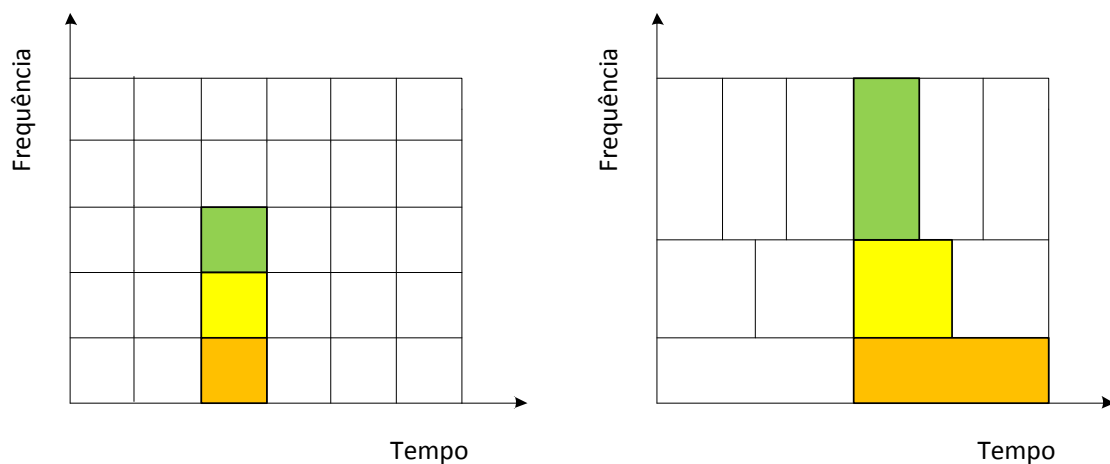


Figura 2-8 - Diagramas do domínio tempo-frequência. À esquerda a representação por funções de Fourier e à direita a representação por Wavelets.

Como é possível observar na Figura 2-8 à direita, as baixas frequências possuem a altura dos retângulos mais baixas, que corresponde a uma melhor resolução em frequência, porém o comprimento destes é maior, o que corresponde a uma pobre resolução no tempo, para as frequências altas ocorre o oposto. Este facto é importante para a análise de sinais, uma vez que geralmente são as componentes de frequência baixa que caracterizam o comportamento de um dado sinal, enquanto as componentes de frequência alta, fornecem os detalhes desse mesmo sinal.

Tendo em conta estes fatores, pode questionar-se o porquê de usar a STFT em vez de usar Wavelets, se aparentemente esta última, parece ser mais vantajosa, no entanto devemos referir que a aplicação da STFT tem facilidade computacional.

Computacionalmente não é possível calcular valores para uma variável contínua, e tal como a transformada de Fourier pode ser amostrada na frequência também a STFT o pode ser, assim como também só é possível calcular computacionalmente a STFT para sinais finitos.

Dado um sinal com N amostras, e uma janela $\omega[m]$ com L amostras definida para o intervalo $0 \leq m \leq L - 1$, sendo $N \geq L$, a STFT discreta desse sinal é dada por

$$X[n, \omega] = X\left[n, \frac{2\pi k}{L}\right] = \sum_{m=0}^{L-1} x[n+m]\omega[m]e^{-j\left(\frac{2\pi}{L}\right)km}, k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2-31)$$

onde $\omega[n]$ representa a janela e $x[n]$ o sinal.

2.6.3 Análise de Espectrogramas de Humanos

Será importante descrever alguns pontos sobre a análise de espectrogramas humanos, que serão úteis para a compreensão de toda a conceção do presente estudo. O espectrograma gerado pelo sinal de retorno de um alvo humano, pode ser calculado pelo empilhamento de FFT de tempo curto. O trabalho de Van Dorp [51, 73] mostra que os espectrogramas simulados baseados no modelo Boulic aproximam-se dos medidos experimentalmente, validando assim o modelo cinemático.

É possível realizar uma análise visual do espectrograma construído a partir do sinal de retorno do ser humano. O retorno mais forte tem origem no tronco, com pequenos desvios de frequência, ou seja, um movimento oscilatório de pequena amplitude sinusoidal, tendo uma forma particular de dente de serra, relacionando-se esta com o facto de o corpo ter no seu ciclo de marcha um período de aceleração e outro de desaceleração. Os membros do corpo geram oscilações maiores, e por conseguinte maiores desvios de frequência, essas oscilações são bem detetáveis no espectrograma, pela sua maior amplitude devida à sua maior velocidade. Se o movimento dos membros superiores estiver sincronizado com o movimento dos membros inferiores, as oscilações geradas por ambos irão aparecer sobrepostas. O aspeto da forma da oscilação gerada por cada conjunto de membros, superiores e inferiores, depende da sua velocidade de movimento, quanto mais rápido maior a amplitude da oscilação, mas também se a sua velocidade é constante, gerando oscilações com a forma de sinusoides, ou se não é constante, podendo gerar oscilações com diversas formas, como por exemplo ondas triangulares. A amplitude que cada membro tem no seu movimento também é importante, pois influenciará a duração do período.

Por exemplo, o retorno dos membros superiores, se estes tiverem uma velocidade constante durante o movimento do ser humano, corresponderá a duas sinusoides desfasadas. Por norma numa caminhada normal, os membros superiores geram sinais com amplitudes menores que os membros inferiores, isto porque quando um ser humano caminha os seus braços têm movimentos curtos, constantes e lentos.

É de notar que a natureza da periodicidade no espectrograma humano é o que torna esta resposta única e diferenciável de outros espectrogramas, até mesmo de outros animais, como pode ser observado a partir dos espectrogramas medidos do ser humano e do cão por Otero em [52].

2.7 Análise ao sinal de *backscattering*

O sinal de eco proveniente do alvo é um sinal que tem associado um tempo de atraso e a frequência deslocada face ao sinal transmitido. Esse sinal de retorno para um ponto do alvo pode ser expresso por equação semelhante à equação (2-20):

$$s_r(n, t) = a_t \text{rect} \left(\frac{t' - t_d}{\tau'} \right) e^{j[-2\pi f_c t_d + \pi \gamma (t' - t_d)^2]} \quad (2-32)$$

Como é expectável o sinal medido pelo radar não é composto apenas pelo retorno do alvo, mas também por outras fontes de interferência, tais como o ruído inserido pelo recetor e as reflexões provocadas por objetos presentes no meio envolvente que se encontrem dentro do *footprint* do radar (*clutter*). Tendo em consideração o atrás referido, podemos representar matematicamente o sinal recebido pela seguinte soma

$$x_r = s_r + x_c + x_n \quad (2-33)$$

onde x_r representa o sinal recebido, s_r o sinal de retorno do alvo, x_c o sinal de *clutter* e x_n o ruído. O ruído é modelado como tendo uma distribuição Gaussiana.

2.7.1 Análise do *backscattering* de um humano em movimento

Como atrás foi referido, o movimento humano é um movimento típico de um corpo não-rígido. Embora o corpo humano seja composto por um número de componentes rígidos, ligados entre si pelas articulações, todo o movimento do corpo é um movimento de um corpo não-rígido, devido à sua complexa articulação e flexibilidade [8, 27]. O caminhar humano é um exemplo típico de um movimento de corpo não-rígido.

A análise do movimento humano por radar tem sido objeto de investigação nos últimos anos, dado que o radar tem a vantagem de ser capaz de detetar e identificar o ser humano à distância e em quaisquer condições atmosféricas, tanto de dia como de noite

[8, 27]. A assinatura micro-Doppler de radar de uma pessoa caminhando foi estudada pela primeira vez no final dos anos 90 [8, 14, 27].

O estudo da biomecânica proporciona uma abordagem para desenvolver um modelo da marcha humana [10, 63]. Esta abordagem apresenta o movimento da marcha humana com trajetórias do corpo no tempo-dependente. Neste modelo, a dinâmica do corpo humano é descrita como uma função do tempo relativo, descrito por 12 trajetórias, das quais três são de translação e nove de rotação. Essas trajetórias são usadas para calcular a localização de uma série de pontos referência do corpo humano naturalmente selecionados, tais como a cabeça, o pescoço, a base da coluna vertebral, os ombros, os cotovelos, as mãos, os quadris, os joelhos, os tornozelos e os dedos dos pés. O sistema de coordenadas ($x - y - z$) deste modelo de movimento humano é definido como mostra a Figura 2-9, onde na base da coluna está situada a origem, quando não ocorre qualquer movimento de translação.

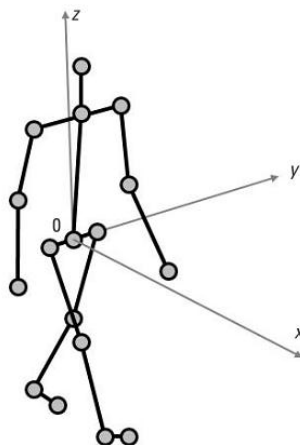


Figura 2-9 - Pontos referência do corpo humano (extraído de [10]).

No princípio básico das trajetórias, cada ângulo da trajetória é redefinido pelos ângulos *yaw* (φ), *pitch* (θ) e *roll* (ψ), sendo as localizações dos pontos referência calculadas utilizando a matriz de transformação dada em [63].

Na determinação do RCS do corpo humano, a localização e a energia dos centros de dispersão são críticos de se obterem. O *backscattering* do sinal de radar a partir de um movimento de uma fração do corpo humano é calculado pela combinação dos RCS das frações individuais do corpo, por simplicidade, modelado por qualquer

ponto isotrópico dispersor distribuído ao longo das várias partes do corpo (modelo ponto-dispersor) ou por simples partes modeladas [27].

Uma assinatura de Doppler (por exemplo, de um humano a caminhar) pode ser derivada tendo a transformada no domínio conjunto do tempo e frequência, para extrair perfis do sinal de *backscattered*. Tomando o exemplo da marcha humana, a partir da assinatura tempo-frequência, cada balanço da perna para a frente é representado como um grande pico, e a oscilação perna-esquerda / perna-direita, completa um ciclo de marcha. O movimento do corpo que é a componente mais forte por debaixo das oscilações das pernas, tem uma forma ligeiramente semelhante ao dente de serra, pois o corpo acelera e desacelera durante o movimento da sua marcha [10, 16, 63].

As trajetórias do movimento das diferentes partes num corpo rígido são similares, porém num corpo não-rígido são bastante diferentes [63].

2.7.2 *Clutter*

Define-se *clutter* como todo o retorno do sinal indesejado. Por exemplo, consideremos o estudo presente neste trabalho, no qual se pretende detetar e analisar o movimento de humanos, ou seja, são procuradas provas da existência de pessoas na área de observação. No entanto existe retorno de sinal de por exemplo: mesas, móveis, solo, paredes, etc., ou seja, qualquer objeto que não seja um ser humano na área em análise. As reflexões provocadas pelos objetos presentes na área de observação são somadas formando o retorno do *clutter*, concluindo-se assim que a natureza do *clutter* varia dependendo da aplicação e especificações que se pretendem. O tipo de cenário em que o sistema está a trabalhar, se está em ambiente *indoor* ou *outdoor*, se é um espaço aberto ou com inúmeros obstáculos, se o sistema opera a partir de uma plataforma aérea, sob o mar ou até mesmo fixo em terra, como no nosso caso, são todo um conjunto de fatores, entre outros, que afetam as características e a modulação do *clutter*.

Se for assumido que o cenário é homogéneo e composto por um número elevado de pontos de reflexão, e tendo em consideração o Teorema do Limite Central, poder-se-á modelar a soma de todo o *clutter* como uma variável aleatória gaussiana, em

que devido à suposição de homogeneidade, o desvio padrão da Gaussiana (σ_c) será constante [10].

Para que se possa detetar e monitorizar o movimento humano com maior eficiência, estes sinais de *clutter* do fundo do cenário têm de ser suprimidos. A supressão do *clutter*, recorre a propriedades estatísticas dos retornos de sinal dos objetos estacionários, que normalmente se situam perto de zero na frequência de Doppler e ocupam uma pequena largura de banda no espectro. Os retornos com origem no corpo humano que “carregam” a informação do movimento humano têm um *offset* da velocidade zero devido à sua velocidade radial. A aplicação de um filtro rejeita-banda com um entalhe em torno da velocidade zero consegue rejeitar boa parte do lixo, sem afetar o sinal do movimento humano, desde que a velocidade média dos micro-movimentos seja maior do que a largura do entalhe a aplicar. Mas a eficiência desta supressão do *clutter* depende, por um lado da profundidade do entalhe e da banda relativa do entalhe, por outro lado da proporção do *clutter*. Contudo, nada garante que isto solucione significativamente o problema, pois se tivermos um forte *clutter*, mesmo após esta filtragem, o resíduo que fica pode ainda assim ser suficiente para provocar uma distorção significativa na frequência de Doppler do movimento humano. Após os dados serem recolhidos já com o *clutter* suprimido, podemos por fim derivar a assinatura de micro-Doppler no tempo e frequência do ser humano em movimento [8, 27].

2.8 Comparação entre Sistema Radar e Sistema Sonar

Embora os dois sistemas tenham diferentes tipos de ondas de transmissão, o radar e o sonar são sistemas de observação remota com importantes aplicações militares, científicas e comerciais. O radar transmite ondas eletromagnéticas que viajam à velocidade da luz e se propagam mesmo no vácuo, enquanto o sonar ativo transmite ondas mecânicas que necessitam de um meio para se propagarem, e a sua velocidade depende inteiramente da densidade média desse meio.

Em ambos os sistemas, as ondas emitidas podem ser refletidas regressando sob a forma de eco, após iluminarem uma determinada área. Estes ecos permitem a determinação de importantes propriedades e atributos dos alvos iluminados, como a sua forma, o tamanho, a velocidade a que se desloca e direção do deslocamento, etc.

O meio onde usualmente são aplicados estes dois sistemas, também difere devido ao tipo de onda utilizada por cada um. As ondas eletromagnéticas são fortemente atenuadas no meio aquático, sendo por isso o radar utilizado principalmente em observações terrestres ou atmosféricas. Os sinais transmitidos pelo sonar penetram facilmente na água, são assim os mais apropriados para serem utilizados na navegação e medição debaixo de água.

A propagação eletromagnética através da água é muito diferente da propagação através do ar, devida a alta permissividade da água e a sua condutividade elétrica. Em virtude dessas características, a atenuação da onda plana no meio aquático é mais elevada do que no ar e aumenta rapidamente com o aumento da frequência. A água tem a mais elevada permissividade quando comparada com qualquer outro material, tem uma permissividade relativa de 80, o que provoca um impacto significativo no ângulo de refração na passagem entre os meios água - ar. A condutividade da água do mar tem um valor típico aproximado de $4 S/m$, já na água doce é bastante variável, sendo que por norma o seu valor é inferior $1 S/m$, podemos assim concluir que a atenuação na água doce é muito menor que na água do mar, apesar de ambos os meios terem uma permissividade semelhante, de cerca de 1, o que implica que exista pouco efeito direto sobre o comportamento do campo magnético [6].

Acima dos 10kHz , a propagação eletromagnética é cem vezes mais rápida do que a acústica, trazendo vantagens importantes para o comando da latência e dos protocolos de rede, onde muitos sinais têm de ser trocados. Sabendo ainda que o efeito de Doppler é inversamente proporcional à velocidade de propagação, então, o efeito de Doppler é muito menor para sinais eletromagnéticos [6].

Independentemente da aplicação para a qual os sistemas foram desenvolvidos, tanto os alvos de radar como de sonar dispersam, desviam e refletem as ondas que neles embatem. Esta dispersão não é uniforme, e na maioria dos casos um forte eco é propagado de volta para o transmissor do sinal tal como um espelho liso pode refletir na direção especular a luz, ou seja, o ângulo que a onda incidente faz na superfície refletora é o mesmo que a onde refletida tem, face à normal de propagação. A intensidade do sinal de retorno é também uma característica dependente do alvo e do ambiente no qual o sistema está inserido. Partindo da medição do tempo que o sinal demora a propagar-se até ao alvo, e o seu sinal de eco a retornar ao sistema, ambos os sistemas de radar e sonar, são capazes de determinar com precisão a distância aos alvos [6].

Dentro dos respetivos domínios, tanto o radar como o sonar podem operar de forma fiável numa ampla variedade de condições adversas, e para além da capacidade sensorial humana [6].

2.8.1 Equações dos Sistemas

As equações dos dois sistemas têm uma aparência diferente mas, para que possam ser produtos de parâmetros comparáveis, a equação (2-36) é expressa em decibel. O ponto de comparação entre parâmetros dos dois sistemas pode ser encontrado quando estes, os parâmetros, são agrupados de acordo com a decomposição tradicional, ou seja, fonte do sinal, o meio e o recetor. É de realçar que se estão a considerar sistema monostáticos, de modo que o ganho de transmissão e receção são idênticos [75].

A equação de alcance do radar pode ser expressa por [75]

$$R_{max}^4 = \frac{E_t G A \rho_a \sigma n E_i(n)}{(4\pi)^2 k T_s \left(\frac{E}{N_0}\right)_1 L_s} = \frac{E_t G^2 \lambda^2 \sigma n E_i(n)}{(4\pi)^3 k T_s \left(\frac{E}{N_0}\right)_1 L_s} \quad (2-34)$$

Voltamos a referir que se assume tratar-se dum sistema monostático, portanto considera-se que o ganho G na transmissão é igual ao da receção. Assim sendo, esta equação também pode ser expressa sob forma logarítmica, ou seja, em dB, ficando da seguinte forma:

$$40 \log R_{max} = 10 \log E_t + 2 \times G[dB] + 20 \log \lambda + \sigma[dBsm] + 10 \log n + 10 \log E_i(n) - 30 \log 4\pi - 10 \log k \left[\frac{dBW}{Hz} \circ K\right] - 10 \log T_s [dB \circ K] - L_s[dB]. \quad (2-35)$$

No caso do sistema sonar ativo, a equação correspondente é muitas vezes indicada como [75]

$$DT = SL - 2TL + TS - NL + DI \quad (2-36)$$

que é a equação para sonar ativo para o caso de ruído limitado. As variáveis de ambas as equações de alcance estão descritas na Tabela 2-1, pretendendo-se com esta tabela comparar os diversos parâmetros das equações (2-34) e (2-36).

Tabela 2-1 - Comparação das equações de Sonar e Radar

	Sonar (equação (2-36))	Radar (equação (2-35))
Sinal Transmitido	$SL = 170.8 + 10 \log P_t \text{ (dB)}$ <p><i>SL</i> – Source Level <i>P_t</i> – Power (watt)</p>	$E_t = 10 \log(P_t \tau) \text{ (dB)}$ <p><i>E_t</i> – Energia do pulso transmitido <i>P_t</i> – Power (watt) <i>τ</i> – Comprimento do pulso (s)</p>
Ganho da Antena	$DI = 10 \log \frac{2L}{\lambda} \text{ (dB)}$ <p><i>L</i> – Comprimento da matriz (m) <i>λ</i> – Comprimento da onda (m)</p>	$G = 10 \log \left(\frac{4\pi\rho_a A}{\lambda^2} \right) \text{ (dB)}$ <p><i>G</i> – Ganho da antena <i>A</i> – Abertura da antena <i>ρ_a</i> – Eficiência da antena <i>λ</i> – Comprimento da onda (m)</p>
Características de Detecção	$DT = 10 \log \frac{S}{N_0} \text{ (dB)}$ <p><i>DT</i> – Limiar de deteção $\frac{S}{N_0}$ – Relação de energia sinal-ruído</p>	$\left(\frac{E}{N_0} \right)_1 = \frac{S}{N}$ <p>$\frac{E}{N_0}$ – Relação de energia sinal-ruído <i>E_i(n)</i> – Eficiência de integração <i>n</i> – Número de acessos integrados</p>
Ruído	$NL = AN + SN \text{ (dB)}$ <p><i>NL</i> – Nível de ruído <i>AN</i> – Ruído ambiente <i>SN</i> – Ruído próprio</p>	$T_s = 10 \log(T_0(F - 1)) \text{ (dB)}$ <p><i>T_s</i> – Temp. de ruído do sistema <i>T₀</i> – Temp. padrão (290° K) <i>F</i> – Figura de ruído</p>
Outros	-----	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Watt/Hz}^\circ\text{K}$ <p><i>L_s</i> – Outras perdas do sistema <i>k</i> – Constante de Boltzmann</p>

A partir da Tabela 2-1 podemos afirmar que em ambos os sistemas, o ganho da antena depende da abertura do sensor e do comprimento de onda, sendo este último dependente da frequência f do sinal

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (2-37)$$

onde C representa a velocidade da onda em m/s . O ganho da antena de transmissão do sonar é normalmente tratado como parte de SL , explicando a diferente energia de λ . As relações sinal-ruído descrevem a situação para o alcance onde apenas um sinal pode ser detetado. Para modelar o desempenho do sensor, é mais conveniente exprimir a relação sinal-ruído em termos da probabilidade de deteção $p(D)$ e da probabilidade de falso alarme $p(FA)$ [75]:

$$(S/N_0) = \frac{d}{2\tau} \quad (2-38)$$

para um pulso com comprimento τ , em segundos e sendo d a característica de operação de receção (ROC – *receiving operating characteristic*) calculada de acordo com [75]

$$d = \left[\frac{\ln(p(FA))}{\ln(p(D))} - 1 \right]^2 \quad (2-39)$$

Uma das principais diferenças entre o radar e o sonar pode ser encontrada a nível do ruído. O desempenho do sonar está muito dependente do ruído ambiente, que é uma característica imposta pelo meio envolvente, já no radar o ruído é parte do sistema do sensor e coloca muito menos constrangimentos, sendo também o *clutter* uma fonte de interferência no sinal muito importante. Por formar a harmonizar a situação, todo o ruído pode ser tratado como um parâmetro do sistema. Para o ruído ambiente, esta harmonização é um pouco aleatória, por definição o parâmetro é quantificado como medido no recetor [75].

Como já foi referido, um sinal quando se propaga através de um meio, pode ser mais ou menos influenciado por esse meio. No caso particular dos sinais de sonar, estes

são fortemente afetados pelo ambiente onde se propagam. A Tabela 2-2 mostra a perda de propagação sonar (TL) que é válida para o espalhamento esférico com atenuação devida à absorção (este tópico será aprofundado no subcapítulo 2.9.1). A atenuação é dependente da frequência e muitas vezes é negligenciada para baixas frequências, tanto para sistemas de radar como de sonar.

Tabela 2-2 - Perda de propagação.

	Sonar	Radar
Perdas por Propagação	$2TL = 2(20 \log R + \alpha_{abs} R) \text{ (dB)}$ TL – Perda de transmissão α_{abs} – Absorção ($\text{dB m}^{-1} \text{ kHz}^{-1}$)	R^4 – Distância (m)

Na equação (2-34), relativa ao radar, a consequente perda de R^4 deve-se essencialmente às mesmas causas que no sonar. A perda de propagação da Tabela 2-2 é válida para os casos mais simples, pois em ambientes mais complexos os sinais podem ser refratados, refletidos, ..., podendo ainda existir uma série de atenuantes. Nesses ambientes mais complexos é comum calcular as suas perdas com um modelo de propagação [75, 76].

2.9 Propriedades da Propagação de Ondas Mecânicas

Considerando que este estudo tem como tema básico a utilização de ondas mecânicas, com o recurso à tecnologia sonar, será de todo relevante abordar as propriedades de propagação deste tipo de sinal, assim como as suas principais atenuantes e a influência que o meio envolvente provoca.

Em física uma onda sonora é definida como sendo uma onda mecânica, pois é necessário a existência de um meio material para se propagar, diferindo nesta característica da onda eletromagnética (por exemplo a luz ou uma onda rádio) que se propaga no vácuo. Devido à causa que está na origem duma onda sonora, esta pode ser igualmente designada como sendo uma onda de pressão, ou seja, é uma onda que se propaga a partir de variações de pressão do meio. Por exemplo, ao ser excitada a membrana de um transdutor, a sua vibração traduz-se alternadamente por compressões e expansões do ar que o envolve, produzindo variações de pressão que se propagam através do meio em que o transdutor está inserido.

Uma onda sonora é também considerada, caso o seu meio de propagação seja o ar ou a água, uma onda longitudinal, ou seja, esta distribui a sua energia no espaço provocando a vibração das moléculas que constituem o meio de propagação, na mesma direção que a direção de propagação. Cada fração do meio atravessado pela onda longitudinal, apenas oscila ligeiramente em torno de uma posição de equilíbrio, no entanto a onda propriamente dita consegue propagar-se por grandes distâncias.

Pelo facto da natureza das ondas sonoras serem variações de pressão, e estas dependerem, entre outros, de parâmetros meteorológicos tais como, a temperatura, a humidade, o nevoeiro ou a chuva, a utilização de sistemas sonar esteve sempre condicionada a ambientes interiores. Contudo um sistema sonar pode, desde que haja processamento, ser utilizado em ambientes exteriores, Além das perturbações meteorológicas, existem muitas outras fontes de ruído acústico, assim na gama dos ultrassons poderemos referir como fontes de ruído as aeronaves, martelos pneumáticos, motores de veículos ou mesmo cabos elétricos que transportam alta tensão. Outro fator que tem influência na variação da pressão é a densidade do meio, que quanto mais denso for, maior será a velocidade de propagação das ondas sonoras nesse meio.

A velocidade de propagação de uma onda sonora não depende da sua frequência, mas sim unicamente do meio em que se propaga. Sendo a velocidade de propagação de uma onda sonora no ar de aproximadamente de 343 m/s enquanto na água toma o valor de aproximadamente 1450 m/s .

Uma onda sonora pode apresentar qualquer frequência, desde os poucos Hertz como as que são produzidas por um sismo, até valores extremamente elevados comparáveis às frequências da luz visível, dependendo a frequência da natureza da fonte emissora da onda sonora. Contudo, é necessário sublinhar que para o ser humano, a banda audível está limitada ao intervalo dos 20 Hz e aos 20 kHz . Toda a onda sonora com uma frequência inferior a este intervalo é denominada de infrassom, e acima dele de ultrassom.

A propagação das ondas sonoras na atmosfera tem sido tema de imensa pesquisa desde a segunda metade do século XX, com uma motivação acrescida pela necessidade de controlar o ruído produzido pelas, desde então, denominadas sociedades industriais [76].

Os fenómenos que afetam a propagação das ondas sonoras, como os descritos anteriormente, estão divididos tipicamente em três grupos:

- Mecanismos de atenuação;
- Mecanismos que afetam a velocidade de propagação do som;
- Turbulência.

2.9.1 Mecanismos de atenuação

Em espaço livre, apresentam-se como mecanismos de atenuação o espalhamento geométrico, a absorção atmosférica, a chuva e o nevoeiro.

Define-se espalhamento geométrico como sendo o decaimento de amplitude de uma onda mecânica, decaimento causado pela expansão da frente de onda. O que significa que o espalhamento geométrico não tem dependência no meio de propagação

mas sim nas características apresentadas pelo transdutor utilizado, especialmente na sua diretividade. Adicionando à perda motivada pelo espalhamento geométrico, quando a onda acústica se propaga pela atmosfera, uma percentagem da sua energia é dissipada sobe a forma de energia térmica, o que causa o decaimento exponencial da pressão, em relação à distância percorrida. De acordo com [77] o campo acústico, gerado por um transdutor com um determinado grau de simetria, num ponto de coordenadas esféricas (r, φ, θ) pode ser determinado por

$$P(r, \varphi, \theta) = P_{ax}(r) \times D(\varphi, \theta) \times e^{-\alpha_{abs} \times r}, \quad (2-40)$$

onde:

- $P_{ax}(r)$ é a pressão acústica sobre o transdutor;
- $D(\varphi, \theta)$ é a diretividade do transdutor;
- α_{abs} é o coeficiente de absorção da atmosfera.

Onde, na região próxima ao eixo do transdutor, $D(\theta) \approx 1$, sendo a atenuação das ondas esféricas dada por $P = P_0/r$, verifica-se uma perda de 6 dB quando a distância à fonte duplica.

A absorção atmosférica das ondas acústicas é retratada pelo seu coeficiente, e incide basicamente em dois mecanismos diferentes: as perdas visco-térmicas (ou a também chamada absorção clássica) e os processos de relaxamento molecular do oxigénio e do nitrogénio. O modo de incrementar a concordância com os dados reais de ambos os processos é apresentado, sob a forma de um conjunto de equações, na norma ISO-9613 [77].

Analisando a equação, apresentada na referida norma, para determinação da absorção atmosférica das ondas acústicas, verifica-se que esta depende de quatro fatores: a frequência do som, a pressão atmosférica, a temperatura do meio e a humidade. Podendo no entanto ser desprezada a pressão, uma vez que na prática a sua excursão em magnitude é pequena.

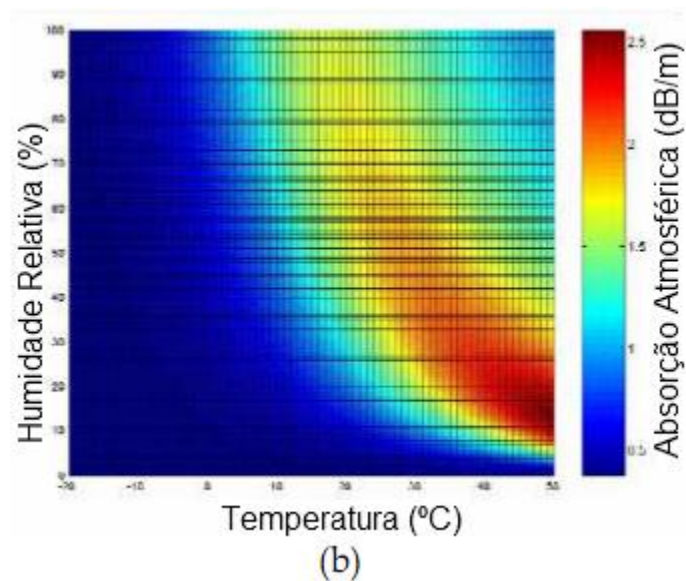
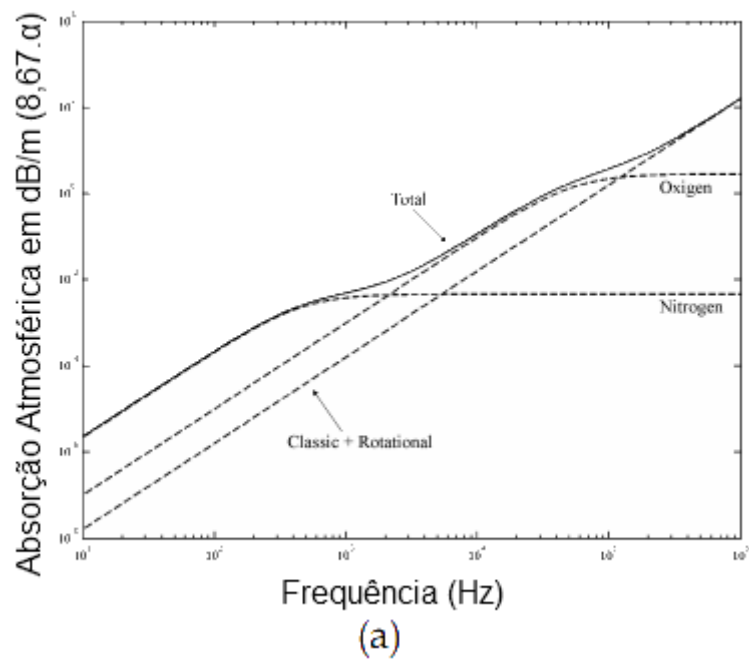


Figura 2-10 - Dependência da absorção atmosférica em diferentes parâmetros. (a) Dependência com a frequência. (b) Dependência com a temperatura e a humidade. (extraído de [77]).

Na Figura 2-10 (a), fixou-se a temperatura em $T_c = 20^\circ\text{C}$, a humidade em $H = 70\%$, e a pressão em $P = 1\text{atm}$. Como se pode observar a absorção atmosférica aumenta rapidamente com a frequência, sendo o relaxamento vibratório do oxigénio o mecanismo de atenuação entre os 2kHz e os 100kHz .

Na Figura 2-10 (b), a frequência foi fixada em $f = 50kHz$ e a pressão em $P = 1atm$. Observando a figura rapidamente se conclui que a temperatura e a humidade têm uma forte influência na absorção atmosférica do sinal. É de salientar que a absorção do sinal numa tarde quente de verão pode ser seis vezes maior que numa manhã fria de inverno.

O espalhamento geométrico e a absorção atmosférica estão sempre presentes quando um sinal acústico é transmitido através do ar. Contudo, quando essa transmissão ocorre ao ar livre, existem outros fenómenos que podem causar atenuação adicional aos sinais, tais como a presença de nevoeiro, chuva ou turbulência.

A atenuação que uma onda acústica sofre na sua propagação numa atmosfera nevoenta, a uma dada temperatura, depende essencialmente de três parâmetros: a concentração de gotículas, o seu raio e a frequência de propagação das ondas. Na Figura 2-11 são apresentadas duas situações que descrevem a atenuação provocada pelo nevoeiro, e que traduzem o modelo de estimação matemática criado por Cole e Dobbins [77]. A primeira situação retrata uma atmosfera com nevoeiro muito denso ($N_{droplets} = 2000 \text{ gotículas/cm}^3$; $R = 6 \mu m$), e a segunda uma atmosfera com nevoeiro pouco denso ($N_{droplets} = 400 \text{ gotículas/cm}^3$; $R = 10 \mu m$). Para ambas as situações foi considerada uma temperatura ambiente de $23^\circ C$.

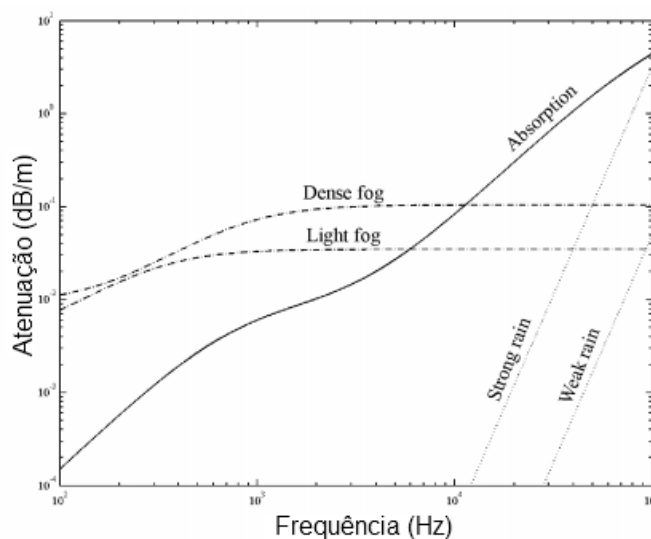


Figura 2-11 - Atenuação causada pela presença de nevoeiro e chuva em função da frequência (extraído de [77]).

Por observação da Figura 2-11, verifica-se que o mecanismo de atenuação dominante acima dos 10 kHz é a absorção atmosférica. Outra consideração que se pode retirar é que, mesmo numa situação de nevoeiro denso, a atenuação que este provoca nesta gama de frequências não vai além dos 0,1dB/m (aproximadamente).

A Figura 2-11 contém também a transcrição do modelo matemático provocado pela chuva, descrito por Shamanaeva em 1988 [77]. Este modelo é válido para frequências superiores a 20kHz, e depende de apenas dois parâmetros: intensidade da chuva e a frequência da onda sonora. Por análise da figura é possível verificar que para as frequências típicas dos ultrassons, por exemplo 50kHz, a atenuação provocada pela chuva, ainda que forte, está na ordem de grandeza dos 0.1dB/m, o que a torna passível de ser negligenciável.

2.9.2 Mecanismos que afetam a velocidade de propagação do som

Dos mecanismos que afetam a velocidade de propagação do som, a temperatura e o vento são os dois parâmetros meteorológicos que têm maior influência. Se se assumir a componente normal do vento em relação à direção de propagação como

sendo pequena, quando comparada à velocidade da onda, pode-se definir a velocidade de propagação do som pela seguinte expressão:

$$v_{sound} \approx v_p + 331.6 \sqrt{1 + \frac{T_c}{273.15}} \quad (2-41)$$

onde v_p representa a componente paralela à direção de propagação, da velocidade do vento; e T_c a temperatura definida em graus Celsius.

É importante referir que, quer a temperatura como a velocidade do vento, são dois parâmetros fortemente dependentes da altura da fonte ao solo. Isto provoca uma dependência na velocidade de propagação do som relativamente a estes fatores, e que influencia a refração das ondas de som.

2.9.3 Turbulência

Uma característica do vento é que este raramente tem um comportamento estacionário, especialmente nas camadas inferiores da atmosfera. O vento apresenta tipicamente flutuações aleatórias de correntes de ar no seu comportamento, que surgem na forma de fluxos altamente rotacionais. Estes “remoinhos de turbulência” causam flutuações aleatórias locais na velocidade do vento e na temperatura. Os dois parâmetros que, como já se mencionou, têm um forte impacto na velocidade de propagação das ondas acústicas. Estes remoinhos causam uma repentina mudança no índice de refração e uma subsequente dispersão de parte da energia das ondas. Como será de prever, uma consequência imediata deste espalhamento é a introdução de uma atenuação adicional.

A Figura 2-12 apresenta a relação entre a atenuação da turbulência e a frequência, segundo um modelo matemático obtido por Brown e Clifford [77]. Pode-se afirmar que mesmo na presença de uma forte turbulência, a atenuação que esta provoca é consideravelmente baixa, quando comparada com a atenuação provocada pela absorção atmosférica.

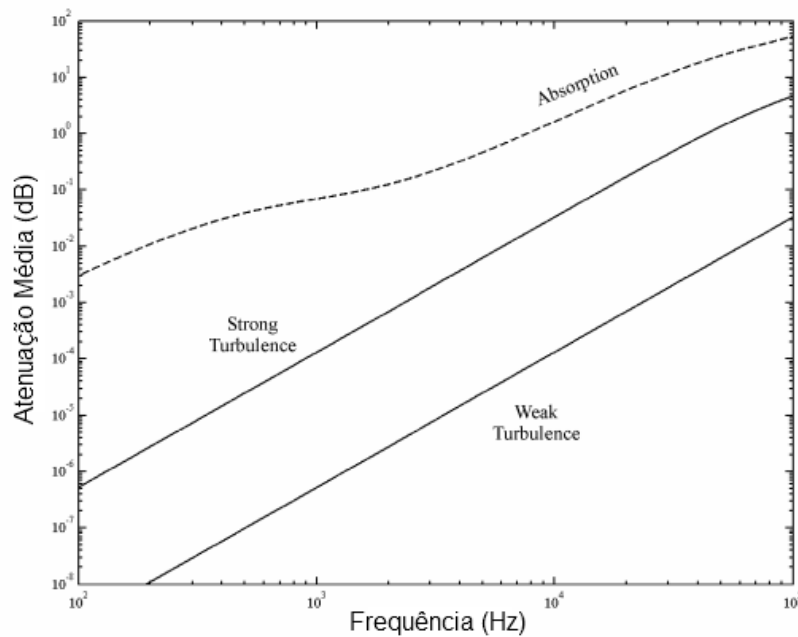


Figura 2-12 - Atenuação provocada pela turbulência em função da frequência (extraído de [77]).

Contudo é importante referir que a atenuação apresentada pela turbulência é um valor médio e que os valores instantâneos podem variar amplamente em torno deste valor médio. Quando uma onda sonora se propaga através de uma região turbulenta, pode encontrar uma variedade de remoinhos com tamanhos, velocidades e temperaturas diferentes. O efeito combinado destes fatores altera a coerência inicial da frente de onda, que deixará de ser esférica e deixa de ter a amplitude que tinha antes de atravessar a região turbulenta.

2.10 Função de ambiguidade

Um dos métodos mais clássicos para a medição de distâncias, com o recurso a ultrassons, é a técnica de medição do tempo de voo do sinal recorrendo ao sonar pulsado. Esta técnica consiste em emitir um pulso a um tom, durante um curto período de tempo, e ficar à escuta do seu eco, medindo o tempo que este demora a retornar. Uma vez conhecida a velocidade de propagação do pulso, é possível obter a distância a que está o objeto que fez o pulso emitido retornar ao sonar.

É bastante usual definir-se um parâmetro denominado *PRF* (*Pulse Repeat Frequency*), que representa a frequência máxima com que se devem repetir os pulsos, ou seja, o intervalo de tempo entre o pulso emitido e o próximo. Impondo este tempo entre pulsos, fixa-se também a taxa máxima com que se conseguem medir distâncias. Normalmente pretende-se ter um *PRF* o mais elevado possível, ou seja, um tempo entre pulsos tão baixo quanto possível.

Em relação ao *PRF* máximo devemos tecer algumas considerações. Tomemos um cenário onde o *PRF*, ou seja, o tempo entre pulsos é inferior a T_s , isto pode implicar que, quando é emitido um pulso, o eco do pulso anterior ainda não tenha retornado ao sonar. Do ponto de vista do sonar isto pode implicar que, quando é emitido o segundo pulso e logo a seguir é recebido um eco, fará com que seja inferida a existência dum alvo a uma determinada distância, quando na realidade esse alvo existe mas está a uma distância maior, pois este eco recebido provém do pulso anterior. Quando esta situação ocorre, induz que haja ambiguidade na deteção, podendo levar a erros graves.

Deste modo, o conceito de máxima distância sem ambiguidade é definido como toda a distância que garanta que o efeito descrito no parágrafo anterior não ocorra. Esta distância é uma constante numa aplicação concreta do sonar, pois corresponde ao alcance máximo que se pretenda para o mesmo. Assim, o menor tempo entre pulsos irá corresponder ao tempo T_t (tempo de ida e volta) ao alvo mais distante que se pretenda detetar. A distância máxima a que o alvo poderá estar, para que o sonar o consiga detetar e medir a sua distância sem ambiguidade é dada pela equação (2-42), verificando-se pela análise da mesma que, para aumentar o alcance sem que haja ambiguidade do sonar, deve-se reduzir o *PRF*:

$$R_u = \frac{C t}{2} = \frac{C}{2 PRF} \quad (2-42)$$

onde R_u é a distância máxima entre o alvo e o sonar (ou seja, ou alcance máximo sem que exista ambiguidade do sonar), t é o tempo entre a transmissão do pulso e a chegada do eco ao sonar e C é a velocidade de propagação [63, 78].

A ambiguidade não é só originada pela distância dos alvos, a frequência de Doppler também pode induzir ambiguidades. Se a frequência de Doppler do alvo é elevada o suficiente para fazer um movimento de linha adjacente espectral dentro da banda de Doppler de interesse, o sonar pode ter ambiguidade de Doppler. A fim de evitar a ambiguidade de Doppler, os sistemas de sonar necessitam de taxas altas de PRF quando detetam alvos a grandes velocidades.

Quando um radar de longo alcance necessita de detetar um alvo a uma grande velocidade, pode não ser possível que este seja não ambíguo tanto em distância como em Doppler. Uma possível resolução deste problema passa pelo recurso a múltiplos $PRFs$, ou seja, múltiplos esquemas de PRF que podem ser incorporados sequencialmente dentro de cada intervalo (quadro de *scan* ou integração) ou então o sistema pode usar um único PRF num *scan* e no próximo resolver a ambiguidade. Esta última técnica pode ter problemas devido a alterações dinâmicas do alvo, de *scan* para *scan* [79].

O espectro de frequências recebido (sujeito a Doppler) só pode ser utilizado para medições de velocidade não ambíguas, ou seja, quando o deslocamento do espectro recebido é menor que o espaçamento entre a frequência de repetição de pulsos (f_{PRF}), isto é, a frequência de Doppler deve ser menor que a f_{PRF} . Utilizando a equação da frequência de Doppler, é possível calcular a velocidade radial limite que garante a não ambiguidade [80]:

$$f_{PRF} < |f_D| = \frac{2v_r f_{tx}}{C} \quad (2-43)$$

$$v_r < \frac{C f_{PRF}}{2 f_{tx}} \quad (2-44)$$

Esta equação é válida, se a direção do deslocamento de Doppler for conhecida, isto é, conhecer-se se o alvo se aproxima ou se afasta do local do sonar. Se esta direção for desconhecida, o valor da não ambiguidade da velocidade é reduzido para metade [80]:

$$v_r < \frac{C f_{PRF}}{4 f_{tx}} \quad (2-45)$$

O PRF também é uma medida de não ambiguidade da distância. Se a largura de pulso transmitido é muito menor do que o período de pulso, o valor da f_{PRF} pode ser substituída pela relação $\frac{C}{2 R_{max}}$ [80]:

$$R_{max} v_r < \frac{C^2}{8 f_{tx}} \quad (2-46)$$

Deste modo é possível concluir que a capacidade de um sonar medir uma distância não ambígua e uma frequência de Doppler não ambígua (isto é, a velocidade radial do alvo) depende da apenas frequência da portadora transmitida [80].

Para realizar o estudo teórico da função de ambiguidade será necessário simular o efeito de Doppler sobre o sinal transmitido pelo sistema e o tempo de atraso deste. Uma vez que neste caso se utiliza a compressão de pulso, a questão do tempo de atraso fica resolvida, dado que o resultado desta operação já vem mapeada em termos de tempo de atraso. No que diz respeito ao efeito de Doppler, será em seguida demonstrado como este pode ser simulado corretamente. Assim, sendo possível aplicar efeito de Doppler a um troço de sinal enviado pelo sonar, basta apenas aplicar a compressão de impulso para diferentes velocidades, para determinar a função de ambiguidade do mesmo.

2.11 Funcionamento do Sonar Pulsado

Um sonar pulsado emite pulsos de curta duração que, ao iluminarem um possível alvo, geram ecos que retornam ao sonar. O tempo decorrido entre a emissão de um pulso e a receção do eco gerado por esse pulso determina a distância desse alvo ao sistema.

Por norma os sistemas de pulsos utilizam a mesma plataforma para transmitir e receber, comutando entre transmissor e recetor (sistema monostático) e são capazes de medir a distância da reflexão ou dispersão do objeto alvo, o seu ângulo de azimute, o ângulo de elevação e a velocidade radial. Se forem transmitidos pulsos de curta duração, a energia dispersada pelos objetos que estão presentes na área que o sistema ilumina, serão cópias dos pulsos transmitidos com um atraso de tempo proporcional à distância percorrida. A frequência dos ecos dependerá da taxa de variação da distância ou da velocidade radial [81].

Atualmente existem inúmeros sistemas pulsados de Doppler, que consistem em sistemas pulsados capazes de obter a velocidade radial do alvo, como fora mencionado anteriormente, através da análise Doppler. Se as medições de distância precisa são válidas entre pulsos consecutivos então a frequência de Doppler pode ser extraída a partir da razão de distância $\dot{R} = \Delta R / \Delta t$. Esta abordagem funciona bem, desde que a distância não mude bruscamente ao longo do intervalo Δt . Caso contrário, os sonares pulsados utilizam um banco de filtros de Doppler [79].

As formas de onda do sonar podem ser definidas do seguinte modo:

- (1) Frequência da portadora, que pode variar dependendo dos requisitos da conceção e finalidade do sonar;
- (2) Largura do pulso, que está estreitamente relacionada com a largura de banda e define a resolução em distância;
- (3) Modulação utilizada;
- (4) Frequência de repetição do pulso.

São normalmente utilizadas diferentes técnicas de modulação para melhorar o desempenho do sistema, ou para adicionar mais capacidades ao sistema que de outro

modo não seria possível. No que diz respeito à PRF, esta deve ser escolhida por modo a evitar ambiguidades de Doppler e de distâncias, bem como para maximizar a potência média transmitida.

Os sistemas de sonar empregam esquemas de baixa, média e alta PRF. Formas de onda com baixa PRF podem proporcionar medidas de distância precisas, longas e não ambíguas, mas exercer graves ambiguidades de Doppler. Formas de onda com uma PRF média devem resolver ambas as ambiguidades de distância e Doppler, contudo, elas fornecem uma energia média transmitida adequada quando comparada com as baixas PRF. As formas de onda com uma alta PRF conseguem fornecer uma energia média transmitida superior e têm uma excelente capacidade de rejeição do *clutter*. No entanto, as formas de onda com PRF altas são extremamente ambíguas em distância. Os sistemas de sonar que utilizam altas PRF são frequentemente designados de sonares de Doppler pulsado (PDS – *Pulsed Doppler Sonars*). Na tabela seguinte é feita uma análise comparativa entre os diferentes PRF e as ambiguidades de distância e de Doppler [79].

Tabela 2-3 - Ambiguidades da PRF.

PRF	Ambiguidade de distância	Ambiguidade de Doppler
PRF baixo	Não	Sim
PRF médio	Sim	Sim
PRF alto	Sim	Não

Os sonares podem utilizar PRF contantes e variáveis. Por exemplo, os radares Indicadores de Alvo em Movimento (MTI – *Moving Target Indicator*) usam PRF variáveis por modo a evitar velocidades cegas. Este tipo de PRF variável é conhecido como PRF de escalonamento. Esta agilidade do PRF é usada para evitar ambiguidades de distância e de Doppler, e também utilizada para prevenir os chamados *jammers*⁴ de

⁴ Designa-se por *jammer* o sistema que realiza uma emissão intencional de uma dada gama de frequências por modo a causar interferência nos recetores causando uma diminuição da relação sinal-ruído, podendo levar mesmo à saturação dos sinais ou então para introduzir informação falsa.

bloqueio de sonares de PRF. Diversas vezes estas duas formas de agilidade de PRF são referidas como PRF *jitter*⁵ [79].

O movimento em distância de um alvo pode ser determinado, a partir da observação dos ecos gerados a partir de uma sequência de pulsos. Pois à medida que o alvo se vai movendo as distâncias detetadas serão diferentes. Neste tipo de representação, o estudo do comportamento do sinal na horizontal é designado normalmente por análise em distância, uma vez que, a distância entre o eco e o sinal transmitido representa a distância entre o alvo e o radar. Todos os pontos do alvo dentro do mesmo impulso retornam ao mesmo tempo para o radar. Como o radar não consegue distingui-los a resolução em distância é então [82]:

$$\rho_r = \frac{c \tau}{2} \frac{1}{\sin \theta} \quad (2-47)$$

Na equação (2-47), ρ_r representa a resolução em distância (quanto menor for este valor, maior será a resolução em distância); c a velocidade de propagação da onda; τ a duração do impulso emitido; e θ o ângulo de observação. Esta expressão demonstra que para aumentar a resolução, τ tem que ser tão pequeno quanto possível [82].

No comportamento do sinal na vertical, frequentemente designado como análise em azimute, todos os pontos do alvo dentro do mesmo feixe à mesma distância vão ser recebidos ao mesmo tempo pelo sistema, sendo que a resolução em azimute é dada pela equação (2-48).

$$\rho_a' = R \beta_a \quad (2-48)$$

A resolução em azimute é dependente da abertura do feixe do transmissor, β_a .

⁵ Designa-se por PRF *Jitter* ao sistema que permite variar o tempo entre pulsos sucessivos, de um modo aleatório, de entre um conjunto de intervalos definidos, e desde que sempre seja satisfeita a condição de alcance máximo. É um sistema utilizado para combater os já designados *jammers*.

3 Proposta de Solução

Neste capítulo, será apresentada a solução que possibilitou a concretização do estudo alvo desta dissertação.

Tendo como principal objetivo nesta dissertação, o estudo da identificação e análise do movimento humano com recurso a ultrassons, complementado com a recolha das assinaturas acústicas geradas pelo contato dos membros inferiores com o chão, é necessário desenvolver um conjunto de algoritmos que proporcionem:

- A geração dos sinais que se pretendia transmitir pelo sonar;
- O tratamento dos sinais de eco recolhidos;
- E a concretização da análise dos dados adquiridos.

Para que a transmissão, a receção e a análise destes sinais seja exequível, existe a necessidade de adquirir um conjunto de *hardware* específico. É proposta também a criação de uma BD (base de dados), contendo diversos testes realizados, para que no futuro se consiga concretizar estudos da análise do movimento humano com maior facilidade.

3.1 Apresentação da proposta de *Hardware*

O módulo proposto para a realização deste estudo é constituído por diversos blocos, os quais são apresentados na Figura 3-1. Deste conjunto de blocos os responsáveis pela captação de dados são:

- **Bloco Sistema Sonar Ativo:** constituído por uma plataforma que emite sinais na gama dos ultrassons e recolhe os seus ecos;
- **Bloco de Captação de Imagem:** composto por uma câmara de vídeo, para recolha de imagens dos alvos em movimento, pois consideramos muito importante para compreensão dos sinais processados após recolhidos os ecos, ter a imagem do movimento realizado pelo alvo;
- **Bloco Sistema Acústico Passivo:** constituído por um microfone que foi utilizado para efetuar a recolha das assinaturas acústicas do andamento dos alvos, mais concretamente do ser humano.

Além dos três blocos atrás descritos existe outro, que pode ser considerado como módulo nuclear, a que se denominou por **bloco central**, constituído por um computador que funciona como unidade de processamento digital de sinal. É nesta unidade que são gerados os sinais que se pretendem emitir pela plataforma sonar, e onde todos os dados são recolhidos, processados e analisados, com recurso a algumas ferramentas de *software*.

Por último, temos um **bloco de áudio**, que não é nada mais que umas simples colunas, as quais permitem analisar auditivamente os dados recolhidos.

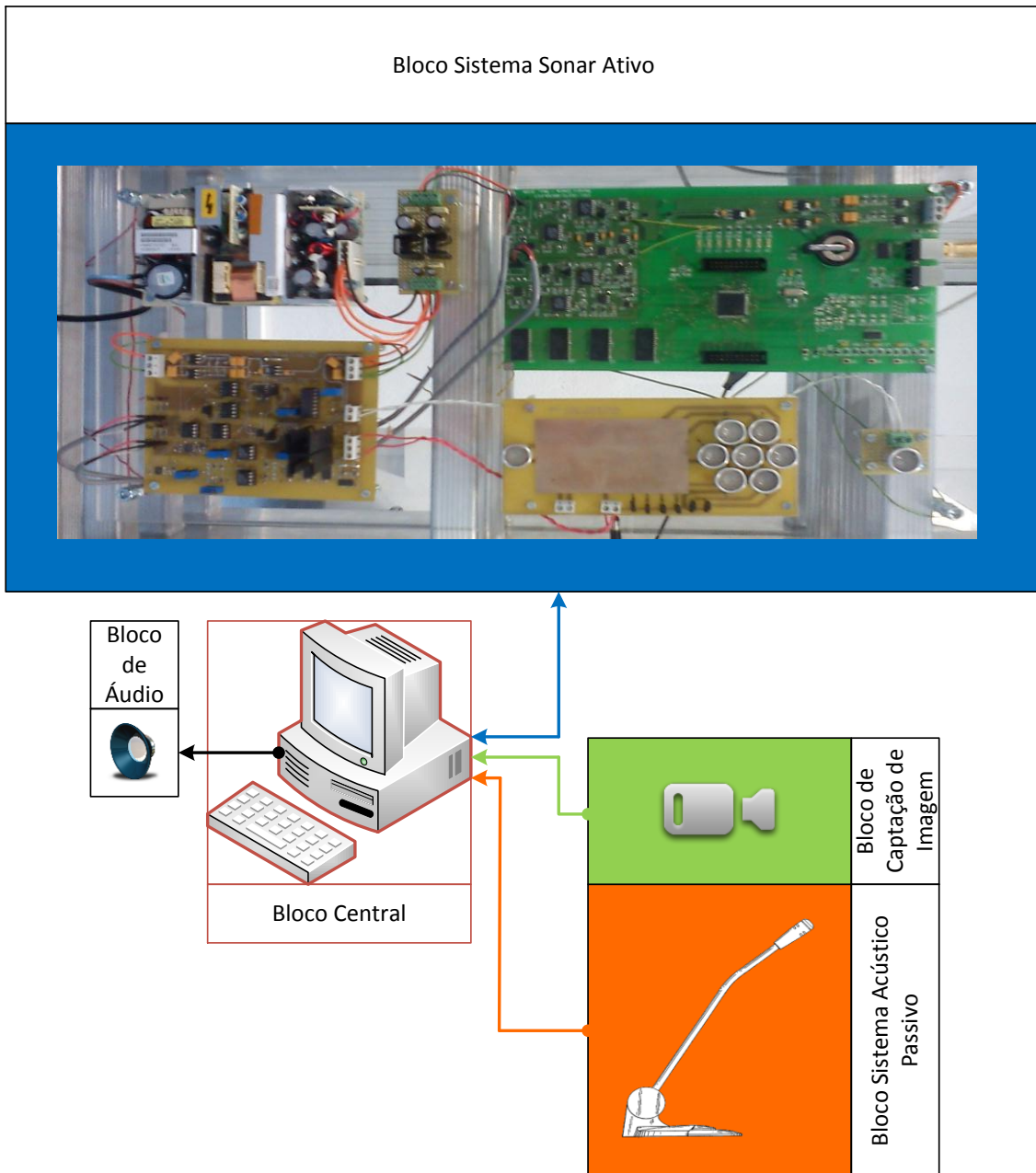


Figura 3-1 - Diagrama de Blocos do hardware.

3.2 Apresentação da proposta para o *Software* dos algoritmos

A realização deste estudo implicou a necessidade de desenvolver um conjunto de algoritmos, que permitissem a geração dos sinais a transmitir, a comunicação com o *hardware* e por fim o processamento e análise dos dados recolhidos.

A plataforma proposta para o desenvolvimento destes algoritmos foi o MATLAB (*MATrix LABORatory*). Este é um *software* de grande performance, dedicado à análise numérica, cálculo de matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos num ambiente *user friendly*, contendo já inúmeras funções e *toolboxes*. A tudo isto, associa-se o facto da programação utilizada ser bastante acessível, fugindo um pouco à tradicional programação. Este sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo, que se gastaria para escrever, por exemplo, um programa semelhante numa linguagem Fortran ou C, e as soluções dos problemas são expressas quase exatamente como elas são matematicamente escritas.

Na seção 1.1 serão descritos mais pormenorizadamente os vários algoritmos, quer para o método ativo como para o método passivo. Dentro de cada um serão focados os principais pontos de todo o processo, desde a inserção dos parâmetros pretendidos até à análise dos dados. Sendo ainda apresentado um algoritmo de *tracking*, das curvas representantes de algumas partes do corpo do alvo, retiradas através da análise automática ao espectrograma gerado.

3.2.1 Solução proposta para o estudo pelo método ativo

Entende-se por sistema ativo, aquele que emite um sinal e que, durante um determinado período de tempo, fica à escuta do seu eco. A Figura 3-2 ilustra o diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido para a recolha de dados através do método ativo.

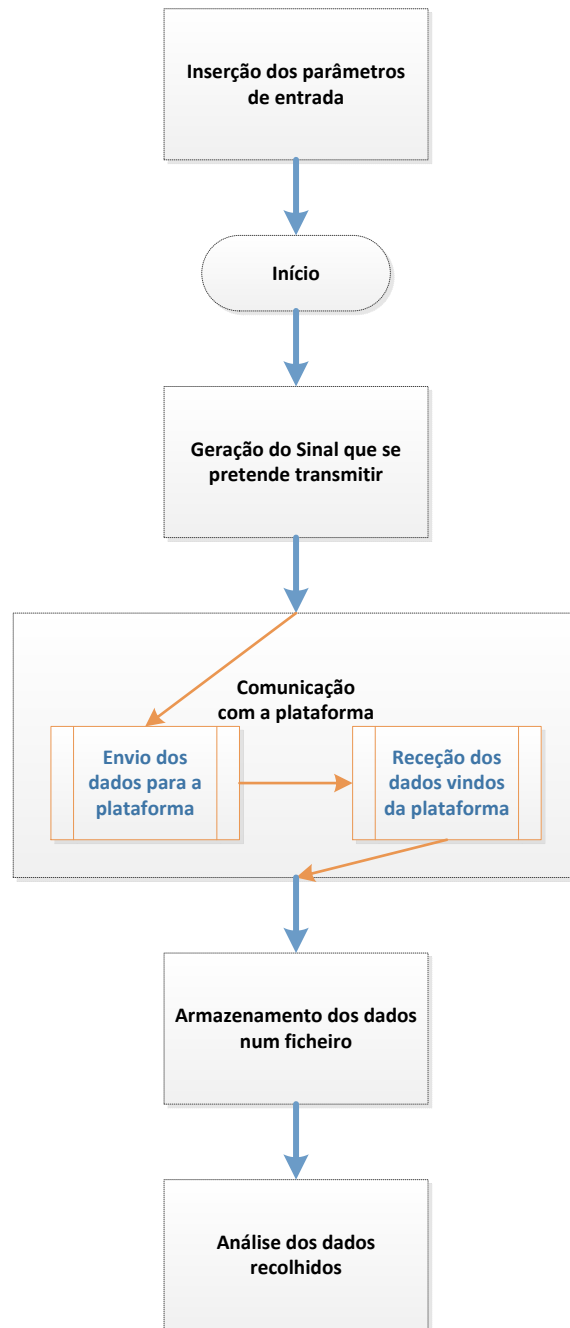


Figura 3-2 - Flowchart do Algoritmo Proposto para o Método Ativo.

Como se pode constatar pelo diagrama atrás apresentado, no sistema sonar ativo de onda contínua, o primeiro passo a efetuar é a inserção dos parâmetros de configuração necessários para a realização do estudo pretendido. Após a inserção desses parâmetros, inicia-se o programa, o qual começa por gerar o sinal, com as características definidas pelo utilizador, que se pretende transmitir. Segue-se a comunicação com a plataforma, a qual recebe o sinal a transmitir assim como os parâmetros da recolha dos

ecos. Após serem rececionados, os ecos são direcionados de seguida para o bloco central onde, após a chegada da sua totalidade, são guardados num ficheiro com todas as suas características. Deste modo, é sempre possível efetuar a análise posterior dos dados recolhidos, pois além desses dados recolhidos também os parâmetros do estudo em causa se encontram disponíveis nesse ficheiro. O processo termina com o processamento dos sinais e a sua consequente análise.

3.2.2 Solução proposta para o estudo pelo método passivo

Entende-se por sistema passivo, aquele que apenas fica à escuta, captando os sinais que lhe chegam provenientes de outras fontes. A Figura 3-3 pretende ilustrar o digrama de blocos do algoritmo desenvolvido para a captura destes sinais.

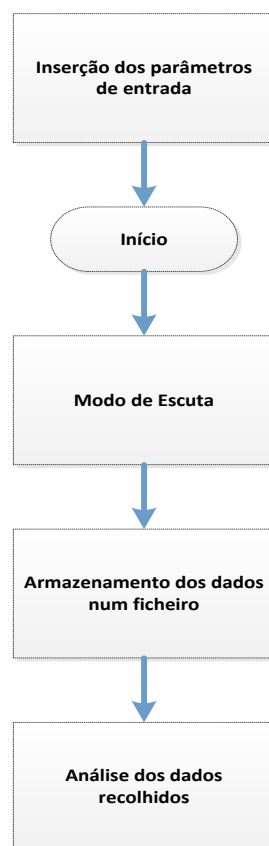


Figura 3-3 - Flowchart do Algoritmo Proposto para o Método Passivo.

A ideia geral para o algoritmo proposto para aquisição dos ecos gerados pelo contato dos membros inferiores com o chão segue uma ideia semelhante à da aquisição de dados pelo método ativo. Será necessário em primeiro lugar, realizar a parametrização do sistema para a recolha pretendida. Após iniciado o algoritmo, o sistema entra em modo de escuta durante o tempo determinado pelo utilizador. Esta recolha é feita através do bloco sistema acústico passivo, apresentado na seção 3.1. Quando o tempo de escuta termina, os dados recolhidos serão armazenados, com toda a informação necessária para uma posterior análise. As análises dos dados recolhidos basearam-se por um lado pela análise acústica, onde se poderá escutar os sinais recolhidos, e por outro na análise espectral e do espectrograma.

3.3 Apresentação da proposta de uma base de dados

A necessidade de ter sempre presente um conjunto de dados que se possam analisar é notória. Cada vez que se pretende efetuar um teste há a necessidade de deslocar o *hardware* para um local que permita a recolha de dados nas melhores condições. Sendo ainda mais complicada a recolha de dados quando se pretende ter como objeto de estudo, alvos que não são os seres humanos, estando sempre o desenvolvimento do estudo pendente da disponibilidade de terceiros, como tal propõe-se a construção de uma base de dados.

Para a criação da base de dados, propõe-se que por cada teste efetuado sejam armazenados os sinais de eco recolhidos assim como toda a informação associada ao sinal transmitido que lhes deu origem. Como uma imagem descreve muito melhor qualquer movimento que uma descrição escrita, é proposto que sejam recolhidas imagens de vídeo dos testes realizados, para quando se pretender fazer a análise de um dado movimento, ter-se presente todos os detalhes desse movimento. Para o caso dos testes realizados com seres humanos, propõem-se também que sejam recolhidas as assinaturas acústicas da passada deste, com o objetivo de poder fazer uma análise comparativa entre esses dados e os recolhidos pela plataforma sonar.

4 Implementação da Solução

Após a apresentação da solução proposta, no capítulo 3, neste capítulo passa-se a explicar mais pormenorizadamente os detalhes da sua implementação, podendo-se dividir esta implementação em três partes:

- do *software*;
- do *hardware*;
- base de dados para suporte a futuros estudos.

4.1 *Software dos Algoritmos Propostos*

Como mencionado, para se proceder ao estudo apresentado neste documento, foi necessário desenvolver um conjunto de algoritmos que permitem, após introdução dos parâmetros iniciais, e no caso do sistema ativo, gerar os sinais que se pretendem transmitir, comunicar com a plataforma, enviando-lhe os sinais gerados, juntamente com as instruções para esta transmitir e capturar sinais, receber desta os ecos capturados e por fim processar e analisar esses dados. No caso do sistema passivo permitir que se adquiram, do *line in* da placa de som, os dados recolhidos pelo microfone.

4.1.1 *Algoritmo desenvolvido para o estudo do Método Ativo*

A solução implementada para algoritmo desenvolvido para a realização da análise do movimento humano por ultrassons, ou seja, através do método ativo, tem como base o diagrama de blocos apresentado na Figura 3-2. Este algoritmo pode-se dividir em três fases:

- Parametização da recolha de dados;
- Preparação do sinal e comunicação com a plataforma sonar;
- Análise dos dados recolhidos.

O algoritmo desenvolvido está dividido em funções, que são chamadas pelo ficheiro principal. No entanto, as funções de processamento e análise dos dados recolhidos, estão preparadas para que possam ser executadas isoladamente, isto porque se o utilizador quiser fazer o estudo de uma determinada recolha de dados *a posteriori* do momento em que a executou, está livre de o fazer.

4.1.1.1 *Parametização da Recolha de Dados*

Quando o utilizador pretende efetuar uma recolha de dados, tem de começar por inserir alguns parâmetros, a partir dos quais o próprio algoritmo calculará os restantes que são necessários para a realização do estudo. No entanto existe um

parâmetro muito importante, a frequência de amostragem do sonar, o qual é fixo para o sistema que se está a utilizar e no nosso caso é: $F_s = 24kHz$.

Outro parâmetro crucial é o tipo de onda que se pretende emitir. O algoritmo tem predefinido um conjunto de dez sinais possíveis de emitir, mas em toda a bibliografia consultada, o sinal que acaba por ser sempre utilizado é a senoide complexa.

Tabela 4-1 - Tabela dos sinais predefinidos, possíveis de emitir.

Nº do tipo de sinal a emitir	Descrição
01	Senoide Real
02	Senoide Complexa
03	Chirp linear
04	Chirp linear + Senoide Complexa
05	Dois Senoides Complexas
06	Senoide Complexa com AWGN (<i>Additive white Gaussian noise</i>)
07	Senoide Complexa + Ruído Gaussiano
08	Chirp linear + Senoide Complexa
09	Dois Senoides Complexas
10	Sinal a zero

Apesar de este algoritmo pretender que o utilizador tenha de inserir o menor número de parâmetros possíveis, sendo os restantes necessários, calculados pelo próprio algoritmo, será necessário inserir duas frequências centrais, pois no caso de se optar pela emissão de um sinal que seja o somatório de outros dois, ter-se-á de inserir a frequência central para cada um deles. O utilizador ainda tem o controlo sobre a amplitude que pretende que o sinal a transmitir tenha.

No que diz respeito à duração do sinal a transmitir, no caso da transmissão contínua, esta é calculada a partir da distância que o utilizador inserir. Esta distância representa a distância máxima, em metros, para a qual a função de ambiguidade é cumprida e, sabendo esta, o tempo do sinal a transmitir terá a duração de:

$$pulseTimeTX \cong \frac{maxDist[m]}{343 [m/s]} \times 1000 [ms]. \quad (4-1)$$

No caso de se pretender transmitir em sonar pulsado, será calculado o PRF do sinal, ou seja, o número de pulsos transmitidos por milissegundo:

$$PRF \cong \frac{2 \times maxDist[m]}{343 [m/s]} \times 1000 . \quad (4-2)$$

A partir do qual será calculado o PRT (*Pulse Repetition Time*), que nos dará a duração, em milissegundos, de repetição entre pulsos:

$$PRT = \frac{1}{PRF}. \quad (4-3)$$

O valor assim obtido para o PRT, multiplicado por 1000, corresponde à duração, em milissegundos, do pulso que se pretende transmitir.

O tempo que se pretende que o sonar fique à escuta é inserido diretamente, sendo este também o tempo que a plataforma estará em funcionamento, recolhendo dados que posteriormente são enviados para o bloco central.

Se se optar por transmitir o sinal composto por AWGN, é também necessário a inserção do valor da SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) pretendida.

Existe ainda um último parâmetro, que só é usado para o sinal de *chirp*, que é a largura de banda do mesmo, que no limite deverá ser 3 kHz, uma limitação dos transdutores utilizados nesta plataforma [83]. Este parâmetro servirá para calcular o *chirp rate*, e a frequência inicial do sinal do *chirp*.

4.1.1.2 Preparação do Sinal e Comunicação com a Plataforma Sonar

Como foi mencionado na seção anterior (4.1.1.1), existem 10 sinais predefinidos, a partir dos quais se pode optar por aquele que se quer transmitir. Escolhido o sinal, e após este ser gerado, com os parâmetros necessários e inseridos pelo utilizador, é inicializada a comunicação entre o núcleo central e a plataforma, via *USB 2.0*.

Após o sinal gerado, o próximo passo será prepará-lo de modo a ser devidamente entregue à plataforma, seguindo o protocolo, apresentado na Figura 3-3. Nesse protocolo de comunicação, o primeiro byte transmitido indica o modo de funcionamento do sonar, se no modo de onda contínua ou no modo pulsado. Como já foi atrás mencionado, neste estudo optou-se pela transmissão de sinais em modo contínuo. Os dois bytes seguintes indicam o número de amostras complexas do sinal que se pretende transmitir e, por fim, são entregues as amostras complexas do sinal, sendo cada amostra representada por 4 bytes, os dois primeiros representam a parte imaginária da amostra e os dois seguintes a parte real da mesma.

Estabelecido o canal de comunicação, toda a informação é enviada para a plataforma, permitindo efetuar a sua configuração, começando esta a operar num modo autónomo. À medida que a plataforma vai recolhendo as amostras dos ecos recebidos, vai enviando-as para o núcleo central, onde vão sendo guardadas, até se ter o conjunto de amostras, referente ao tempo de escuta pretendido.

Após a receção de todos os dados, é importante guardá-los, para que a sua análise possa ser efetuada em qualquer altura, para que tal seja possível, esses dados são guardados num ficheiro do tipo *mat* (MATLAB). Querendo posteriormente efetuar o estudo de uma dada recolha de dados, e não se saber qual foi a parametrização utilizada, junto com o sinal serão também guardados todos os dados da parametrização referentes a essa recolha. O nome do ficheiro conterà um prefixo, que é um código, que referenciará o tipo de alvo e o número correspondente ao teste efetuado. Este ficheiro poderá ser consultado numa base de dados (ver apêndice III), contém a data e hora a que o teste foi realizado (parâmetro inserido automaticamente pelo algoritmo) e por fim a sigla ASHM, que corresponderá a *Active Sonar Human Motion*.

4.1.1.3 Análise dos Dados Recolhidos

Após efetuado um determinado teste, todos os dados referentes ao mesmo ficam guardados num ficheiro. Para efetuar a análise do teste, basta ler esse ficheiro para uma variável do tipo estrutura (como se pode verificar pela Figura 4-1), onde a partir dela se consegue aceder à parametrização utilizada no teste efetuado, assim como, ao sinal de eco recolhido, e assim realizar a análise desses mesmos dados.

```

out = load(savefilename);           % Leitura do ficheiro
signalType = out.signalType;       % Tipo de sinal que se pretende transmitir
testDate = out.testDate;          % Registo do teste
PRF = out.PRF;                    % N° pulsos transmitidos por segundo
pulseTimeTX = out.pulseTimeTX;    % Duração de impulso [msegundos]
pulseTimeRX = out.pulseTimeRX;    % Duração de escuta de dados [msegundos]
AmplitudeSignalTX = out.AmplitudeSignalTX; % Amplitude do sinal
time4SendReceive = out.time4SendReceive; % Tempo de aquisição
Fs = out.Fs;                      % Frequência de amostragem do sonar
LBOOfSignalTX = out.LBOOfSignalTX; % Largura de banda do sinal TX a gerar
fo_sin1 = out.fo_sin1;            % Frequência central da senoide
fo_sin2 = out.fo_sin2;            % Frequência central da segunda senoide
SignalTX = out.SignalTX;          % Sinal transmitido
SignalRX = out.RawData;           % Sinal recebido
    
```

Figura 4-1 - Exerto de código Matlab, exemplificando o carregamento dos dados presentes no ficheiro *mat* guardado.

Após ter carregado todos os dados usados na recolha de um determinado sinal, e antes de se proceder à sua análise, é necessário efetuar o cálculo de alguns parâmetros que serão utilizados no seu processamento, assim como efetuar um tratamento ao sinal recolhido.

O primeiro passo antes de iniciar o processamento do sinal, será submetê-lo a uma primeira filtragem, com o intuito de eliminar toda a componente residual que possa existir e que se torna desinteressante para o estudo.

Após apresentada a fundamentação teórica na seção 2.6, percebe-se que se pretende fazer uma análise ao sinal a partir de um espectrograma, mais concretamente, a partir da *short-time Fourier transform* e, para tal, é necessário ter uma janela temporal. A aplicação de uma janela temporal a um sinal amostrado, permite de um modo simples aumentar as características espectrais desse sinal, pois ao ser analisada uma sequência finita através da análise de *Fourier*, ou outro método de análise espectral, a aplicação desta janela temporal suaviza as transições bruscas no início e no fim do bloco de sinal,

reduzindo a perda espectral, uma vez que estas transições num sinal contínuo no tempo comprometem a resolução em frequência.

Aplicar uma janela a um sinal no domínio do tempo é equivalente a multiplicar o sinal pela função que representa a janela. Devido a multiplicação no domínio do tempo ser equivalente à convolução no domínio da frequência, o espectro de um sinal passado por uma janela temporal é a convolução do espectro do sinal original com o espectro da janela temporal. Por esse motivo, a aplicação de uma janela temporal num sinal modifica a forma do sinal tanto no domínio do tempo como no da frequência.

Como já foi mencionado neste trabalho, existem vários tipos de janelas, no entanto não existe um critério concreto para a sua escolha, dependendo essa escolha do que possa ser considerado o “melhor” para cada situação em particular.

No caso particular do presente estudo, e apesar na maioria da bibliografia consultada se utilizar a janela de Hamming, optou-se por utilizar a janela de Kaiser-Bessel. Justifica-se a não utilização da janela de Hamming, dado que esta possui os seus coeficientes da extremidades não nulos, o que deste modo a suavização não será tanto quando comparada com a janela de Kaiser-Bessel, que possui a particularidade de ter um parâmetro β que permite ajustar a sua atenuação.

$$w[n] = \begin{cases} I_0 \left[\beta \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2n}{M}\right)^2} \right], & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{para os outros casos} \end{cases} \quad (4-4)$$

A partir da equação (4-4), calculam-se os coeficientes da janela de Kaiser-Bessel, onde $I_0(x)$ representa a função de Bessel modificada de ordem zero, e que se encontra expressa em (4-5). Por sua vez, o parâmetro M representa o comprimento da janela, e o parâmetro β é o valor que regula a atenuação dos lóbulos laterais da janela e pode ser calculado segundo a equação (4-6). Variando β e M , é possível ajustar a amplitude dos lóbulos secundários. Um caso particular, se $\beta = 0$, obtemos então uma janela retangular.

$$I_0(x) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(x/2)^n}{n!} \right]^2 \quad (4-5)$$

$$\beta = \begin{cases} 0,1102 (\alpha - 8,7), & \alpha > 50 \\ 0,5842 (\alpha - 21)^{0,4} + 0,07886 (\alpha - 21), & 21 < \alpha \leq 50 \\ 0, & \alpha < 21 \end{cases} \quad (4-6)$$

Sendo $\alpha = M/2$.

Para o cálculo desta janela, é necessário saber o seu comprimento, ou seja, o número de coeficientes que se pretende para a janela. Como este número pode não ser muito perceptível a quanto equivale em termos temporais, em sua substituição é utilizado no cálculo da janela, o tempo L em milissegundos, que se pretenda que a mesma tenha. Definido esse tempo, o número de coeficientes correspondentes, é calculado pela seguinte expressão:

$$M = \frac{L \times F_s}{1000} \quad (4-7)$$

De seguida é feita uma aproximação para o valor de potência de 2 mais próximo, de modo a tornar as FFT computacionalmente mais eficientes. A partir do número de coeficientes calculados, que representam aproximadamente o tempo L pretendido para a janela temporal, calcula-se o número de coeficientes da janela temporal, através da função já existente no Matlab.

Para além da janela temporal, para se construir o espectrograma do sinal é necessário determinar o número de pontos da FFT e a sobreposição ou *overlap*. O número de pontos de cada FFT a realizar, será igual ao número de coeficientes da janela temporal. O tamanho da sobreposição que existe entre duas janelas sucessivas, designada normalmente por *overlap*, varia entre $[0; (\text{tamanho_janela_temporal} - 1)]$.

Tendo o espectrograma do sinal de eco recolhido, obtém a assinatura de Doppler do movimento do ser humano, e a partir desta consegue-se realizar a extração de algumas características do movimento efetuado pelo ser humano.

Com a finalidade de se estudar a cadência da passada do ser humano, é selecionada uma frequência que esteja próxima do pico da curva característica de maior amplitude. Selecionada a frequência, é recolhida para um vetor toda a linha temporal do espectrograma, correspondente à frequência selecionada, com os valores de potência. Após realizada a FFT deste vetor, e mostrado o espectro com o resultado, observara-se um pico elevado perto da frequência zero, representativo da componente DC, e poucos Hertz depois um outro pico de menor amplitude que representa a cadência da passada do ser humano.

Por fim, é retirada a cadência da passada e aplicado ao espectrograma com a assinatura de Doppler, o algoritmo desenvolvido no contexto desta dissertação, para a extração das principais curvas características da sua assinatura.

4.1.1.3.1 Algoritmo de estimação de micro-Doppler

Irá ser agora apresentado um algoritmo desenvolvido no âmbito deste trabalho. O seu objetivo é fazer o *tracking* às curvas características do movimento do corpo. Para além de se realizar uma descrição do algoritmo, será apresentada a sua utilidade, bem como as suas presentes limitações.

Objetivo do Algoritmo

O estudo apresentado nesta dissertação tem um grande foco nas curvas de micro-Doppler obtidas através de espectrograma. A partir delas, é possível retirar algumas características do movimento humano, como por exemplo a sua velocidade. A sua análise visual é perfeitamente credível, no entanto, atualmente existe sempre o objetivo de automatizar ao máximo possível tudo o que nos rodeia.

Na bibliografia consultada, as análises relatadas, além de na maioria das vezes se basearem em dados simulados, não se encontrou uma que extraísse as curvas características de dados reais, em especial de sistema sonar. Possivelmente pela sua dificuldade de obtenção. Pois, quando se têm dados reais, os sinais não são perfeitos como nos dados simulados, e também pela presença nestes de inúmeras perturbações, tais como o ruído ou a *clutter*. No entanto, o algoritmo que foi elaborado, mesmo contendo ainda algumas limitações, consegue realizar a extração de algumas curvas de alguns tipos de movimento, o que pode ser uma contribuição para o estudo nesta área.

Com este algoritmo pretende-se efetuar o seguimento das principais curvas do espectrograma, não recorrendo ao processamento da sua imagem, mas sim ao processamento dos sinais que o compõem. Como adiante se poderá ver, no capítulo dos resultados, a extração dessas curvas não se torna de todo trivial, no entanto este algoritmo representa uma primeira versão, da concretização de algumas ideias.

Exposição do Algoritmo

O algoritmo será utilizado a partir do cálculo do espectrograma, pois até aí, todo o trabalho decorre como foi descrito no seção 4.1.1.3.

A ideia principal será, a partir do espectrograma, fazer uma análise da energia dos sinais em cada instante. Um dos problemas principais reside no facto de uma curva característica num determinado instante, poder ter a componente de maior energia e no instante seguinte deixar de a ter. Isto deve-se ao *cross section* das diversas partes que compõem o alvo, nesses referidos instantes. Por exemplo, num braço em movimento, a sua área de refletividade, varia a cada instante conforme a sua posição. Soluciona-se este problema fazendo uma restrição na área de estudo do sinal, ou seja, de uma forma adaptativa, tentar-se-á fazer uma previsão de onde poderá estar o próximo ponto da curva no espectrograma, face aos pontos anteriores, restringindo deste modo a área de pesquisa e evitando erros na reconstrução da curva.

Sendo importante que a atenção se foque apenas nos sinais que são interessantes, o primeiro passo será colocar os dados das restantes zonas com valores que permitam ao algoritmo ignorá-las. Contudo, não se irá atribuir um valor qualquer, a

opção passa por recolher o valor de menor energia, encontrado em todo o sinal, e atribuí-lo a todas as zonas que se pretendem ignorar.

Outro ponto que merece especial atenção é a *clutter*. Pois uma zona do espectrograma, que apresentará uma forte energia, será sempre a zona da frequência central do sinal emitido (assinalada a vermelho na Figura 4-2, com a letra A), uma vez que tudo o que esteja no *footprint* do sonar e esteja estático, irá refletir o sinal à mesma frequência que este foi emitido; mais uma vez o princípio de que se há ausência de movimento existirá ausência de Doppler. Para que este deixe de ser um possível ponto que possa trazer problemas, e uma vez que o mesmo nada interessa para o objetivo do algoritmo, tentar-se-á eliminar a *clutter*, efetuando o procedimento atrás descrito: numa curta gama de frequências em torno da frequência central, ir-se-á colocar o seu valor igual ao valor da energia mínima encontrada.

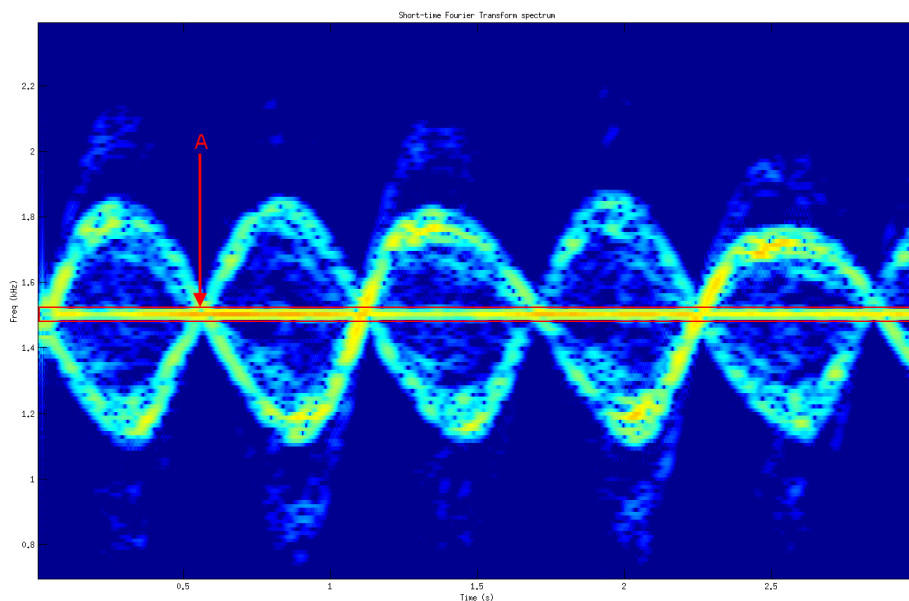


Figura 4-2 - Representação do *Clutter* num sinal de eco (Espectrograma de um movimento dos braços).

Realizado este primeiro tratamento ao espectrograma, ficamos em condições de poder iniciar a pesquisa pelas curvas características. Uma das limitações deste algoritmo é não conseguir extrair mais que duas ou três curvas características. Porém, a partir delas já se torna possível retirar algumas conclusões.

Neste momento o sinal encontra-se preparado para se avançar com a extração das curvas características. Após indicar o número n de curvas que se pretende extrair, tendo em atenção que esse valor está limitado ao máximo de duas ou três curvas, o passo seguinte será selecionar um instante do espectrograma a partir do qual se vão localizar as n frequências, correspondentes aos n valores de maior energia nesse instante. Cada um destes máximos de energia corresponderá à primeira posição de uma curva. Como atrás foi dito, a zona do instante onde se inicia a pesquisa é selecionada pelo utilizador, porém, dever-se-á selecionar uma zona em que as curvas não estejam muito próximas, para não correr o risco de estarmos a selecionar duas vezes a mesma curva, como se apresenta na Figura 4-3 a vermelho e identificado por 1. Na mesma figura, a verde e identificado por 2, é apresentada uma possível zona em que, tendo em conta o espectrograma apresentado, se aconselha a dar início à pesquisa.

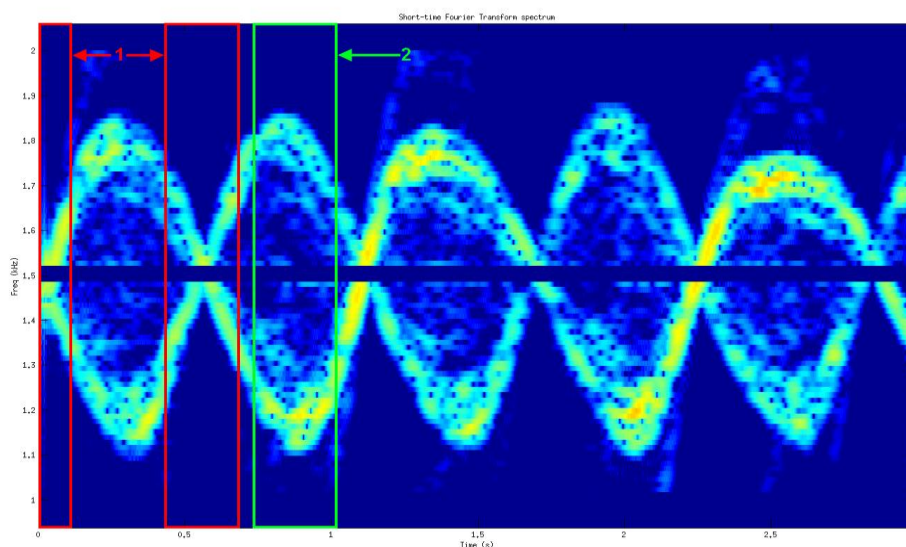


Figura 4-3 - Exemplificação de uma má zona e de uma zona aconselhável para iniciar a pesquisa no espectrograma (Espectrograma de um movimento dos braços).

Quando se inicia esta primeira pesquisa pelos máximos de energia, é importante que, após cada máximo encontrado, exista uma pequena margem, superior e inferior ao ponto encontrado, a que se impute o valor mínimo. O objetivo deste procedimento é que na próxima interação, para encontrar outro primeiro ponto de outra curva, não seja atribuído um valor pertencente a uma curva já encontrada. Os valores correspondentes à frequência são também guardados em duas variáveis, denominadas

maxPeak e *minPeak*. Estas variáveis vão indicar qual é o valor máximo e mínimo da curva. Uma vez que neste ponto do algoritmo, ainda não se sabe se são valores máximos ou mínimos, ou nem uma coisa nem outra, ambos recebem o valor da frequência, e ao longo do algoritmo serão atualizados. A extração das curvas é feita uma de cada vez mas, após se ter encontrado a primeira posição para uma dada curva, a sua extração será efetuada toda de seguida.

Mencionados estes primeiros pontos do algoritmo, passamos a explicar o processo de extração de uma curva característica, salientando os pontos considerados mais relevantes para a sua concretização. Neste ponto será de todo importante mencionar uma particularidade de como a análise do espectrograma é realizada; é comum considerar um espectrograma, como sendo uma imagem composta por diversas *frames*, será com base neste princípio que o mecanismo da algoritmia de pesquisa procederá.

Para efetuar a pesquisa existe a necessidade de criar algumas variáveis de ajuste, as quais são atualizadas ao longo da mesma. Essas variáveis são apresentadas na Figura 4-4.

```
lostValue = freq(iFrame-1,i);
mini = lostValue-miniLimit;
maxi = lostValue+maxiLimit;
% Ajuste da banda de procura!
if mini<(maxiLimit+1)
    fprintf('Ajuste Minimo \n');
    aux = miniLimit - abs(mini);
    mini = maxiLimit+1;
    maxi = maxi + aux;
end
if maxi > length(Saux(:,1))-maxiLimit
    fprintf('Ajuste Maximo \n');
    aux = maxiLimit - abs(maxi);
    mini = mini - aux;
    maxi = length(Saux(:,1))-maxiLimit;
end
[a(1) valueFre(1)] = max((Saux(mini:maxi,frame))/nfft);
valueFre(1) = valueFre(1) + (mini-1);
[a(2) valueFre(2)] = max((Saux(mini:maxi,frame+1))/nfft);
valueFre(2) = valueFre(2) + (mini-1);
Saux(floor(valueFre(1)), iFrame+1) = minValue;
Saux(ceil(valueFre(1)), iFrame+1) = minValue;
```

Figura 4-4 - Excerto do código, que mostra as variáveis para a configuração da pesquisa.

Um dos cuidados que devemos ter sempre presente é garantir que o algoritmo é o mais eficiente possível, isto é, evitarmos a possibilidade de seguir uma curva que por

qualquer motivo, o próximo ponto considerado validado pelo algoritmo, seja ele qual for, na verdade foi incorretamente validado. Para evitar que tal aconteça, a zona de pesquisa é forçada a ficar compreendida entre um intervalo $[mini, maxi]$. Este intervalo ficará compreendido entre, o anterior valor obtido subtraído de uma constante $miniLimit$ e o anterior valor obtido somado de outra constante designada de $maxiLimit$. Contudo, há que evitar que a pesquisa saia do espectrograma, pois se estivermos muito perto dos seus limites superior ou inferior corre-se o risco de tal acontecer, para tal é necessário verificar se nos encontramos perto desses limites e, se for esse o caso, fazer um ligeiro ajuste.

Outra zona crítica para extração das curvas características, são as zonas onde as curvas se cruzam, como as apresentadas na Figura 4-5 assinaladas a vermelho. Para solucionar este problema devemos averiguar o comportamento do sinal nos instantes anteriores e tentar prever o caminho que este fará ao longo desta zona crítica.

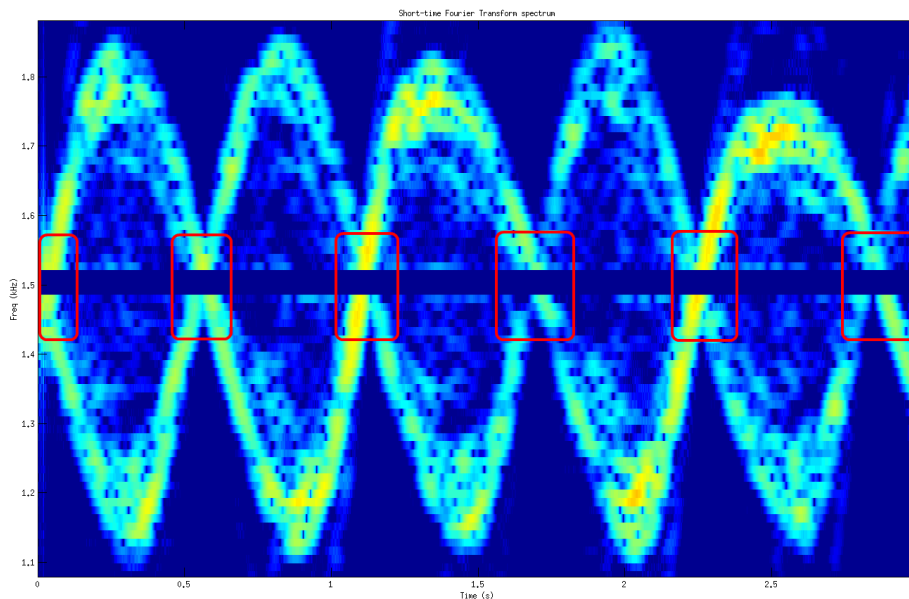


Figura 4-5 - Exemplificação de zonas críticas para a extração das curvas (Espectrograma de um movimento dos braços).

Tendo presente o que atrás foi referido, quando se inicia a pesquisa, a primeira verificação a ser efetuada é saber se está dentro ou fora desta zona crítica. De seguida ir-se-á expor o método de proceder em cada uma das situações:

- Caso se esteja fora da zona crítica é guardado, o valor máximo de energia e o valor da correspondente frequência encontrada no intervalo $[mini, maxi]$, para aquele dado instante. A seguir é feita uma comparação do valor da frequência encontrada com os valores das variáveis *maxPeak* e *minPeak*, caso se verifique a condição de o valor encontrado ser maior que *maxPeak* ou menor que *minPeak*, é atualizada a variável em que a condição se verificou.
- No caso de se estar dentro da zona crítica, o procedimento será um pouco mais complexo. Primeiro, verifica-se se a curva característica em análise está a descer ou a subir, sendo esta verificação efetuada por comparação entre o ponto anterior e o ponto em estudo. No caso da curva característica estar a descer, calcula-se o declive que existe entre o ponto anterior e o ponto que se considera ser o último pico máximo (*maxPeak*). Enquanto se estiver dentro da designada zona crítica, deixa-se de efetuar a pesquisa dos pontos pertencentes à curva característica e passa-se a estimar os pontos, estimação esta que é feita com base no declive calculado que é somado sempre ao ponto anterior. O raciocínio para o caso em que a curva característica está a subir é idêntico.

Efetuada a extração dos pontos das curvas características, e tomando o mesmo exemplo que tem vindo a ser apresentado – um movimento dos membros superiores, o resultado final da extração será o apresentado na Figura 4-6.

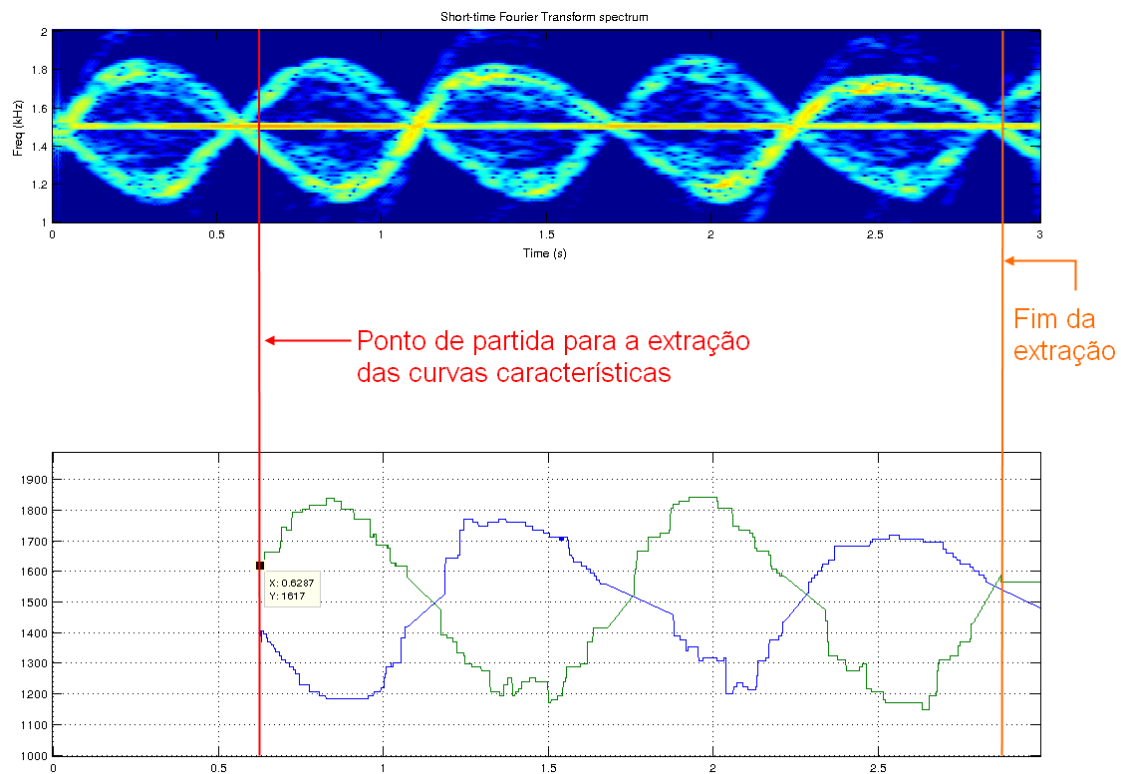


Figura 4-6 - Demonstração do resultado da extração das curvas características para um movimento dos membros superiores.

4.1.2 Algoritmo desenvolvido para o estudo do Método Passivo

O algoritmo desenvolvido para aquisição, pelo método passivo, dos ecos gerados pelo contato do membro inferior com o chão, segue o raciocínio apresentado no diagrama de blocos da Figura 3-3.

Este algoritmo, à semelhança do algoritmo para o método ativo, necessita que lhe sejam inseridos alguns parâmetros. Uma vez que se vai recorrer ao *line-out* de uma placa de som, a frequência de amostragem a considerar deverá ser aquela que a mesma placa suporta. O outro parâmetro que é necessário inserir será o tempo de escuta, ou seja, o tempo que se pretende que o sistema esteja a recolher dados, fazendo sentido que este tempo seja igual ao tempo de funcionamento atribuído ao sistema de sonar ativo, para que depois haja coerência na comparação dos dados adquiridos por ambos os sistemas.

Inseridos os parâmetros, é inicializado o sistema, ficando este em modo de escuta até o tempo parametrizado terminar, sendo de seguida os dados recolhidos armazenados num ficheiro do tipo *mat*.

Quando se pretender analisar os dados recolhidos dum dado teste, estes são lidos para uma variável estrutura, à semelhança do que se faz para o método ativo. Numa primeira instância, é possível realizar uma análise acústica. Ou seja, com recurso a umas colunas e reproduzindo os dados recolhidos, podemos escutar o que o microfone conseguiu captar. Como é previsível, este só consegue captar a informação que contenha frequências que estejam contidas na gama da sua resposta em frequência.

Não sendo suficiente a análise acústica, uma vez que existem características que o ouvido normal do ser humano não deteta, é necessária uma análise visual, ou seja, uma análise através do espectro e do espectrograma do sinal recolhido, sendo assim possível respetivamente, detetar as frequências presentes no sinal e ver a sua localização ao longo do tempo.

4.2 Descrição do *Hardware*

Pretende-se nesta seção dar a conhecer o diagrama de blocos do sistema completo, apresentado na Figura 3-1, que permitiu a recolha de dados para a realização deste trabalho, onde os componentes mais importantes são o sistema sonar ativo e o sistema acústico passivo. É efetuada uma descrição de todo o *hardware* utilizado. Porém, uma vez que o módulo de sonar utilizado não foi desenvolvido pelo autor deste trabalho, apenas são, nesta seção, descritas as suas características mais relevantes de uma forma sucinta, sendo apresentada uma descrição mais detalhada no apêndice II. É também efetuada a descrição do sistema passivo utilizado na captação do andamento dos alvos. Quer no sistema sonar ativo como no sistema acústico passivo, os dados são guardados e tratados com recurso a um computador.

4.2.1 Sistema Sonar Ativo – Plataforma Sonar

A plataforma Sonar utilizada no presente trabalho, apresentada na Figura 4-7, foi desenvolvida pelo Engenheiro Renato Costa, sob coordenação do Doutor Paulo Marques, no âmbito de um projeto designado SATSON, numa parceria entre Brisa, ISEL (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa), GUEST (Grupos de Investigação em Eletrónica e Sistemas de Telecomunicações) e FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia). Toda a documentação referente a esta plataforma encontra-se disponível no apêndice II, e em mais detalhe em [83], no entanto, são apresentadas de seguida as suas principais características.

Deve-se no entanto clarificar que esta plataforma não sofreu nenhuma modificação, ou seja, foi utilizada com as mesmas especificações que vinha do projeto anterior para o qual teria sido desenvolvida.

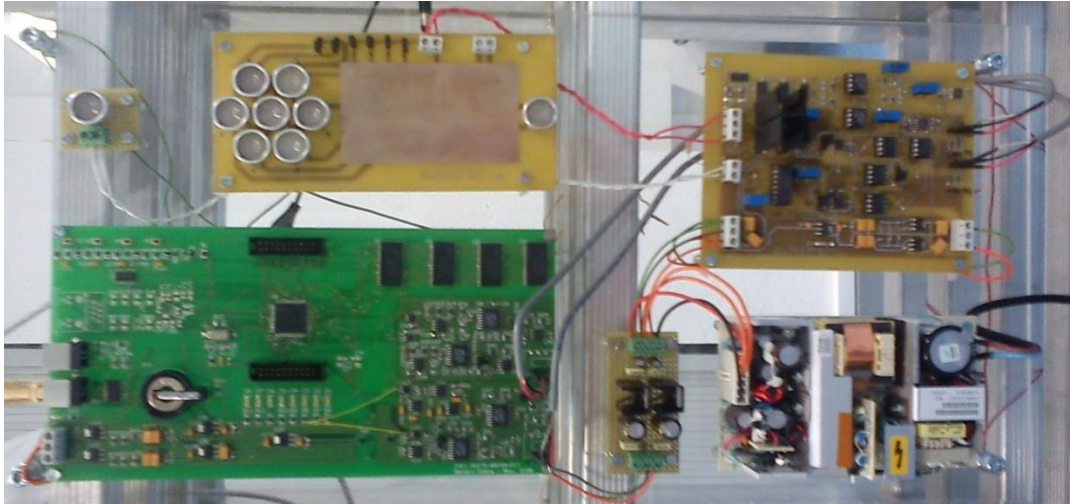


Figura 4-7 - Plataforma Sonar.

Como se pode constatar através da Figura 4-8, que apresenta o diagrama de blocos do *hardware* desta plataforma, esta encontra-se dividida num núcleo analógico e outro digital.

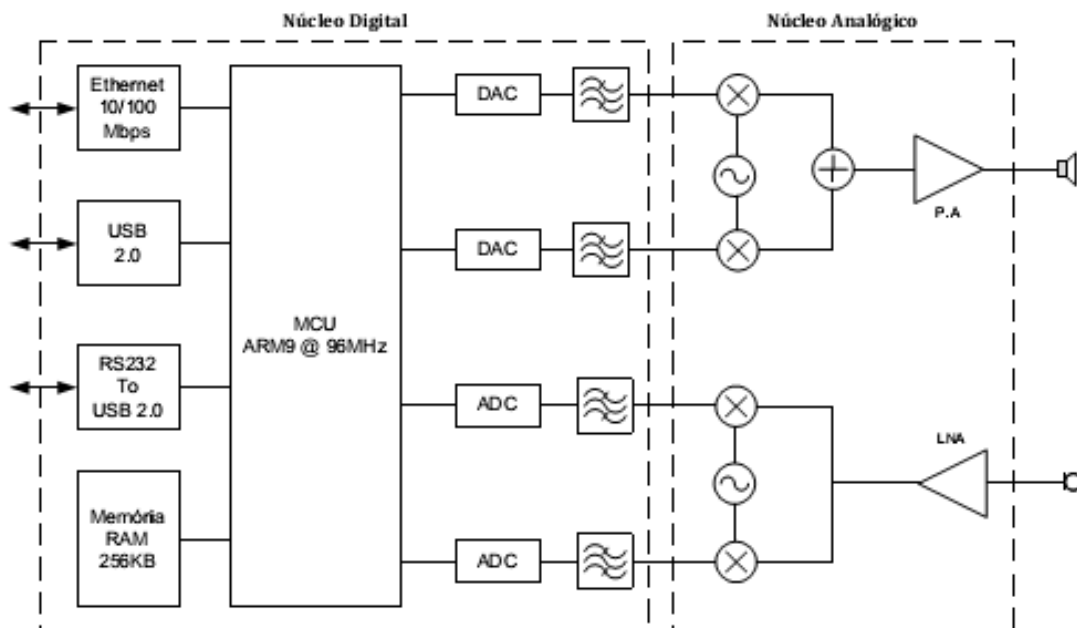


Figura 4-8 - Diagrama de blocos do *hardware* (extraído de [83]).

O núcleo analógico tem como principal função o acondicionamento de sinal. É também constituído por um modulador e desmodulador complexo analógico, que tem

como finalidade baixar a largura de banda dos sinais analógicos que acedem ao núcleo digital, podendo com isto baixar também a frequência de amostragem deste último.

A principal função do núcleo digital é efetuar a aquisição e geração dos sinais sonar em banda base. Para além disto, também tem a competência de comunicar através de inúmeros protocolos físicos, permitindo deste modo que seja feito um redireccionamento das amostras do sinal sonar para uma plataforma de processamento de sinal.

4.2.2 Sistema Acústico Passivo

O sistema acústico passivo, é constituído apenas por um recetor, que se limita a ficar à escuta de ecos de sinais com origem em fontes de outros sistemas.

Neste sistema passivo utilizou-se um microfone da marca Creative e modelo MC1000, apresentado na Figura 4-9, cujas principais especificações estão na Tabela 4-2:

Tabela 4-2 - Especificações do microfone utilizado no método passivo.

Tipo	Condensador de Eletreto, unidirecional
Resposta em frequência	Dos 100Hz aos 16kHz
Impedância de saída	Impedância baixa a 1kHz
Sensibilidade	-47dB ± 4dB
Tensão de funcionamento	1,5V a 10V
Consumo de corrente	< 500 μA
SNR	60dB (mínimo)
Tipo de cabo	Blindado
Comprimento do cabo	2,1m



Figura 4-9 - Microfone utilizado como recetor do sistema passivo.

O microfone está ligado diretamente ao PC que, quando detetada a presença de algum intruso, começa a gravar tudo o que consegue captar.

4.3 Descrição da Base de Dados Construída

Neste capítulo apresenta-se a BD recolhida e efetuam-se diversas análises que poderão servir de base de trabalho para estudos futuros. Em toda a pesquisa efetuada não se encontrou qualquer fonte que disponibilizasse dados reais recolhidos por um sonar, o que certamente será uma lacuna para o estudo nesta área. A existência dos dados por nós recolhidos permite que, em trabalhos futuros, o tempo que se gastaria na sua obtenção, possa ser aplicado na análise desses mesmos dados e em busca de soluções para os problemas que forem surgindo. Embora sendo pequena, esta BD é uma contribuição para que no futuro se possa desenvolver o estudo desta área. Será também importante salientar que, como determinados tipos de testes são difíceis de concretizar, como sejam os realizados com equinos e caninos, na recolha dos dados para este estudo, houve a intenção de a fazer de modo a construir um arquivo fidedigno para estudos futuros.

Esta BD encontra-se disponibilizada na sua íntegra em suporte digital, no DVD que acompanha este documento, estando a descrição de cada conjunto de ficheiros teste disponibilizada no *Anexo I*.

4.3.1 Constituição da Base de Dados

A BD criada, trata-se de uma biblioteca constituída pelos dados recolhidos a partir do *hardware* e software utilizados neste estudo. Nela constam dados recolhidos tendo como alvos de estudo o ser humano, o equídeo e o canino. De cada um destes alvos são retirados os dados de diferentes tipos de marcha, que implicam diferentes velocidades e diferentes assinaturas. A composição detalhada da base de dados encontra-se disponível no *Anexo I*.

4.3.1.1 Assinaturas Ultrassónicas de Seres Humanos

A recolha de dados recorrendo ao ser humano como alvo é a mais importante para este estudo, daí o facto de se terem realizado diversos testes. Nunca será possível realizar todos os testes que representem todas as situações do quotidiano mas, ter um conjunto de dados que contenha informação sobre os movimentos mais básicos do ser humano, torna-se relevante para efetuar um estudo inicial.

Recorrendo ao ser humano como alvo, são apresentados dados em que este caminha sempre na linha de vista do sonar e em linha reta, aproximando-se ou afastando-se deste. Estas recolhas foram efetuadas com diferentes tipos de marcha:

- a) Devagar;
- b) Normal;
- c) Rápido
- d) Corrida;
- e) Militar.

São efetuadas recolhas dos tipos de marcha a), b) e d), onde o ser humano se encontra às distâncias de 1 *metro* e de 4 *metros* da plataforma sonar, simulando que caminha, mas sempre no mesmo lugar.

Como é importante verificar a diferença nos dados recolhidos, entre saber se estamos na presença de um só ser humano, ou de vários seres humanos, foram realizados três testes com dois seres humanos. Num dos testes caminharam lado a lado na direção do sonar, noutra partiram na direção de afastamento do sonar e por último em que caminhavam em direções opostas.

Uma vez que existe a possibilidade deste estudo ser aplicado a diversas situações do quotidiano, recolheram-se dados com o ser humano a transportar uma caixa e a simular o transporte duma arma do tipo espingarda.

Por último, foram realizados testes em que o ser humano caminhava perpendicularmente à direção de emissão dos sinais.

4.3.1.2 *Assinaturas Ultrassónicas de Caninos*

No que diz respeito à utilização de caninos como alvo para testes, estes são mais complicados de controlar de modo a possibilitar uma recolha adequada de dados, mesmo tratando-se de animais treinados. Contudo, conseguiu-se recolher dados com o animal a caminhar sozinho na direção da plataforma, a caminhar na direção desta, acompanhado pelo criador e por fim efetuou-se uma recolha com o animal a arrancar em corrida na direção oposta ao sonar.

4.3.1.3 *Assinaturas Ultrassónicas de Equídeos*

A BD contém também testes com um equídeo. Foram recolhidos dados nos três estilos habituais de caminhada deste animal:

- a) Passe, o estilo de caminhada mais lenta;
- b) Trote, o andamento normal do cavalo;
- c) Galope, é o estilo que se pode considerar como de corrida.

4.3.2 *Identificação dos Ficheiros*

Os parâmetros utilizados num determinado teste, como mencionado no seção 4.1.1.2, são guardados dentro do próprio ficheiro, bastando apenas efetuar a sua leitura. Já a identificação do ficheiro em relação ao teste a que pertence, é feita a partir do prefixo do seu nome. A partir desse prefixo e consultando a tabela da base de dados, apresentada no *Anexo I*, onde se encontram descritas as características dos testes, poder-se-á fazer a sua identificação. Existe ainda a possibilidade de ver o vídeo recolhido para cada teste realizado, sendo utilizado o mesmo prefixo na sua identificação.

A título de exemplo, considere o ficheiro com o nome

H_4-06__20121105T111912__ASHM.mat

onde se irá exemplificar como proceder para a sua correta identificação:

H_4-06	A sequência inicial é designada como prefixo do nome do ficheiro. Tendo este prefixo, sabe-se à partida que é um teste realizado com H umanos, que pertence ao 4º conjunto de testes, e é o 6º teste desse conjunto. A partir do prefixo, e consultando a tabela da BD apresentada no apêndice III, ficamos a saber que a plataforma se encontrava na vertical aquando da recolha dos dados, que o teste consiste na marcha do ser humano no tipo marcha militar caminhando na direção do sonar. Caso, seja necessário detalhar o modo como o ser humano caminhou ao longo do tempo, a mesma diretoria disponibiliza uma gravação deste teste com o nome H_4-06.
20121105T111912	Este conjunto identifica a data e hora a que o teste foi realizado. Esta parte do nome é gerada automaticamente pelo algoritmo quando o ficheiro é criado. No presente exemplo, indica que o teste foi realizado no ano de 2012, no mês 11 (Novembro), no dia 5 pelas 11h19m12s. Deste modo fica assegurado que não há enganos no que diz respeito ao momento da realização do teste.
ASHM	ASHM é a sigla para <i>Ative Sonar Human Motion</i> , e é utilizada para identificar que os dados foram obtidos por um sistema de sonar ativo. Quando a recolha de dados é efetuada por um sistema acústico passivo, o modo de atribuição do nome é similar terminando com o sufixo PSHM, sigla para <i>Passive Sonar Human Motion</i> .

Numa diretoria encontram-se todos os ficheiros referentes ao conjunto das recolhas de dados utilizando o mesmo alvo. Associado a uma recolha encontram-se ficheiros do tipo *mat* que contêm os dados dos sinais capturados nas duas tipologias de recolha de dados (ativa e passiva), um ficheiro do tipo *wmv* (*Windows Media Video*) que contém a gravação do teste efetuado e um ficheiro do tipo *png* (*Portable Network Graphics*) que contém uma imagem do espectrograma do sinal recolhido pelo sonar.

Este ficheiro *png* tem a vantagem de evitar que, para procurar um determinado teste, se tenha de estar a analisar dado a dado até o encontrar, bastando abrir a imagem e verificar se é o teste que se pretende.

As variáveis armazenadas no ficheiro *mat* correspondente à recolha dos sinais de eco de ultrassom, estão dispostas na Tabela 4-3:

Tabela 4-3 - Descrição das variáveis do ficheiro guardado da recolha pelo método ativo.

Variável	Descrição
F_s	Frequência de amostragem do sinal transmitido.
<i>testDate</i>	Data e hora, da realização do teste.
<i>signalType</i>	Referência do sinal que se transmitiu, tendo como escolhas possíveis as apresentadas na Tabela 4-1.
<i>fo_sin1</i>	Frequência central da primeira senoide.
<i>fo_sin2</i>	Frequência central da segunda senoide.
<i>fo</i>	Frequência de início do chirp.
<i>AmplitudeSignalTX</i>	Amplitude do sinal transmitido.
<i>PRF</i>	<i>Pulse Repetition Frequency</i> .
<i>pulseTimeTX</i>	Duração do pulso transmitido, em milissegundos.
<i>pulseTimeRX</i>	Tempo de escuta do sonar, em milissegundos;
<i>LBOfSignal</i>	Largura de Banda do Chirp.

<i>SignalTX</i>	Vetor com o sinal transmitido, com a duração de <i>pulseTimeTX</i> milissegundos.
<i>RawData</i>	Vetor com o sinal de eco adquirido pelo sonar.
<i>time4SendReceive</i>	Indica o tempo real da comunicação entre o bloco central e a plataforma, que será sempre aproximadamente igual ao tempo de recolha de ecos.

No caso do ficheiro *mat* criado na recolha dos ecos pelo método passivo, apenas guarda o vetor com os dados recolhidos durante o tempo de escuta parametrizado pelo utilizador, numa variável designada por *mySpeech*.

Com toda esta informação disponível será possível, em qualquer momento, efetuar uma análise dos dados recolhidos, sem qualquer tipo de dúvida relativa aos parâmetros utilizados ou ao movimento efetuado pelo alvo.

5 Resultados

Apresentam-se neste capítulo, os resultados obtidos realçando os aspetos mais interessantes. Para além de resultados com seres humanos, são também apresentados outros animais como caninos e equídeos. Desta forma será possível comparar as assinaturas de Doppler de um ser humano, com animais quadrúpedes e entre animais quadrúpedes e assim propor estratégias para a sua identificação e classificação.

5.1 Apresentação dos cenários de teste

Nesta seção são apresentados os cenários que foram utilizados para a realização dos testes, estando descritos no *Apêndice I*. Os cenários para a realização dos testes foram escolhidos dando preferência a áreas abertas, de modo a reduzir o máximo de perturbações devidas ao meio e para que a maior percentagem do sinal refletido tenha origem no alvo de interesse.

Dos cenários onde se realizaram os testes, uns puderam ser escolhidos, outros não puderam como o caso dos realizados com o equídeo. O local mais utilizado ao longo desta dissertação foi o Laboratório de Investigação e Desenvolvimento da Área Departamental de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e Computadores do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, local onde se procedeu a todo o estudo realizado, e se realizaram os primeiros testes aos algoritmos que iam sendo elaborados. Quando se recolheram sinais para apresentação dos resultados finais, selecionou-se o piso -2 da Área Departamental de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, por ser uma área ampla e com um número reduzido de obstáculos. Um outro espaço utilizado para a recolha de dados foi o pátio interior do edifício G do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, onde se procederam aos testes com o canino. Por fim, os testes que tinham como alvo o equídeo, decorreram num dos picadeiros interiores da Sociedade Hípica Portuguesa.

5.2 Apresentação de Resultados

Apresentam-se nesta seção os resultados do estudo efetuado sobre a identificação e análise do movimento humano por ultrassons. Não sendo possível obter a assinatura individual de cada parte do corpo são apresentadas as assinaturas daquelas que podem ser consideradas as mais importantes do ponto de vista de assinatura de ultrassons, de modo a tentar extrair as suas curvas características. De seguida, é apresentado um estudo aprofundado sobre o movimento mais básico do ser humano: a marcha. Após o estudo do movimento de marcha, é efetuada a sua comparação com o movimento dum ser humano a deslocar-se a diversas velocidades, e em diferentes direções face à direção de propagação dos sinais transmitidos. Serão também apresentadas duas situações que, são consideradas relevantes para potenciais aplicações de vigilância ou de segurança: o movimento dum ser humano transportando um objeto e a presença de mais de um ser humano em cena. Através da recolha e análise das assinaturas destes seres vivos, poder-se-á desenvolver metodologias capazes de fazer a distinção entre o ser humano e os animais. Também serão apresentadas as diferenças nas assinaturas de animais quadrúpedes para o mesmo estilo de caminhada.

Serão incluídos resultados recolhidos de forma ativa e de forma passiva. Será efetuada uma análise comparativa, com o objetivo de calibrar o sistema, fazendo corresponder o som acústico do passo ao momento em que as pernas apresentam micro-Doppler nulo.

5.2.1 Assinatura de diferentes partes do corpo humano

A assinatura de micro-Doppler gerada pelo corpo humano está repleta de curvas características, tornando-se complexa de analisar. Uma curva característica representa uma parte do corpo humano, como por exemplo, a cabeça, o pescoço, os ombros, os braços, os cotovelos, os antebraços, as mãos, os dedos, o tronco, a coxa, a perna, os joelhos ou os pés.

Como os sinais refletidos pelas diferentes partes do corpo humano, geram diferentes assinaturas de micro-Doppler, tendo o conhecimento da curva correspondente

a cada parte do corpo, será mais fácil interpretar os sinais que retornam da totalidade do corpo humano. Não sendo de todo possível recolher a assinatura individual de cada uma das partes do corpo humano, apresentam-se as assinaturas daquelas que podem ser consideradas as mais importantes. Assim sendo, e de modo a possibilitar uma melhor compreensão da assinatura de micro-Doppler gerada pelo corpo humano, são apresentadas em primeiro lugar as assinaturas individuais dos membros superiores, do tronco e dos membros inferiores.

5.2.1.1 Assinatura dos membros superiores

A assinatura de micro-Doppler gerada pelos membros superiores, quando um ser humano caminha normalmente, traduz-se de forma simplificada por duas sinusoides desfasadas entre si, uma representando o membro superior esquerdo e a outra o membro superior direito. Analisando o movimento que um braço realiza, consegue-se justificar o sinal gerado. O membro superior tem um movimento oscilatório, avançando e recuando ao longo do tronco, e a uma velocidade que se pode considerar, durante o período de aquisição de dados, constante. Esse movimento oscilatório induz o efeito de Doppler em que o desvio na frequência face à frequência central do sinal emitido, aumenta e diminui de forma periódica. Como a oscilação é efetuada a velocidade constante, é compreensível que a evolução do desvio também o seja.

Assim sendo podemos afirmar que, quando uma pessoa caminha na direção do sonar, à medida que o membro superior avança a frequência de Doppler aumenta, e quando esse membro começa a recuar a frequência de Doppler começa a diminuir.

Para melhor compreensão da situação atrás descrita, é apresentado na Figura 5-1, o espectrograma da aquisição dos ecos gerados pelo movimento do membro superior direito. Na Figura 5-1, destaca-se claramente a sinusoide, conforme descrita no parágrafo anterior.

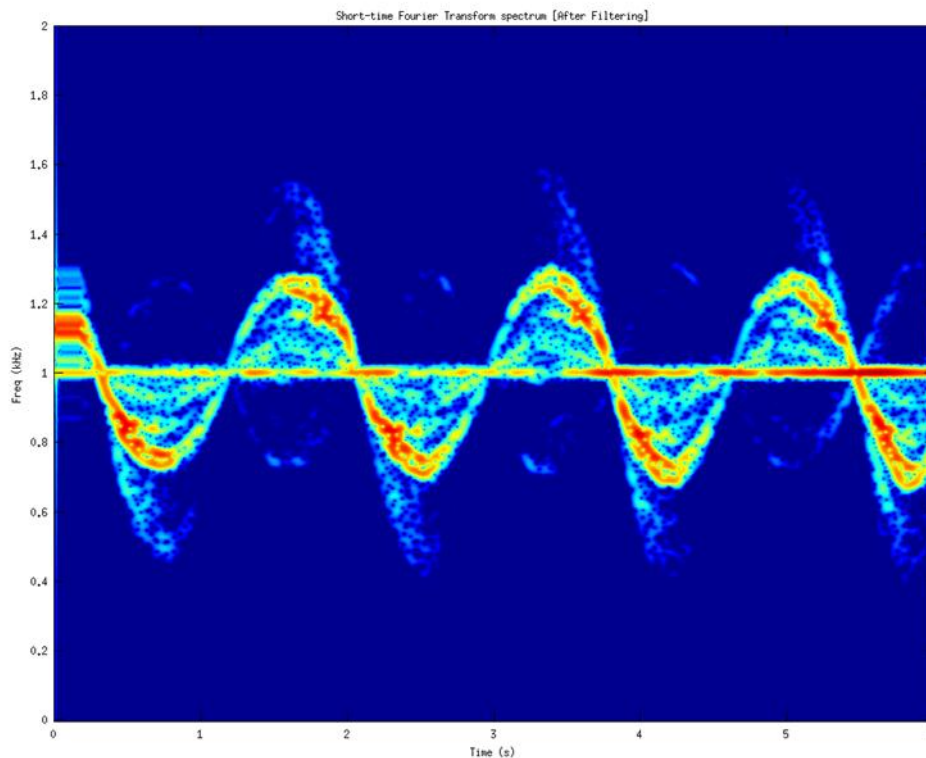


Figura 5-1 - Espectrograma do movimento do membro superior direito de um ser humano.

5.2.1.2 Assinatura do tronco

A recolha da assinatura de micro-Doppler gerada pelo tronco não é facilmente conseguida de forma isolada do restante movimento do corpo, isto porque não se pode simplesmente fazer deslizar o corpo numa direção, uma vez que durante a caminhada do ser humano, o seu corpo apresenta pequenas acelerações e desacelerações, assim como pequenos movimentos oscilatórios, que acabam por levar a que o sinal gerado tenha uma ligeira forma de dente de serra como descrito em [10, 16, 63]. A solução encontrada para adquirir resultados do tronco, o mais próximo possível da caminhada normal, com a menor introdução de assinaturas geradas por outras partes do corpo, passa por caminhar com os braços junto ao corpo, manter a cabeça bem fixa, e ao movimentar as pernas tentar mantê-las o mais esticadas possível. Através da Figura 5-2, observar o resultado obtido com o movimento do tronco efetuado conforme foi atrás descrito.

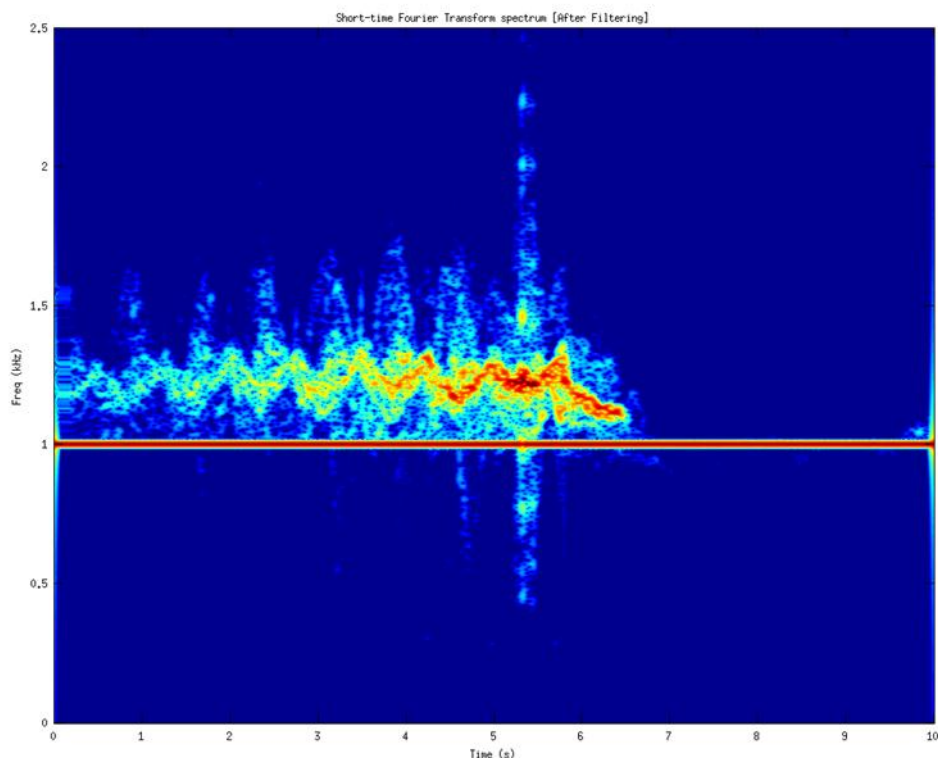


Figura 5-2 - Espectrograma do movimento do tronco de um ser humano.

A forte componente que se observa com pequenas oscilações, representa o movimento do tronco. A componente do tronco é, do corpo humano, aquela que mais se destaca, devido aos grandes níveis de energia que dela retornam ao sonar. Estes elevados níveis de energia ficam a dever-se à grande área exposta que o tronco possui relativamente às restantes partes que constituem o corpo humano.

5.2.1.3 Assinatura dos membros inferiores

É expectável que a assinatura gerada por cada um dos membros inferiores no espectrograma, quando comparada com as demais, tenha uma forma semelhante a uma senoide de grande amplitude de acordo com [10, 16, 63]. Estas oscilações são bem detetáveis no espectrograma, como se constata na Figura 5-3. A curva característica gerada por estes dois membros, é responsável pelo sinal com maior Doppler, devendo-se este à velocidade que os membros inferiores atingem face às restantes partes do

corpo, isto para o caso do ser humano caminhar normalmente. Durante a caminhada, o movimento do membro inferior pode dividir-se em três fases. A primeira fase corresponde ao levantar do pé do chão, com a perna a ter um momento de aceleração, a segunda fase corresponde ao momento em que o membro inferior está exatamente por debaixo do tronco, e por último temos a fase de desaceleração da perna, quando esta se prepara para pousar o calcanhar no chão [10].

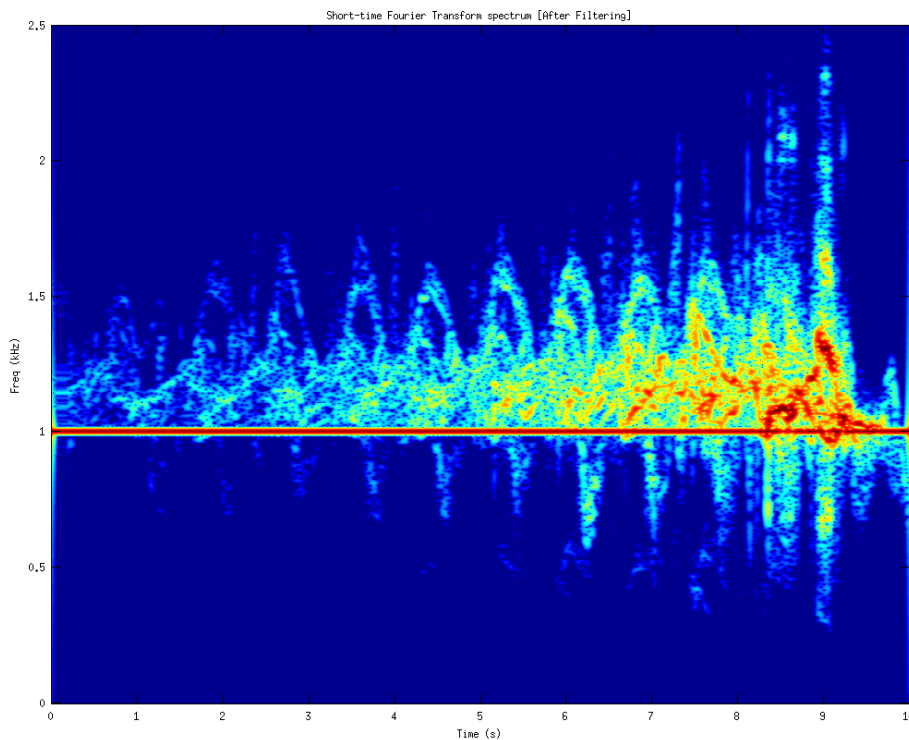


Figura 5-3 - Espectrograma do movimento das pernas.

Analisando a Figura 5-3, consegue-se observar os grandes desvios de Doppler gerado pelos membros inferiores. No entanto, como já foi referido, não foi possível fazer a aquisição isolada do sinal retornado por estes membros, pelo que também são evidentes efeitos devidos às outras partes do corpo.

5.2.2 *Estudo do Movimento do Corpo Humano*

Conhecendo as assinaturas no espectrograma das três grandes partes do corpo humano (membros inferiores, tronco e membros superiores) de forma individual, poder-se-á com maior facilidade analisar o movimento de todo o corpo humano.

Apresenta-se de seguida um teste realizado no cenário I (descrito no *Apêndice I*), tendo como alvo um ser humano do sexo masculino com 1,83 *metros* de altura, e 76 *Kg*. Este efetua um percurso de 8 metros na direção da plataforma, com um estilo de marcha militar, a uma velocidade constante. Pode-se observar a gravação deste movimento, a partir do ficheiro **H_8-07.mov**, presente na BD disponibilizada no DVD que anexa a este documento. A Figura 5-7 mostra o espectrograma do eco gerado pelo corpo humano em movimento, onde se encontram presentes os valores de Doppler ao longo do tempo, e a energia das ondas refletidas pelas diferentes partes do corpo. O indivíduo, demora aproximadamente 10 segundos a percorrer cerca de 8 metros, sendo necessárias 13 passadas para completar este trajeto.

O sinal transmitido pelo sonar teve uma duração total de 10 segundos. Este sinal é formado por diversas réplicas de um sinal de curta duração no tempo, que deve garantir que quando é transmitida uma réplica o eco da anterior já chegou ao sonar, por outras palavras deve cumprir a função de ambiguidade. Este tempo é calculado segundo a distância máxima de alcance do sistema ou a distância máxima a que se pretende detetar um alvo. No caso deste teste considerou-se 10 metros, uma vez que acima desta distância o sonar utilizado não consegue detetar alvos. Sabendo o valor desta distância, através da equação (5-1), fica-se a saber que a duração do sinal transmitido é de 29 *milisegundos*. Pode-se observar este sinal na Figura 5-4.

$$pulseTimeTX = \frac{D_{max}}{C_{sound}} \times 1000 \approx 29 [ms] \quad (5-1)$$

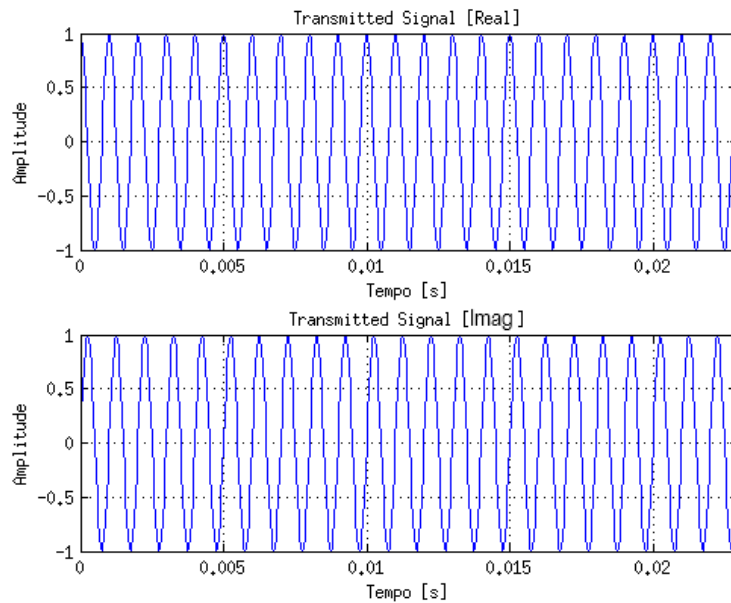


Figura 5-4 - Sinal transmitido - Sinusoide complexa à frequência de 1 kHz.

O sonar transmitiu uma sinusoide complexa (Figura 5-4) à frequência central de 1 kHz em banda base, sendo modulada para banda canal, ficando colocada assim à frequência de 41 kHz. Parte deste reflete-se no ser humano na direção do sonar, gerando o eco apresentado na Figura 5-5. O eco recebido, não contém só a frequência de 1 kHz, mas também inúmeros desvios de frequência em torno da frequência central transmitida, causados pelos diferentes movimentos das diferentes partes do corpo humano, como se pode observar no espectro da Figura 5-6, em baixo.

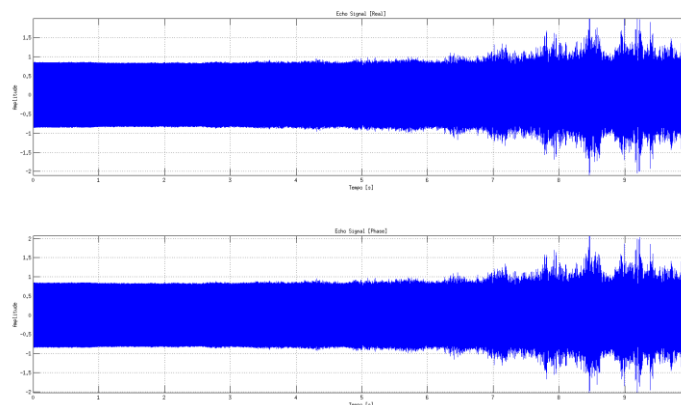


Figura 5-5 - Sinal recebido, gerado pelas reflexões no corpo humano em movimento.

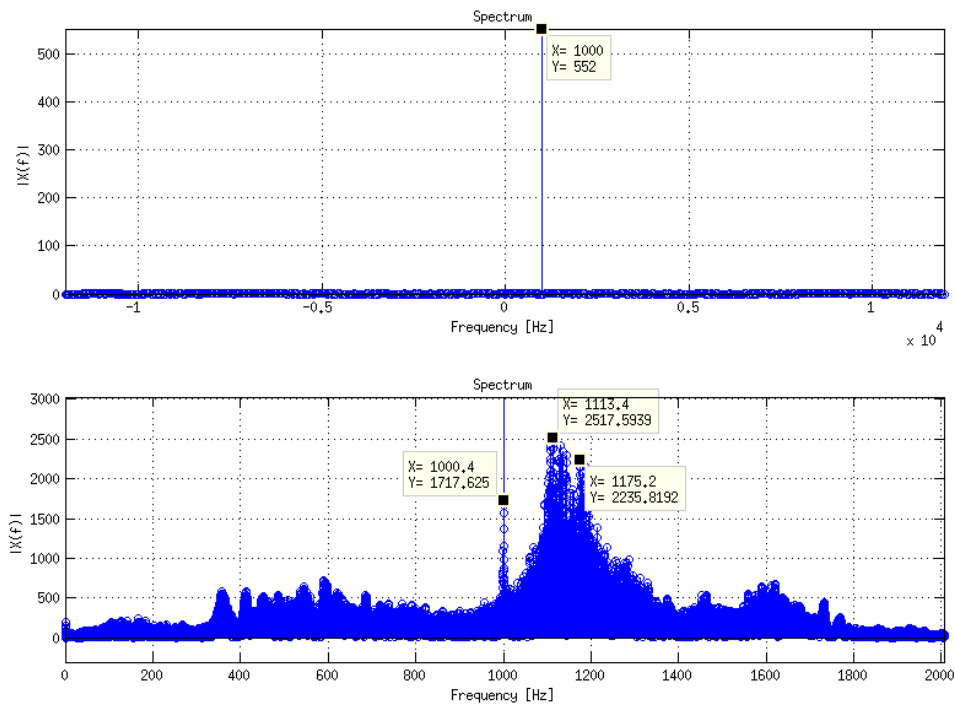


Figura 5-6 - Espectro do sinal transmitido (em cima), e do sinal recebido (em baixo).

Analisando o espectro da Figura 5-6, observa-se uma grande concentração de energia acima da frequência central, como seria expectável, uma vez que o ser humano se desloca na direção do sonar. Justifica-se a presença de Doppler abaixo da frequência central, pelo fato de quando o ser humano se movimenta na direção da fonte ter os membros com um movimento oscilatório, para a frente e para trás, o que provoca desvios de Doppler abaixo da frequência central.

Na Figura 5-6, em baixo, é bem visível a energia presente na frequência central. Neste espectro também constam os dois maiores picos de Doppler do sinal, que por análise do espectrograma se pode concluir que são frequências com origem na parte do corpo com maior *cross-section*, ou seja, o tronco.

Fazendo uma análise ao espectrograma da Figura 5-7, vê-se uma linha horizontal que apresenta mais energia, em torno da frequência central do sinal transmitido (1 kHz), que representa a soma do acoplamento direto entre o transmissor e recetor através do ar, com o sinal refletido por toda a matéria estacionária que se encontra no alcance do sonar. Existe uma outra linha com algumas flutuações em torno

da frequência de 1,193 kHz, etiquetada com o número 1, que representa o movimento do tronco, a mais forte componente de reflexão do corpo humano a caminhar. É possível ainda observar na zona etiquetada com o número 2, o Doppler gerado pelo movimento dos membros inferiores e superiores. Apesar de estes terem valores de desvio de Doppler superiores ao que o tronco apresenta, isto deve-se à velocidade superior em relação ao tronco que os membros atingem. Estes têm *cross-sections* menores que o tronco, o que implica que se tornam menos detetáveis que o tronco com o aumento da distância.

Após observação do vídeo, compreende-se que das duas curvas marcadas com a etiqueta 2 na Figura 5-7, a de maior amplitude, ou seja, de maior Doppler, representa o movimento dos membros superiores e a de menor Doppler, o movimento dos membros inferiores. Explica-se isto pelo movimento mais rápido que os membros superiores realizam em comparação com o dos membros inferiores. No entanto as curvas aparecem quase que sobrepostas, pois o movimento dos dois pares de membros é feito no mesmo instante de tempo.

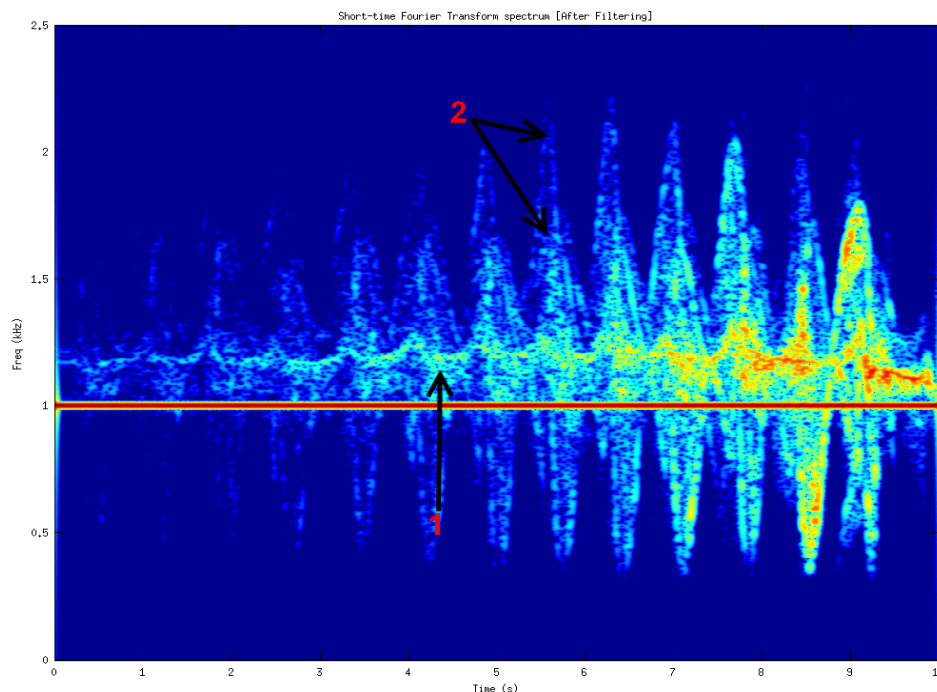


Figura 5-7 - Espectrograma do sinal de eco do movimento do ser humano.

Fazendo o escalonamento da imagem resultante do espectrograma do eco capturado pelo sonar, conseguem-se identificar as 13 passadas da caminhada do ser humano, como mostra a Figura 5-8. Como afirmado anteriormente, as curvas de maior amplitude representam os membros superiores, mas o movimento destes sobrepõe-se com o dos membros inferiores, pelo que ao se fazer o escalonamento dos valores que deram origem ao espectrograma da Figura 5-7, e apesar de se perder alguma informação dos dados cinemáticos do ser humano, consegue-se realçar os sinais mais fracos da passada no início da caminhada, permitindo identificar o momento temporal de cada passada.

Interpreta-se um período da curva característica do movimento de um membro inferior da seguinte forma: o maior valor negativo de Doppler representa o momento em que o membro inferior, durante a marcha, se encontra atrás do tronco; à medida que o membro inferior avança, a frequência de Doppler deste aproxima-se da frequência de Doppler do tronco, até que quando o membro inferior se encontra por baixo do tronco, as frequências de Doppler são iguais, pois neste instante de tempo a velocidade de ambos também é igual; continuando o membro inferior a avançar a sua frequência de Doppler também aumenta até o pé tocar no chão. Neste momento obtém-se o máximo valor da frequência de Doppler. Após o membro inferior estar em contato com o chão, o outro começa a avançar, ficando este para trás, existindo um progresso da frequência de Doppler a ele associado simétrico ao descrito.

No movimento do corpo humano, é o desvio de Doppler associado ao tronco que indica a velocidade a que o humano se desloca. Por este motivo, todos os restantes movimentos associados às diferentes partes do corpo humano, têm as suas curvas características em torno das frequências de Doppler do tronco.

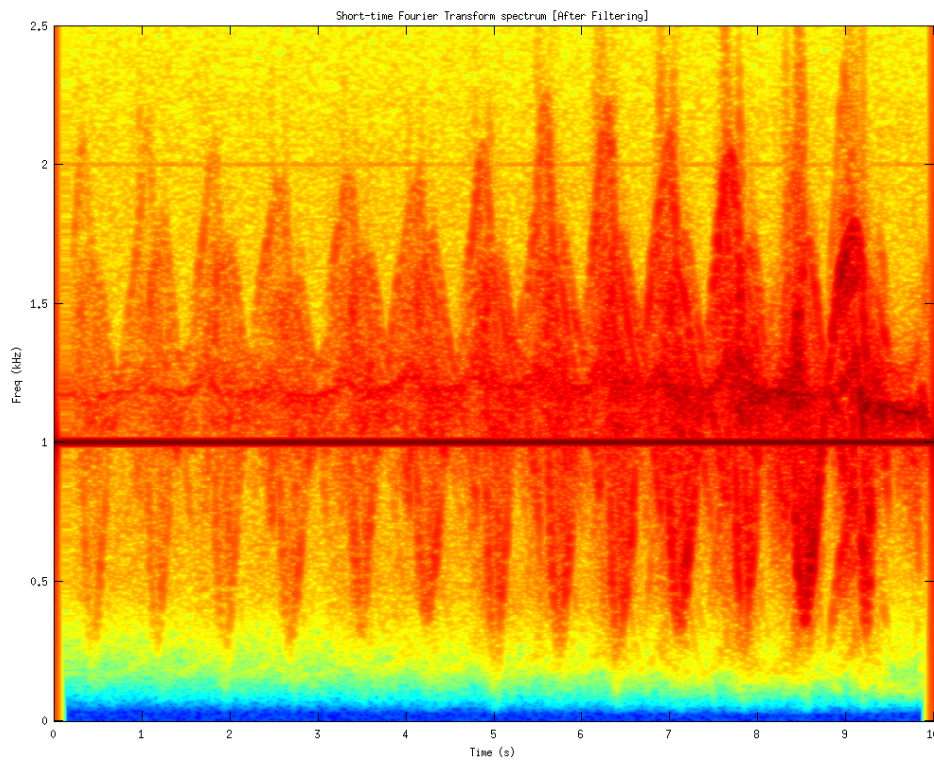


Figura 5-8 - Espectrograma (escalonado) do movimento do ser humano.

O desvio de Doppler Δf é proporcional à velocidade V do objeto [13]:

$$\Delta f = \frac{2V}{C_{sound}} f_c \quad (5-2)$$

onde C_{sound} é a velocidade do som e f_c a frequência transmitida.

Observando a Figura 5-9, verificamos que o desvio médio da frequência Doppler do tronco é 193 Hz.

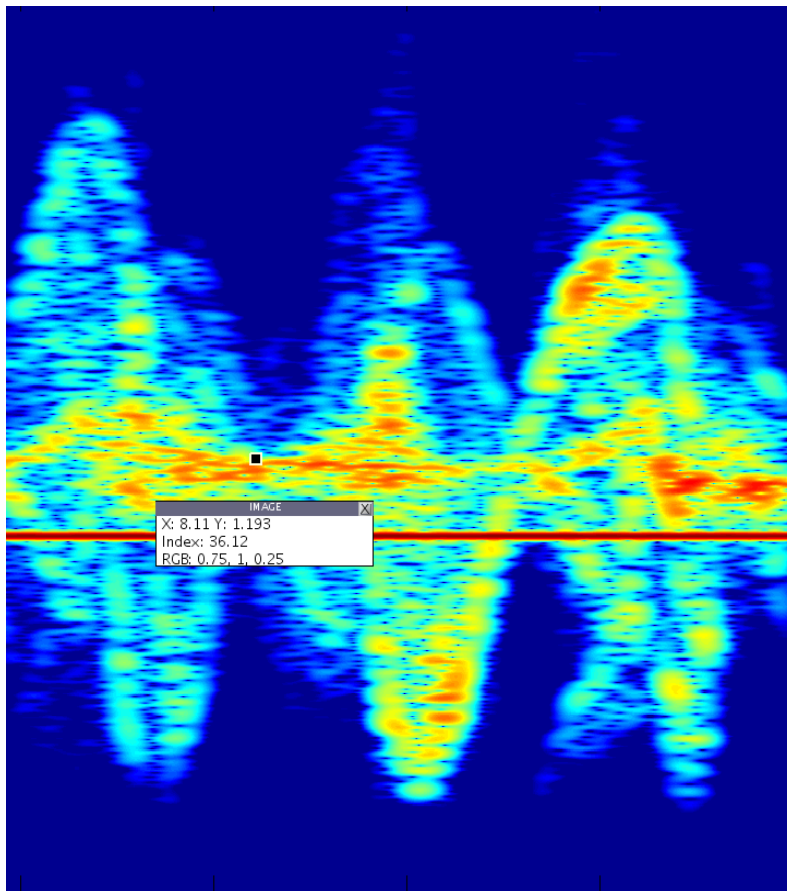


Figura 5-9 - Corte do espectrograma apresentado na Figura 5-7.

Com um desvio de Doppler, Δf , igual a 193 Hz, $C_s \approx 343$ m/s e $f_c = 41$ kHz obtém-se a velocidade v do humano igual a:

$$v_o = \frac{\Delta f}{2f_c} \times C_s = \frac{193}{2 \times 41000} \times 343 = 0,807 \text{ [m/s]}. \quad (5-3)$$

Assim calculando o valor da velocidade do ser humano, tendo por base a razão entre o comprimento da faixa de teste D e o tempo t que o caminhante a demorou a percorrer, obtém-se:

$$v_o = \frac{D}{t} = \frac{8}{10} = 0,8 \text{ [m/s]}. \quad (5-4)$$

Os valores obtidos para a velocidade calculada recorrendo ao desvio de Doppler e à geometria experimental são muito próximos, o que leva a concluir que os

desvios de frequência observados correspondem à parte do corpo que tem o maior valor de *cross-section*, o tronco. Podendo afirmar com isto que se poderá utilizar os dados de micro-Doppler gerados pelo retorno do ser humano em movimento, para determinar corretamente a velocidade.

A cadência da frequência da passada (f_m), pode ser obtida através do número de passadas dadas num dado intervalo de tempo. No caso concreto do presente estudo, tem-se 13 oscilações da passada dos membros inferiores durante os 10 segundos da recolha de dados, o que indica que haja uma cadência da frequência da passada de 1,3 Hz.

Contudo, este valor para a cadência pode ser calculado computacionalmente. Para tal, e com base na observação do espectrograma, é selecionada uma frequência onde seja perceptível a passada do ser humano, ou seja, escolhe-se uma frequência perto da amplitude máxima da curva característica dos membros inferiores. Neste caso concreto, selecionou-se a frequência de 1750 Hz, guardando-se num vetor todos os valores de potência existentes ao longo do tempo para essa frequência. A Figura 5-10 apresenta a curva obtida. Fazendo a FFT deste sinal recolhido, obtém-se a Figura 5-11 que apresenta os dados obtidos no domínio da frequência, onde o pico observado representa a cadência da passada.

Para se saber a frequência a que corresponde uma amostra de um sinal, é necessário saber qual o seu tempo de amostragem, de onde se retira a frequência de amostragem. A frequência correspondente a uma amostra i pode ser obtida através da equação (5-7).

$$T_s = \frac{T_t}{N} = \frac{10}{470} = 0,02128 \text{ segundos} \quad (5-5)$$

$$F_s = \frac{1}{T_s} = 47 \text{ Hz} \quad (5-6)$$

$$f_{ponto} = \frac{i \times F_s}{N} = \frac{i}{T_t} [\text{Hz}] \quad (5-7)$$

Se compararmos este valor com o obtido teoricamente, pode-se afirmar que são bastante próximos, o que comprova o estudo efetuado sobre a cadência.

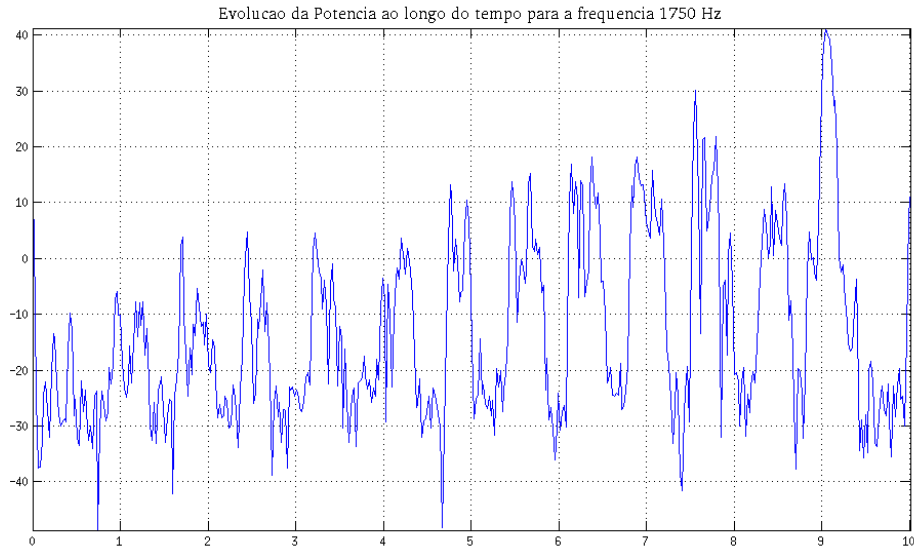


Figura 5-10 - Evolução da potência ao longo do tempo para a $f= 1750$ Hz.

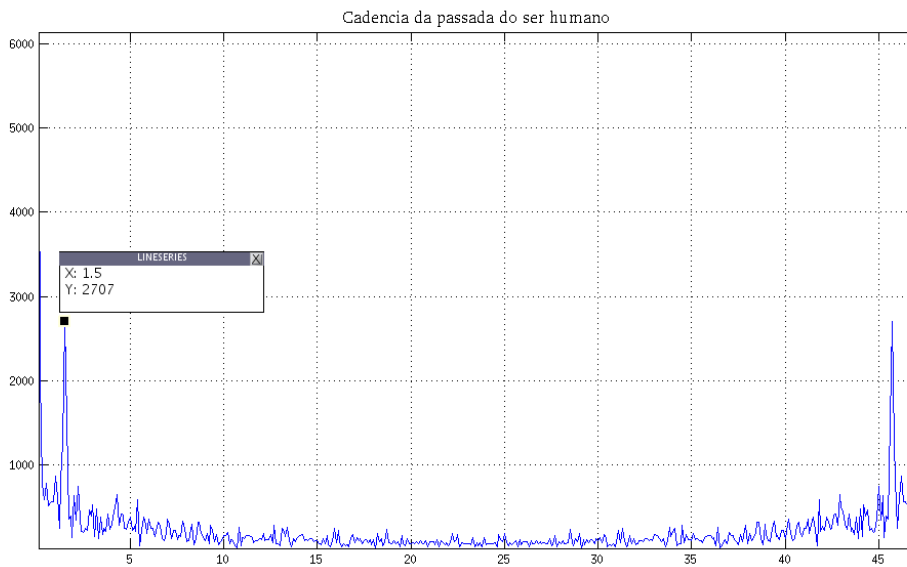


Figura 5-11 - FFT da frequência escolhida ($f=1750$ Hz).

Considerando os valores obtidos teoricamente, e se se dividir a velocidade do ser humano pela cadência da frequência da passada obtém-se o comprimento da passada (l_{stride}),

$$l_{stride} = \frac{v_o}{f_m} = \frac{0,8}{1.3} = 0.615 [m]. \quad (5-8)$$

Tendo conhecimento do comprimento da passada e do número de passadas realizadas, consegue-se saber a distância percorrida,

$$D = l_{stride} \times n_{stride} = 0.615 \times 13 = 7.995 [m]. \quad (5-9)$$

Este valor está de acordo com a distância real de 8 metros.

5.2.2.1 *Confrontação dos dados recolhidos pelo método passivo com os dados recolhidos pelo método ativo.*

O ser humano, durante o seu movimento de caminhada, gera sinais acústicos que têm origem no contato dos membros inferiores com o chão. Estes sinais sendo captados através de um sistema passivo, e após efetuado o seu processamento e posterior análise, poderão servir para a deteção de movimento numa determinada área. O sinal recolhido corresponde à passada do ser humano, podendo a partir desta determinar-se a velocidade a que a pessoa se desloca.

Contudo, no presente estudo pretendeu-se confrontar os resultados obtidos pelos dois métodos, e confirmar se estes se relacionam como esperado, ou seja, se no momento em que as pernas apresentam um desvio de Doppler máximo, o que corresponde ao momento em que o pé entra em contacto com o chão, coincide no método passivo o momento em que é detetado um passo.

A Figura 5-12 representa o sinal acústico da passada do ser humano no domínio do tempo, recolhido pelo método passivo, durante a realização deste teste. A maioria dos dados acústicos recolhidos, tiveram recurso a um microfone autónomo,

como já descrito. No entanto, existe um conjunto restrito de testes em que os dados acústicos foram extraídos a partir do áudio recolhido pela camara de vídeo. A necessidade de recorrer a esta via deveu-se a problemas de ruído inserido pela própria placa de som do computador utilizado.

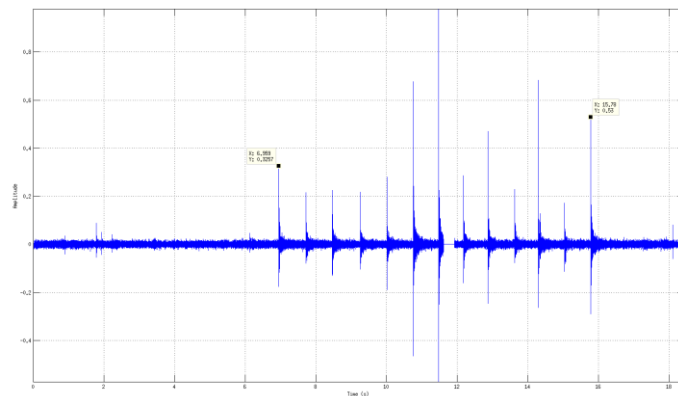


Figura 5-12 - Sinal recolhido pelo método passivo.

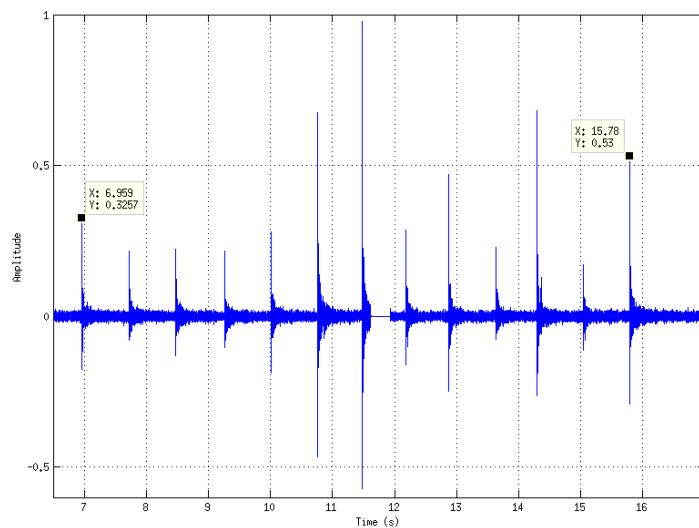


Figura 5-13 - Zona de interesse do sinal recolhido pelo método passivo.

À semelhança do sinal recolhido pelo método ativo, também este sinal pode ser reproduzido, sendo possível escutar as passadas do ser humano.

Apesar do tempo de escuta deste sinal ser de aproximadamente 18 segundos, como se pode observar pela Figura 5-13, o tempo de interesse reduz-se aos 10 segundos que o ser humano demora a caminhar os 8 metros. O tempo que separa o primeiro do último contato do pé com o chão é de aproximadamente 9 segundos, a este tempo se se somar uma pequena fração de tempo, correspondente ao movimento do corpo até dar o primeiro passo, e ao movimento do corpo depois de dar o último passo, ir-se-á obter os 10 segundos.

Por observação ao espectro do sinal recolhido (Figura 5-14), verifica-se que este se encontra disperso por toda a gama de frequências audíveis.

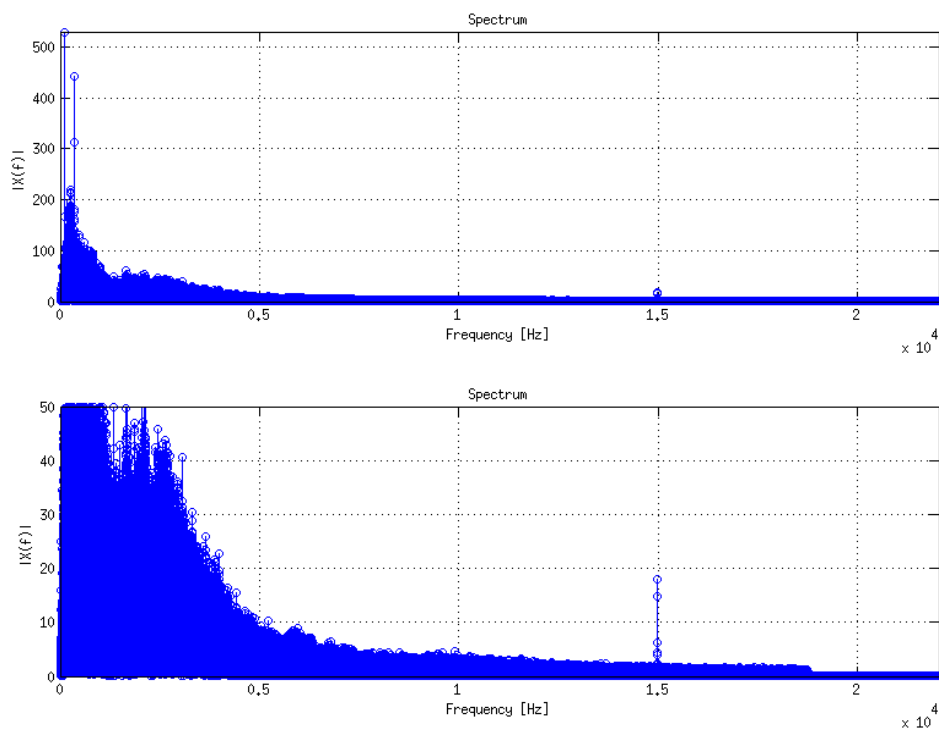


Figura 5-14 - Espectro do sinal recolhido (em cima); Espectro do sinal recolhido com zoom (em baixo).

Sebatier e Ekimov, em [13], recorrem a um sensor de ultrassons, como sistema passivo, para a recolha da passada do ser humano, alegando que na gama das frequências audíveis os dados obtidos não são nítidos devido ao ruído acústico. Com os dados recolhidos neste estudo, demonstra-se que os dados obtidos com um recetor cuja zona de funcionamento está na gama do audível, são suficientemente bons para a identificação da passada do ser humano.

A Figura 5-15 representa, em cima, o espectrograma do sinal recolhido pelo método passivo, e em baixo, o mesmo espectrograma mas escalonado, conseguindo-se assim ter uma maior perceção da localização temporal das passadas. É de notar que nos espectrogramas apresentados, é apenas mostrada a zona de interesse.

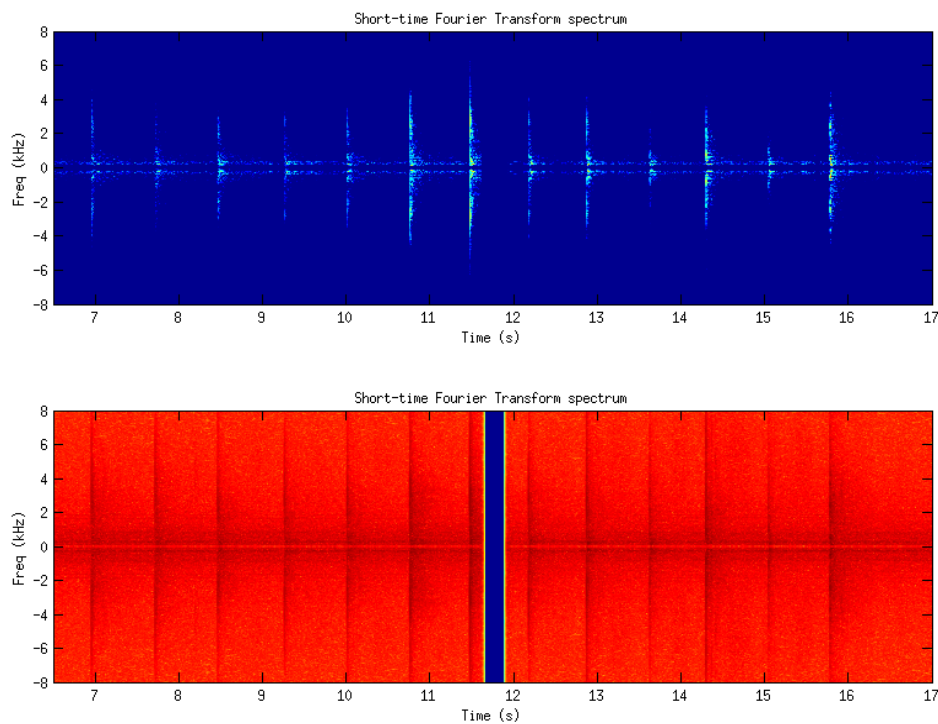


Figura 5-15 - Espectrograma (em cima) e Espectrograma com o valor da potência escalonado (em baixo), do sinal recolhido pelo sistema passivo.

Observa-se uma zona anómala perto dos 12 segundos, que representa uma falha na captação do áudio. No entanto, conseguem-se identificar as 13 passadas realizadas pelo ser humano. Observando o espectrograma, conclui-se que o contato do

membro inferior do ser humano com o chão gera um sinal que se estende desde os poucos Hz até cerca dos 7 kHz.

Terá um enorme interesse comparar o espectrograma gerado com os dados recolhidos pelo método passivo com o espectrograma gerado com os dados recolhidos pelo método ativo, com a finalidade de por um lado mostrar que se podem correlacionar as análises feitas em ambos os casos, por outro, para se comprovar que se poderá ter um sistema misto, ou seja, poder-se-á ter um sistema passivo que primeiro identifica a presença de um ser humano através do sinal gerado pelo contato dos membros inferiores com o chão e a quando a sua deteção, começar a emitir a partir do sistema ativo, para que posteriormente se possa analisar o movimento do ser humano, e futuramente se possa proceder à sua identificação. A Figura 5-16 ilustra o momento em que o membro inferior contacta com o chão é o instante de tempo em que se verifica micro-Doppler máximo gerado por este membro. Foram traçadas linhas verticais que unem os dois espectrogramas. Estas coincidem com os instantes de tempo em que o membro inferior bate no chão, espectrograma inferior, e vão culminar no espectrograma de cima, que advém da recolha de dados pelo método direto, correspondendo então ao micro-Doppler máximo gerado pelos membros inferiores.

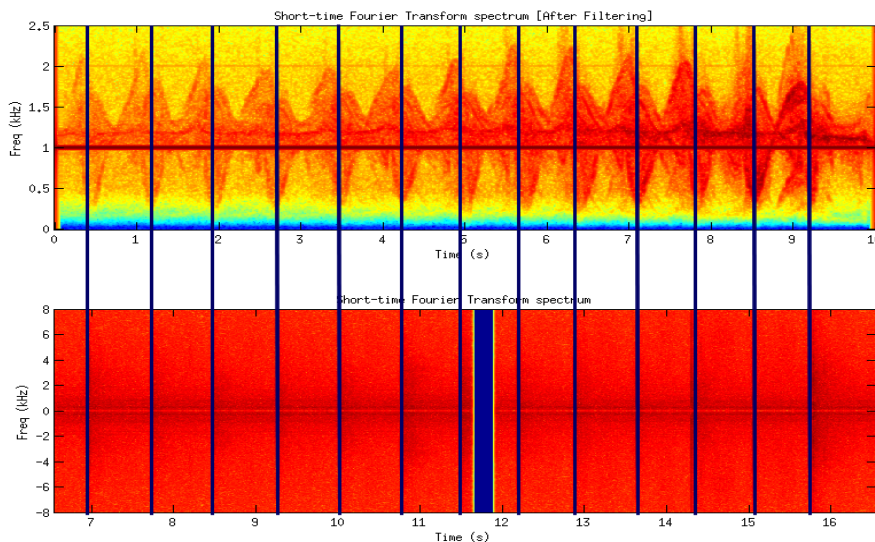


Figura 5-16 - Comparação dos dados recolhidos pelo método ativo (a) e método passivo (b), a partir dos seus espectrogramas.

Na Figura 5-16, os espectrogramas apresentam os seus valores de potência escalonados, com o intuito de se salientar os dados de maior relevo para o que é pretendido: no espectrograma de cima, o movimento dos membros inferiores, no espectrograma (b), o sinal gerado pelo contato do membro inferior com o chão.

Observa-se no espectrograma (a) da Figura 5-16, duas sinusoides quase que sobrepostas. Como já fora dito, a de maior amplitude neste caso particular representa os membros superiores e a de menor amplitude, que surge décimas de segundo mais atrasada, corresponde ao movimento dos membros inferiores, e será esta última que tem interesse para o estudo pretendido. Por análise à Figura 5-16, observa-se que no momento em que o membro inferior toca no chão, será aproximadamente o momento em que se obteve máximo desvio na frequência de Doppler causado pelo membro inferior.

5.2.3 Assinaturas de Doppler com diferentes estilos de caminhada do ser humano, e em direções diferentes.

Apresenta-se de seguida os resultados recolhidos com um ser humano caminhado em diferentes formas, podendo assim comparar as diferentes assinaturas de Doppler que os diferentes tipos de caminhada geram.

Nas subsecções seguintes, é apresentada a assinatura de Doppler que teve origem nos dados recolhidos em cada uma das diferentes formas de caminhada, onde o indivíduo alvo é o utilizado na secção 5.2.2, para o mesmo cenário. Todos os testes realizados e apresentados nesta secção tiveram uma recolha de dados com duração de 10 segundos, onde o indivíduo alvo percorreu 8 metros.

O grupo de testes de seguida apresentado encontra-se subdividido em três conjuntos. O primeiro conjunto pretende mostrar as diferentes assinaturas de Doppler originadas pelos diferentes modos de caminhar. Como tal, para que se possam comparar as assinaturas de Doppler, a direção em que o indivíduo alvo se deslocou foi sempre a mesma, na direção da plataforma sonar, assim como a distância percorrida. Os estilos de caminhada utilizados neste estudo são os seguintes:

- Caminhada lenta;
- Caminhada, à velocidade normal;
- Caminhada rápida;
- Corrida;
- Marcha, género militar.

O segundo conjunto de testes apresentados tem o objetivo de se perceber quais as diferenças das assinaturas de Doppler recolhidas quando o indivíduo alvo se desloca em diferentes direções. Nos resultados apresentados que ilustram este conjunto de testes, tal como anteriormente, o indivíduo percorreu a mesma distância em todos os testes e manteve sempre o mesmo estilo de caminhada, sendo esta efetuada nas seguintes direções:

- Na direção oposta à plataforma (afastamento);
- Na direção da plataforma (aproximação);
- Perpendicular à plataforma;
- Oblíquo à plataforma.

Por último, e porque tem toda a importância perceber qual a diferença entre ter uma pessoa na área de recolha de dados, ou ter mais que uma, são apresentadas as assinaturas de Doppler recolhidas na presença de dois seres humanos, em duas situações de caminhada:

- Os dois indivíduos caminhando lado a lado na direção da plataforma;
- Os dois indivíduos a caminharem em sentidos opostos, um aproximando-se da plataforma e o outro a afastar-se desta.

No processamento dos dados que deram origem aos espectrogramas das seguintes subsecções (5.2.3.1, 5.2.3.2 e 5.2.3.3), foram usados os parâmetros descritos na Tabela 5-1 e Tabela 5-2.

Tabela 5-1 - Parametrização da janela temporal, utilizada para o processamento dos dados apresentados nesta secção.

Parametrização da Janela Temporal	
Janela temporal	Kaiser-Bessel
Tamanho (L)	400 Milissegundos
Número de pontos (window size)	16384
Beta da janela	100

Como já mencionado, apesar de se definir o tamanho da janela temporal, a partir do tempo que queremos que esta tenha, de modo a tornar os cálculos mais eficientes quando este valor é convertido em número de pontos, é arredondado para a potência de 2 superior mais próxima. Neste caso concreto, fez-se a opção por uma janela temporal com a dimensão de 400 milissegundos, que equivale a 9600 pontos. Sendo o valor de base 2 seguinte mais próximo igual a 16384, então de fato teremos uma janela temporal com um tamanho de 682,6 milissegundos. A partir da Figura 5-17, pode-se observar do lado esquerdo a janela temporal com o tempo de 400 milissegundos e os 9600 pontos, e do lado direito a janela temporal já ajustada com 16384 pontos, ou seja, 682,6 milissegundos.

Tabela 5-2 - Parametrização do espectrograma, utilizado após o processamento dos dados apresentados nesta secção.

Parametrização do Espectrograma	
Número de FFT (N)	16384
Sobreposição entre janelas temporais adjacentes	16368
Janela temporal	(apresentada na Tabela 5-1)

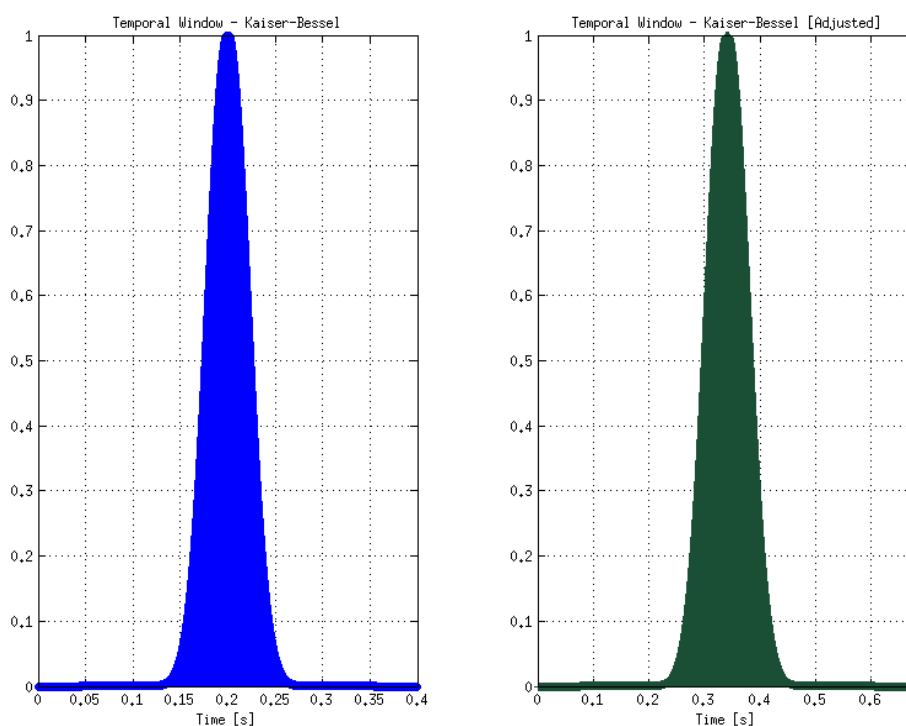


Figura 5-17 - Janela Temporal de Kaiser-Bessel. Do lado esquerdo, a janela com os parâmetros selecionados pelo utilizador, do lado direito, a janela ajustada, utilizada no processamento dos dados recolhidos, e apresentados nesta secção.

5.2.3.1 Assinaturas de Doppler, com estilos diferentes de caminhada

Nesta secção, serão apresentadas as assinaturas de Doppler de diferentes estilos de caminhada do ser humano, com o intuito de se entender as diferenças que possam existir entre elas.

Por forma a se perceber qual a influência que existe na amplitude das curvas características, de assinatura para assinatura de Doppler dos diferentes estilos de caminhada, os espectrogramas apresentam-se truncados entre as mesmas frequências ([250; 2250]Hz). Todos os espectrogramas apresentados nesta secção podem ser observados com maior detalhe no **apêndice III**.

Como será expetável, diferentes estilos de caminhada terão que originar diferentes assinaturas. Começando por comparar a caminhada lenta (Figura 5-18 e

Figura 5-19), normal (Figura 5-20 e Figura 5-21) e rápida (Figura 5-22 e Figura 5-23), é possível observar que à medida que a velocidade da caminhada do ser humano aumenta, a amplitude das curvas características dos membros também aumenta, assim como o seu período diminui. Isto acontece pois o aumento da velocidade implica movimentos mais rápidos, o que faz com que por um lado o período da curva que representa o movimento do membro tenha uma duração menor, e dada a sua maior velocidade induzirá um maior desvio da frequência de Doppler.

Como já fora explicado, o tronco é a zona do corpo humano que tem maior *cross-section*, e por conseguinte a frequência média da curva característica originada por esta parte do corpo é que determina a velocidade a que o ser humano se desloca. Ora como será de prever, se o ser humano aumenta a velocidade, também o desvio da frequência média da curva característica que representa o tronco aumentará. Este fato é constatado quando se observam os diferentes espectrogramas, onde à medida que a velocidade aumenta também este desvio de frequência aumenta face à frequência central do sinal fora emitido.

Analisando a Figura 5-19, Figura 5-21 e Figura 5-23, que representam os sinais recolhidos pelo método passivo e o seu espectrograma, para os estilos de caminhada lenta, normal e rápida, respetivamente, observa-se a energia gerada pelo contato do membro inferior com o chão, onde se conseguem detetar nitidamente as passadas do ser humano. Estes sinais apresentam um maior número de ecos causados pelo contato, uma vez que por forma a garantir que se recolham todos os dados, o indivíduo começará a caminhar alguns metros antes da zona de teste. Mas é de todo fácil perceber quais são os ecos correspondentes ao espectrograma com as assinaturas de Doppler; sabendo o número n de movimentos realizados pelos membros inferiores, basta contarem-se no sinal recolhido pelo método passivo as últimas n passadas.

Ao se observar a Figura 5-24 e Figura 5-25, que correspondem respetivamente à assinatura de Doppler e aos dados recolhidos pelo sistema passivo, do ser humano a deslocar-se em corrida, verifica-se que existe um grande desvio da frequência de Doppler, e que por se ter movimentos mais rápidos, as curvas características de Doppler geradas, não são tão perceptíveis. Por observação do vídeo recolhido a quando da

realização deste teste, é observável que os membros inferiores e superiores não produzem movimentos muito oscilatórios, apesar de o pouco movimento existente ser mais rápido que nos três casos anteriores, isto explica também o porquê das curvas não serem tão perceptíveis como nos casos até aqui ilustrados, nesta secção. Com o sinal recolhido pelo sistema passivo, observa-se que as passadas ocorrem com uma frequência maior.

Fazendo a análise comparativa entre os estilos de caminhada anteriores e o estilo de marcha militar, e considerando a Figura 5-26 e Figura 5-27, que ilustram a assinatura de Doppler, e os ecos gerados pela passada, respetivamente, constata-se que sendo a marcha militar um movimento mais lento, o desvio de Doppler causado pelo tronco é inferior a qualquer um dos estilos até aqui descritos. Contudo, e uma vez que no estilo de marcha militar, existe uma grande oscilação dos membros, a amplitude das curvas características de Doppler geradas são superior às dos estilos de caminhada anteriores, assim como o período destas.

Em suma, pode-se afirmar que é possível diferenciar os estilos de locomoção apresentados, em especial entre o estilo de caminhada em geral e o de marcha militar. Consegue-se determinar a velocidade aproximada a que o ser humano se desloca. A deteção da presença do ser humano, na área em estudo, é muitas vezes viável tanto pelo método passivo como pelo método ativo, o que leva a crer que a implementação de um tipo de sistema com estes dois métodos, num corredor por exemplo, torna possível a deteção de um ser humano, e fazer uma análise sobre o seu estilo de movimento. Se se estiver a falar de um sistema de segurança, se a área em que fora detetado a presença de um ser humano seja uma área de isolamento (ou seja, em que seja pressuposto não haver ninguém), a simples deteção da presença do ser humano desencadeia imediatamente um alarme, se for uma zona em que haja acesso de ser humanos, o fato de este se deslocar a correr, poderá acionar um alerta, que se traduz em atividade suspeita.

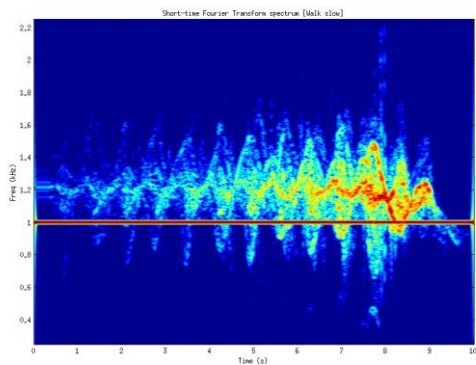


Figura 5-18 – Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar devagar.

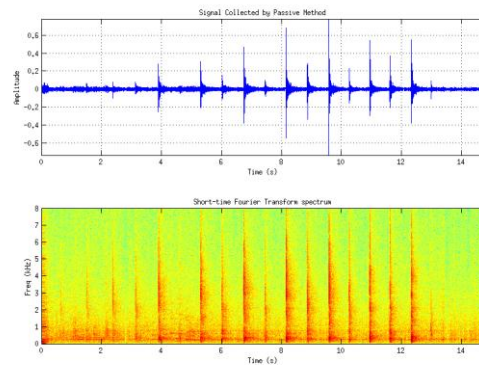


Figura 5-19 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano a caminhar devagar.

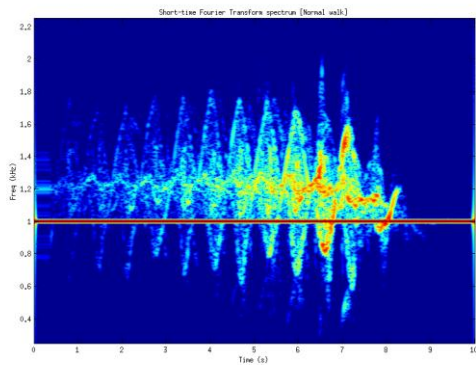


Figura 5-20 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar normalmente.

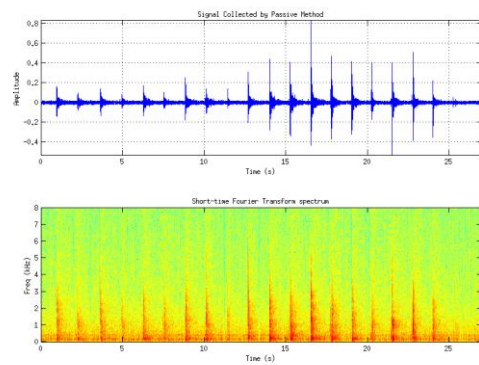


Figura 5-21 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano a caminhar normalmente.

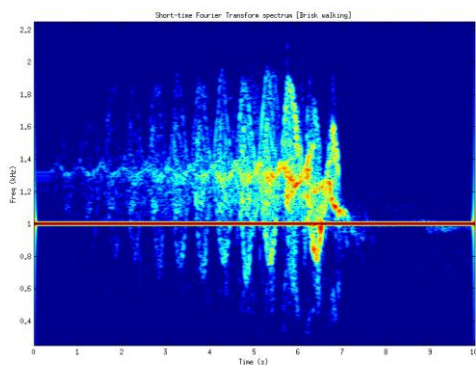


Figura 5-22 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar rápido.

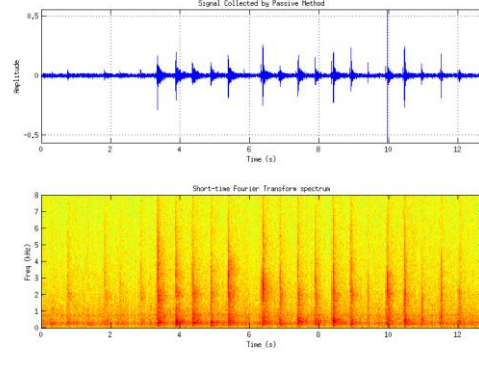


Figura 5-23 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano a caminhar rápido.

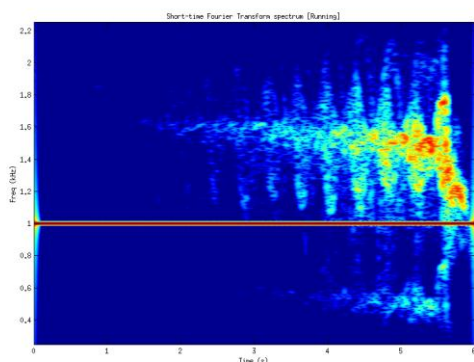


Figura 5-24 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a correr.

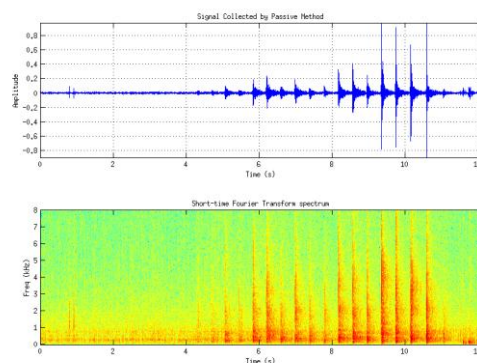


Figura 5-25 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano a correr.

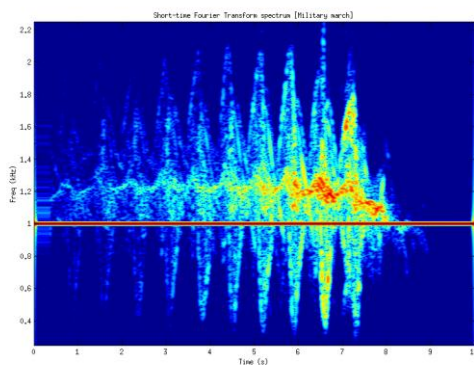


Figura 5-26 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar com estilo de marcha militar.

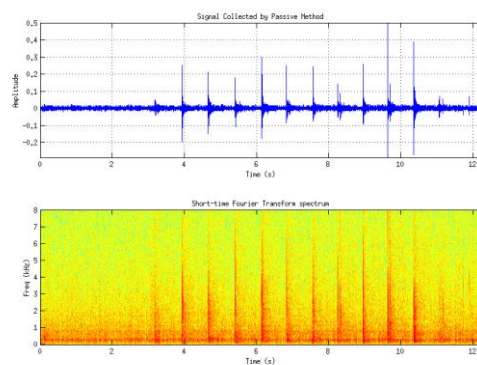


Figura 5-27 - Sinal recolhido e respetivo espectrograma, a partir do método passivo, com um ser humano com estilo de marcha militar.

5.2.3.2 Assinaturas de Doppler, com diferentes direções de caminhada

Quando se faz a deteção do movimento de um ser humano, torna-se relevante perceber a direção para onde este se desloca. Com este objetivo, realizaram-se quatro testes em que o indivíduo alvo se desloca para direções diferentes. No primeiro teste, o indivíduo desloca-se na direção perpendicular relativa à direção de propagação do sinal (Figura 5-28), e no segundo teste o deslocamento é realizado obliquamente (Figura 5-29), também em relação à direção de propagação do sinal. Os dois últimos testes são realizados com o ser humano a deslocar-se na mesma linha de propagação do feixe, só

que no penúltimo este aproxima-se da plataforma (Figura 5-29), e no último afasta-se desta (Figura 5-31).

Após o processamento dos dados recolhidos pela plataforma sonar, e da análise das assinaturas de Doppler geradas, tentou-se perceber quais as diferenças, e se é possível determinar a direção de locomoção do ser humano. Não serão apresentados os dados recolhidos pelo sistema passivo, uma vez que os ecos gerados pela passada do ser humano, não são relevantes para a perceção de onde vem e para onde vai a deslocar-se o indivíduo. Os espectrogramas apresentados da Figura 5-28 à Figura 5-31 encontram-se no **apêndice III**, em maior dimensão para que melhor se possa analisar as curvas características das assinaturas de Doppler geradas.

Ao analisar os espectrogramas das quatro assinaturas de Doppler, concluímos que as diferentes direções originam diferentes assinaturas. Apesar de em alguns casos não ser logo detetável qual a direção que o alvo está a tomar, após uma análise mais cuidada por observação da assinatura consegue-se aferir qual a direção que este toma. No entanto, uma solução com que se pudesse aferir a direção de movimento, poderá passar por utilizar dois ou mais sensores.

Não querendo com isto que seja de todo perceptível associar uma assinatura a uma direção.

Quando o ser humano se desloca na direção perpendicular à direção de propagação e é iluminado pelo sinal, o retorno recebido pelo sistema ativo, origina um espectrograma em que o Doppler presente situa-se próximo da frequência central, mas com a particularidade, durante o percurso que o indivíduo faz, desde que entra na linha de vista do sonar até sair desta, a frequência de Doppler vai diminuindo, começando por estar acima da frequência central do sinal emitido, e no instante em que sai da linha de vista do sonar, o Doppler do eco recolhido já se encontra abaixo da frequência central do sinal emitido. Podendo ainda afirmar-se que no momento em que o indivíduo se encontra exatamente à frente da plataforma, a média da frequência do desvio de Doppler situa-se sobre a frequência do sinal transmitido, que neste caso é 1 kHz . Ao se observar o espectrograma da Figura 5-28, observam-se uma curva onde se detetam oito picos, que levam a crer que correspondem ao movimento dos membros. Justifica-se a

afirmação anterior, tendo em consideração que a superfície do corpo humano não é plana, e o sinal ao iluminar o corpo humano, é refletido em todas as direções, sendo portanto possível que parte deste chegue aos transdutores recetores do sonar. O motivo do sinal ter forma decrescente, justifica-se que o ser humano desde que entra zona de linha de vista do sonar até se encontrar diante deste, está-se a aproximar da plataforma; quando passa diante do sonar até sair da linha de vista deste, o ser humano está-se a afastar da plataforma e daí o eco gerado vir com a frequência de Doppler inferior à frequência central do sinal transmitido.

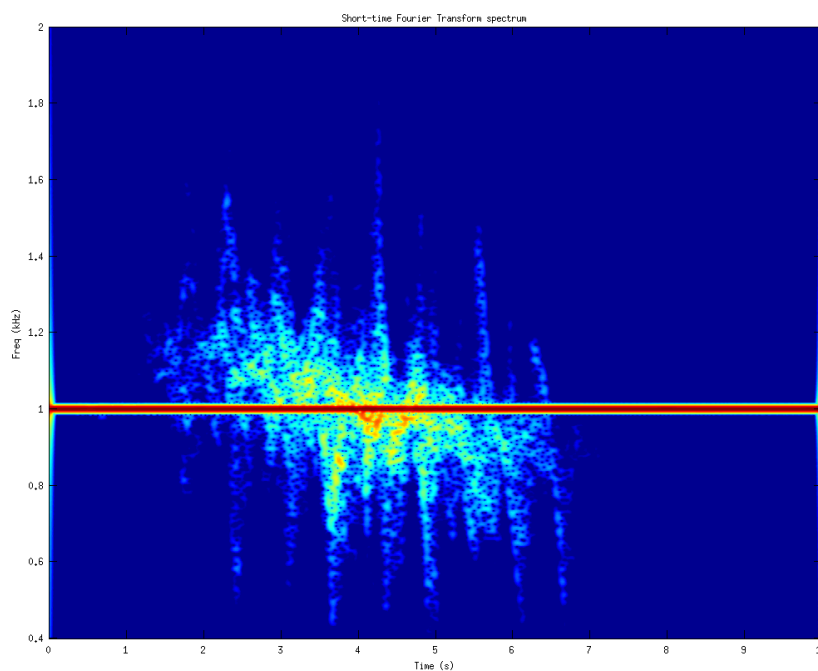


Figura 5-28 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a deslocar-se na perpendicular.

Quando se analisa o espectrograma correspondente ao retorno do sinal correspondente ao deslocamento oblíquo do ser humano (Figura 5-29), é observada uma assinatura muito diferente das até aqui apresentadas. O desvio da frequência de Doppler está acima da frequência central do sinal transmitido, o que leva a afirmar que a direção oblíqua que o indivíduo toma, é de aproximação à posição da plataforma. São observáveis alguns dos picos correspondentes às passadas, o que impossibilita saber o

número concreto de passadas. O fato de se obter sinais tão fracos, deve-se à direção para a qual o corpo está virado face aos sinais que nele colidem, ou seja, uma grande parte dos sinais são refletidos também na direção oblíqua, e daí existirem curvas que não sejam tão perceptíveis.

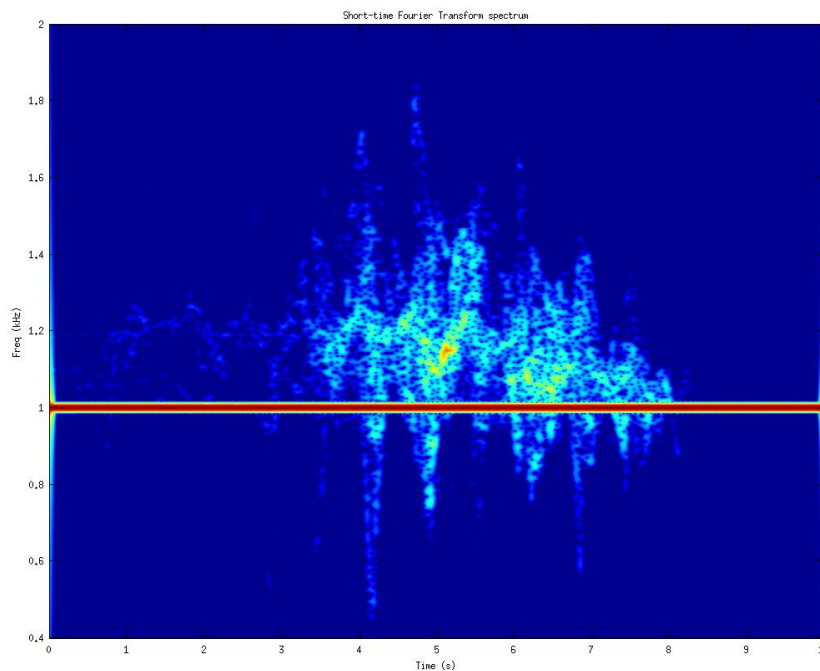


Figura 5-29 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano deslocar-se obliquamente.

Realiza-se de seguida a análise dos espectrogramas referentes às outras duas direções de caminhada, uma na direção de aproximação e a outra na direção de afastamento do sonar, Figura 5-30 e Figura 5-31 respetivamente, em linha reta com a plataforma sonar.

Analisando os espectrogramas da Figura 5-30 e Figura 5-31, para além de ser intuitiva qual a direção de propagação, também a partir deles é exequível a realização de uma análise mais profunda do movimento realizado. No espectrograma da Figura 5-30, observam-se as 14 passadas realizadas pelo ser humano, na direção da plataforma, pois a frequência do desvio de Doppler gerada pelo tronco, é superior à frequência central do sinal emitido. Sendo a média deste desvio de frequência de Doppler mais ou menos constante, indica-nos que o ser humano se desloca em linha reta com o sonar. No caso

do espectrograma da Figura 5-31, são observadas 13 passadas dadas pelo ser humano. Sendo também aqui a média do desvio de frequência de Doppler causado pelo tronco mais ou menos constante ao longo do tempo, mas com frequência inferior à frequência central do sinal transmitido, pode-se afirmar sem dúvidas que o ser humano caminha em na direção de afastamento do sonar.

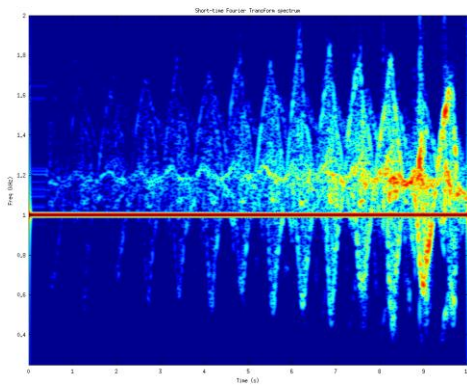


Figura 5-30 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a aproximar-se da plataforma.

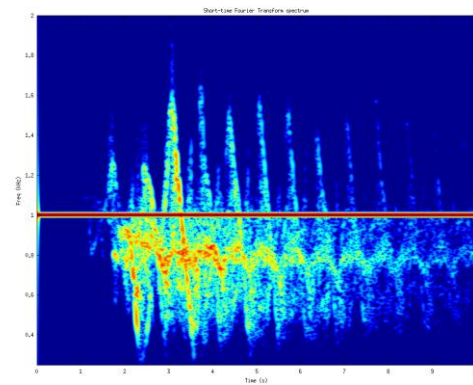


Figura 5-31 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a afastar-se da plataforma.

Analisando os quatro espectrogramas apresentados anteriormente, referentes aos dados recolhidos pelo método ativo, com as assinaturas de Doppler das quatro direções de locomoção, é possível constatar que se torna de algum modo complexo determinar com exatidão a direção na qual o ser humano se desloca. Se a direção de movimento do ser humano for em linha com a plataforma, consegue-se interpretar qual a direção do movimento, mas quando este se desloca nas direções perpendicular e oblíqua, torna-se complicado diferenciá-las.

Pode-se afirmar que com o sistema utilizado neste estudo, será apenas viável a sua utilização para a análise de algumas características do movimento efetuado pelos seres humanos, e quando estes caminham em linha com a plataforma, como que se estivesse num corredor.

5.2.3.3 Assinaturas de Doppler, com a presença de dois seres humanos

Até aqui apenas se apresentaram resultados com um único ser humano. No entanto e já pensando numa aplicação realista deste sistema para a identificação e análise do movimento numa determinada área, rara será a situação onde em todo o instante de tempo só haja um ser humano. Por este motivo, torna-se importante entender que assinatura de Doppler é gerada a partir de dados recolhidos pelo sonar, quando se está na presença de mais de um ser humano.

Apresentado o problema, serão analisadas nesta secção as assinaturas de Doppler, que caracterizam o movimento efetuado por dois seres humanos. Nos testes realizados para o problema apresentado, para além do indivíduo já caracterizado, recorreu-se a um segundo indivíduo do sexo masculino, com um peso de 86 kg e uma altura de 1,92 metros. Os testes efetuados para esta secção, tomam apenas as direções de linha reta com a plataforma, uma vez que se teve em consideração as conclusões descritas na secção 5.2.3.2. Assim são apresentados dois testes, um em que ambos os indivíduos caminham lado a lado, afastando-se do sonar, como ilustra a Figura 5-32, e outro em que os indivíduos caminham em direções opostas, um afastando-se e outro aproximando-se do sonar, cruzando-se a meio do caminho, como ilustra a Figura 5-33.



Figura 5-32 - Os dois seres humanos a caminhar lado a lado.



Figura 5-33 - Os dois seres humanos a caminharem em direções opostas.

Analisando o espectrograma com a assinatura de Doppler no caso em que ambos os indivíduos se afastam da plataforma lado a lado, Figura 5-34, consegue-se perceber que existem dois fortes sinais distintos, correspondendo a cada um dos

indivíduos. Recorrendo à Figura 5-35 torna-se mais perceptível entender os dois sinais descritos.

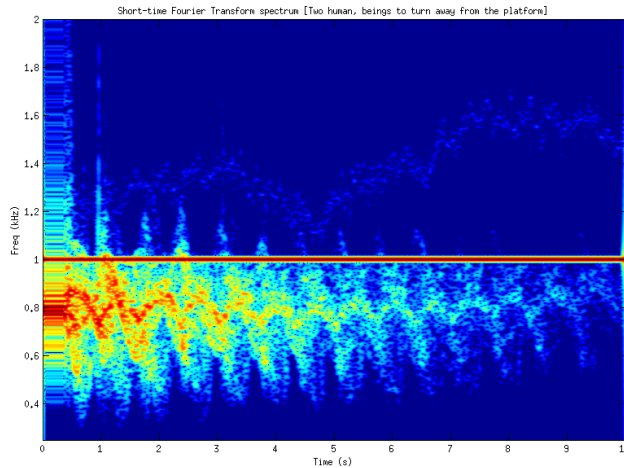


Figura 5-34 - Espectrograma da assinatura de Doppler, com os dois seres humanos a afastarem-se da plataforma.

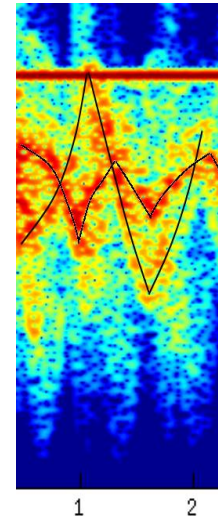


Figura 5-35 - Recorte do espectrograma da Figura 5-34, ilustrando os dois sinais distintos.

Analisando o espectrograma da Figura 5-36, é perceptível a existência de dois seres humanos em movimento. O Doppler gerado por cada um dos seres humanos é detetável, pois um concentra-se na zona de frequências acima da frequência central do sinal transmitido, indicando que existe um ser humano a aproximar-se da plataforma, e o outro Doppler gerado pelo segundo indivíduo situa-se no conjunto de frequências abaixo da frequência central, indicando que este se afasta da plataforma. Para além da localização das frequências de Doppler, existe outra particularidade que torna possível perceber que o indivíduo se aproxima ou se afasta, uma vez que à medida que este se afasta da plataforma o sinal vai perdendo energia, ficando portanto mais fraco, e vice-versa.

Pela análise deste espectrograma pode-se retirar outra conclusão bastante interessante, face a constituição física do ser humano e o sinal que este reflete, pois o sinal de Doppler correspondente ao ser humano que se aproxima tem as suas curvas características com amplitudes maiores, e possuem mais energia. Justifica-se esta afirmação, com o fato de o ser humano que realizou o trajeto de aproximação à

plataforma, ter sido o indivíduo com uma altura e membros maiores, e consequentemente acaba por ter um maior *cross-section*.

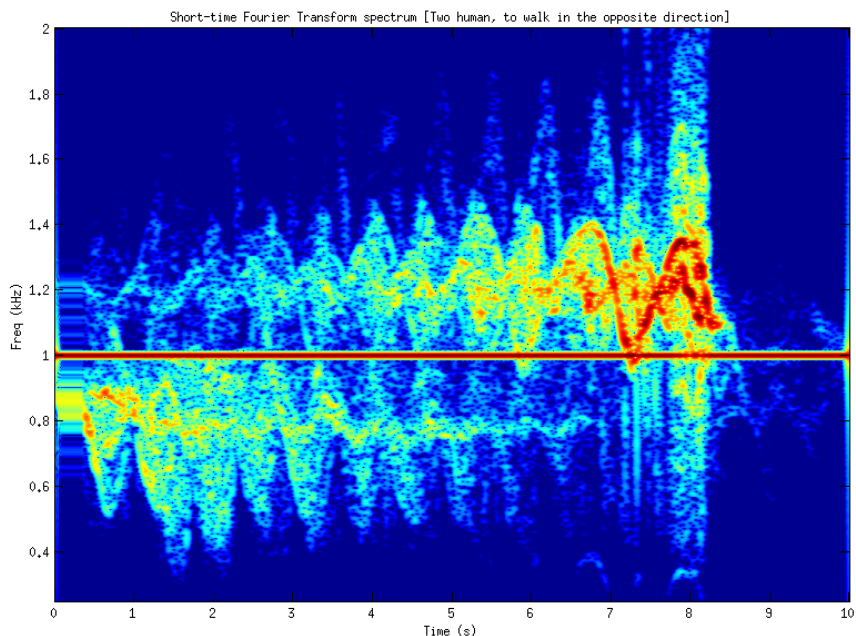


Figura 5-36 - Espectrograma da assinatura de Doppler, com os dois seres humanos a caminharem em direções opostas.

Como objetivo de concluir sobre a possibilidade ou não de se detetar a presença de um ou mais seres humanos, é possível afirmar que no caso em que os indivíduos caminham lado a lado na mesma direção existe alguma dificuldade em se perceber quantos indivíduos estão presentes. Nos casos de irem em sentidos opostos, ou no mesmo sentido mas espaçados, é possível detetar esse mesmo número de indivíduos, número este limitado, uma vez que se tivermos na presença de inúmeras pessoas, o sinal recolhido pode-se tornar impercetível. Contudo não se deve esquecer que este tipo de sistemas tem uma forte aplicabilidade em zonas onde por norma o número de pessoas presentes é reduzido.

5.2.4 Assinaturas de Doppler de Quadrúpedes

O alvo estudo deste trabalho são os seres humanos. Contudo é importante perceber que assinaturas de Doppler são geradas quando se está na presença de outro ser vivo na área de observação do sonar, que não um ser humano, com estilos de locomoção totalmente diferentes. Poder-se-ão assim desenvolver estratégias para evitar falsos alarmes na presença de animais como um cão, por exemplo.

Assim, recorreu-se a um canino e a um equídeo como alvos, para a extração das assinaturas do seu movimento de locomoção. Como será de prever, a realização de testes recorrendo a este tipo de seres vivos não é fácil, especialmente no caso do canino, isto porque são animais que, por muito treinados que estejam, nem sempre executam o trajeto que pretendemos, da forma que é interessante para o estudo.

5.2.4.1 Assinaturas de Doppler de um Canino

Para o estudo da assinatura de Doppler gerada a partir dos dados recolhidos com um canino, recorreu-se a um cão de raça Labrador, com um peso aproximado de 42 Kg e uma altura de 0,61 metros (Figura 5-37). Mesmo sendo um animal treinado pelo seu dono, elemento do Corpo de Segurança Pessoal, não foi fácil conseguir que este animal fizesse exatamente o que era pretendido, juntando as condicionantes de que a distância do percurso que se pode tomar como válida ser curta para o animal, e o fato do animal estar na presença de um objeto que lhe é totalmente estranho, a plataforma, como de pessoas que não reconhece, tornou mais complicada a concretização dos testes.



Figura 5-37 - Canino utilizado na recolha de dados.

Dos inúmeros testes realizados foram selecionados quatro, cujos resultados face ao comportamento do animal, são aceitáveis. Num primeiro, o animal caminha sozinho na direção de aproximação da plataforma (Figura 5-38). De seguida o canino parte da mesma posição que a anterior, a correr na direção da plataforma (Figura 5-39), no terceiro caso ele parte de junto da plataforma e afasta-se desta, também a correr (Figura 5-40). Por último, o animal caminha lado a lado com o seu dono. Como será expectável, ir-se-á obter a assinatura deste animal, misturada com a assinatura do ser humano (Figura 5-44).

Após a análise de diversas assinaturas de Doppler, e como se poderá observar de seguida, as curvas características geradas pelo canino, têm amplitudes muito pequenas, e contêm pouca energia. O que é fácil de entender, pois para além de o cão ter um *cross-section* reduzido, também possui um comprimento e diâmetro pequeno dos seus membros.

Observando os três espectrogramas das figuras seguintes, consegue-se identificar a assinatura de Doppler gerada pelo animal, em torno da frequência central do sinal emitido, ainda que esteja um pouco mascarada pelo *clutter* do sinal de eco recolhido. Estes espectrogramas encontram-se com maior dimensão no **apêndice III**.

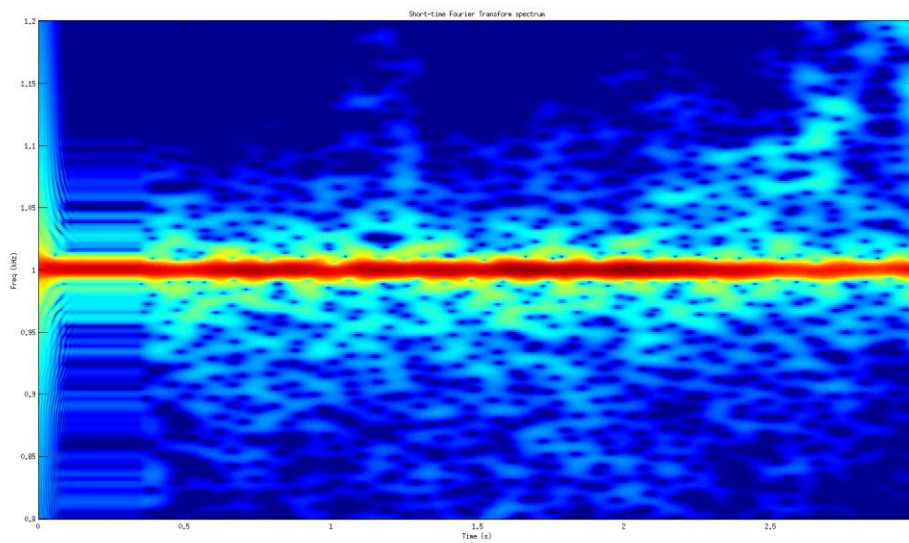


Figura 5-38 - Espectrograma da assinatura de Doppler de um canino a caminhar na direção da plataforma.

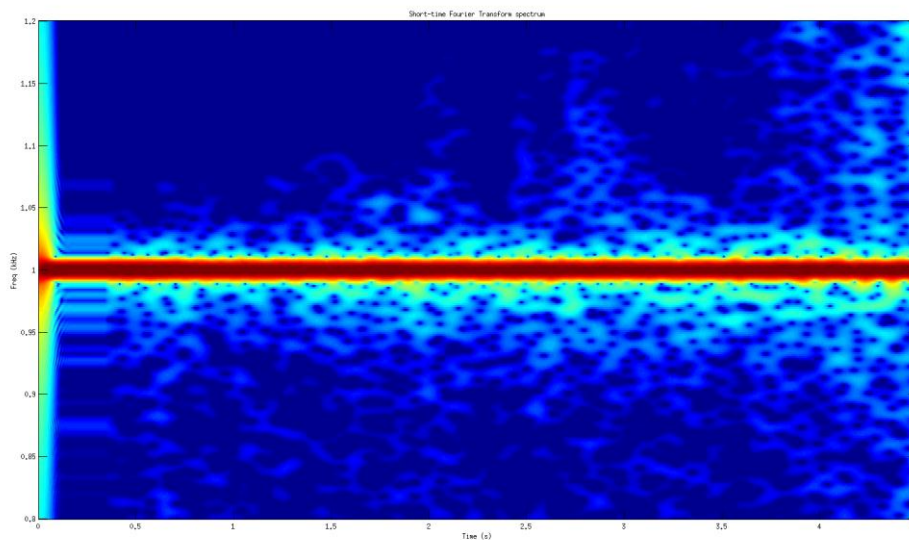


Figura 5-39 - Espectrograma da assinatura de Doppler de um canino a correr na direção da plataforma.

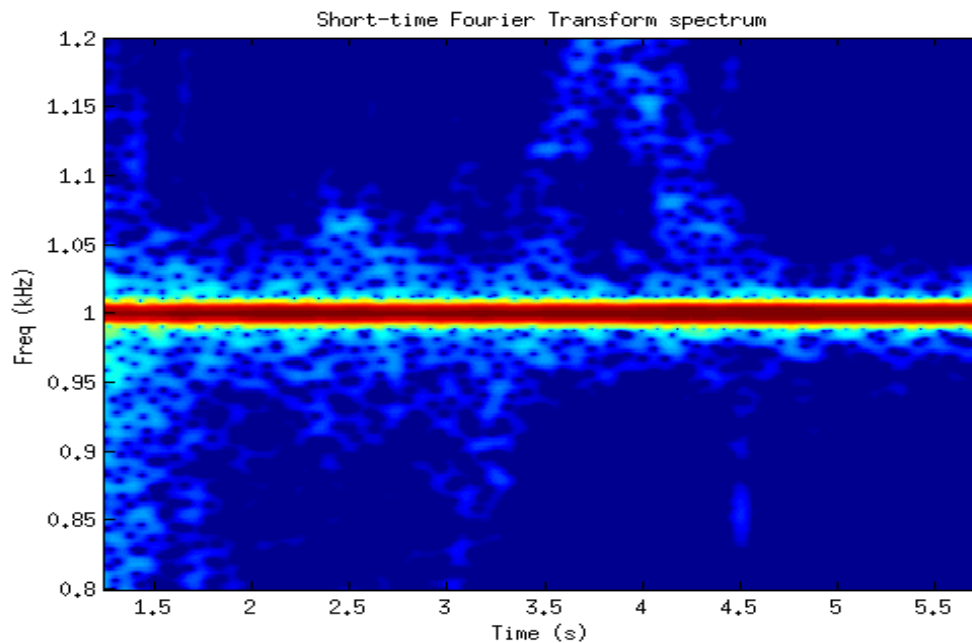


Figura 5-40 - Espectrograma da assinatura de Doppler de um canino a correr, afastando-se da plataforma.

Com o intuito de comprovar que o Doppler que aparece em torno do *Clutter* corresponde efetivamente ao movimento do canino, realizou-se uma ampliação em torno deste nos espectrogramas já apresentados. Um dos espectrogramas corresponde ao movimento de um ser humano a caminhar na direção da plataforma (Figura 5-7), e o outro corresponde ao movimento do canino, também este a caminhar na direção da plataforma (Figura 5-38). Analisando a Figura 5-41, que representa o caso do ser humano, e a Figura 5-42, que representa por sua vez o caso canino, é possível observar uma grande diferença. Pois na situação em que se tem o ser humano a caminhar, a zona em torno do *clutter*, não contém oscilações de energia significativas que possam corresponder a qualquer tipo de curva, mas já no caso do canino observa-se variações de energia que se traduzem nas curvas características da assinatura de Doppler do canino.

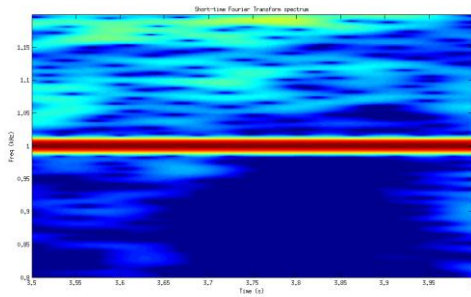


Figura 5-41 - Ampliação da zona do *Clutter*, da Figura 5-7.

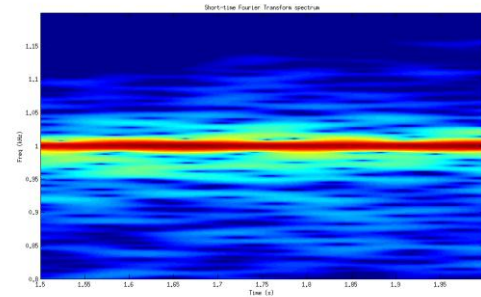


Figura 5-42 - Ampliação da zona do *Clutter*, da Figura 5-38.

Aborda-se de seguida a última situação apresentada no contexto das assinaturas de Doppler com um canino, onde este caminha na direção da plataforma ao lado de um ser humano (Figura 5-43). O espectrograma apresentado na Figura 5-44 (que pode ser observado com uma escala maior, no **apêndice III**) representa a assinatura de Doppler gerada, com os dois seres vivos a caminhar. É bastante notória a assinatura do ser humano, mas para além desta e tal como nos três casos anteriores corresponde a assinatura gerada pelo movimento do canino encontrar-se parcialmente sobreposta pelo *clutter*, existindo também o problema da assinatura do ser humano acabar por mascarar também um pouco a assinatura do canino, como se pode observar pela Figura 5-45.



Figura 5-43 - Teste realizado com o canino a caminhar ao lado de um ser humano, em direção da plataforma.

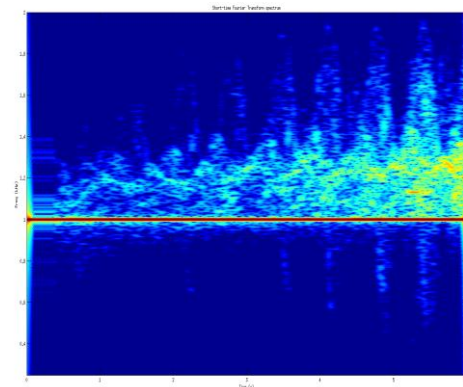


Figura 5-44 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um canino a caminhar ao lado de um ser humano, aproximando-se da plataforma.

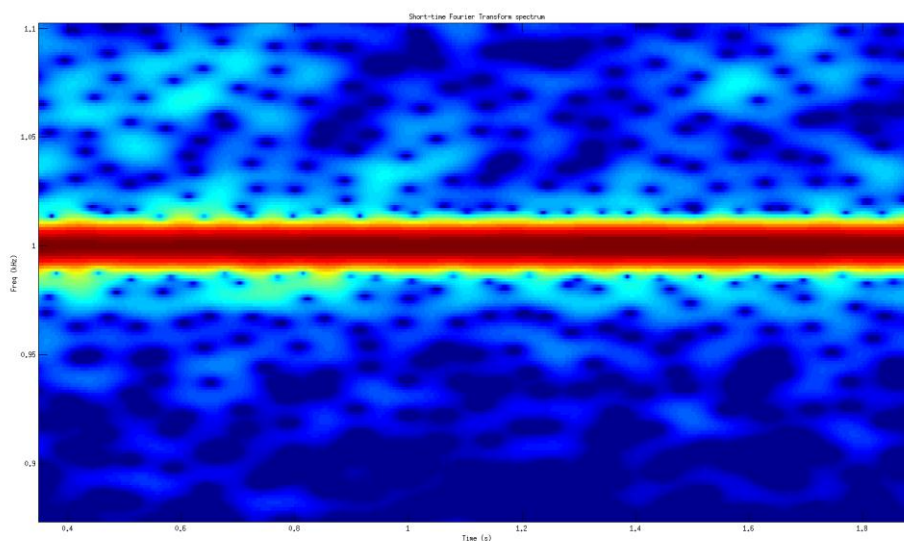


Figura 5-45 - Ampliação do espectrograma da Figura 5-44, onde se identifica a assinatura de Doppler do movimento do canino.

Considerando os resultados obtidos, é possível afirmar que com o atual sistema e apesar de se conseguir identificar e observar a presença da assinatura de Doppler originada pela caminhada do canino, não se consegue a partir dela caracterizar o movimento deste último.

5.2.4.2 Assinaturas de Doppler de um Equídeo

O segundo quadrúpede escolhido para o estudo da sua caminhada foi um equídeo cruzado, de puro-sangue inglês com lusitano, com 13 anos de idade e um peso de aproximadamente 500 *kg*.

Existem três estilos de caminhada realizados pelo cavalo, designados por ‘passo’, o estilo mais lento de caminhada; o ‘trote’, estilo de caminhada mais comum; e por fim o ‘galope’, onde o cavalo caminha a uma velocidade quase de corrida. E tendo por base estes três estilos de caminhada serão apresentadas as assinaturas de Doppler recolhidas para cada um deles, sempre com o equídeo a caminhar na direção da plataforma.



Figura 5-46 - Equídeo utilizado na recolha de dados.

O equídeo tem um *cross-section* considerável, uma vez que exhibe membros compridos e de diâmetro considerável, assim como todo o seu corpo. Como tal, seria de esperar que as suas assinaturas de Doppler fossem mais perceptíveis quando comparadas com as do canino.

Por análise dos espectrogramas relativos aos três estilos de caminhada do equídeo, o ‘passo’ (Figura 5-47), o ‘trote’ (Figura 5-48, estando com uma escala maior no **apêndice III**) e o ‘galope’ (Figura 5-49), retira-se logo uma conclusão óbvia, que à medida que a velocidade do equídeo aumenta, o espaçamento entre as curvas características geradas pelos membros encurta, ou seja, o seu período fica menor. O que seria de esperar, pois o animal dá aproximadamente o mesmo número de passadas para percorrer a mesma distância, mas a cada estilo caminha numa velocidade diferente, ou seja, se por exemplo o equídeo em cada um dos três estilos precisasse de 10 passadas para percorrer a mesma distância, e sendo esta distância concretizada em tempos diferentes, o que acontece é que à medida que a velocidade do equídeo aumenta, o tempo que este demora a concretizar o percurso diminui, mas as curvas características que representam as 10 passadas estão lá na mesma, se o movimento for muito rápido, poderá acontecer que estas curvas fiquem parcialmente sobrepostas umas nas outras. Já no estilo ‘galope’ existe sobreposição praticamente total, onde só se identificam alguns dos picos das curvas características da assinatura de Doppler.

Tal como acontecia com o ser humano, também no equídeo se verifica que é o tronco, neste caso concreto o peito do animal, que tem maior *cross-section*, e é a sua

curva característica que acaba por indicar qual a velocidade a que se desloca. Também à semelhança do que aconteceria com o ser humano, com o aumento da velocidade, o desvio da média da frequência de Doppler associada ao peito do animal aumenta consequentemente.

Uma característica bem visível no espectrograma da assinatura de Doppler da caminhada a ‘passo’, e que torna possível distinguir esta assinatura da de um ser humano a caminhar, é que no caso do ser humano, para além do movimento oscilatório provocado pelo movimento do tronco, tem-se presente também, entre as demais, dois pares de curvas que representam os membros inferiores e superiores, um par com amplitude maior que o outro. No caso do equídeo, deixamos de observar no espectrograma as curvas de menor amplitude e passamos a observar que existe uma curva praticamente sobreposta a outra, com a mesma amplitude. Isto representa o movimento típico da passada do quadrúpede, ou seja, este ao caminhar para a frente, e ao avançar o membro dianteiro esquerdo, move também o membro traseiro esquerdo, e vice-versa, realizando estes movimentos sempre de uma forma cíclica. Quer isto dizer que as duas curvas quase que sobrepostas que surgem sempre, tratam-se das curvas dos membros ou do lado esquerdo ou do lado direito.

É ainda observável que existe uma diferença notável no que toca à largura da curva, que no caso dos equídeos comparativamente com os seres humanos é mais estreita, que se deve ao movimento rápido que os membros inferiores do equídeo realizam

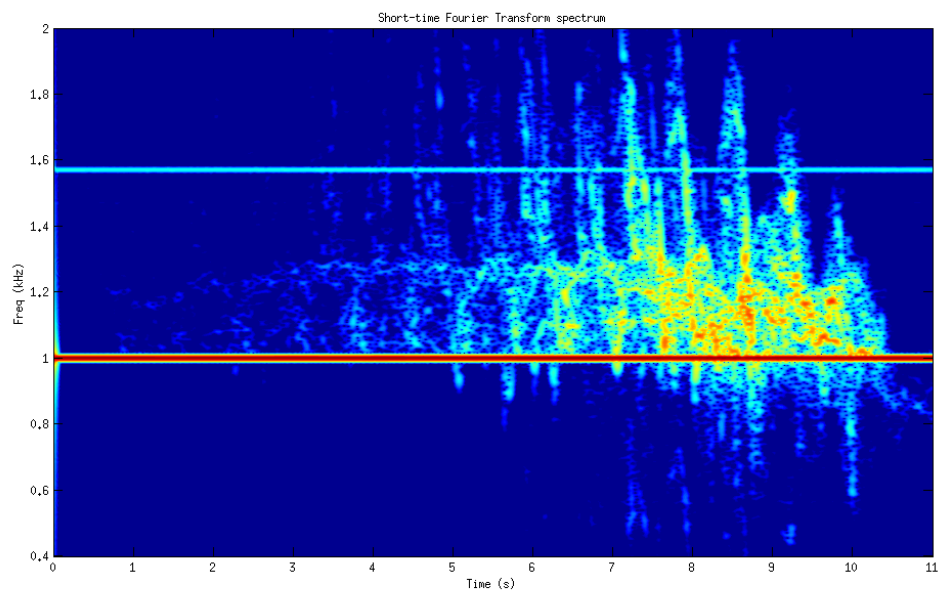


Figura 5-47 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um equídeo a caminhar no estilo: 'passe'.

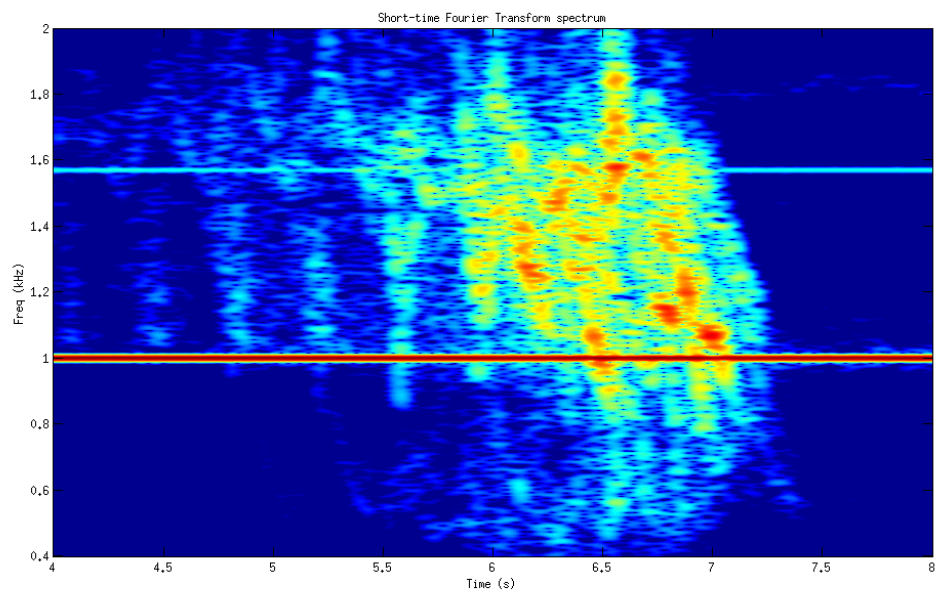


Figura 5-48 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um equídeo a caminhar no estilo: 'trote'.

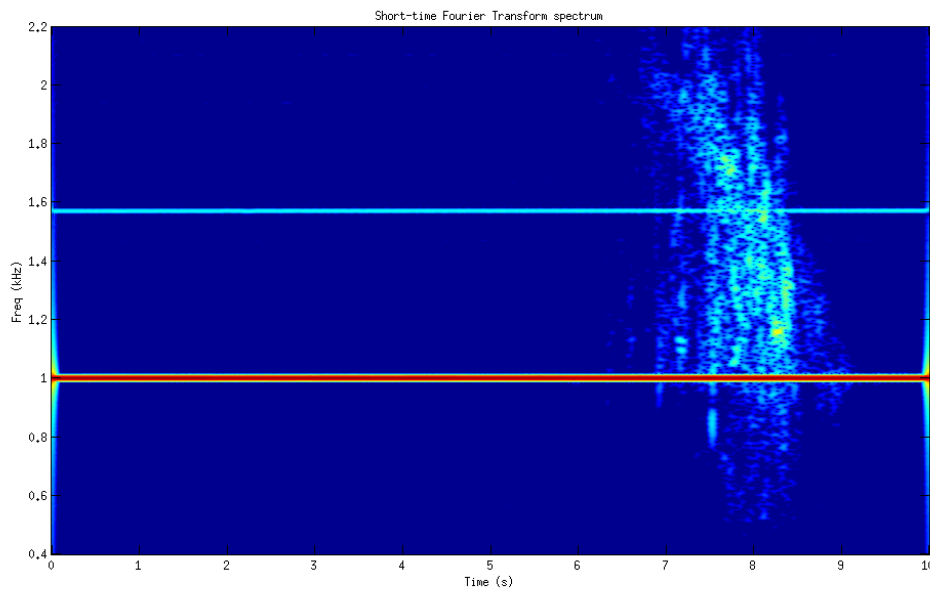


Figura 5-49 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um equídeo a caminhar no estilo: 'galope'.

5.2.5 Comparação entre as assinaturas de Doppler com Seres Humanos, Caninos e Equídeos

Analisando e comparando as assinaturas de Doppler dos três seres vivos estudados, notam-se algumas diferenças que agora se resumem. As assinaturas geradas pelo canino têm um desvio de Doppler muito pequeno, de modo que as curvas características geradas ficam quase em torno da frequência central do sinal transmitido. No caso do ser humano e do equídeo, estas apresentam desvios de Doppler consideráveis, onde se destacam claramente as curvas características dos quatro membros e do tronco. Também a energia presente nos sinais recebidos do canino é fraca, ao invés que nos outros dois é considerável, estando este ponto relacionado com o *cross-section* de cada animal, que quanto maior for, mais energia terão os sinais refletidos por ele.

Apesar de serem quase imperceptíveis as assinaturas de Doppler do canino, estas distinguem-se das restantes, uma vez que contêm desvios de Doppler pequenos, mas

uma vez que se encontram quase que sobrepostos com o *clutter* não é exequível realizar a análise do seu movimento.

No caso das assinaturas de Doppler geradas pelo ser humano e pelo equídeo, que são semelhantes, são distinguidas pelas curvas características dos membros. Enquanto no ser humano tem-se uma curva característica com uma grande amplitude que representa os membros inferiores, e outra curva característica de menor amplitude, que representa os membros superiores, no caso do equídeo esta última curva de menor amplitude desaparece, surgindo uma outra curva igual à que já existia de maior amplitude. A curva característica representativa do tronco, no caso do ser humano, e no caso do equídeo, o peito, também apresenta diferenças, pois no caso do ser humano a oscilação do desvio de Doppler é menor em relação ao equídeo.

Tabela 5-3 - Resumo das características mais importantes das assinaturas de cada tipo de ser vivo estudado.

Ser Humano	Canino	Equídeo
<p>- Os efeitos de Doppler presentes na assinatura do seu movimento de caminhada normal, são constantes e aparecem de forma quase que simétrica em relação à frequência média de Doppler gerada pelo tronco.</p> <p>- Dois pares de sinusoides com amplitudes diferentes, representativas dos membros inferiores e superiores.</p>	<p>- O movimento deste ser vivo gera um Doppler pequeno, ficando perto da frequência central a que o sinal é emitido.</p> <p>- A sua assinatura fica parcialmente sobreposta pelo sinal correspondente à <i>clutter</i>.</p> <p>- Por a assinatura deste ser vivo se sobrepôr ao sinal da <i>clutter</i>, acaba por haver uma ligeira distorção desta.</p>	<p>- Os efeitos de Doppler presentes na assinatura do seu movimento de caminhada a passe, são constantes e aparecem de forma quase que assimétrica em relação à frequência média de Doppler gerada pelo peito, estando presentes maioritariamente ou acima ou abaixo desta, consoante se aproxima ou afasta do sonar, respetivamente.</p> <p>- Dois pares de sinusoides</p>

<p>- O tronco gera a curva característica com mais potência, devido a ser a parte do corpo com uma área maior.</p> <p>- A curva característica gerada pelo tronco tem uma amplitude acentuada.</p>		<p>com amplitudes idênticas, representativas dos membros anteriores e posteriores.</p> <p>- O peito gera a curva característica com mais potência, devido a ser a parte do corpo com uma área maior.</p> <p>- A curva característica gerada pelo peito tem uma amplitude consideravelmente maior, quando comparada com a gerada pelo tronco do ser humano.</p>
--	--	--

5.2.5.1 Sugestão de algoritmo para classificação dos três seres vivos estudados

Seria interessante construir um algoritmo que classifique o tipo de assinatura recolhida, sabendo diferenciar caninos, equídeos e humanos, pelo que se sugere o desenvolvimento do mesmo como trabalho futuro. Como tal, é descrito um algoritmo que pretende classificar os alvos encontrados, tendo também por base a Tabela 5-3.

Após o processamento dos sinais recolhidos, e obtida a assinatura do alvo, poder-se-á proceder do seguinte modo:

- Escolher n colunas ao acaso do espectrograma e realizar a FFT de cada uma, com o objetivo de encontrar a localização média da zona com a segunda maior potência, lembrando que a primeira será a *clutter*. Esta segunda zona,

entenda-se que corresponderá a uma frequência, que por sua vez será onde está concentrado o Doppler médio da assinatura.

- Se esta frequência estiver afastada da frequência central pode-se estar na presença de um equídeo ou um humano, se for próxima está-se na presença de um canino. Em qualquer uma das duas situações, analisa-se as curvas características de maior amplitude:
 - Se o pico máximo destas estiver muito próximo da frequência encontrada anteriormente, e se esta for próxima da frequência central do sinal emitido, então o alvo é um canino;
 - Caso contrário, o alvo poderá ser um equídeo ou um humano.
- Procede-se à análise da concentração do Doppler, fazendo à semelhança do que se fez inicialmente, selecionar n colunas do espectrograma e fazer de novo a FFT dessas colunas. De seguida é verificada a existência ou não, de dois pares de sinusoides com amplitudes semelhantes ou com amplitudes diferentes:
 - Se existir muita energia acima ou abaixo da frequência média de Doppler encontrada, ou seja, se a sua distribuição não for uniforme; e se existirem dois pares de sinusoides com amplitudes idênticas, o alvo é um equídeo;
 - Se a energia existente no sinal estiver espalhada de uma forma quase simétrica relativa à frequência média de Doppler, juntamente com a existência de dois pares de sinusoides com amplitudes diferentes, então o alvo é um humano.

6 Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

A presente dissertação apresentou um estudo inovador, que incide na análise do movimento humano utilizando sinais de ultrassons refletidos pelos diversos membros do corpo humano, designados por assinaturas de ultrassons.

Com a finalidade de se analisar o movimento humano, recorreu-se um sistema já existente que permite a transmissão de sinais ultrassónicos e a posterior receção dos ecos. Com o processamento dos sinais recolhidos obtém-se a assinatura de Doppler característica, de onde é possível extrair algumas informações que permitem realizar a análise do movimento humano. Utilizou-se a *Short-Time Fourier transform* para o processamento dos dados adquiridos que são apresentados sobre a forma de espectrograma. A partir deste, por observação e recurso a alguns cálculos conseguem-se obter algumas características, como o número de passadas realizadas, a cadência da passada, o comprimento da passada, a velocidade a que o ser humano se desloca e a distância percorrida. Estas características são complementadas pelos resultados conseguidos com o recurso a algoritmos desenvolvidos, onde embora possua algumas limitações, consegue isolar e extrair de forma automática algumas das curvas e parâmetros característicos dos membros envolvidos no movimento humano. O espectrograma é por fim comparado com um gerado a partir do sinal da passada recolhido da passada pelo método passivo, com recurso a um recetor de sinais acústicos na gama do audível.

Com a intenção de no futuro desenvolver um classificador capaz de distinguir entre humanos e outros animais, foram ainda recolhidas e analisadas as assinaturas de dois animais quadrúpedes, um canino e um equídeo, realizando uma comparação entre si e com as do ser humano. Desta forma, foi possível apresentar um conjunto de características que permitem distinguir os diferentes seres vivos.

Adquirido o conhecimento necessário para o estudo do movimento humano com ultrassons, adotou-se uma metodologia que fosse ao encontro do que era pretendido. Os sinais foram gerados em banda base num computador, e entregues à plataforma sonar que os modulava para a banda canal antes de serem transmitidos. O recetor ficava à escuta aguardando os sinais que eram refletidos no corpo. Após receção, o sinal era

desmodulado e entregue ao computador, onde se efetuava o processamento e a análise de dados. No caso do ser humano, foi ainda implementada uma segunda metodologia para a recolha dos sinais gerados pela passada. Com a finalidade de tornar o estudo coerente possível, foram estabelecidas áreas onde o indivíduo caminhava.

A análise da assinatura de Doppler do humano a caminhar, torna possível a extração de informações, tais como a velocidade de deslocamento, o número de passadas realizadas, a cadência da frequência da passada ou mesmo o tamanho da passada. Ainda se observa que os membros comparativamente com o tronco, apresentam desvios de Doppler maiores, que se devem à maior velocidade que estes tomam, contudo o tronco tendo um *cross-section* maior origina curvas características com mais energia.

Considerando um estudo apresentado em [13] por Sebatier e Ekimov, em que argumentam que existe a necessidade de recorrer a um recetor de ultrassons para a captação dos ecos gerados pela passada, com o estudo apresentado neste documento pode-se afirmar que a captura destes sinais pode ser realizada com o recurso a um recetor que funcione na gama do audível, como é o caso do microfone utilizado, mas com mais ruído.

Ao se confrontar os resultados obtidos pelo método direto e pelo método passivo, demonstrou-se a existência duma relação entre os dados adquiridos por ambos, pois quando existe Doppler máximo do movimento dos membros inferiores é capturado um sinal gerado pelo contato destes membros com o chão. Esta relação permitiu consolidar a interpretação de algumas das curvas características da assinatura de Doppler do movimento humano.

Foram realizados diversos testes com estilos e direções de caminhada diferentes; e a presença de um ou dois seres humanos na cena em estudo. As assinaturas de Doppler dos vários estilos de caminhada contêm diferenças assinaláveis. O estilo de caminhada designado por marcha militar, distingue-se das restantes pois a sua assinatura acaba por ser misto das anteriores, ou seja, a amplitude das curvas características dos membros inferiores são grandes, tal como nos estilos de caminhada mais rápidos, no entanto os seus períodos são longos, tal como nos estilos de caminhada

mais lentos. Para além da informação de aproximação ou de afastamento da plataforma, que é possível determinar através do desvio de Doppler, é difícil inferir a direção, dado que as assinaturas não são conclusivas. Nas experiências, onde estão presentes dois humanos, são visíveis as assinaturas geradas por ambos. No entanto, e ainda que visíveis no caso em que caminham lado a lado, não foi ainda desenvolvido o algoritmo que os permite detetar, remetendo-se o mesmo para trabalho futuro.

As assinaturas obtidas dos sinais refletidos no canino têm potência fraca, e o Doppler gerado é pequeno, ficando as suas curvas características em torno da frequência central, sendo mascaradas pelo *clutter* ou pela falta de resolução na frequência. Já no caso do equídeo, encontrou-se a singularidade que existem duas curvas características quase que sobrepostas, que representam o movimento quase que simultâneo ou dos membros do lado esquerdo ou do lado direito.

O estudo elaborado nesta dissertação vem dar uma contribuição na área da análise de movimento humano por ultrassons, onde foi possível obter assinaturas de Doppler, contendo características que permitem a classificação do movimento como humano ou não humano. Não se conseguiu fazer a interpretação de todas as curvas características dado que para além do sinal de interesse, o sinal de retorno tem outras componentes que são indesejáveis. O que não acontece nos sinais estudados na maioria da bibliografia consultada, uma vez que esses sinais são simulados, e como tal aparecem sem a presença de ruído e *clutter*.

Do trabalho desenvolvido resultou ainda uma extensa base de dados de assinaturas de ultrassons de humanos e animais que permitirá suportar trabalho de investigação e desenvolvimento futuro.

6.2 Trabalho Futuro

Torna-se útil que determinados procedimentos sejam automáticos, como a extração das curvas características das assinaturas, e como tal sugere-se realizar melhoramentos ao algoritmo apresentado na dissertação, com a finalidade de se encontrarem padrões únicos do movimento realizado por cada pessoa. Assim, será interessante realizar o processamento dos dados recorrendo a outras técnicas, comparando resultados obtidos e com o intuito de se extraírem mais informações.

Como nem todo o estudo está dependente só do processamento dos dados, seria importante melhorar as especificações do *hardware* capaz de emitir e recolher sinais, tendo em consideração os seguintes requisitos:

- Aumentar a potência dos sinais transmitidos (ou a sensibilidade do recetor), para que se possam capturar movimentos mais longínquos da plataforma;
- Aumentar a largura do feixe dos sinais transmitidos, por modo a abranger uma maior área;
- Procurar transdutores que permitam trabalhar com sinais com uma maior largura de banda;
- Estudar a possibilidade de se ter um sistema com diversos recetores, com o objetivo de se realizar processamento multidimensional dos dados.

Propõe-se a concretização de um sistema que permita realizar a análise do movimento humano em tempo real.

E por fim, sugere-se o desenvolvimento de um classificador capaz de inferir a presença de humanos e não humanos, como o sugerido na subsecção 5.2.5.1, usando características extraídas da assinatura, como a amplitude das curvas características dos membros, a dimensão do desvio de Doppler causado pela parte do corpo com maior *cross-section*, ou se a localização de Doppler é simétrica ou assimétrica face à frequência média de Doppler.

Bibliografia e Referências

[1] Wikipedia, 2012. “*Ultrasound*”, Disponível *on-line* em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>. Último acesso em Fevereiro de 2012.

[2] Prado Jr, H., 2010, “*Efeito piezoelétrico – O Princípio do ultrassom*”. Disponível *on-line* em: <http://artesmedicas.com/piezoelasticidade.htm>. Último acesso em Fevereiro de 2012.

[3] Nobile, L. (data desconhecida). “*Breves de Saúde*”. Disponível *on-line* em: <http://www.brevesdesaude.com.br/ed02/ultrasonografia.htm>. Último acesso em Outubro de 2011.

[4] Fish, J. P., 2002. “*Acoustics and Sonar Primer*”. Disponível *on-line* em: <http://www.instituteformarineacoustics.org/SonarPrimer/SideScanSonar.htm>. Último acesso em Outubro de 2011.

[5] Bellis, M. (data desconhecida). “*The Story of Sonar*”. Disponível *on-line* em: http://inventors.about.com/od/sstartinventions/a/sonar_history.htm. Último acesso em 18-11-2011.

[6] Rhodes, M., Dezembro de 2006, “*Underwater Electromagnetic Propagation*”, Disponível *online* em: http://www.hydro-international.com/issues/articles/id697-Underwater_Electromagnetic_Propagation.html. Último acesso em Agosto de 2012.

[7] Simão, P. (data desconhecida). “*Sonar*”. Disponível *on-line* em: <http://perceberomundo.blogs.sapo.pt/5441.html>. Último acesso em Novembro de 2011.

[8] Chen, V. C. “*Detection and Analysis of Human Motion by Radar*”. Rome, Italy: IEEE Radar Conference, 2008.

[9] Sundar, Shobha; Ling, Hao. “*Human motion animation using micro-Doppler signatures from multiple Doppler sensors*”. Charleston: Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009.

[10] Chen, V. C. “*The Micro-Doppler Effect in Radar*”. London, England: Artech House Radar Library, 2011.

[11] Geisheimer, J. L. Grenaker, E. and Marshall, W.S. “*A high-resolution Doppler model of human gait*”, Proceedings of SPIE on Radar Technology, 2002.

[12] T. B. Moeslund, A. Hilton, and V. Krueger, “*A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis*”, Intl. Journal on Computer Vision and Image Understanding, Vol. 104, No. 2-3, 2006, pp.90-127.

[13] Sebatier, J. Ekimov, A. “*Ultrasonic Methods for Human Motion Detection*”, In Battlefield Acoustic Sensing for ISR Applications, 2006.

[14] Chen, V. C., “*Analysis of Radar Micro-Doppler Signature with Time-Frequency Transform,*” Proc. of the IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing (SSAP), Pocono, PA, 2000, pp. 463–466.

[15] Chen, V. C., and H. Ling, “*Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*”, Norwood, MA: Artech House, 2002.

[16] Chen, V. C., et al., “*Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study,*” IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, Vol. 42, No. 1, 2006, pp. 2–21.

[17] Skolnik, M.I., “*Introduction to Radar Systems*”, McGraw-Hill, Vol. 2, 1981.

[18] Rife, D. C., and R. R. Boorstyn, “*Single Tone Parameter Estimation from Discrete-Time Observations,*” IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 20, No. 5, 1974, pp. 591–598.

[19] Kay, S. M., and S. L. Marple, “*Spectrum Analysis: A Modern Perspective,*” Proc. IEEE, Vol. 69, No. 11, 1981, pp. 1380–1419.

[20] Kay, S. M., “*A Fast and Accurate Single Frequency Estimator*,” IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 37, No. 12, 1989, pp. 1987–1990.

[21] Setlur, P., M. Amin, and F. Ahmad, “*Cramer-Rao Bounds for Range and Motion Parameter Estimations Using Dual Frequency Radars*,” Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Honolulu, HI, April 15–20, 2007, pp. 813–816.

[22] Setlur, P., M. Amin, and F. Ahmad, “*Optimal and Suboptimal Micro-Doppler Estimation Schemes Using Carrier Diverse Doppler Radars*,” Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Taipei, Taiwan, April 19–24, 2009.

[23] Setlur, P., M. Amin, and F. Ahmad, “*Dual Frequency Doppler Radars for Indoor Range Estimation: Cramér-Rao Bound Analysis*,” IET Signal Processing, Vol. 4, No. 3, 2010, pp. 256–271.

[24] Smith, G. E., K. Woodbridge, and C. J. Baker, “*Multistatic Micro-Doppler Signature of Personnel*,” IEEE Radar Conference, Roma, Itália, 2008.

[25] Chen, V. C., A. des Rosiers, and R. Lipps, “*Bi-Static ISAR Range-Doppler Imaging and Resolution Analysis*,” IEEE Radar Conference, Pasadena, CA, 2009.

[26] Sparr, T., and B. Krane, “*Micro-Doppler Analysis of Vibrating Targets in SAR*,” IEE Radar, Sonar and Navigation, Vol. 150, No. 4, 2003, pp. 277–283.

[27] Chen, V. C., “*Doppler Signatures of Radar Backscattering from Objects with Micro-Motions*,” IET Signal Processing, Vol. 2, No. 3, 2008, pp. 291–300.

[28] Ghaleb, A., L. Vignaud, and J. M. Nicolas, “*Micro-Doppler Analysis of Pedestrians in ISAR Imaging*,” IEEE Radar Conference, Roma, Itália, 2008.

[29] Ghaleb, A., L. Vignaud, and J. M. Nicolas, “*Micro-Doppler Analysis of Wheel and Pedestrians in ISAR Imaging*,” IET Signal Processing, Vol. 2, No. 3, 2008, pp. 301–311.

[30] Luo, Y., et al., “*Micro-Doppler Extraction of Frequency-Stepped Chirp Signal Based on the Hough Transform,*” Proc. of the 8th International Symposium on Antenna, Propagation and EM Theory, 2008, pp. 408–411.

[31] Li, K., et al., “*A New Separation Method for Micro-Doppler Information of a Target with Rotating Parts,*” Proc. of International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), 2008, pp. 1365–1369.

[32] Bai, X., et al., “*Imaging of Micro Motion Targets with Rotating Parts Based on Empirical Mode Decomposition,*” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 46, No. 11, 2008, pp. 3514–3523.

[33] Sun, H. X., and Z. Liu, “*Micro-Doppler Feature Extraction for Ballistic Missile Warhead,*” Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), 2008, pp. 1333–1336.

[34] Liu, Z., and H. X. Sun, “*Micro-Doppler Analysis and Application of Radar Targets,*” Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), 2008, pp. 1343–1347.

[35] He, S., et al., “*Analysis and Extraction of Stepped Frequency Radar Signature for Micro-Motion Structure,*” IET Radar, Sonar and Navigation, Vol. 3, No. 5, 2009, pp. 484–492.

[36] Thayaparan, T., et al., “*Analysis of Radar Micro-Doppler Signatures from Experimental Helicopter and Human Data,*” IET Radar, Sonar and Navigation, Vol. 1, No. 4, 2007, pp. 289–299.

[37] Thayaparan, T., L. Stankovic, and I. Djurovic, “*Micro-Doppler-Based Target Detection and Feature Extraction in Indoor and Outdoor Environments,*” Journal of the Franklin Institute, Vol. 345, No. 6, 2008, pp. 700–722.

[38] Ram, S. S., et al., “*Doppler-Based Detection and Tracking of Humans in Indoor Environments,*” Journal of the Franklin Institute, Vol. 345, No. 6, 2008, pp. 679–699.

[39] Zhang, Z., et al., “*Acoustic Micro-Doppler Radar for Human Gait Imaging*,” *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 121, No. 3, 2007, pp. EL110–EL113.

[40] Li, B., et al., “*ISAR Based on Micro-Doppler Analysis and Chirplet Parameter Separation*,” *Proc. of the First Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, 2007, pp. 379–384.

[41] Liu, Y., et al., “*Radar Micro-Doppler Target Resolution*,” *Proc. of the CIE International Conference of Radar*, 2007.

[42] Setlur, P., M. Amin, and T. Thayaparan, “*Micro-Doppler Signal Estimation for Vibrating and Rotating Targets*,” *Proc. of the 8th International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA)*, 2005, pp. 639–642.

[43] Kim, Y., and H. Ling, “*Human Activity Classification Based on Micro-Doppler Signatures Using an Artificial Neural Network*,” *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2008.

[44] Kim, Y., and H. Ling, “*Human Activity Classification Based on Micro-Doppler Signatures Using a Support Vector Machine*,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, No. 5, 2009, pp.1328–1337.

[45] Smith, G. E., K. Woodbridge, and C. J. Baker, “*Micro-Doppler Signature Classification*,” *Proc. of the CIE International Conference of Radar*, 2007.

[46] Smith, G. E., K. Woodbridge, and C. J. Baker, “*Template Based Micro-Doppler Signature Classification*,” *Proc. of the 3rd European Radar Conference (EuRAD)*, 2007, pp. 158–161.

[47] Smith, G. E., K. Woodbridge, and C. J. Baker, “*Naïve Bayesian Radar Micro-Doppler Recognition*,” *Proc. of the 2008 International Conference on Radar*, 2008, pp. 111–116.

[48] Setlur, P., M. Amin, and F. Ahmad, “*Urban Target Classifications Using Time-Frequency Micro-Doppler Signatures*,” Proc. of the 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications (ISSPA), 2007.

[49] Nanzer, J. A., and R. L. Rogers, “*Bayesian Classification of Humans and Vehicles Using Micro-Doppler Signals from a Scanning-Beam Radar*,” IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 19, No. 5, 2009, pp. 338–340.

[49] Yang, Y., et al., “*Target Classification and Pattern Recognition Using Micro-Doppler Radar Signatures*,” Proc. of the 7th International Conference on Software Eng., Artific. Intelligence, Netw., and Parallel/Distributed Comput., 2006, pp. 213–217.

[51] P. van Dorp, and F.C.A. Groen, “*Human walking estimation with radar*,” IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation, V. 150, No. 5, 2003, pp. 356-365.

[52] M. Otero, “*Application of a continuous wave radar for human gait recognition*”, SPIE, Proceedings, Vol. 5809, 2005, pp. 538-548.

[53] Baker, C. J., and B. D. Trimmer, “*Short-Range Surveillance Radar Systems*”, Electronics & Communication Engineering Journal, 2000, pp. 181–191.

[54] Geisheimer, J. L., W. S. Marshall, and E. Greneker, “*A Continuous-Wave (CW) Radar for Gait Analysis*”, 35th IEEE Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers, Vol. 1, 2001, pp. 834–838.

[55] Cutting, J., and L. Kozlowski, “*Recognizing Friends by Their Walk: Gait Perception Without Familiarity Cues*,” Bulletin of the Psychonomic Society, Vol. 9, 1977, pp. 353–356.

[56] Eric A. Nauman, Charles M. Krousgrill, and Gordon R. Pennock, “*Human Motion Kinetics - The Equations And Analysis Of Performance And Injury*”

[57] Silva M., “*Cinemática do Movimento Humano*”, slides do curso de Biomecânica do Movimento do Instituto Superior Técnico, 2004 (Também disponível

online no sitio: http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/Humanoid/2007_PFerreira/Anexos/papers%20e%20apresenta%C3%A7%C3%B5es/)

[58] White, M.O., “*Radar cross-section: measurement, prediction and control*,” *Electronics and Communication Engineering Journal*, 1998, pp.169-180.

[59] Yamada, N., Tanaka, Y., and Nishikawa, K., “*Radar cross section for a pedestrian in 76 GHz band*,” 2005 European Microwave Conference, Vol. 2, 2005, pp. 4-6.

[60] Dogaru, T., Nguyen, L., and LE, C., “*Computer Models of the Human Body Signature for Sensing Through the Wall Radar Applications*,” U.S. Army Research Laboratory Technical Report ARL-TR-4290, 2007.

[61] Watanabe, K., “*Kinematical Analysis and Measurement of Sports Form*,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol. 36, No. 3, 2006.

[62] Novacheck, T.F., “*The biomechanics of running*,” *Gait and Posture*, Vol. 7, 1998, pp. 77-95.

[63] Boulic R., Thalmann M.N., Thalmann D, “*A global human walking model with real-time kinematic personification*”, *Vis. Comput.*, 1990, pp. 344–358.

[64] Chen V.C., Lin C.-T., Pala W.P, “*Time-varying Doppler analysis of electromagnetic backscattering from rotating objects*,” 2006 IEEE Int. Radar Conf. Record, Verona, NY, 24/27-04-2006, pp. 807–812.

[65] LAMBDA (Laboratório de Automação de Museus, Bibliotecas Digitais e Arquivos), “*Análise Tempo-Frequência de Sinais Sísmicos*”, Disponível online em: http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/5081/5081_5.PDF. Último acesso em Setembro de 2012)

[66] Chen, V. C., and Miceli, W. J., “*Simulation of ISAR imaging of moving targets*”. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 148, 3, 2001, pp. 160-166.

[67] Proakis, J. G. & Manolakis, D. G. “*Introduction to Digital Signal Processing*”, MacMillan Publishing Company, New York, 1988.

[68] Gonzalez, R. C., Woods, R. E., “*Digital Image Processing*”, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.

[69] Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., “*Discrete-Time Signal Processing*”, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1989.

[70] Cohen, M. F., Derose, T. D., Fournier, A., Lounsbery, M., Reissel, L-M., Schröder, P., Sweldens, W., “*Wavelets And Their Applications In Computer Graphics*”, Siggraph 95 Conference, Course Notes #26, Acm, 1995.

[71] Polikar, R., “*The Wavelet Tutorial*”, Iowa State University, Ames, IA, 1998. (Também disponível online no sitio: <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>).

[72] Graps, A., “*An Introduction to Wavelets*”, IEEE Computational Science and Engineering, Vol. 2, No. 2, 1995.

[73] P. van Dorp, and F.C.A. Groen, “*Feature-based human motion parameter estimation with radar*,” IET Radar, Sonar and Navigation, Vol. 2, Edição 2, 2008, pp. 135-145.

[74] World of Earth Science, 2003, “*Radar and Sonar*”, Disponível online em: <http://www.enotes.com/radar-sonar-reference/radar-sonar>. Último acesso em Maio de 2012.

[75] Leijen, A.V., Norden, W.L., Bolderheij, F., “*Unification Of Radar And Sonar Coverage Modeling*”, 12th International Conference on Information Fusion, Seattle - USA, 6/9-07-2009.

[76] Hitney, H.B., “*Hybrid Ray Optics And Parabolic Equation Methods For Radar Propagation Modeling*”, Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center, USA, (Data desconhecida).

[77] Franco, F.J.A., Ureña, J.U., “*Outdoor Sonar Sensing*”, Advances In Sonar Techonology, editado por Silva, S.R., Vienna, Austria, 2009.

[78] Mahafza, B.R., “*Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*”, Chapman & Hall/CRC, Huntsville, Alabama, 2000

[79] Mahafza, B.R., Elsherbeni, A.Z., “*MATLAB Simulations for Radar Systems Design*”, Chapman & Hall/CRC, USA, 2004

[80] Wolff, C. (data desconhecida), “*Radar Tutorial*”, Disponível *online* em: <http://www.radartutorial.eu/18.explanations/ex54.en.html>. Último acesso em Junho de 2012.

[81] Marques, P. A. C., Costa, R. M. P., “*SATSON – Sistema Sonar para Classificação de Veículos em ambiente free-flow*”, Brisa, ISEL, GUEST, FCT, 2011.

[82] Meikle, H., “*Modern Radar Systems*” London, England: Artech House Radar Library, 2ª Edição, 2008.

[83] Coimbra, Manuel J.B., “*Radar de abertura sintética*”. Slides da cadeira de Sistemas de Telecomunicações 2 da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2002.

A. APÊNDICES e ANEXOS

Apêndice I. Descrição dos cenários de teste

No apêndice I, são apresentados e descritos os cenários que foram utilizados para a realização dos testes. Os cenários para a realização dos testes, foram escolhidos dando preferência a áreas abertas, de modo a reduzir ao máximo as perturbações devidas ao meio e para que a maior percentagem do sinal refletido tenha origem no alvo de interesse.

Cenário I – Edifício da ADEC do ISEL

O cenário I foi utilizado para a aquisição de dados com seres humanos. Fica localizado no piso -2 do edifício da Área Departamental de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (Figura A-1 e Figura A-2).



Figura A-1 - Fotografia do cenário I (linha de vista do sonar).



Figura A-2 - Fotografia do cenário I (local onde se situava toda a plataforma).

A escolha deste local, foi motivada pelo facto de ser um local amplo e liberto de obstáculos, o que permite que o retorno dos sinais seja efetuado com o menor número de interferências possíveis.

A Figura A-3 apresenta a planta do cenário 1, onde está assinalada a zona de testes e as distâncias envolvidas. O comprimento total do espaço são 21,6 metros, mas a zona destinada a testes ocupou apenas metade, ou sejam, 10,8 metros. Apesar de se ter utilizado apenas uma parte do espaço como percurso nos vários testes, é relevante

saber onde o mesmo termina, de modo a serem referenciadas as possíveis fontes de reflexão. A largura do cenário é de 8,1 metros, pelo que o espaço tem uma área total de aproximadamente 175 m².

Na planta estão também indicadas as distâncias a que foram realizadas as recolhas de dados.

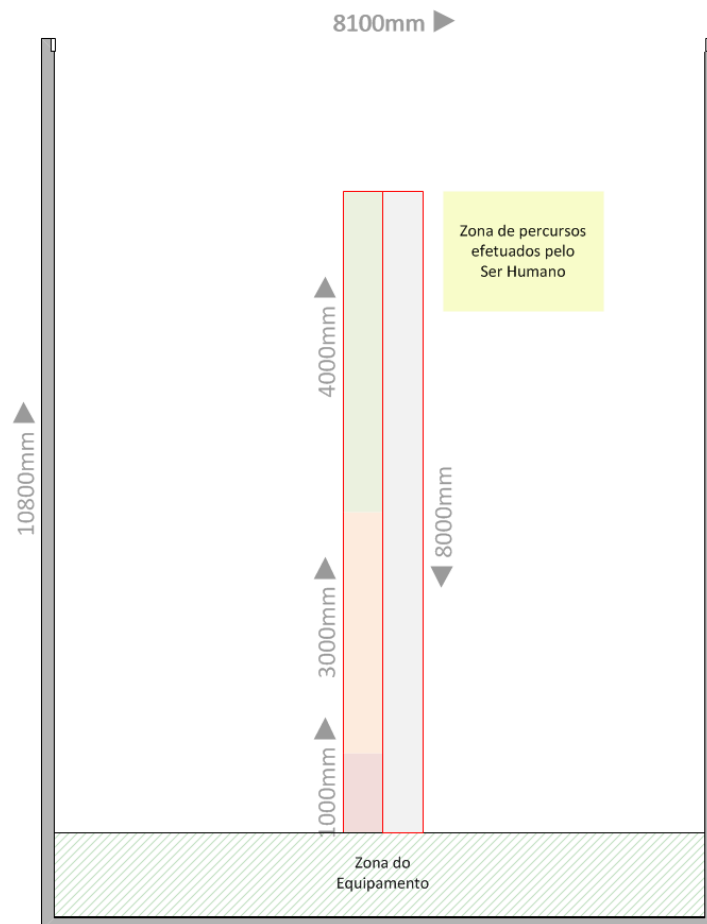


Figura A-3 - Planta da área do cenário I.

Cenário II – Hipódromo do Campo Grande

O Hipódromo do Campo Grande, pertencente à Sociedade Hípica Portuguesa, foi catalogado como cenário II. Este local possibilitou a recolha de dados tendo como alvo um equídeo. A Figura A-4 apresenta uma panorâmica geral do picadeiro onde foram realizados os testes.

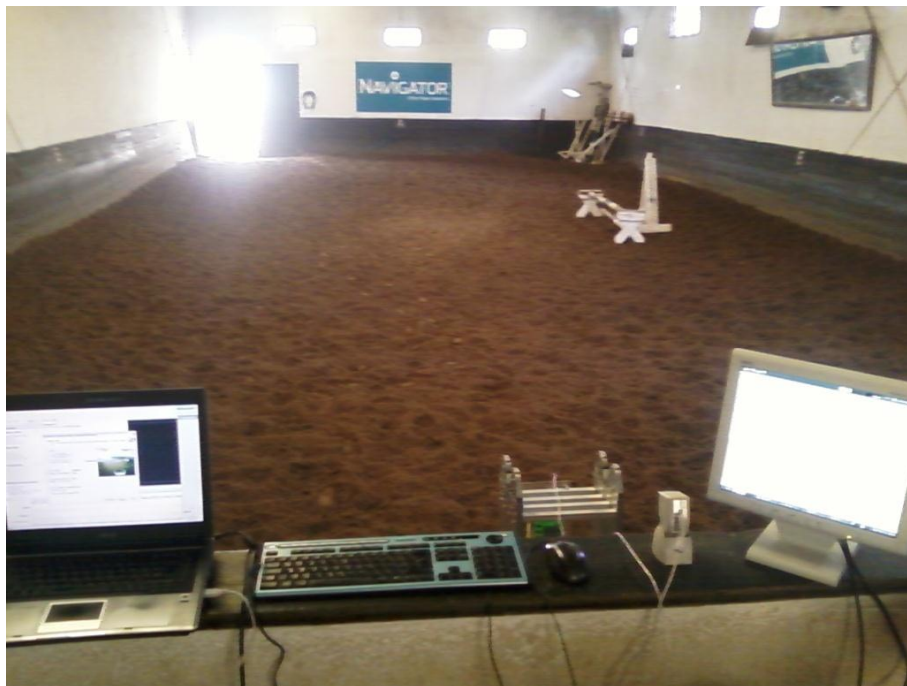


Figura A-4 - Fotografia do cenário II.

Mais uma vez para a realização dos testes optou-se por um espaço amplo e praticamente livre de obstáculos. Este picadeiro é um espaço coberto e o seu piso é composto por terra e areia.

O esquema para os testes foi semelhante ao realizado pelos seres humanos, tal como foi apresentado na Figura A-3. Na realização dos testes o equídeo caminhava sempre em linha reta, umas vezes aproximando-se da plataforma, outras afastando-se desta.

Cenário III – Edifício G do ISEL

Para realização dos testes com recurso a caninos, optou-se pelo pátio central do Edifício de Generalidades do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Se por um lado este cenário tem algumas características idênticas às dos dois anteriores, como ser uma área ampla e livre de obstáculos, diferencia-se deles por ser um cenário ao ar livre, como se pode observar pela Figura A-5.



Figura A-5 - Fotografia do cenário III.

No que se refere à planta de execução dos testes, ela foi igual às descritas anteriormente: o canino afasta-se ou aproxima-se da plataforma, mas sempre de forma retilínea.

Cenário IV – Laboratório de I&D da ADEETC do ISEL

O Laboratório de Investigação e Desenvolvimento da Área Departamental de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e Computadores do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa foi o cenário IV para a realização de testes. Este cenário acaba por ser complementar aos anteriores, uma vez que nele estão presentes vários obstáculos numa área menos ampla que as anteriores. A Figura A-6 apresenta uma panorâmica geral deste cenário.



Figura A-6 - Fotografia do cenário IV.

Este Laboratório tem a particularidade de ter a temperatura ambiente e a humidade do ar controladas, através de um sistema de ar condicionado. Uma vez que aqueles parâmetros têm relevância no comportamento das ondas acústicas, é de todo o interesse realizar os testes nas mesmas condições ambientais, sendo que nos outros ambientes apresentados estes controlo é mais difícil ou impossível.

Apêndice II. Hardware de Suporte – Sistema Sonar Ativo (Plataforma Sonar)

Pretende-se neste apêndice complementar a informação já disponibilizada no seção 4.2, sendo que se existir a necessidade de obter uma informação sobre algum detalhe mais concreto que não esteja aqui referido, pode-se consultar o documento referenciado em [83].

Abordagem do Núcleo Analógico

O núcleo analógico, apresentado na Figura A-7, é constituído por três grandes blocos de *hardware*:

- Cadeia de emissão;
- Cadeia de receção;
- Cadeia de geração de portadoras em fase e quadratura.

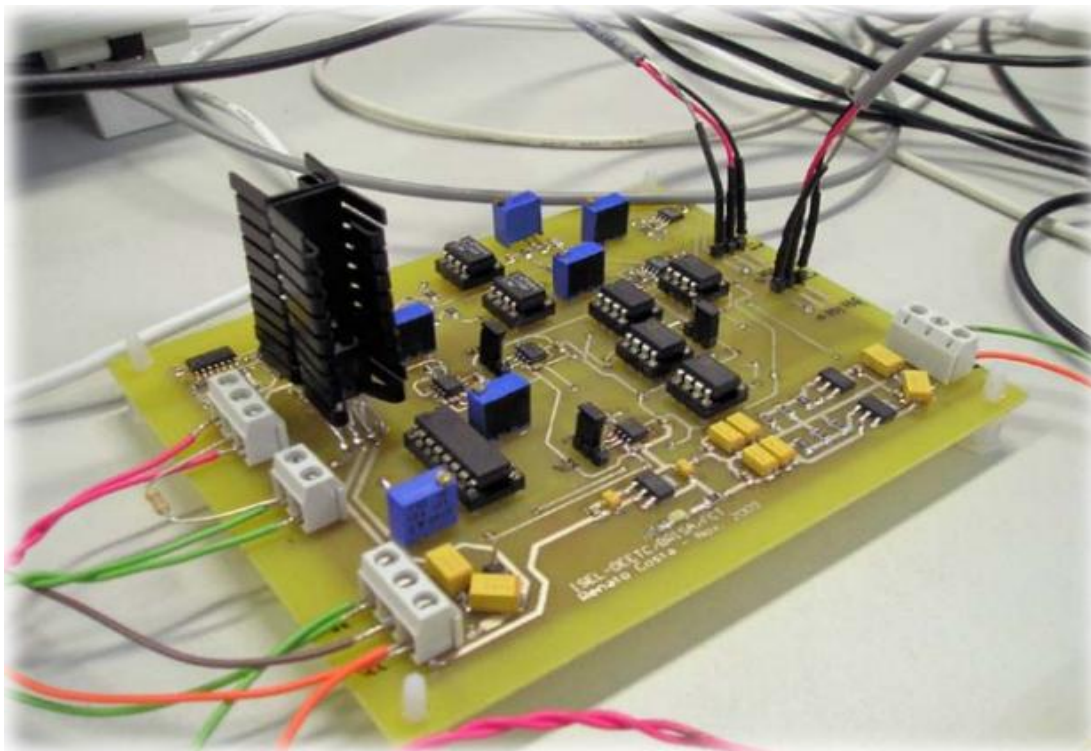


Figura A-7 - Foto do protótipo do núcleo analógico (extraído de [83]).

A Figura A-8 representa o diagrama de blocos da cadeia de emissão, contendo o modulador complexo que recebe os sinais gerados pelo processador de banda base, e os converte em sinais adequados de banda canal, a qual é suportada pelo transdutor utilizado (mais à frente, na página 186, serão apresentadas as principais características do transdutor). Após o sinal ser modulado, é pré amplificado para níveis adequados de amplitude e, por último, entregue ao amplificador de potência que atuará sobre o transdutor.

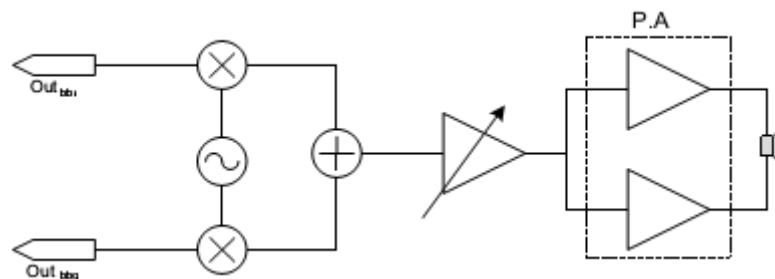


Figura A-8 - Diagrama de blocos da cadeia de emissão do núcleo analógico (extraído de [83]).

O diagrama de blocos da cadeia de recepção deste núcleo analógico é apresentado na Figura A-9. Nesta cadeia, após a recepção do sinal, este é entregue a um amplificador de baixo ruído com alta linearidade, permitindo deste modo amplificar os sinais recebidos pelo transdutor para níveis de amplitude desejáveis. Uma vez que existe a possibilidade da existência de ruído e de componente DC no sinal recebido, este sofre uma filtragem passa-banda, de modo a garantir que seja reduzida a probabilidade de existir fenómenos de saturação, por parte da amplificação realizada no bloco seguinte. Após esta amplificação, o sinal recebido é entregue a um desmodulador complexo, permitindo deste modo efetuar a sua passagem de banda canal para banda base e, por fim, enviá-lo ao processador de banda base para ser processado.

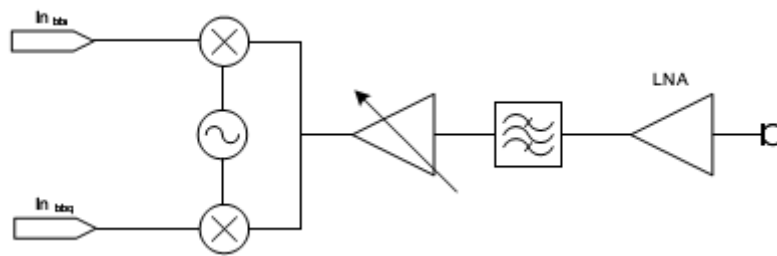


Figura A-9 - Diagrama de blocos da cadeia de recepção do núcleo analógico (extraído de [83]).

Por fim, é apresentado na Figura A-10 o diagrama de blocos do gerador de portadora em fase e quadratura (dois sinais sinusoidais desfasados entre si de 90°). Este bloco é necessário para que seja possível utilizar o modulador e o desmodulador complexo, pois para que estes funcionem é necessário que lhes seja entregue um sinal de portadora em fase e quadratura.

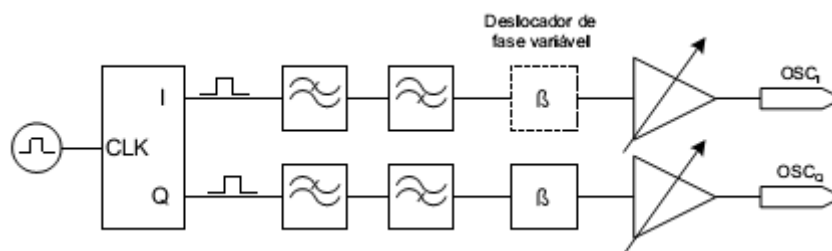


Figura A-10 - Diagrama de blocos do gerador de portadora em fase e quadratura (extraído de [83]).

Também fazem parte do núcleo analógico, transdutores ultrassónicos. São estes os responsáveis pela conversão do sinal elétrico num sinal mecânico de natureza acústica, e vice-versa. Estes transdutores designam-se de US por trabalharem com sinais numa banda de frequência acima daquela que se considera audível pelo ser humano.

Os transdutores ultrassónicos utilizados pertencem ao fabricante PROWAVE, sendo o transdutor emissor do modelo 400ST160 e o transdutor recetor do modelo 400SR160, as suas características fundamentais estão apresentadas na Tabela A-1:

Tabela A-1 - Características dos transdutores ultrassónicos.

Frequência central	40kHz
Largura de banda (-6dB)	2kHz emissão, 2.5kHz receção
Nível de pressão sonora transmitida a 40kHz; 0dB corresponde 0.0002µbar com 10Vrms aplicados medido a 30 cm	120dB min
Sensibilidade na receção a 40.0kHz em que 0dB = 1volt/µbar	-65dB min
Máxima tensão de excitação	20Vrms = 28.28V
Ângulo de abertura a -6dB	55°
Impedância mínima apresentada pelo transdutor emissor	Cerca de 600Ω

Abordagem do Núcleo Digital

Este núcleo, que apresentamos na Figura A-11, suporta a cadeia de conversão analógico/digital, a cadeia digital/analógico e um microcontrolador, o qual é responsável pela comunicação entre o computador e toda a plataforma sonar. A Tabela A-2 pretende dar a conhecer as características destes três blocos do núcleo digital.

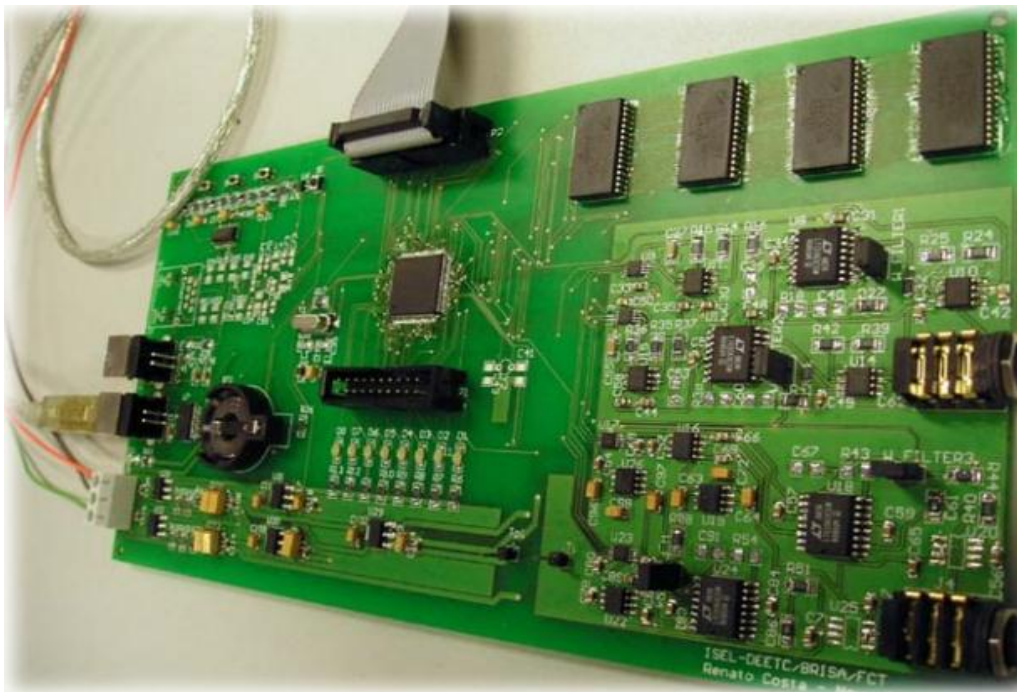


Figura A-11 - Foto do protótipo do núcleo digital (extraído de [83]).

Tabela A-2 - Características fundamentais dos três principais blocos do núcleo digital.

<p>Características elétricas da cadeia de conversão A/D</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 16 Bits de quantificação • ENOB (número efetivo de bits) de 14.7bits @ $F_s = 100\text{Ksps}$ • Máxima frequência de amostragem, 100 Ksps • Gama de frequências admitidas pela entrada, 0 a 50 [KHz] • Gama dinâmica de entrada, ± 2.048 [V]
<p>Características elétricas da cadeia de conversão D/A</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 16 bits de resolução em tensão • SNR de aproximadamente 88dB @ frequência = 1 [kHz] • Máxima taxa de atualização do DAC, 200 [kHz] • Gama de frequências reproduzíveis na saída, 0 a 50 [kHz] • Gama dinâmica da tensão de saída, ± 5 [V] • Máxima corrente de saída, 35 [mA]
<p>Características do Micro controlador</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricante, ST • Referência do fabricante, STR912 • Núcleo ARM966E-S RISC 32bits • Velocidade de relógio, 96 [MHz] • Uma instrução por ciclo de relógio incluído instruções DSP • Capacidade de processamento, 96MIPS • Interface de depuração de erros e carregamento de código JTAG (<i>Join Test Action Group</i>)

O núcleo digital também é constituído por *firmware*. Denomina-se por *firmware*, o *software* que é executado pelo MCU (*Microcontroller Unit*) presente neste núcleo. Este MCU tem como funções gerir os dispositivos de aquisição, os respetivos canais de comunicação e ainda estabelecer o protocolo de comunicação com o sistema PC remoto.

Este sistema está preparado para suportar dois modos de funcionamento, um de transmissão contínua e outro que permite enviar apenas um único pulso e recolher o seu

eco. Em qualquer um dos modos terá que ser enviada pelo PC, uma trama com os dados de configuração e os respetivos dados a serem emitidos pelo sonar, tal como se exemplifica na Figura A-12. Com o envio desta trama de configuração o sistema sonar entra em modo de excussão, começando a enviar para o PC as amostras recolhidas pelos ADC's, ou seja os ecos providos do exterior, tal como se exemplifica na Figura A-13.

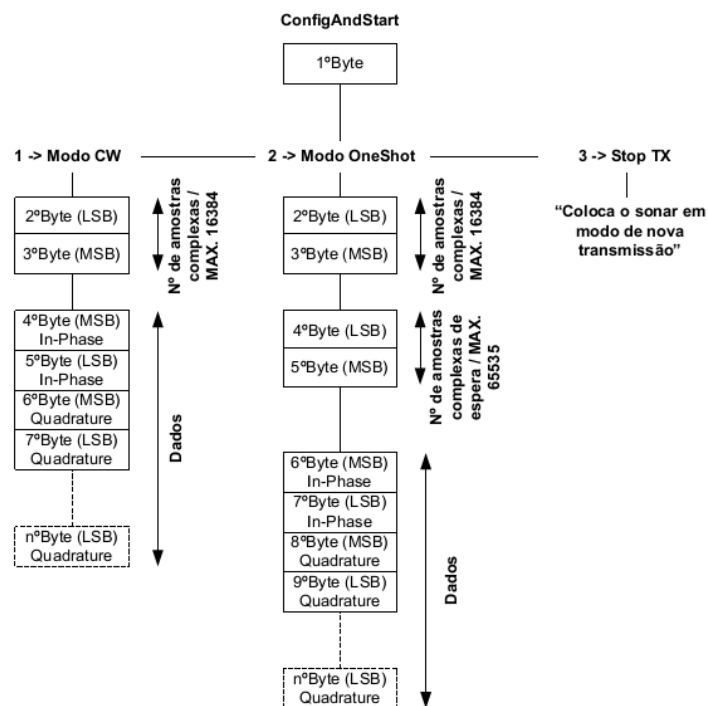


Figura A-12 - Protocolo de comunicação do PC para o sistema sonar (extraído de [83]).

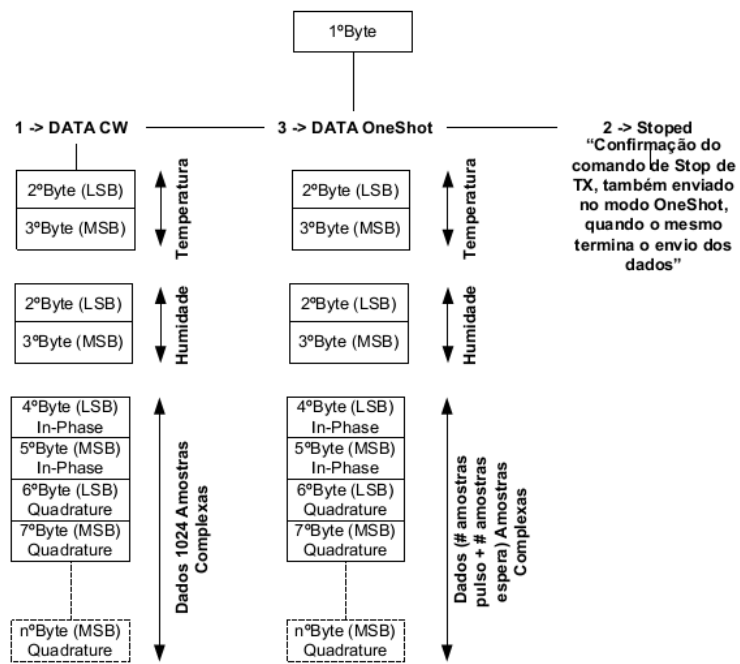


Figura A-13 - Protocolo de comunicação do sistema sonar para o PC (extraído de [83]).

Apêndice III. Apresentação com maior escala de algumas figuras presentes no seção 5.2

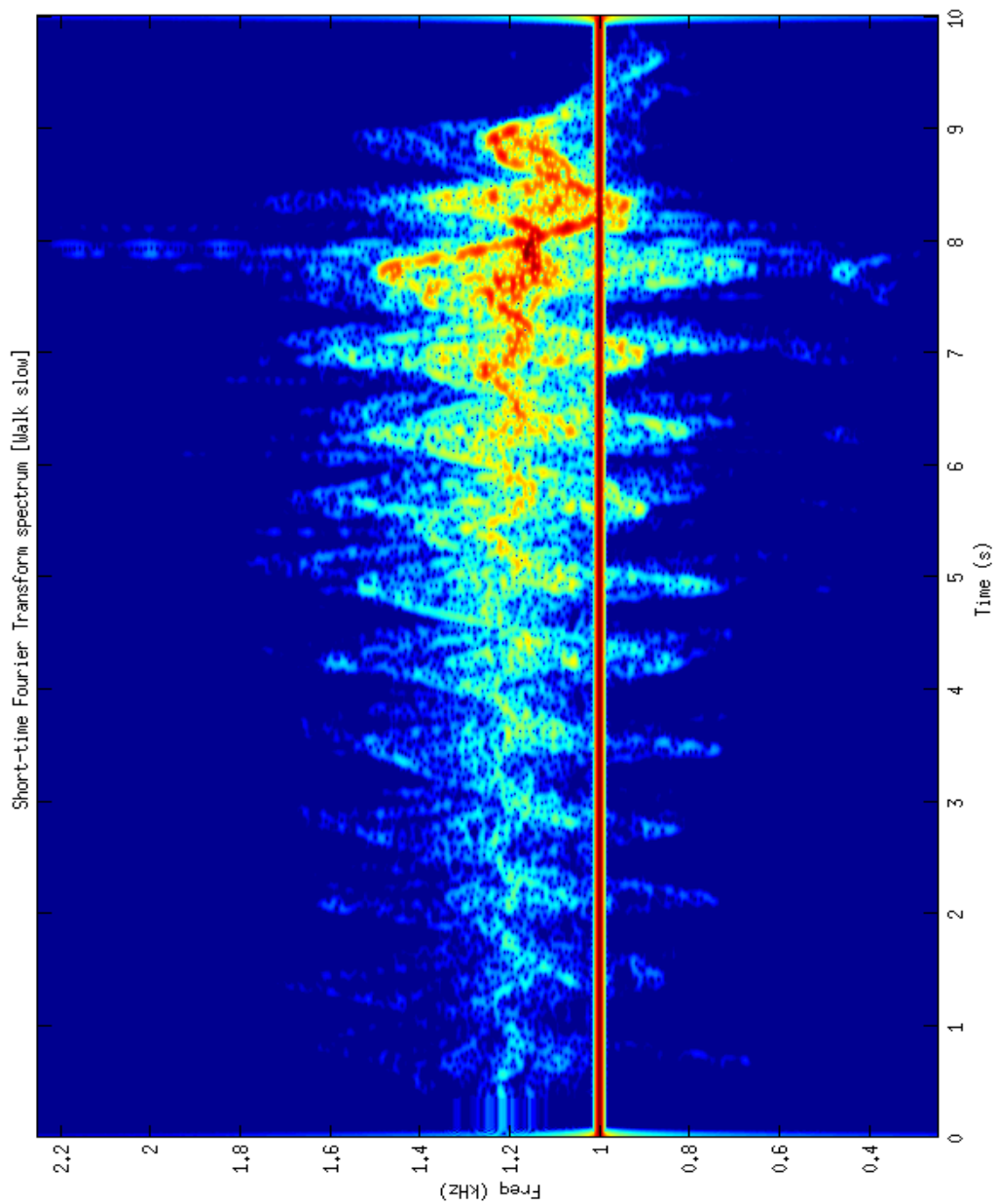


Figura A-14 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar devagar (Figura 5-18).

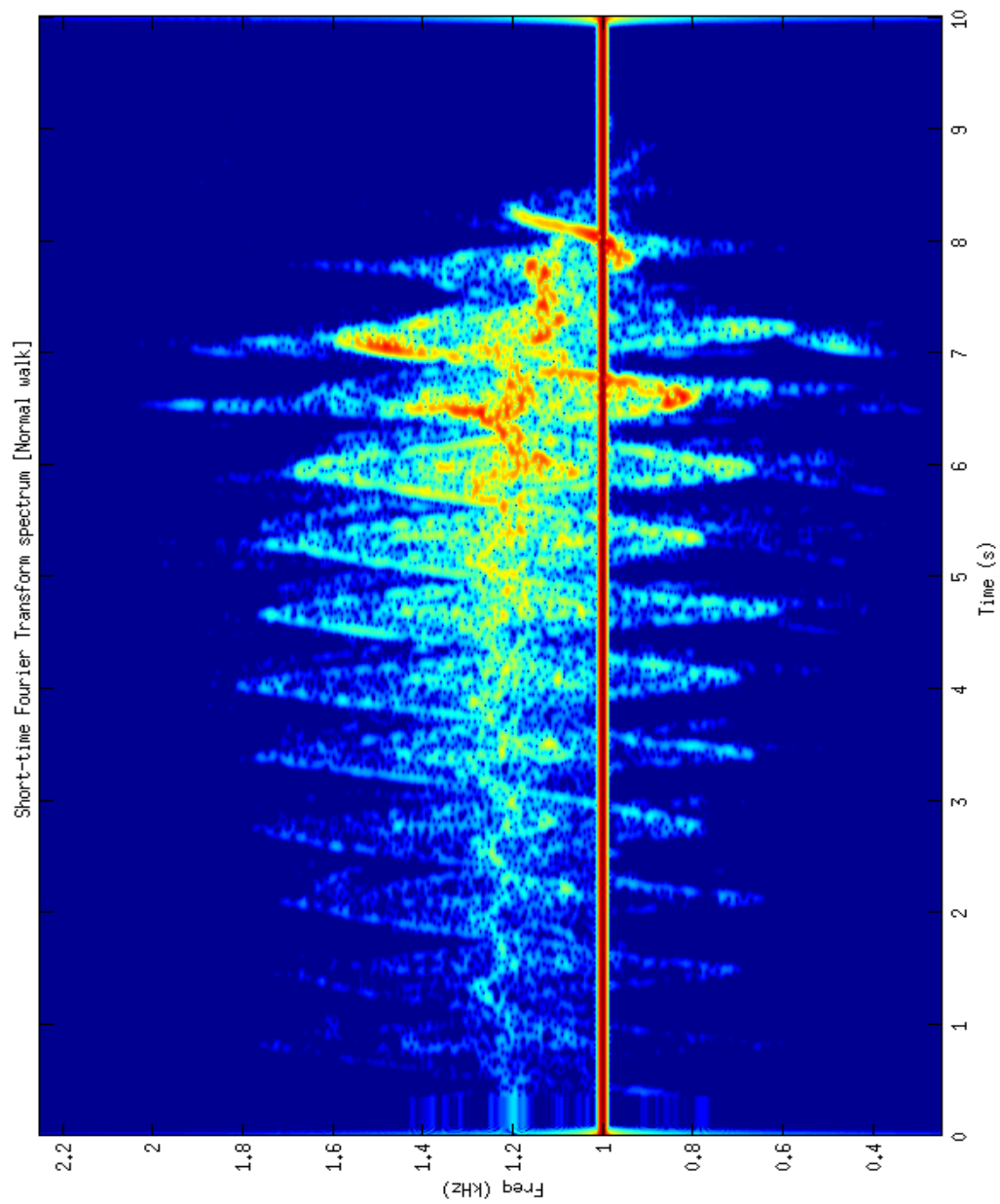


Figura A-15 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar normalmente (Figura 5-20).

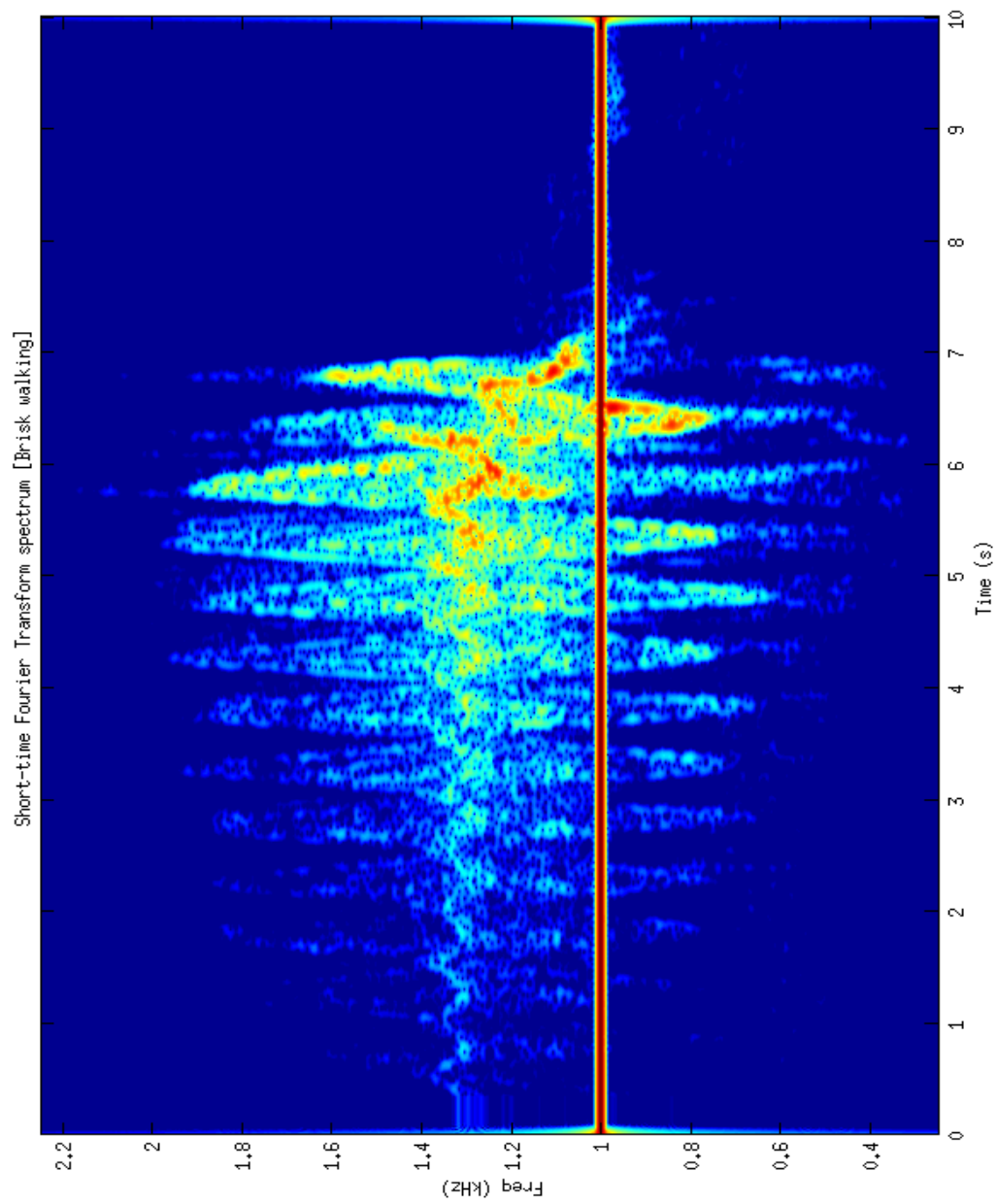


Figura A-16 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar rápido (Figura 5-22).

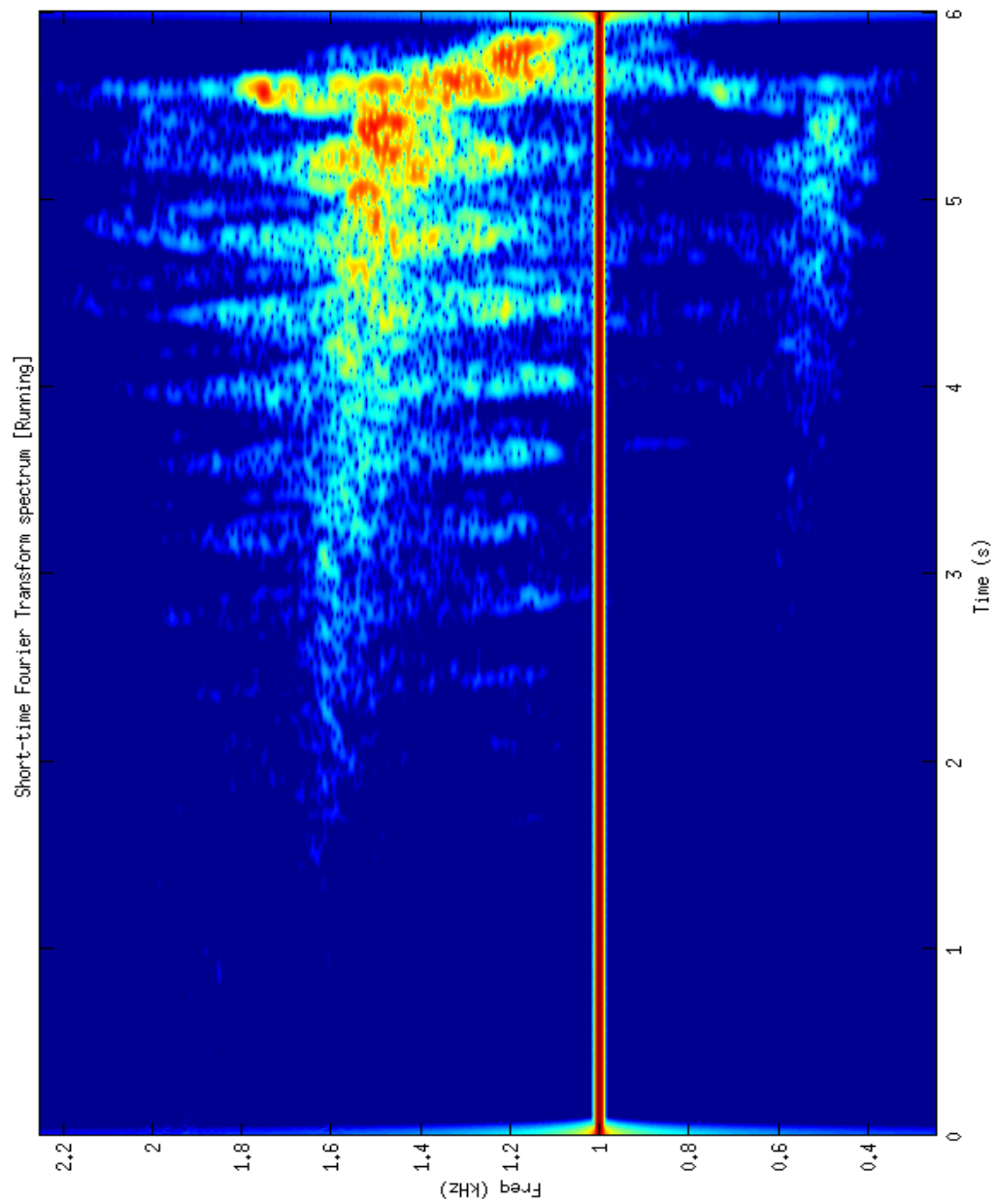


Figura A-17 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a correr (Figura 5-24).

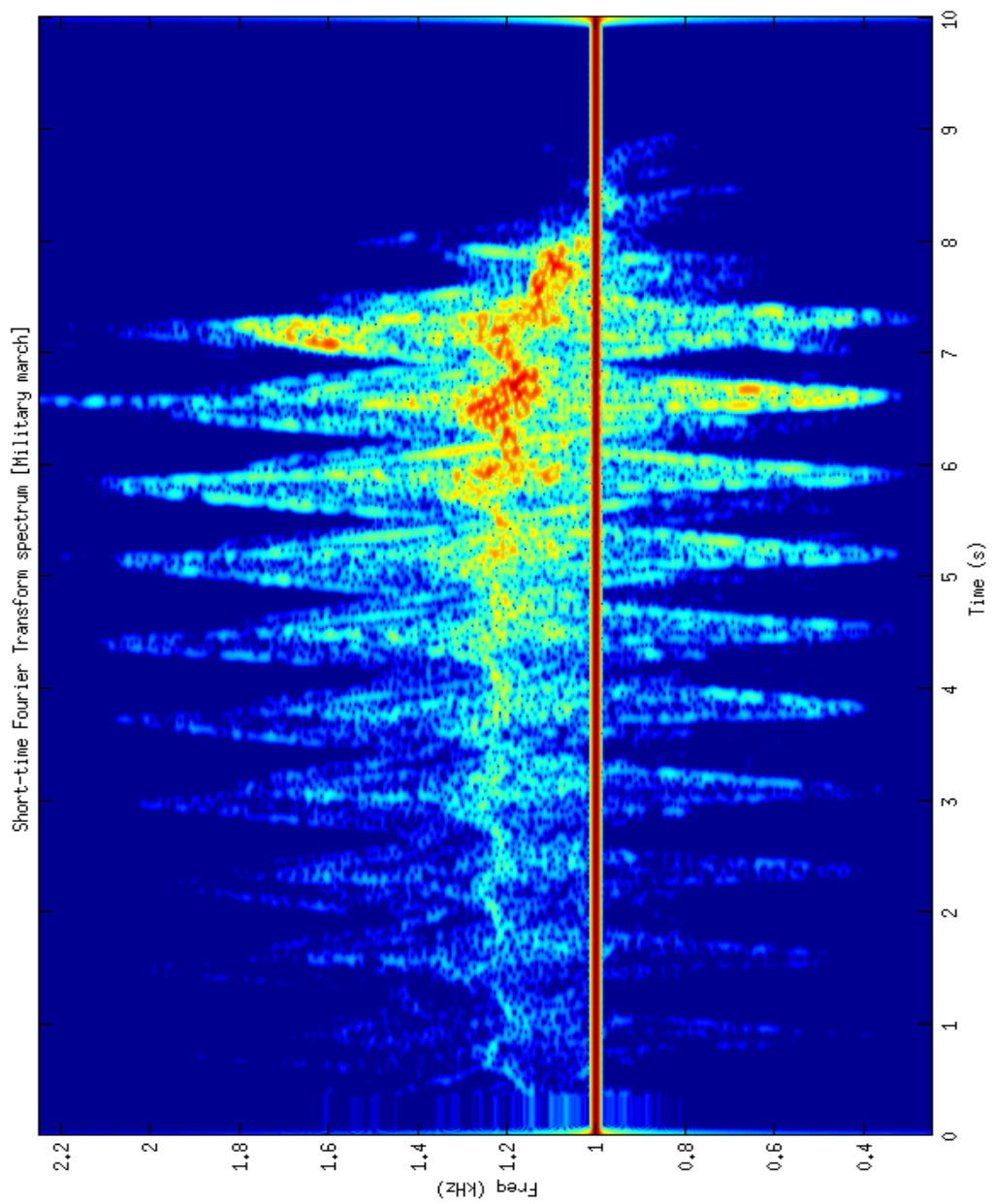


Figura A-18 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a caminhar com estilo de marcha militar (Figura 5-26).

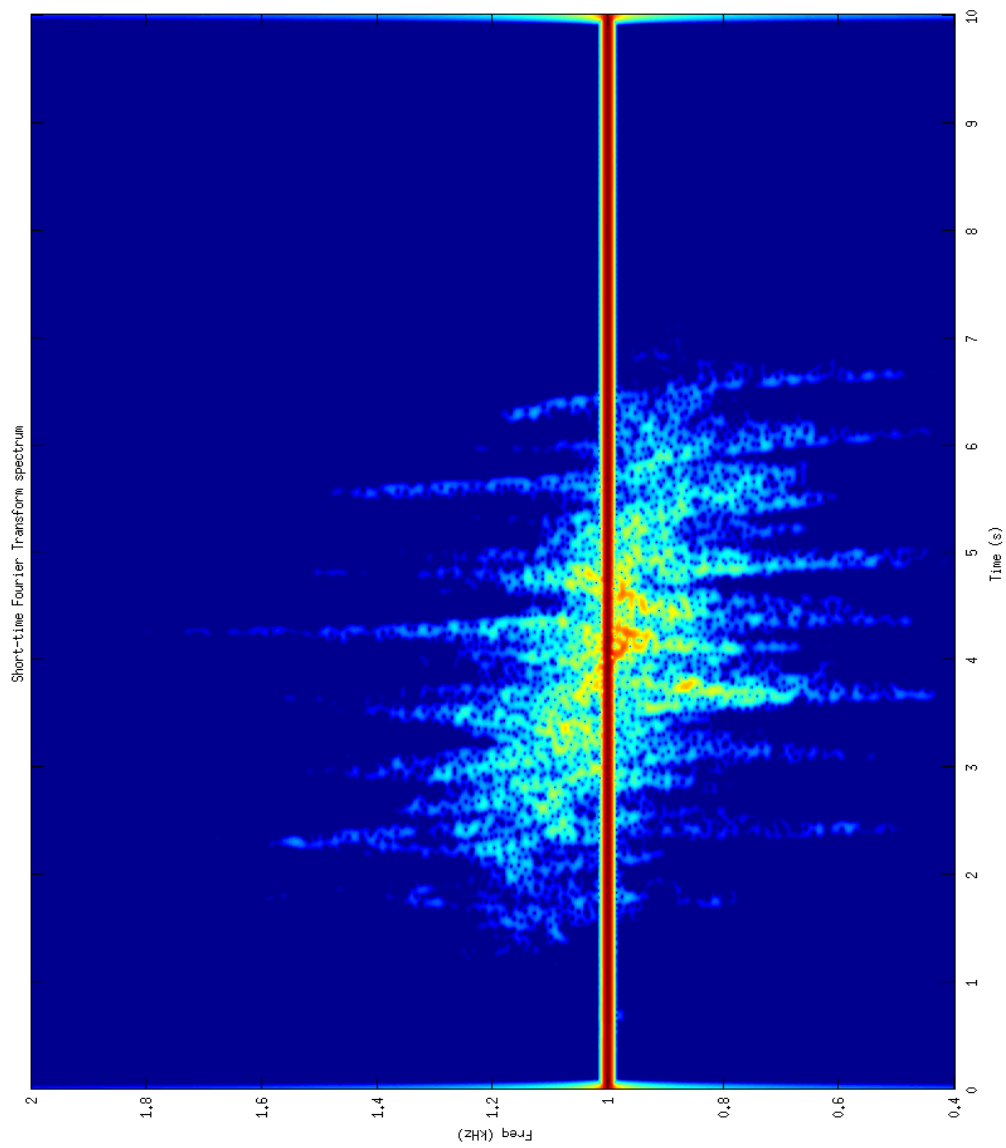


Figura A-19 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a deslocar-se na perpendicular (Figura 5-28).

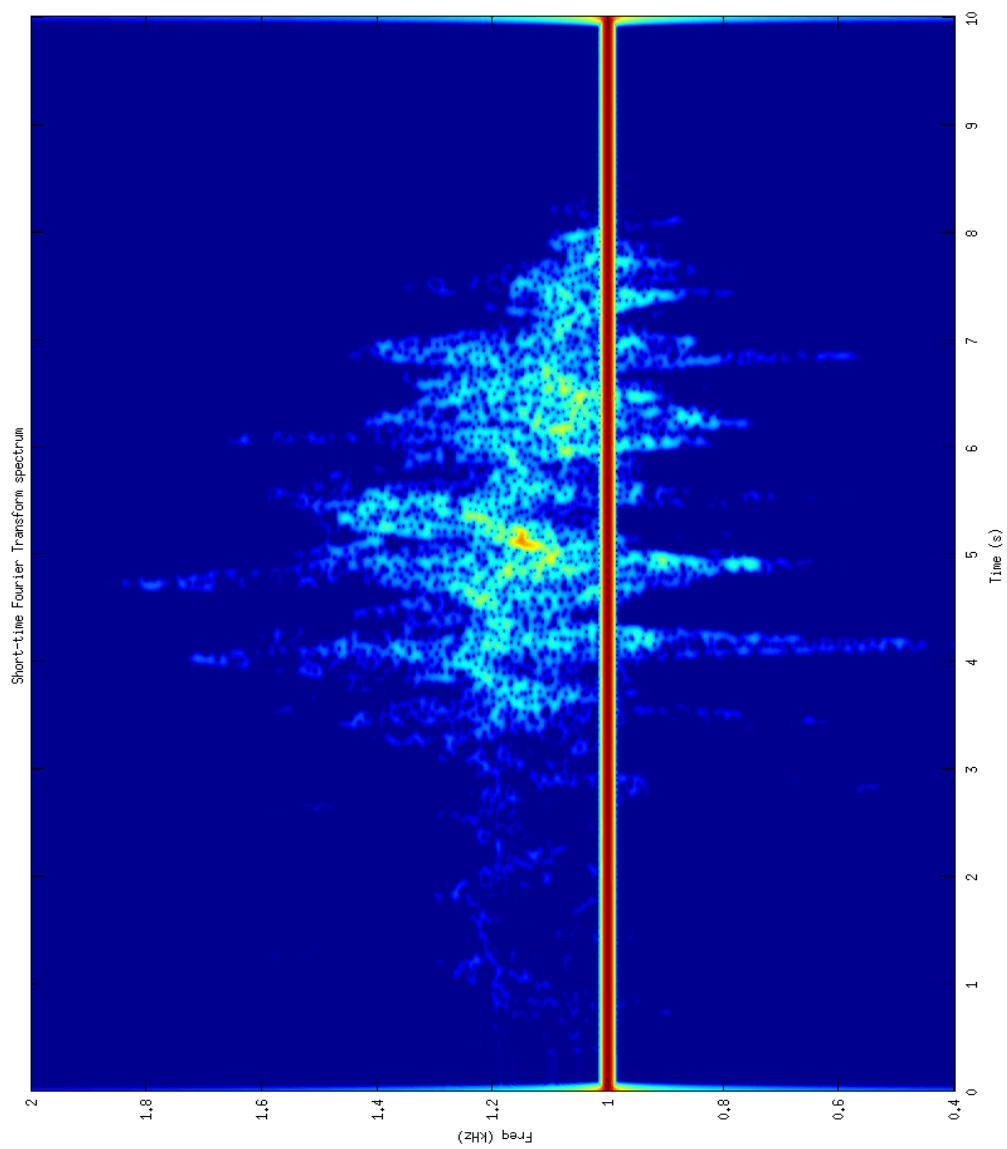


Figura A-20 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano deslocar-se obliquamente (Figura 5-29).

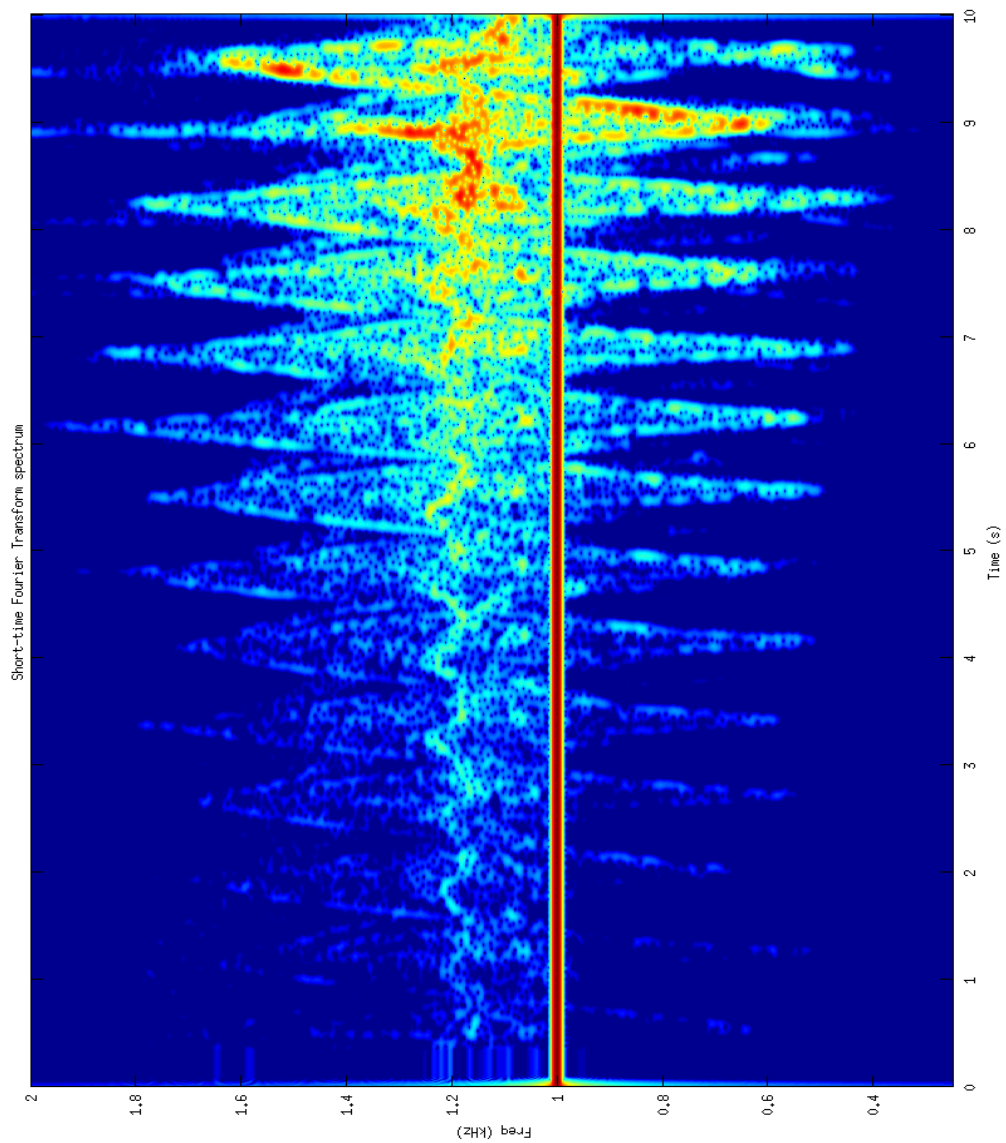


Figura A-21 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a aproximar-se da plataforma (Figura 5-30).

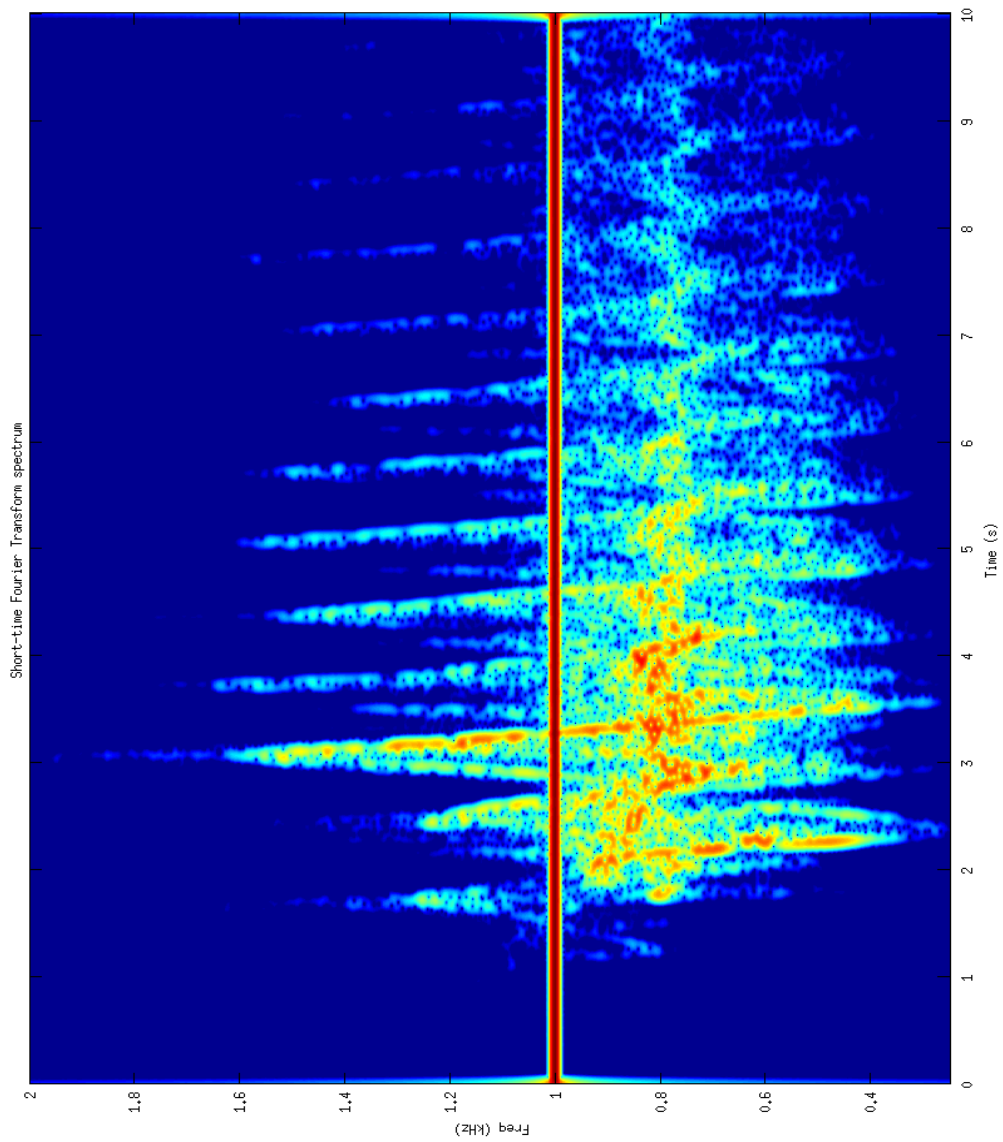


Figura A-22 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um ser humano a afastar-se da plataforma (Figura 5-31).

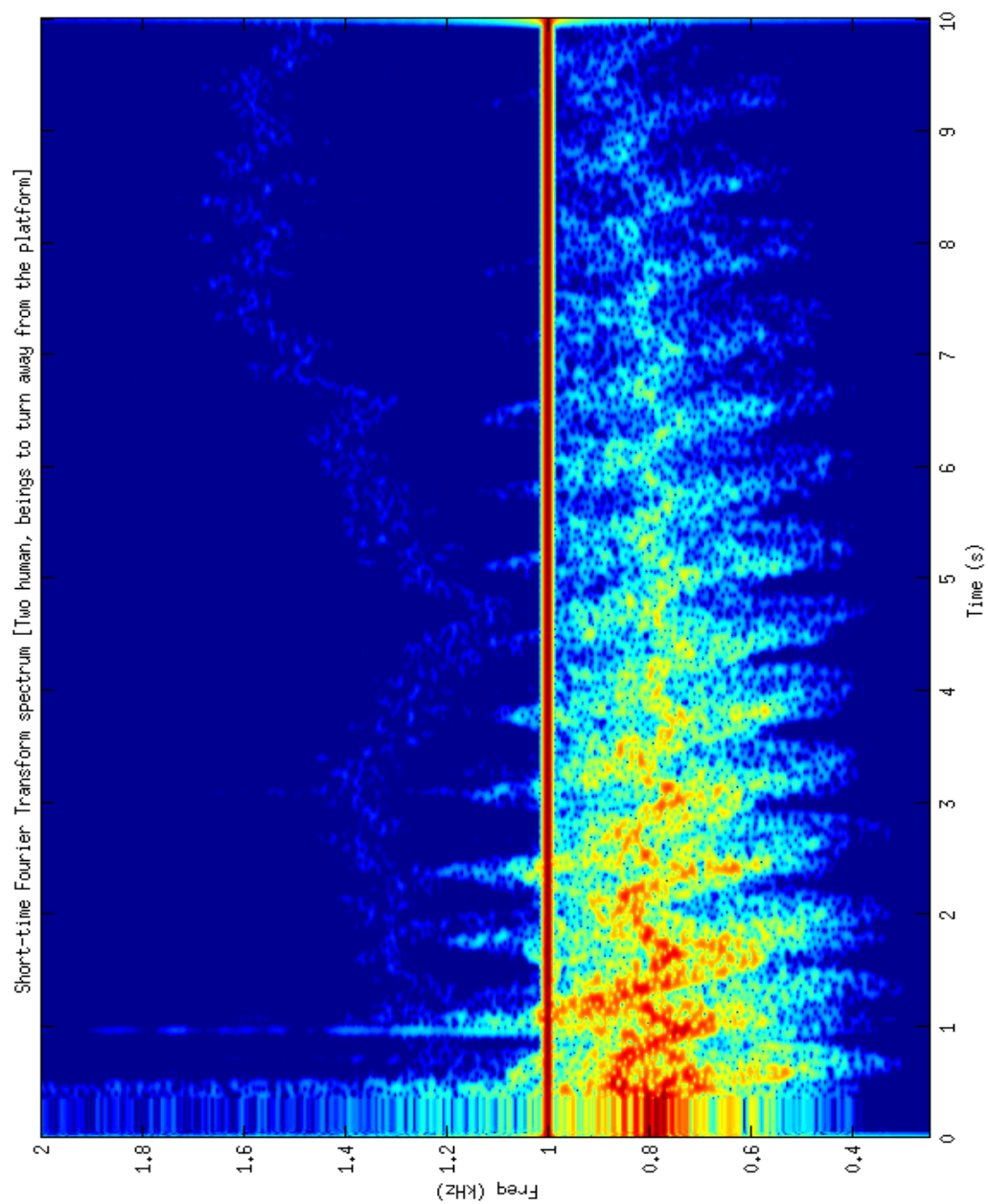


Figura A-23 - Espectrograma da assinatura de Doppler, com os dois seres humanos a afastarem-se da plataforma (Figura 5-34).

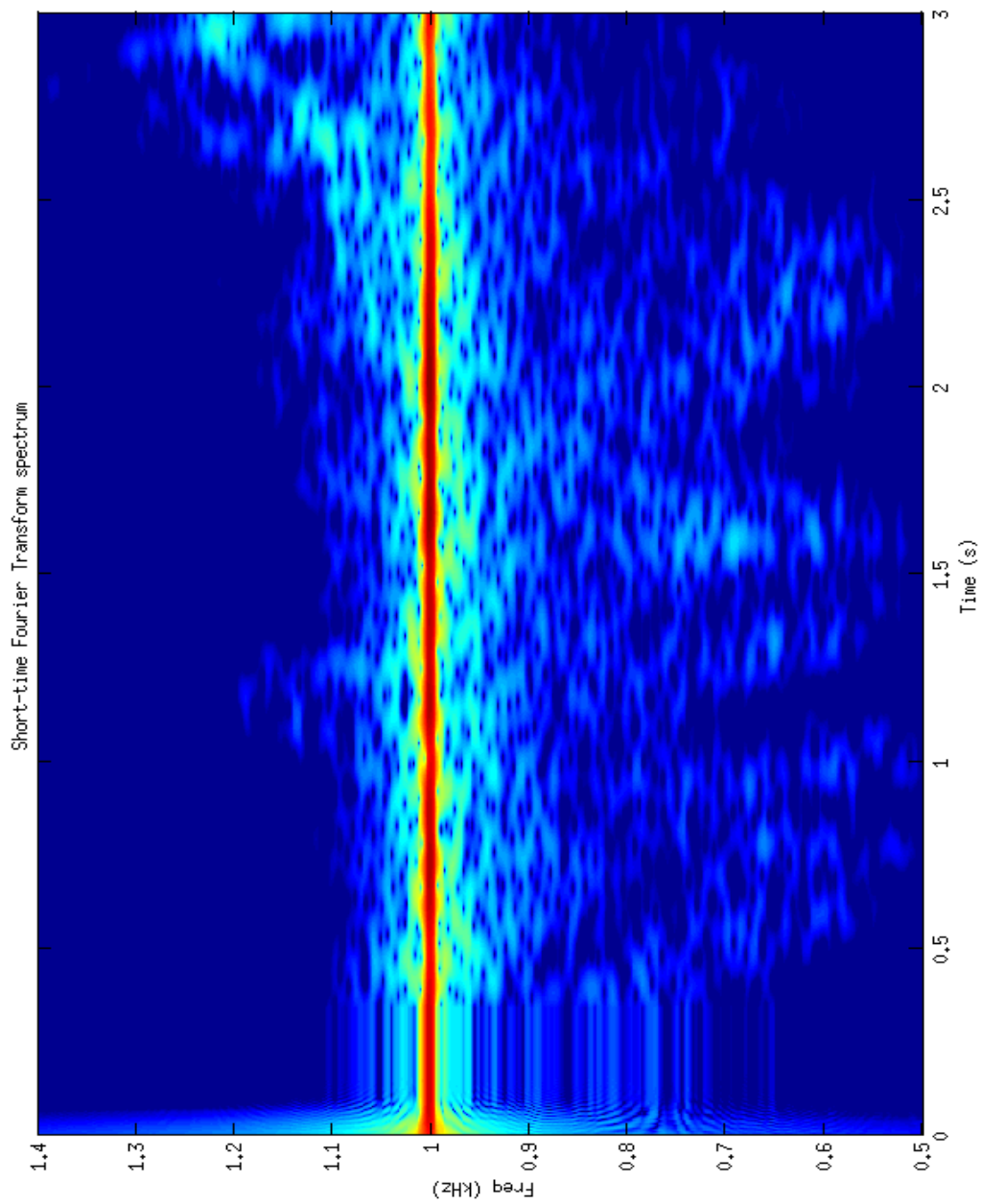


Figura A-24 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um canino a caminhar na direção da plataforma (Figura 5-38).

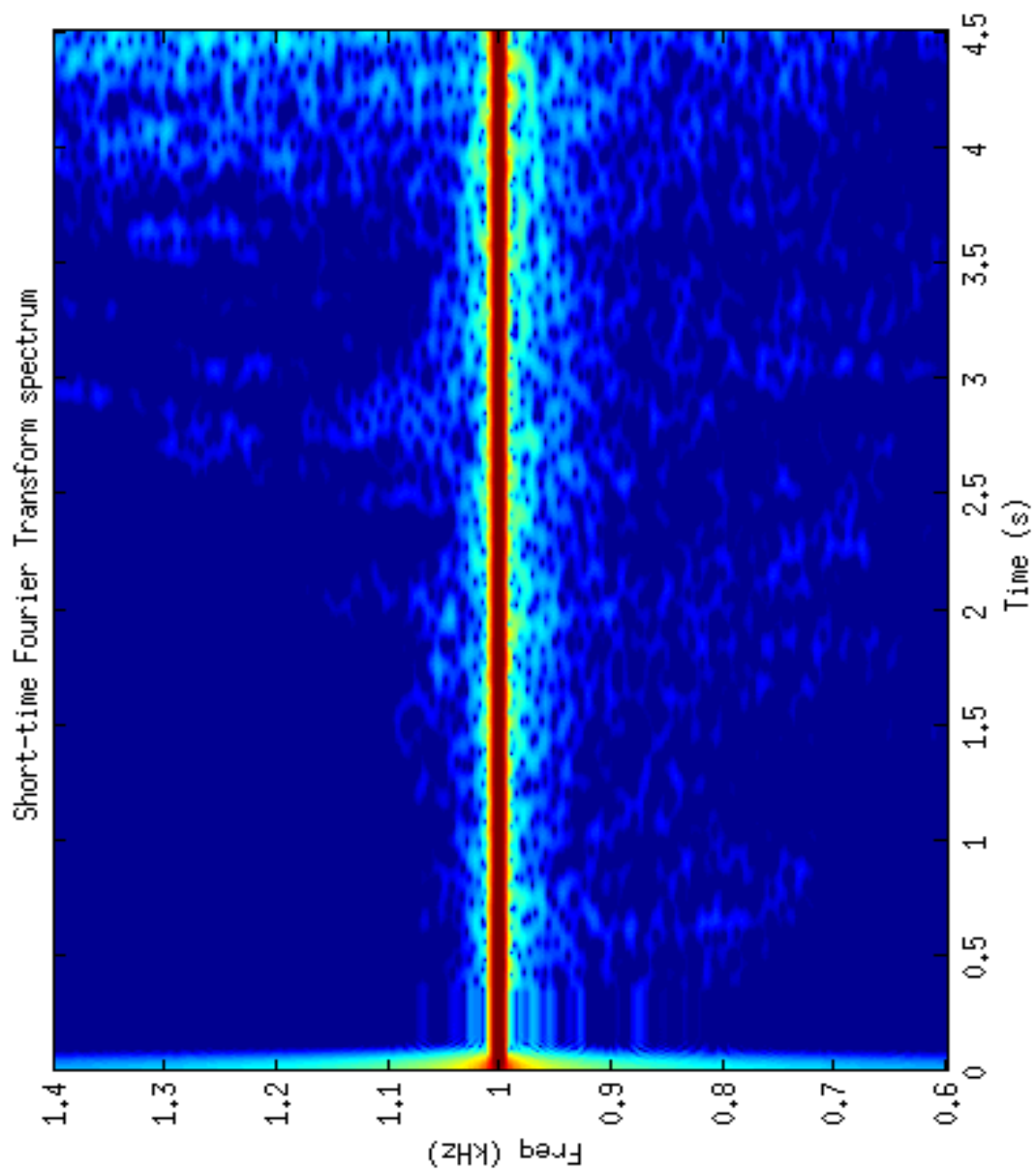


Figura A-25 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um canino a correr na direção da plataforma (Figura 5-39).

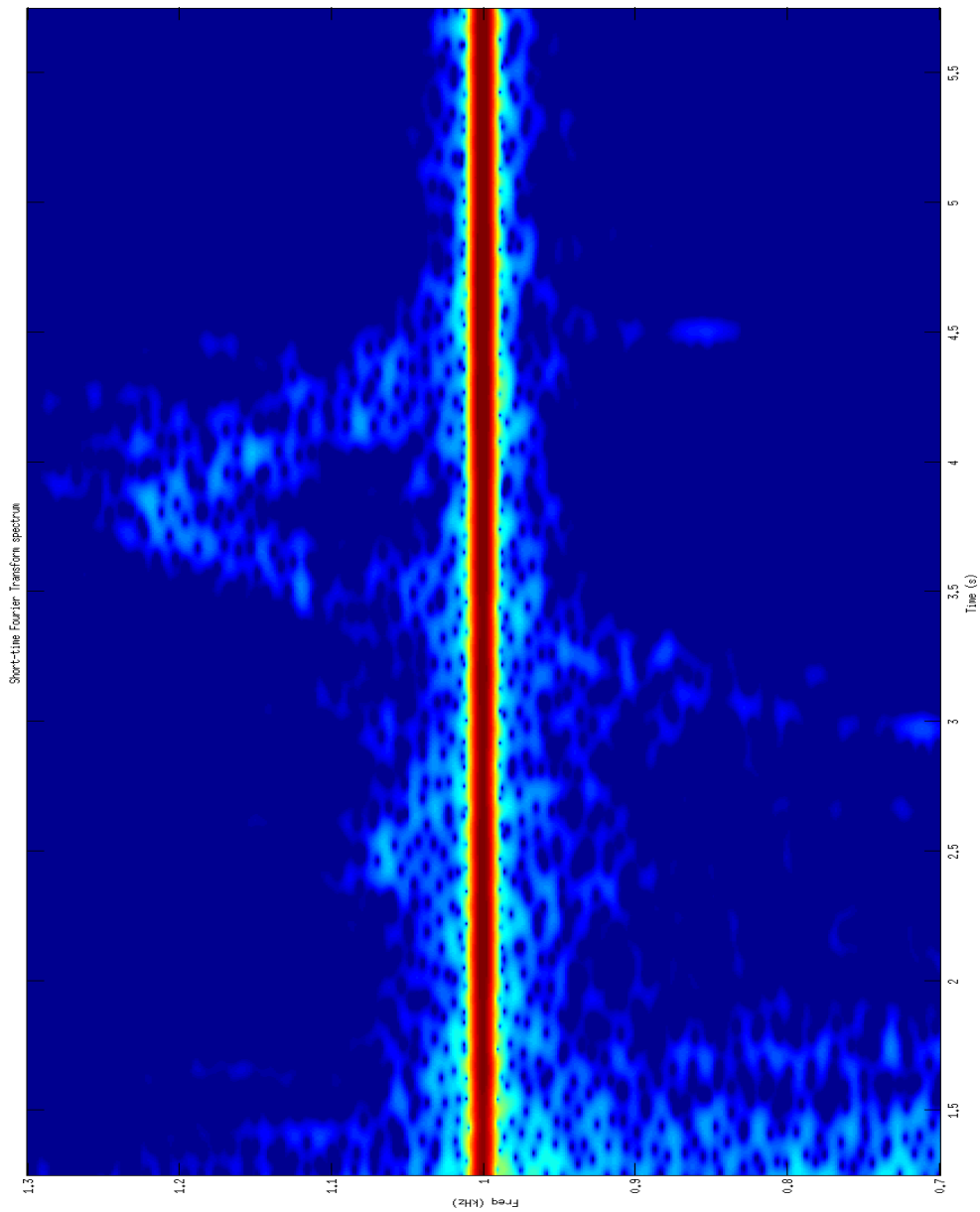


Figura A-26 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um canino a correr, afastando-se da plataforma (Figura 5-40).

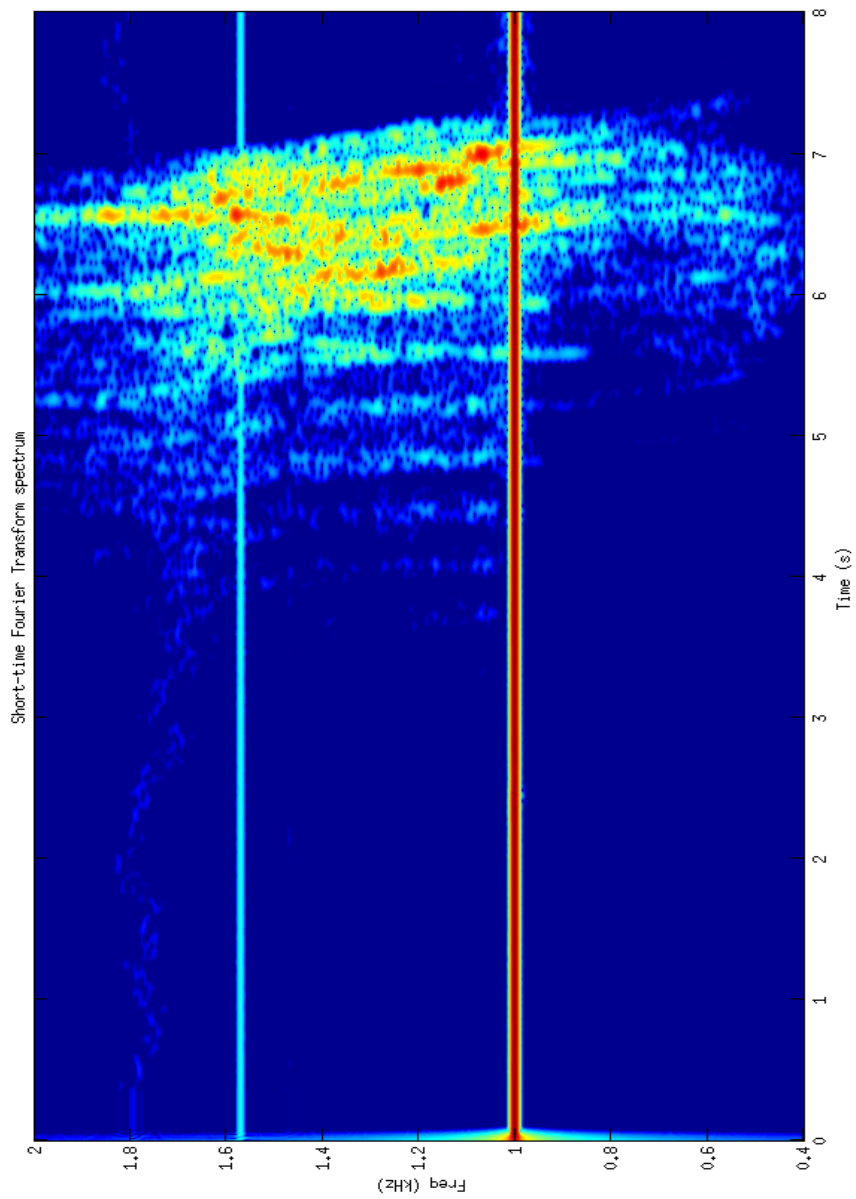


Figura A-27 - Espectrograma da assinatura de Doppler, de um equídeo a caminhar no estilo: ‘trote’ (Figura 5-48).

Anexo I. Descrição do conteúdo da BD

Este anexo é apresentado em forma de tabela, a caracterização de todos os testes que constam na BD construída, para o estudo da análise do movimento humano por ultrassons.

Prefixo	Posição da Plataforma	Alvo	Descrição	Posição relativa à Plataforma Sonar	Data de Realização
Testes com H U M A N O S					
H_0.0	Vertical	-	Teste sem nada presente	-	2012-11-05
Só o movimento dos braços.					
H_1.1	Horizontal	1 Humano	Braços a balançar, a cerca de 1 metro dos transdutores	-	2012-11
H_1.2	Vertical	1 Humano	Braços a balançar, a cerca de 1 metro dos transdutores	-	2012-11-05
H_1.3	Horizontal	1 Humano	Braço direito a balançar, a cerca de 1 metro dos transdutores	-	2012-11
Diversos tipos de marcha, sem sair do mesmo local.					
H_2.1	Vertical	1 Humano	Caminhar devagar no mesmo local, a 1 metros dos transdutores	De frente	2012-11-05
H_2.2	Vertical	1 Humano	Caminhar devagar no mesmo local, a 1 metros dos transdutores	De costas	2012-11-05
H_2.3	Vertical	1 Humano	Caminhar devagar no mesmo local, a 4 metros dos transdutores	De frente	2012-11-05
H_2.4	Vertical	1 Humano	Caminhar devagar no mesmo local, a 4 metros dos transdutores	De costas	2012-11-05

H_2.5	Vertical	1 Humano	Caminhar normalmente no mesmo local, a 1 metros dos transdutores	De frente	2012-11-05
H_2.6	Vertical	1 Humano	Caminhar normalmente no mesmo local, a 1 metros dos transdutores	De costas	2012-11-05
H_2.7	Vertical	1 Humano	Caminhar normalmente no mesmo local, a 4 metros dos transdutores	De frente	2012-11-05
H_2.8	Vertical	1 Humano	Caminhar normalmente no mesmo local, a 4 metros dos transdutores	De costas	2012-11-05
H_2.9	Vertical	1 Humano	“Marcha militar” no mesmo local, a 1 metro dos transdutores	De frente	2012-11-05
H_2.10	Vertical	1 Humano	“Marcha militar” no mesmo local, a 1 metro dos transdutores	De costas	2012-11-05
H_2.11	Vertical	1 Humano	“Marcha militar” no mesmo local, a 4 metro dos transdutores	De frente	2012-11-05
H_2.12	Vertical	1 Humano	“Marcha militar” no mesmo local, a 4 metro dos transdutores	De costas	2012-11-05
Diversos tipos de marcha, com os braços junto ao tronco.					
H_3.1	Vertical, o mais perto do chão	1 Humano	Caminhar devagar, com os braços junto ao tronco	De frente	2012-11-05
H_3.2	Vertical, o mais perto do chão	1 Humano	Caminhar normalmente, com os braços junto ao tronco	De frente	2012-11-05
H_3.3	Vertical, o mais perto do chão	1 Humano	“Marcha militar”, com os braços junto ao tronco	De frente	2012-11-05
H_3.4	Vertical, o mais perto do chão	1 Humano	“Marcha militar”, com os braços junto ao tronco	De costas	2012-11-05
Diversos tipos de marcha.					
H_4.1	Vertical	1 Humano	Caminhada devagar	De frente	2012-11-05

H_4.2	Vertical	1 Humano	Caminhada devagar	De costas	2012-11-05
H_4.3	Vertical	1 Humano	Caminhada normal	De frente	2012-11-05
H_4.4	Vertical	1 Humano	Caminhada normal	De costas	2012-11-05
H_4.5	Vertical	1 Humano	“Marcha militar”	De frente	2012-11-05
H_4.6	Vertical	1 Humano	“Marcha militar”	De costas	2012-11-05
H_4.7	Vertical	1 Humano	Correr	De frente	2012-11-05
H_4.8	Vertical	1 Humano	Correr	De costas	2012-11-05
H_4.9	Vertical	1 Humano	Caminhada devagar	De frente	2012-11-05
H_4.10	Vertical	1 Humano	Caminhada normal	De frente	2012-11-05
H_4.11	Vertical	1 Humano	“Marcha militar”	De frente	2012-11-05
Diversos tipos de marcha, transportando objetos.					
H_5.1	Vertical	1 Humano	Caminhada normal com uma “bazuca”	De frente	2012-11-05
H_5.2	Vertical	1 Humano	Caminhada normal com uma “bazuca”	De costas	2012-11-05
H_5.3	Vertical	1 Humano	“Marcha militar” com uma “bazuca”	De frente	2012-11-05
H_5.4	Vertical	1 Humano	“Marcha militar” com uma “bazuca”	De costas	2012-11-05

H_5.5	Vertical	1 Humano	Caminhada normal transportando um peso	De frente	2012-11-05
H_5.6	Vertical	1 Humano	Caminhada normal transportando um peso	De costas	2012-11-05
Marcha com 2 seres humanos.					
H_6.1	Vertical	2 Humanos	Caminhada normal, lado a lado	De frente	2012-11-05
H_6.2	Vertical	2 Humanos	Caminhada normal, lado a lado	De costas	2012-11-05
H_6.3	Vertical	2 Humanos	Caminhada, em sentidos opostos	-	2012-11-05
Marcha na direção perpendicular à propagação dos sinais.					
H_7.1	Vertical	1 Humano	Caminhada normal	Perpendicular	2012-11-05
H_7.1	Vertical	1 Humano	Caminhada normal	Perpendicular	2012-11-05
NOVOS TESTES					
H_8.1	Vertical, o mais perto do chão	1 Humano	PERNAS – Caminhada normal	De frente	2012-11-22
H_8.2	Vertical, o mais perto do chão	1 Humano	PERNAS – “Marcha militar”	De frente	2012-11-22
H_8.3	Vertical	1 Humano	TRONCO – Braços colados ao corpo, e pernas caminham esticadas	De frente	2012-11-22

H_8.4	Vertical	1 Humano	Caminhada lenta	De frente	2012-11-22
H_8.5	Vertical	1 Humano	Caminhada lenta	De frente	2012-11-22
H_8.6	Vertical	1 Humano	“Marcha militar”	De frente	2012-11-22
H_8.7	Vertical	1 Humano	“Marcha militar”	De frente	2012-11-22
H_8.8	Vertical	1 Humano	Caminhada lenta	De frente	2012-11-22
H_8.9	Vertical	1 Humano	Caminhada normal	De frente	2012-11-22
H_8.10	Vertical	1 Humano	Caminhada rápida	De frente	2012-11-22
H_8.11	Vertical	1 Humano	“Marcha militar”	De frente	2012-11-22
H_8.12	Vertical	1 Humano	Corrida	De frente	2012-11-22
H_8.13	Vertical	1 Humano	Corrida	De frente	2012-11-22
H_8.14	Vertical	1 Humano	Caminhada normal, na perpendicular à direção de propagação do sinal	De frente	2012-11-22
H_8.15	Vertical	1 Humano	Caminhada normal, na oblíqua em relação à direção de propagação	De frente	2012-11-22
H_8.16	Vertical	1 Humano	Caminhada normal	De frente	2012-11-22
H_8.17	Vertical	1 Humano	Caminhada normal	De costas	2012-11-22

Testes com EQUÍDEOS --- C A V A L O S					
E_1.1	Vertical	2 Cavalos	Passe	De frente	2012-10-24
E_1.2	Vertical	1 Cavalo	Trote	De frente	2012-10-24
E_1.3	Vertical	1 Cavalo	Trote	A rodar	2012-10-24
E_1.4	Vertical	1 Cavalo	Galope	De frente	2012-10-24
E_1.5	Vertical	1 Cavalo	Galope	De frente	2012-10-24
E_1.6	Vertical	1 Cavalo	Trote	De frente	2012-10-24
E_1.7	Vertical	1 Cavalo	Passe	De frente	2012-10-24
2º Conjunto de testes.					
E_2.1	Vertical	1 Cavalo	Passe	De frente	2012-10-31
E_2.2	Vertical	1 Cavalo	Passe	De frente	2012-10-31

E_2.3	Vertical	1 Cavalo	Trote	De frente	2012-10-31
E_2.4	Vertical	1 Cavalo	Trote	De frente	2012-10-31
E_2.5	Vertical	1 Cavalo	Trote (mais rápido)	De frente	2012-10-31
E_2.6	Vertical	1 Cavalo	Galope (Com interferência)	De frente	2012-10-31
E_2.7	Vertical	1 Cavalo	Galope	De frente	2012-10-31
E_2.8	Vertical	1 Cavalo	Galope	De frente	2012-10-31
E_2.9	Vertical	1 Cavalo	Passe (mais lento)	De frente	2012-10-31
E_2.10	Vertical	1 Cavalo	Passe (mais lento)	De frente	2012-10-31

Testes com C A N I N O S --- C Ã E S

C_1.1	Vertical, o mais perto do chão	1 Cão	Andar (depressa)	De frente	2012-11-11
C_1.2	Vertical, o mais perto do chão	1 Cão	Andar (depressa)	De frente	2012-11-11
C_1.3	Vertical, o mais perto do chão	1 Cão + Criador	Andar	De frente	2012-11-11
C_1.4	Vertical, o mais perto do chão	1 Cão + Criador	Corrida	De frente	2012-11-11

C_1.5	Vertical, o mais perto do chão	1 Cão	Corrida	De frente	2012-11-11
C_1.6	Vertical, o mais perto do chão	1 Cão	Corrida	De costas	2012-11-11

