

Extração de features de sinais acústicos

JOSE MANUEL GONCALVES DE ARAUJO
novembro de 2016



Extração de features de sinais acústicos.

José Manuel Gonçalves Araújo,
N^o 1090410

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores -
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

21 de Novembro de 2016



Dissertação, para satisfação parcial dos requisitos do Mestrado em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: José Manuel Gonçalves Araújo,
N^o 1090410

Orientador: Alfredo Manuel Oliveira Martins

Co-Orientador: José Miguel Soares De Almeida

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores -
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

”Our future, our destiny, will be greatly affected by discoveries from our exploration of
inner and outer space.”

Scott Carpenter, Astronaut/Aquanaut

Aos meus pais, irmãos, namorada e amigos...

Agradecimentos

Gostaria de utilizar esta secção para efetuar alguns agradecimentos, começando por agradecer ao Eng^o José Almeida ao Eng^o Alfredo Martins por me proporcionarem esta oportunidade e pelo apoio prestado.

Quero também agradecer aos meus amigos e colegas Renato Ribeiro, André Faria, André Neves, Bruno Matias, Joel Oliveira, Nelson Campos e Miguel Ribeiro que ao longo destes anos me acompanharam neste percurso académico. Um agradecimento especial ao Flávio Lopes e João Ribeiro pelo apoio prestado enquanto estive fora do país.

Aos meus pais pelo apoio dado durante a minha formação académica.

Para finalizar queria também agradecer à minha namorada Andreia Cruz, pela paciência e apoio prestado durante a execução desta dissertação.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Resumo

A exploração de ambientes subaquáticos está em constante evolução e é cada vez mais comum recorrer à utilização de robôs para efetuar explorações em situações em que existe um risco elevado para o ser humana. Estes robôs necessitam de ser dotados de sensores para poderem adquirir informação útil à exploração. Surge então a necessidade de adicionar um sensor que seja capaz de captar sinais acústicos em ambientes subaquáticos, com o propósito de efetuar a deteção e identificação de embarcações à superfície. Para ser possível efetuar a captura de sinais acústicos é necessário dotar o robô de um hidrofone e uma unidade de processamento capaz de processar os sinais capturados e detetar a presença de embarcações e se possível identificar as mesmas.

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema que seja capaz de capturar os sinais acústicos e efetuar o processamento para a extração de informação útil.

A informação retornada por este sistema deverá ser analisada posteriormente por um algoritmo capaz de detetar a presença e identificar as embarcações.

Palavras-Chave:

embarcação, barco, hidrofone, processamento, sinal, som, subaquático, isep, lsa.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Abstract

The exploration of underwater environments it's evolving and the use of robots it's a requirement when the environment is not suitable for humans. It's also known that this robots need to be fitted with sensors to be able to collect useful information to the exploration. In underwater explorations comes up the requirement to fit the robots with acoustic sensors. This sensor need's to capture acoustic sounds of vessels passing at the sea surface and detect and identify this vessels.

The robot needs to be fitted with one hydrophone and a processing unit able to process the audio data and notify when it detects one vessel and identify it if possible.

The goal of this dissertation is design a system able of capture acoustic signals in underwater environments and process them extracting features that can be used to detect the presence of a vessel and do the indentation.

One extra system will be required with the ability of interpret the features and proceed to the detection and identification of vessels.

Keywords:

vessel, ship, hydrophone, signal, processing, features, recognition, audio, underwater, isep, lsa.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Acrónimos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Âmbito da dissertação	1
1.2 Enquadramento e motivação	2
1.3 Cenários de operação	3
1.4 Objetivos	3
1.5 Estrutura do documento	4
2 Estado da Arte	5
2.1 Sistemas Existentes	5
2.2 Tecnologias Existentes	6
2.2.1 Hidrofone	6
2.2.2 Processamento de sinal	8
2.3 Resumo do capítulo	13
3 Fundamentos teóricos	15
3.1 Ondas sonoras na água	15

3.2	Fontes de ruído em barcos	16
3.3	Hidrofone	17
3.3.1	Hidrofone	17
3.4	Processamento de sinal digital	20
3.4.1	Amostragem	20
3.5	Resumo do capítulo	21
4	Abordagem conceptual	23
4.1	Arquitetura funcional do sistema de captura de som	23
4.2	<i>Hardware</i> para a captura de som	24
4.2.1	Sistema de aquisição de ondas sonoras	25
4.2.2	Sistema de de digitalização de sinais elétricos	27
4.3	Resumo do capítulo	28
5	Implementação	29
5.1	Processo de gravação do som	29
5.2	Processo de extração de <i>features</i>	30
5.2.1	espectrograma	31
5.2.2	Deteção de picos	36
5.3	Resumo do capítulo	36
6	Resultados	39
6.1	Identificação das gravações	39
6.2	Análise utilizando o <i>Audacity</i>	43
6.3	Análise utilizando algoritmo implementado.	50
6.4	Deteção de picos.	54
6.5	Resumo do capítulo	56
7	Conclusão e Trabalho Futuro	57
	Bibliografia	59

Lista de Figuras

1.1	Alguns dos robôs do LSA.	2
2.1	Hidrofone TC4013.	7
2.2	Espetro de frequência de uma janela quadrada.	10
2.3	Exemplo de um espectrograma.	11
2.4	Divisão das células no plano tempo-frequência pelo SFFT (esquerda) e <i>Wavelet Transform</i> (direita).	12
2.5	Modelo de <i>EIH</i>	13
3.1	Hidrofone TC4013.	18
4.1	Arquitetura do <i>Software</i>	24
4.2	Arquitetura do <i>Hardware</i>	25
4.3	Hidrofone TC4013.	26
4.4	Hidrofone H2a.	26
4.5	Pré-amplificador EC6061.	26
4.6	Gravador ZOOM H1.	28
5.1	Local escolhido para gravação dos ficheiros.	30
5.2	Localização do gravador.	31
5.3	Criação do espectrograma.	32
5.4	Espetro de frequências de uma <i>frame</i>	33
5.5	Exemplo de janela de <i>Hamming</i>	34
5.6	Escala de <i>Erb</i> , <i>Mel</i> e <i>Bark</i>	34
5.7	Escala <i>Linear</i>	35
5.8	Escala <i>Bark</i>	35

5.9	deteção de Picos.	36
6.1	Barcos gravados no Log 1.	40
6.2	Barcos gravados no Log 3.	41
6.3	Barcos gravados no Log 4.	41
6.4	Barcos gravados no Log 7.	42
6.5	Barcos gravados no Log 8.	42
6.6	Barcos gravados no Log 9.	43
6.7	Análise Log 1.	44
6.8	Análise Log 3.	45
6.9	Análise Log 7.	46
6.10	Análise Log 8.	47
6.11	Análise Log 8 com escala ajustada para barco 12.	47
6.12	Análise Log 4.	48
6.13	Análise Log 9.	49
6.14	Barco 3 - Log 3 - 16:17:13.	51
6.15	Barco 3 - Log 7 - 16:39:11.	51
6.16	Barco 3 - Log 7 - 16:45:33.	52
6.17	Barco 3 - Log 9 - 17:09:02.	52
6.18	Barco 3 - Log 9 - 17:15:33.	53
6.19	Deteção de picos Barco 3 Log 3.	55
6.20	Deteção de picos Barco 4 Log 4.	55

Lista de Tabelas

4.1	Características dos Hidrofonos.	27
4.2	Características do Gravador Zoom H1.	28
6.1	Duração e Barcos presentes em cada Gravação.	40
6.2	Período analisado em cada gravação para o Barco 3.	50

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Siglas e Acrónimos

LSA Laboratório de Sistemas Autónomos

FT Fourier Transform

DFT Discrete Fourier Transform

STFT Short Time Fourier Transform

FFT Fast Fourier Transform

SFFT Short Fast Fourier Transform

DEMON Detection of Envelope Modulation on Noise

ADC Analog to Digital Converter

WPD Wavelet Packets Decomposition

EIH Ensemble Interval Histogram

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Âmbito da dissertação

A exploração de meios subaquáticos tem vindo a evoluir, tendo a tecnologia permitido elevar a exploração neste meio para além das capacidades de um ser humano.

Os robôs tem vindo a ser cada vez mais utilizados, permitindo por exemplo efetuar o registo da atividade sísmica no fundo do mar durante meses ou anos seguidos.

Esta dissertação visa o desenvolvimento de um sistema capaz de capturar e analisar informação acústica em ambientes subaquáticos.

Em ambientes subaquáticos é comum efetuar a análise da variação da pressão da água, sendo este o fenómeno equiparado ao da variação da pressão do ar que resulta na geração de sinais sonoros.

Com esta análise é possível estudar comunicações entre animais marinhos, ruídos emitidos por veículos subaquáticos ou de superfície ou mesmo ruídos de atividade vulcânica. De forma a ser possível efetuar esta análise é necessário dotar os robôs com capacidade sensorial a este nível e de desenvolver algoritmos capazes de detetar os vários fenómenos.

No âmbito desta dissertação, são abordadas técnicas de extração de informação útil a partir da recolha de informação acústica do meio.

1.2 Enquadramento e motivação

Ao longo dos últimos anos o LSA (Laboratório de Sistemas Autónomos)¹ tem vindo a desenvolver projetos na área de robótica aquática, desenvolvendo veículos de superfície e subaquáticos, Figura 1.1.



Figura 1.1: Alguns dos robôs do LSA.

Qualquer um destes robôs pode passar a integrar um sistema de análise de sinais acústicos subaquáticos, permitindo diferentes análises consoante o robô utilizado. Como tal, esta dissertação tem como objetivo desenvolver um sistema capaz de extrair informação útil (*features*) dos sinais capturados pelo sensor.

¹www.lsa.isep.ipp.pt

1.3 Cenários de operação

O tipo de análise proposta no âmbito desta dissertação permite que esta seja aplicável em diversas soluções. Este sistema foi direccionado para ambientes subaquáticos podendo desta forma ser facilmente integrado em robôs subaquáticos, sendo que este sistema também pode ser utilizado em ambientes não aquáticos.

A variedade de aplicações para este sistema em meios subaquáticos é extensa, tais como:

- Monitorização do tráfego marítimo em docas;
- Detecção e identificação de embarcações;
- Exploração de oceanografia;
- Detecção e identificação de animais marinhos;
- Monitorização de atividade sísmica;
- Estudos de impacto do ruído gerado por veículos subaquáticos na vida marinha.

Como exemplo em meio não subaquático são:

- Detecção de avarias em motores;
- Detecção e identificação de veículos;
- Estudo de sons emitidos por aves;

1.4 Objetivos

Esta dissertação aborda o tema de extração de informação útil de sinais acústicos em ambientes subaquáticos. Dada a diversidade de aplicações deste sistema, esta dissertação focou-se na extração de *features*² que permitam a deteção e identificação de embarcações à superfície. Assim sendo, os objectivos propostos a alcançar com o desenvolvimento desta dissertação são:

- Projeto de um sistema de aquisição de áudio e extração de *features*;

²*Features* designam elementos de informação de interesse que podem ser reconhecidos no conjunto total dos dados adquiridos. Por exemplo: características identificáveis de sinais acústicos que permitem isoladamente ou em conjunto determinar a deteção de animais ou embarcações. De uma forma geral estas *features* são descritas por um conjunto limitado características incorporadas no que se designa de descritores.

- Algoritmos de extração de *features* a partir dos sinais de áudio;
- Possibilidade de efetuar análise em tempo real ou após operações;
- Algoritmo de validação das *features*;
- Validação do desempenho do sistema;

1.5 Estrutura do documento

O segundo capítulo, **estado da arte**, diz respeito ao estudo preliminar sobre o tema em questão, onde serão descritas as tecnologias existentes e analisados alguns trabalhos desenvolvidos que estão diretamente relacionados com o tópico desta dissertação.

No terceiro capítulo, **fundamentos teóricos**, são apresentados conceitos e fundamentos necessários à compreensão do funcionamento de um sistema de processamento de sinal.

No quarto capítulo, **abordagem conceptual**, é detalhada a arquitetura funcional do sistema e as etapas referentes ao processamento de extração de *features*.

No quinto capítulo, **implementação**, é descrita a implementação do projeto, onde são detalhados os algoritmos implementados.

No sexto capítulo, **resultados**, é apresentado o processo de validação das *features* e apresentados também os testes efetuados e os respectivos resultados.

No sétimo e último capítulo, **conclusão e trabalho futuro**, são apresentadas algumas conclusões bem como respectivas linhas de trabalho futuro, tendo em vista a continuidade do trabalho.

Capítulo 2

Estado da Arte

Este capítulo tem como objectivo efetuar um estudo do estado da arte referente aos tópicos abordados na presente dissertação, nomeadamente permitir tomar conhecimento das tecnologias utilizadas nos sistemas já existentes, sendo assim possível conhecer limitações ou vantagens desses sistemas. Esta tarefa permite pois desta forma enquadrar o trabalho realizado no estado da arte actual em detecção e identificação de features acústicas para os cenários endereçados.

2.1 Sistemas Existentes

A **Mark 60 CAPTOR** é uma mina anti-submarinos, para águas profundas. Esta é ancorada no fundo do mar e pode ser colocada utilizando um submarino, navio ou avião. A mina encontra-se equipado com um torpedo Mark 46 e um sonar com capacidade computacional suficiente para detetar a diferença na assinatura acústica entre um navio e um submarino. Caso ocorra a detecção de um submarino inimigo, a mina lança um torpedo Mark 46. Este torpedo tem a capacidade de seguir o som gerado pelo submarino e explode assim que embater.

Mais informação técnica acerca da tecnologia de detecção acústica, como algoritmos de processamento utilizados não foi encontrada, mas serve este como um bom exemplo de um sistema implementado em ambiente real. Este sistema foi utilizado pela Marinha dos Estados Unidos da América na guerra fria a partir de 1979.^{3 4}

O projeto **Civitas Mobilis**⁵, decorrido entre 2005 e 2009, teve como objectivo melhorar a mobilidade urbana em algumas cidades europeias, tendo contado com a participação dos *stakeholders*⁶ da mobilidade local das cidades de Toulouse (França), Debrecen (Hungria), Ljubljana (Eslovenia), Veneza (Itália) e Odense (Dinamarca). No âmbito deste projeto, James Curry e Jonathan Ross desenvolveram um sistema de identificação de barcos com recurso à assinatura do ruído gerado pelos motores [1]. O sistema foi desenvolvido com o propósito de efetuar medições na cidade de Veneza de forma a conseguirem reduzir o impacto da ondulação gerada pelos barcos, nas infraestruturas locais.

2.2 Tecnologias Existentes

Nesta secção são descritas as tecnologias existentes para processamento de sinal digital.

2.2.1 Processamento de sinal

Para o processamento de sinal sonoro existem vários algoritmos documentados nas várias fontes analisadas, algoritmos estes que tem como função extrair informação útil dos sinais sonoros gravados, informação esta nomeada de *feature*. Normalmente os algoritmos utilizados em projetos relativos ao tema desta dissertação, são classificados em dois tipos, os **detetores** e os **classificadores**. Algoritmos **detetores** tem como função analisar o sinal de audio proveniente do hidrofone e extrair as *features*, *features* estas que serão analisadas pelos algoritmos **classificadores** que por sua vez identificam a existência de uma embarcação e classificação ou identificação da mesma. Podemos de uma forma geral considerar que o primeiro tipo de algoritmos visa a detecção e elementos relevantes enquanto o segundo visa a sua classificação.

³http://the-meaning.com/mark_60_captor.html

⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Mark_60_CAPTOR#cite_ref-1987_almanac_1-1

⁵<http://civitas.eu/content/mobilis>, acedido em 07/08/2016.

⁶*stakeholders* são individuais, grupos ou organizações que são afetados pela atividade de um negócio.

Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier, FT (*Fourier Transform*), é a ferramenta mais básica que pode ser utilizada para efetuar a análise de um sinal. Com esta é possível converter um sinal que se encontra no domínio do tempo para o domínio das frequências, [2]. Definida pela Equação 2.1:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

Como é possível observar da Equação 2.1, esta implica a análise de um sinal contínuo no tempo. Uma vez que o processamento é efetuado num computador, a informação tem de ser convertida para formato digital, passando a ser formada por amostras do sinal real contínuo no tempo. O tempo entre cada amostra é nomeado de período de amostragem, sendo que esta tem um valor máximo especificado pelo teorema de *Nyquist* [2]. O teorema de *Nyquist* diz que a frequência de amostragem de um sinal tem de ser pelo menos duas vezes maior que a frequência presente no sinal a ser digitalizado, por exemplo, se pretendemos efetuar a amostragem de um sinal audível pelo ouvido humano, ou seja que comporta frequências entre 20Hz a 20kHz, é necessário que a frequência mínima de amostragem do sinal seja de 40kHz, por forma a reter toda a informação existente no sinal original e poder posteriormente reconstruir o sinal original a partir das suas amostras. Estes são os requisitos mínimos para ser possível detetar a frequência fundamental de um sinal.

$$X(w) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (2.2)$$

Para a análise de sinais discretos a Transformada de Fourier Discreta, DFT (*Discrete Fourier Transform*), é definida pela Equação 2.2 [2].

Com é possível observar na Equação 2.2, esta requiere o completo conhecimento de um sinal de $n = -\infty$ a $n = +\infty$, mas isto não é possível para um sistema digital finito, implicando a definição da *Short Time Fourier Transform*, STFT, sendo definida pela Equação 2.3:

$$X(w) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \quad (2.3)$$

A estratégia de utilizar uma porção do sinal (conhecida também pela aplicação de

uma janela) é equivalente a multiplicar o sinal original por um sinal de onda quadrada com largura igual ao tempo definido para a análise. Esta multiplicação é equivalente a uma convolução no domínio das frequências, [2]. O problema da utilização de uma janela quadrada é que o espectro de frequências desta função é uma função *sinc*, Figura 2.2, que introduz artefactos no sinal original, [1]. Para minimizar este efeito da janela quadrada, é bastante comum recorrer à janela de *Hamming*, [3].

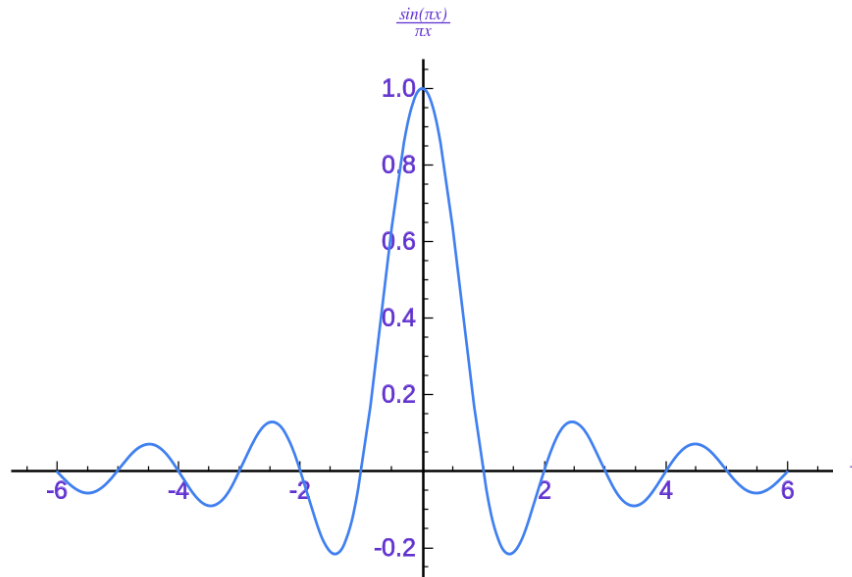


Figura 2.1: Espectro de frequência de uma janela quadrada.

A STFT é bastante exigente a nível computacional o que levou ao desenvolvimento da técnica *Fast Fourier Transform*, (FFT). Esta calcula a DFT em N pontos igualmente espaçados no domínio das frequências, onde N é o total de pontos do domínios dos tempos e deve ser sempre uma potência de 2.

O algoritmo FFT é no entanto uma ferramenta com limitações para alguns sistemas, como é o caso do tema desta dissertação, onde é necessário manter a informação temporal quando no domínio das frequências. O FFT não tem a capacidade de manter a posição temporal da informação analisada. Isto é um requisito no âmbito desta dissertação, porque o sinal de som a ser analisado não é constante no tempo, querendo isto dizer que, por exemplo, num determinado instante de tempo vai existir uma componente de frequência f_1

e instantes depois uma componente f_2 . Caso se analisasse o sinal considerando que este seria estático, o resultado do FFT, seria que no sinal foi detetada a componente f_1 e f_2 . Para ser possível receber a informação do instante de tempo em que cada componente ocorreu é necessário utilizar outro algoritmo como é o caso do WPD (*Wavelet Packets Decomposition*) ou de um espectrograma.

Espectrograma e SFFT

Um espectrograma é uma ferramenta utilizada para visualizar o espectro de frequências de um sinal ao longo do tempo. Quando utilizada a ferramenta FFT, a um determinado sinal, esta retorna um vetor as frequências detetadas. Este vetor é guardado numa matriz de duas dimensões e o respectivo período de tempo a que pertence, e assim sucessivamente para os seguintes períodos de tempo. Na Figura 2.3, é possível observar que o sinal analisado é constituído em grande parte por quatro frequências ao longo do tempo.

O processo de construção desta matriz recorrendo ao FFT é chamado de SFFT (*Short Fast Fourier Transform*).

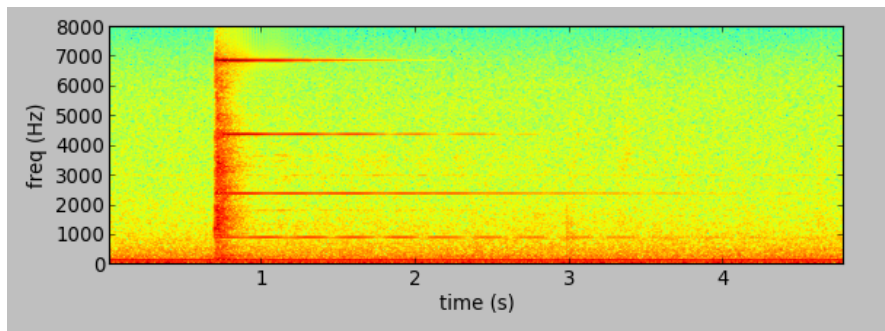


Figura 2.2: Exemplo de um espectrograma.

Wavelet Packets Decomposition

Wavelet Packets Decomposition, WPD, é um algoritmo que é muito utilizado para substituir a utilização do FFT, uma vez que este tem a vantagem de conseguir converter um sinal para o domínio das frequências mantendo a posição temporal do mesmo, [?].

Na Figura 2.4, é possível observar do lado esquerdo a divisão que o método *FFT* efetua no plano tempo-frequência e à direita a divisão efetuada pelo método *Wavelet Transform*. Em comparação com o método *FFT*, com o método *Wavelet Transform* é possível obter melhor resolução temporal à medida que a frequência aumenta, por outro lado à medida que a frequência diminui este aumenta a resolução no eixo das frequências. Inicialmente uma onda "mãe", que pode ser comparada a uma onda sinusoidal limitada, é utilizada para filtrar o sinal. Esta onda "mãe" é então progressivamente escalada e dilatada por potências de 2, para produzir resultados para outras escalas. A *Continuous Wavelet Transform*, [4], é definida pela Equação 2.4, em termos da onda "mãe" h , no instante t na escala a :

$$X_{WT}(t, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int x(\tau) h * \left(\frac{\tau - t}{a} \right) d\tau \quad (2.4)$$

Como referido, esta tem a particularidade de localizar as *features* no plano tempo-frequência ao contrário da *FFT*. A segunda propriedade desejada é o escalamento exponencial das análises do *Wavelet* no plano tempo-frequência, aproximando-se do comportamento de um ouvido, Figura 2.4.

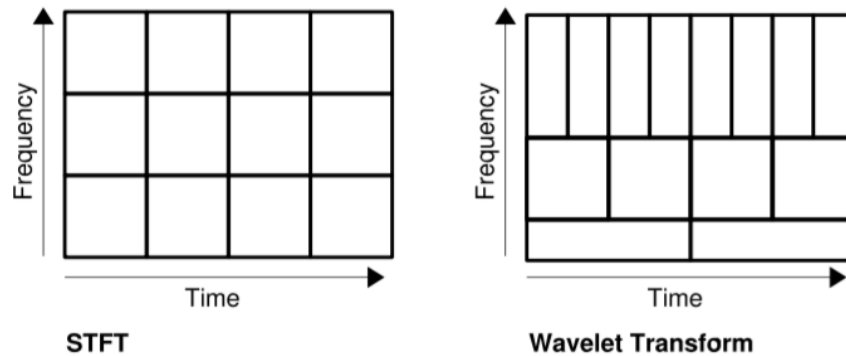


Figura 2.3: Divisão das células no plano tempo-frequência pelo SFFT (esquerda) e *Wavelet Transform* (direita) [4].

Ensemble Interval Histogram

Ensemble Interval Histogram, (EIH), é um método de análise espectral que funciona de forma muito parecida a um ouvido. Neste a frequência contida num sinal é estimada a partir do comportamento de uma simulação das fibras do nervo auditivo a um impulso.

Segundo, *Robert Mill*, [4], foi feita uma comparação do desempenho da análise de *Fourier* e de *EIH* a quando da variação do nível de ruído num dígito falado. O autor concluiu que o *EIH* degradava mais lentamente com a diminuição da relação sinal ruído. Com este trabalho foi possível concluir que o *EIH* tem uma habilidade superior para preservar a estrutura harmónica na presença de ruído Gaussiano.

A Figura 2.5, ilustra a estrutura do modelo do algoritmo *EIH* adaptado por *Robert Mill*, [4].

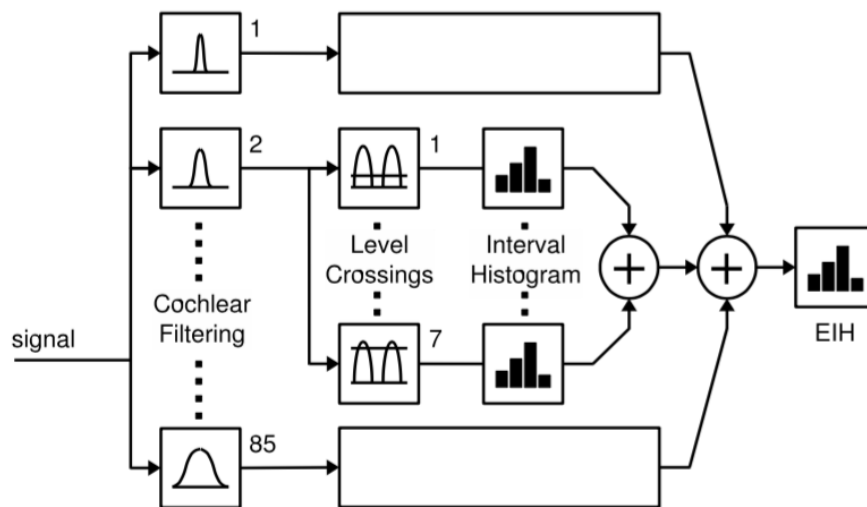


Figura 2.4: Modelo de *EIH* adaptado por [4].

DEMON

Detection of Envelope Modulation on Noise, (DEMON) é um dos métodos que é utilizada para identificar ou detetar embarcações, [4] [5].

Este método consiste na extração de informação útil da amplitude da modulação da envolvente da relação sinal ruído. Precisamente, quando uma série de harmónicos está presente no espectro de frequências, a frequência fundamental corresponde à velocidade de rotação da hélice e a amplitude dos harmónicos representa o total de hélices e a sua configuração.

2.3 Resumo do capítulo

Com o desenvolvimento deste capítulo foi possível encontrar e estudar sistemas existentes e desta forma ajudar na decisão de quais tecnologias se deveria abordar para a implementação deste sistema.

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

No capítulo anterior foram analisados trabalhos relacionados com o tema desta dissertação, permitindo enquadrar as diferentes abordagens. Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos teóricos necessários à compreensão de um sistema de processamento de sinal digital.

3.1 Ondas sonoras na água

As ondas sonoras, [6], são definidas como ondas de compressão ou longitudinais, que tem uma frequência dentro do espectro audível. O ser humano consegue ouvir desde 20Hz até 20kHz, mas outros animais conseguem ouvir para além do espectro do ouvido humano.

Ondas de compressão são ondas mecânicas que se propagam como variações de pressão através de materiais. Uma característica é que as partículas movem-se para trás e para a frente na mesma direção que a onda é propagada. A variação destas partículas é que gera a variação de pressão e o ritmo do movimento determina a frequência da onda.

Dependendo nas condições da geração das ondas sonoras, estas podem ser esféricas, planas ou algo entre as duas. Ondas planas propagam-se como um plano que avança no espaço, num meio ideal sem perdas de energia na direção de propagação da onda. Por outro lado ondas esféricas propagam-se segundo uma esfera, com uma perda de energia no meio ideal que segue a regra esférica, que diz que a energia decai relativamente ao inverso da distância ao quadrado.

Se as leituras das ondas sonoras forem efetuadas perto da fonte, estas são normalmente chamadas de leituras de campo próximo, por outro lado, se forem efetuadas longe da fonte são chamadas leituras de campo distante.

Existe uma razão para definir se a leitura é de campo próximo ou de campo distante. Para ser considerada leitura de campo próximo esta tem de ter uma distância para a fonte menor que a distância r_0 . Para uma fonte com área circular A , uma leitura é dita de campo próximo com a Equação 3.1, [6]:

$$r_0 = \frac{A}{\lambda} = \frac{Af}{c} \quad (3.1)$$

, onde:

- f frequência da onda
- λ comprimento de onda
- c velocidade de propagação do som na água

3.2 Fontes de ruído em barcos

As ondas mecânicas emitidas por embarcações podem ser emitidas por várias fontes. Segundo Carlton e Vlastic, [7], [?], as fontes de ruído ou vibração de uma embarcação são:

1. Motores - Típicamente motores a Gasóleo;
2. Vibrações de eixos de transmissão;
3. Pressão gerada pela hélice e força gerada nos rolamentos;
4. Sistemas de climatização;
5. Equipamentos para efetuar manobras, como propulsores transversais;
6. Movimentações de cargas e máquinas de ancoragem;
7. *Vortex shedding mechanisms* - Formação de vórtices quando a embarcação está em movimento
8. Aspirações e descargas de água;
9. *Slamming phenomena* - É o efeito da parte de baixo da embarcação a bater na superfície do mar;

Segundo Chung, [8], um dos mais métodos fiáveis de deteção e classificação de navios é a análise da portadora do ruído emitido pelo navio. O ruído emitido por um navio é

modulado a uma frequência que está relacionado com o total de lâminas da hélice e com a velocidade de rotação, considerando o ruído causado pela propulsão como predominante. Este método é conhecido como DEMON (*Detection of Envelope Modulation on Noise*).

As vibrações emitidas por mecanismos de criação de vórtices (*Vortex Shedding Mechanisms*), segundo [7], podem gerar desconforto para as pessoas que estão no navio ou para animais marinhos e também pode levar a instabilidade da estrutura do navio em alguns casos.

Este tipo de vibrações não estão diretamente relacionadas com velocidades de rotação dos mecanismos, mas sim com o efeito da abertura das grelhas do casco do navio e com a morfologia do mesmo (em particular na medida em que esta afecta o fluxo). Estas vibrações estão também relacionadas com o número *Strouhal*⁸ e número de *Froude*⁹, ambos dependentes da velocidade do navio, [7].

Os lemes e linha central do casco do navio podem interferir na frequência do Vortex em determinadas situações, dependendo diretamente da velocidade do navio e direção do mesmo.

O efeito de vórtice pode ser utilizado para complementar a assinatura de um navio uma vez que este é em parte formado por características intrínsecas ao navio.

3.3 Hidrofone

3.3.1 Hidrofone

Um Hidrofone, Figura 3.1, é um microfone desenhado para a operar dentro de água com o objetivo de recolher sons em ambientes subaquáticos. Estes são transdutores que tem a capacidade de gerar corrente elétrica quando sujeitos a uma variação de pressão,

⁸Strouhal é um numero que representa a frequência das oscilações dos materiais flexíveis, oscilações estas que são geradas pelo variação de pressão do fluxo de água ao longo do navio.

⁹Froude é um numero que relaciona a velocidade entre o navio e o mar com a força gravítica, sendo uma medida da resistência que o navio tem ao fluir na água.

(sendo que um sinal sonoro é uma variação de pressão). Alguns destes transdutores tem também a capacidade de emitir sinais sonoros.



Figura 3.1: Hidrofone TC4013 ⁷.

O princípio de funcionamento e material do transdutor é equivalente entre o microfone e o hidrofone, podendo os dois serem utilizados em qualquer um dos ambientes, ar ou água, mas como é expectável, um hidrofone vai ter um péssimo desempenho quando utilizado em ar e vice-versa para o microfone. A grande diferença é a sensibilidade que o transdutor deve ter para o meio ambiente que foi desenhado, uma vez que a água é muito mais densa que o ar.

Tal como para os microfones existem várias características que é necessário ter em conta para decidir qual melhor se adapta a determinada aplicação, acontece com os hidrofones, onde é necessário ter em conta a algumas características tais como:

- Sensibilidade;
- Frequência de operação;
- Profundidade de operação aconselhada;
- Profundidade máxima de operação;

- Ativo ou Passivo;
- Consumo energético;
- Tipo de polarização (horizontal ou vertical);
- Comprimento do cabo;

Um hidrofone funciona da mesma forma que um microfone, apenas é desenhado para ser capaz de capturar ondas sonoras em água. Um hidrofone pode também ter a capacidade de emitir ondas sonoras, mas nem todos, se utilizar um hidrofone desenhado apenas para receber sinais sonoros como transmissor, este vai acabar por se danificar.

Um hidrofone, tal como um microfone, é constituído por um sensor piezoelétrico que tem a capacidade de gerar corrente elétrica quando existe uma variação de pressão aplicada ao mesmo. Quando o sensor está na presença de ondas sonoras, estas fazem comprimir e descomprimir o sensor, gerando uma corrente elétrica. A sensibilidade de um hidrofone é uma característica importante na escolha do hidrofone. Esta representa a razão da tensão de saída do hydrophone face à pressão acústica da água, sendo tipicamente representada em decibel. Sendo que normalmente os fabricantes fornecem o valor linear da tensão da sensibilidade em $1V/\mu Pa$.

O nível de sensibilidade deve ser escolhido consoante os tipos de sinais que se pretende capturar, por exemplo, caso se pretenda efetuar a captura de sinais sonoros de baixa amplitude é necessário que o hidrofone tenha uma sensibilidade elevada para ser possível efetuar a captura dos sinais. Por outro lado, se os sinais sonoros a capturar são de elevada amplitude, é boa prática escolher um hidrofone com sensibilidade mais baixa, evitando desta forma a saturação do sistema.

O nível de intensidade do sinal à saída do hidrofone vai depender se este é activo ou passivo. Um hidrofone passivo necessita sempre de um sistema adicional de acondicionamento de sinal, para amplificar o sinal elétrico para um nível que seja adequado ao sistema de gravação. No caso de um hidrofone activo, este tem incorporado um pré-amplificador, que por sua vez necessita de ser alimentado. Alguns sistemas de gravação

⁷<http://www.teledyne-reson.com>, acedido em 21/08/2016.

já suportam hidrofones ativos, não sendo desta forma necessário equipamento extra.

A gama de frequências que um hidrofone consegue capturar é também um fator importante na seleção do mesmo, que mais uma vez vai depender dos requisitos do sistema.

A profundidade a que o hidrofone vai operar também é um requisito a ter em conta, sendo este um fator com bastante influência no custo do mesmo.

3.4 Processamento de sinal digital

O processamento de sinal digital é processo de manipulação de sinais, normalmente com o intuito de medir, filtrar ou comprimir sinais analógicos contínuos. É caracterizado pela utilização de sinais digitais para representar estes sinais no domínio do tempo ou das frequências na forma de sequência de números para permitir o processamento digital de sinais analógicos.

3.4.1 Amostragem

Amostragem é o processo de converter um sinal analógico contínuo num formato digital e discreto. Um sinal em formato digital é representado por uma sequência de números, espaçados de um período de tempo normalmente constante, onde cada medida contém o valor do sinal analógico no instante da captura. Para efetuar este processo é utilizado um conversor analógico digital, ADC (*Analog to Digital Converter*).

O período de tempo entre cada amostra é tipicamente constante definindo (pela sua inversa) o que é usualmente conhecida como frequência de amostragem. A frequência de amostragem é definida com base na natureza do sinal a medir e no tipo de sistema que está a ser desenvolvido. Esta frequência de amostragem tem um valor mínimo, nomeado de *Nyquist rate* (não confundir com *Nyquist Frequency*), que é o dobro da frequência máxima que se pretende capturar. No caso da medição de um sinal $s(t)$ que comporta frequências entre 20Hz a 20kHz, a frequência de amostragem, F_s , tem de ser $F_s > 2 * 20kHz$. A outra notação, *Nyquist Frequency*, é igual a $F_n = F_s/2$, que diz que

todas as frequências de $s(t)$ superiores a F_n vão ser *aliased* para um frequência entre 0 e F_n . O que é o mesmo que acontece caso F_s não seja maior que o dobro da frequência em $s(t)$.

3.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram expostos aspectos teóricos, aspectos estes necessários para uma melhor compreensão da problemática que aborda esta dissertação. Esta informação é importante para uma melhor compreensão de como se deve abordar o processamento de sinais acústicos em água.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 4

Abordagem conceptual

Nos capítulos anteriores foi efetuada a análise das várias tecnologias existentes para o processamento de sinal. Para proceder à resolução do problema do âmbito desta dissertação é necessário proceder à selecção do *hardware* mais adequado e desenvolver um algoritmo capaz de interpretar os sinais capturados, retornando pontos de interesse, *features*.

Dos cenários possíveis de aplicação abordados anteriormente, esta dissertação incide na deteção de *features* relacionadas com detecção de embarcações.

4.1 Arquitetura funcional do sistema de captura de som

Neste sub-capítulo é apresentada a arquitetura do sistema, incluindo *hardware* e *software*. Na Figura 4.1, é possível observar a componente de *software* e na Figura 4.2, é possível observar a componente de *software*.

Ambas as componentes funcionam independentemente uma da outra, quer isto dizer que o processamento dos ficheiros é efetuado posteriormente, no entanto o sistema poderá ser adaptado para funcionar em tempo real. Os ficheiros gerados pelo gravador são guardados num cartão de memória, sendo posteriormente possível extrair os ficheiros removendo o cartão ou ligando ao computador por USB.

Como já referido o processamento é efetuado numa segunda fase e consiste em selecionar a informação desejada de um ficheiro, aplicar a transformada de *Fourier*, detetar as frequências que tem mais energia e guardar as coordenadas destes picos. Estas coordenadas são os pontos de interesse, *features*, que deverão ser utilizadas por algoritmos de deteção. Estes algoritmos recorrem normalmente a redes neuronais para ser possível a classificação e identificação de embarcações. A análise destes algoritmos não se enquadra no âmbito desta dissertação, [?], [1], [?].

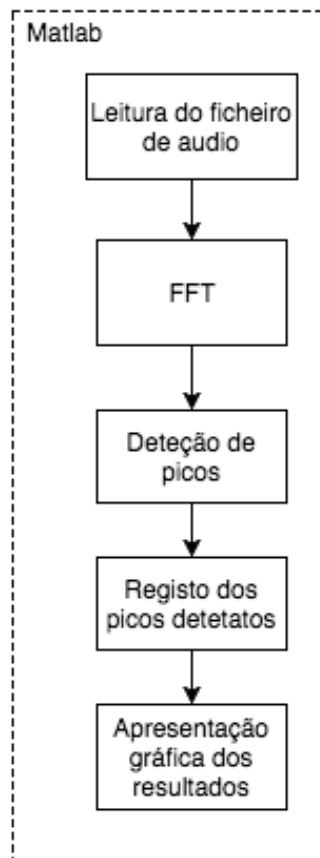
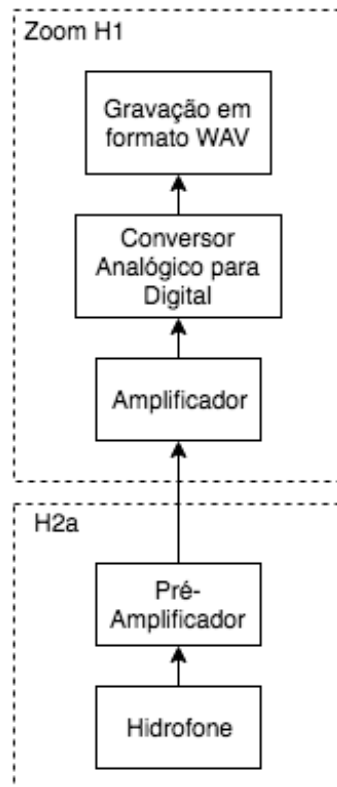


Figura 4.1: Arquitetura do *Software*.

4.2 *Hardware* para a captura de som

Uma vez que o sistema de interpretação dos sinais sonoros é efetuado em formato

Figura 4.2: Arquitetura do *Hardware*.

digital, é necessário proceder à conversão das ondas sonoras para um formato digital, podendo assim ser interpretado por um computador. Esta conversão deve ser analisada em duas fases distintas, uma onde é efetuada a conversão de uma onda mecânica, (onda sonora), para um sinal elétrico e outra onde é efetuada a digitalização de um sinal elétrico.

4.2.1 Sistema de aquisição de ondas sonoras

Para efetuar a conversão de ondas sonoras em água para uma grandeza elétrica é necessário utilizar um hidrofone. No laboratório onde foi efetuada esta dissertação encontrava-se disponível um hidrofone, Figura 4.3. Este hidrofone requer que seja complementado de um pré-amplificador, Figura 4.5, antes do sinal ser injetado no sistema de digitalização. É possível também adquirir um hidrofone com pré-amplificador embutido.



Figura 4.3: Hidrofone TC4013.



Figura 4.4: Hidrofone H2a.



Figura 4.5: Pré-amplificador EC6061.

Na Tabela 4.1 é possível observar a diferenças entre os hidrofones utilizados no âmbito desta dissertação. Como é possível observar existe diferenças nas características dos hi-

	TC4013 ¹⁰	H2a ¹¹
Gama de Frequências	1Hz a 170KHz	20Hz a 100KHz
Sensibilidade	-211dB ± 3dB re : 1V/μPa	-180dB ± 4dB re : 1V/μPa
Profundidade	700m	80m
Pré-amplificador	Não	Sim
Preço	1050€ ¹²	187.5€
Conector	BNC	Jack 3.5mm

Tabela 4.1: Características dos Hidrofonos.

drofonos que tem um impacto substancial do custo do equipamento. Uma vez que o hidrofone TC4013 já se encontrava disponível no laboratório foi efetuado um pedido de orçamento para o pré-amplificador EC6061 diretamente ao fabricante e este teria um custo de 1563€. Devido ao custo do pré-amplificador, optou-se por uma solução mais econômica e adquiriu-se o hidrofone H2a em conjunto com um equipamento para efetuar a digitalização do sinal que iremos falar mais à frente por um total de 302.9€.

4.2.2 Sistema de de digitalização de sinais elétricos

O sistema de digitalização é responsável por efetuar a conversão do sinal elétrico proveniente do hidrofone para um formato digital. Numa primeira abordagem foi definida a análise de dados tendo em atenção à deteção de *features* nas frequências audíveis. O sistema adoptado no âmbito desta dissertação foi o gravador compacto ZOOM H1, Figura 4.6. Este gravador foi escolhido em conjunto com o hidrofone H2a, uma vez que tem disponível um entrada de audio jack 3.5mm com capacidade de fornecer alimentação.

O gravador Zoom H1 tem também a capacidade de condicionar o sinal de entrada, podendo aplicar um filtro passa baixo e ainda amplificar o sinal. O ganho de entrada é configurável entre 0 e -39dB. Quanto ao filtro passa baixo, não foi possível encontrar informação detalhada como por exemplo a frequência de corte (possivelmente consegue-se saber efetuando um pedido ao fabricante).

Este gravador pode ser utilizado de duas formas, gravando os ficheiros para um cartão de memória ou utilizar em conjunto com um computador através de uma porta USB,

¹⁰<http://www.teledyne-reson.com/product/tc-4013/>, acedido em 22/10/2016.

¹¹<https://goo.gl/iUrbFd>, acedido em 22/10/2016.

¹²<http://www.avisoft.com/pricelist.htm>, acedido em 22/10/2016.

	Zoom H1
Canais	2
Formato de gravação	WAV e MP3
Resolução WAV	44.1 / 48 / 96kHz, 16- / 24-bit
Resolução MP3	44.1kHz 48/56/64/80/96/112/128/160/192/224/256/320kbps
Gravação por USB	44.1 /48 kHz/ 16-bit

Tabela 4.2: Características do Gravador Zoom H1.

passando a ser visível no computador como um dispositivo de entrada de audio. Existem algumas limitações respetivamente ao controlo e frequência de amostragem disponível para cada cenário, Tabela 4.2.



Figura 4.6: Gravador ZOOM H1.

4.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os requisitos a nível da arquitectura do sistema, especificando a estrutura do *software* e determinar o equipamento necessário a utilizar.

Capítulo 5

Implementação

No capítulo anterior foi desenvolvido o procedimento conceptual do sistema, neste capítulo será efetuada a implementação desse procedimento. A implementação foi separada em duas partes distintas, em primeiro lugar foi efetuada a gravação do som emitido pelos barcos e em segundo foi desenvolvido um algoritmo para efetuar o processamento dos ficheiros de som.

5.1 Processo de gravação do som

Neste tipo de projeto é pretendido que o sistema funcione num ambiente real, onde existam mesmo gravações de barcos reais e não simulações. Uma vez que o laboratório onde esta dissertação foi desenvolvida é localizado no Porto, Portugal, foi escolhido o Rio Douro como local para efetuar as gravações de dados experimentais. Existem vários tipos de embarcações que passam neste rio diariamente, sendo que a maioria são embarcações turísticas.

Uma vez escolhido o rio, foi necessário decidir um local onde fosse possível evitar ao máximo que os barcos se cruzassem e de ter fácil acesso através da margem do rio, Figura 5.1.

A colocação do hidrofone foi efetuada a cerca de 1m da margem e entre 20cm a 1m de profundidade, senda que a variação da profundidade é relativa ao aumento do nível da água uma vez que nos encontramos perto da foz do rio. A instalação do hidrofone

a 1m da margem fez com que fosse possível gravar também o som da rebentação das ondas geradas pela passagem dos barcos.

Como visto anteriormente, o hidrofone é encontra-se desenhado para captar frequências entre os 20Hz e os 100kHz, mas o gravador foi projetado para frequências audíveis pelo ser humano, o que restringe entre os 20Hz e 20kHz. Segundo o teorema de *Nyquist* para ser possível captar frequência de 20kHz é necessário que a frequência de amostragem seja duas vezes maior, 40kHz. Para efetuar a escolha da frequência de amostragem foi feita uma gravação à frequência máxima, 96kHz, e efetuando a análise no domínio das frequências conclui-se que na presença de uma embarcação só existia picos de energia até aproximadamente 5kHz. Foi então decidido utilizar a frequência de amostragem de 48kHz, permitindo assim obter ficheiros de audio mais pequenos e por sua vez diminuir o tempo de processamento.

Durante o processo de gravação, foi também efetuado o registo da passagem das embarcações com fotografias, sendo posteriormente necessário relacionar a que embarcação pertence o som gravado.

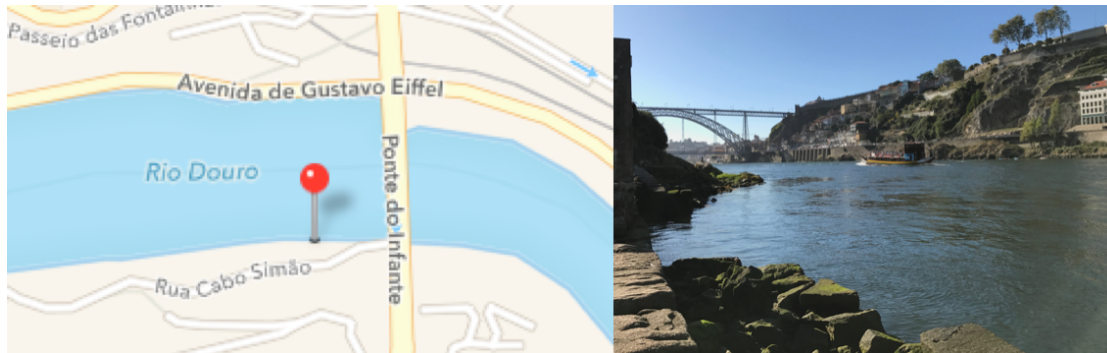


Figura 5.1: Local escolhido para gravação dos ficheiros.

5.2 Processo de extração de *features*



Figura 5.2: Localização do gravador.

5.2.1 espetrograma

O processo de extração de *features* foi desenvolvido em *MATLAB*, utilizando a *toolbox voicebox*¹³. Esta *toolbox* é utilizada para processamento de voz, providenciando várias ferramentas que podem ser utilizadas para efetuar o processamento dos sons emitidos pelos barcos.

Esta *toolbox* recorre à função *FFT* do *MATLAB* que já se encontra otimizada para transformar um sinal no domínio dos tempos para o domínio das frequências. Na Figura 5.3, está ilustrado o processo de criação de um espetrograma recorrendo à *toolbox*. Na utilização desta *toolbox* é necessário ter em atenção à duração do ficheiro de áudio que está a ser analisado, uma vez que esta irá efetuar a leitura do ficheiro por completo para memória e depois efetuar todos os cálculos, é necessário garantir que o computador tem memória RAM suficiente. Para solucionar esta problema, o algoritmo escrito em *Matlab* exige que seja parametrização o ficheiro que se pretende analisar, bem como o instante temporal da amostra inicial e o instante de tempo da amostra final. Desta forma apenas será analisado uma pequena parte do ficheiro, sendo necessário analisar previamente qual o instante de tempo referente ao barco que se pretende analisar.

Como segunda fase, é invocada a *toolbox*, a qual necessita de ser parametrizada. Os parâmetros vão indicar qual a janela temporal que se deseja aplicar ao sinal, de forma

¹³<http://www.ee.ic.ac.uk/hp/staff/dmb/voicebox/voicebox.html>

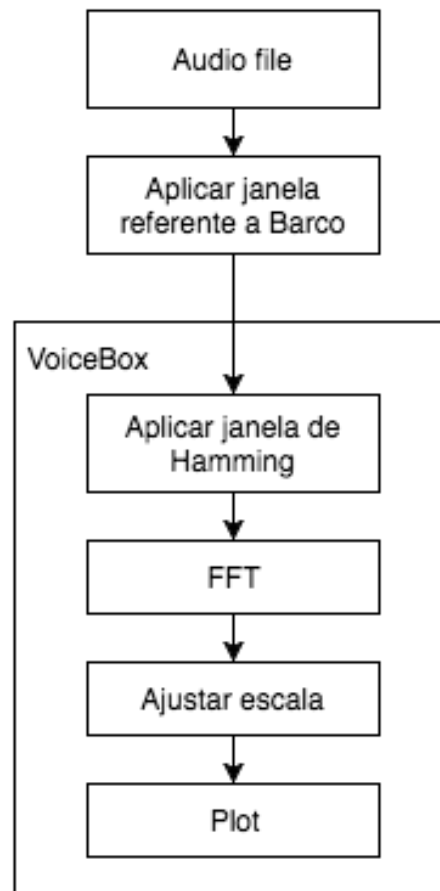
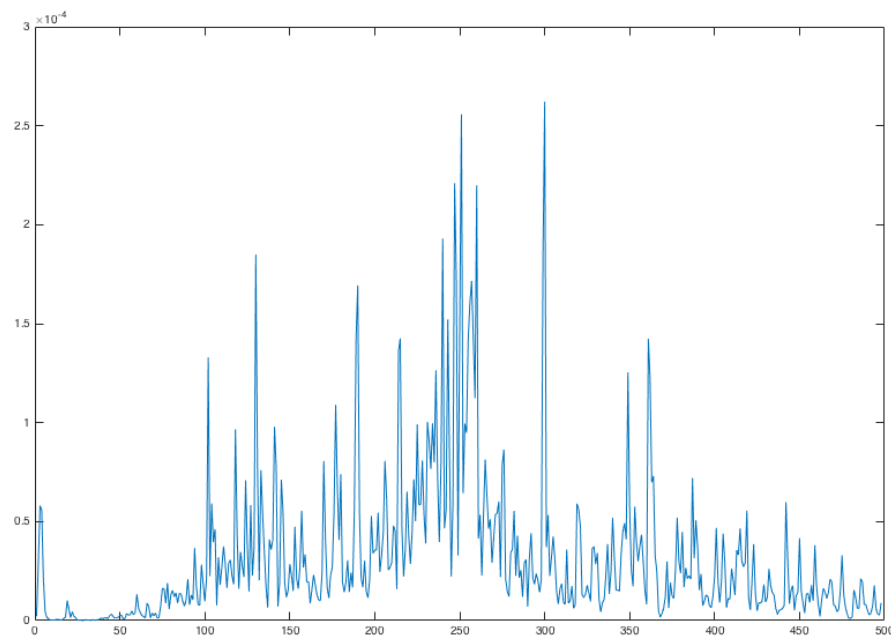
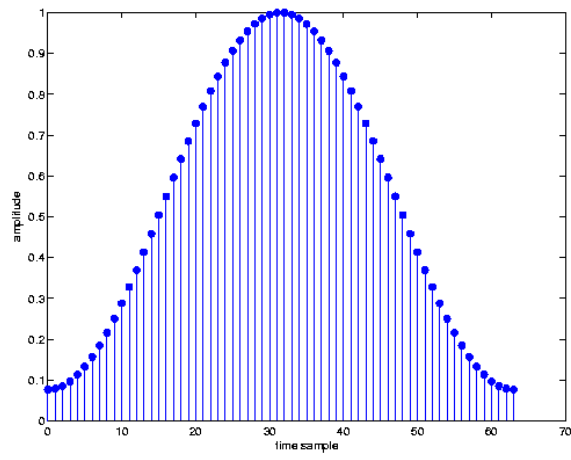
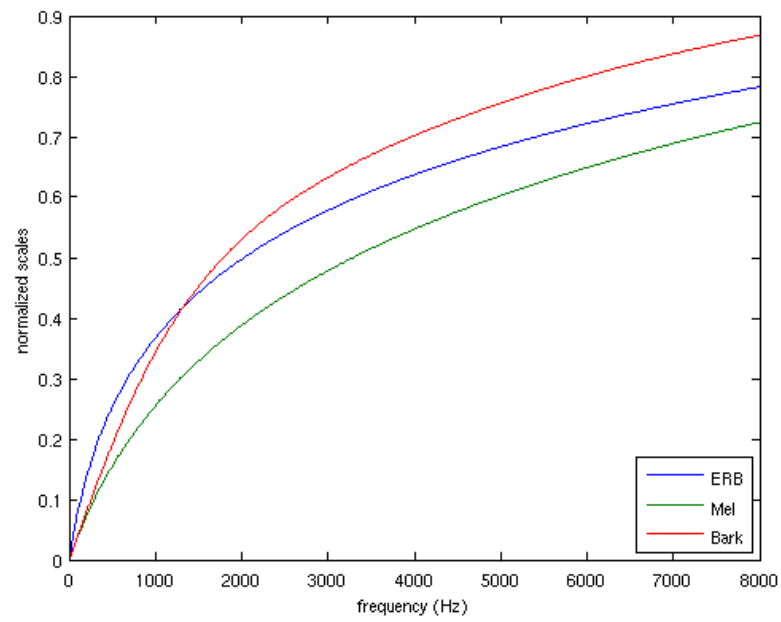


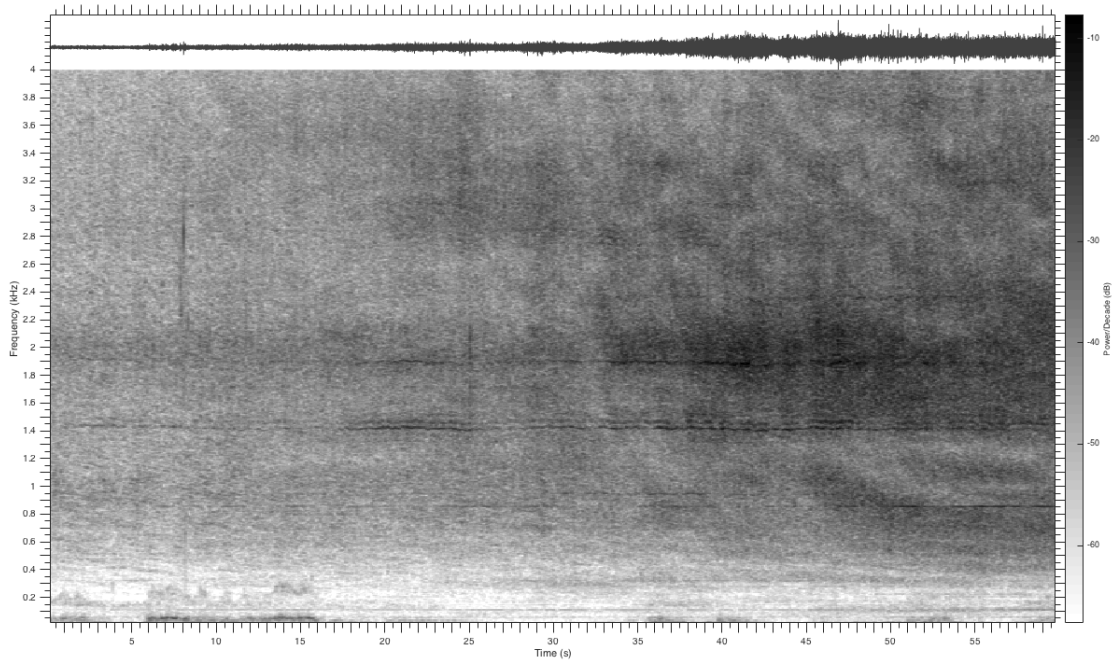
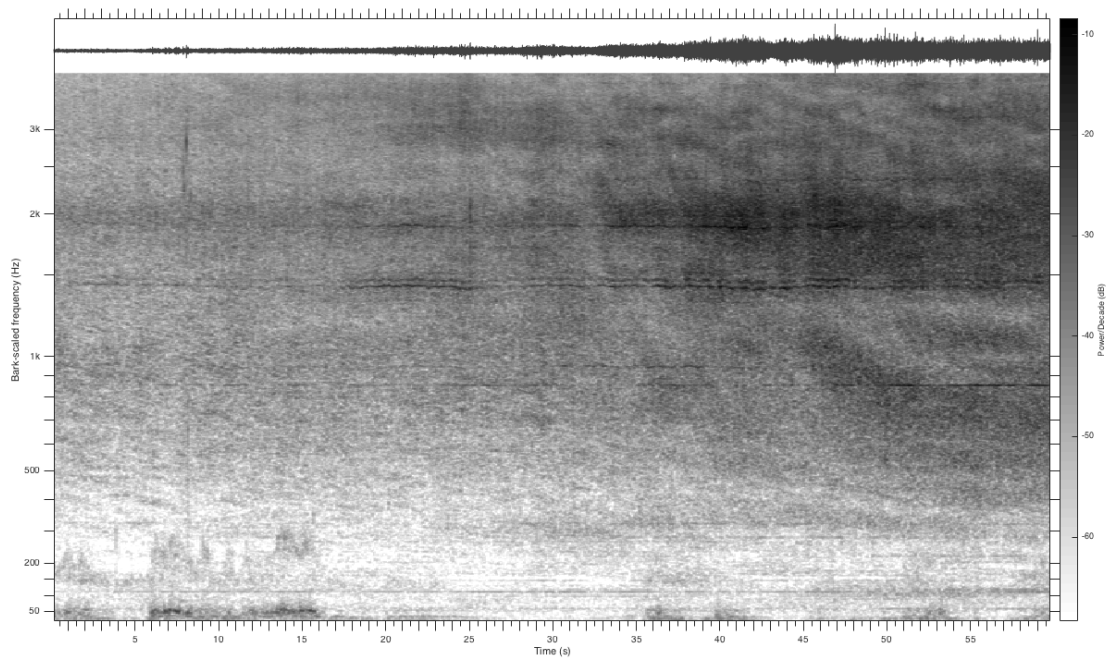
Figura 5.3: Criação do espectrograma.

a gerar *frames*, às quais será aplicada a função *FFT* de forma a obter o espectro de frequências para cada *frame*. O tamanho das *frames* está relacionado com a resolução que se pretende no eixo das frequências, resolução esta que também é definida na parametrização da *toolbox*. A necessidade da criação de *frames*, como visto anteriormente, é devido à capacidade a função *FFT* só conseguir analisar sinais invariantes no tempo. Como é sabido, o sinal de som é variante no tempo, ou seja, as frequências contidas num instante de tempo podem variar no instante de tempo seguinte. É nesta fase que surge a necessidade de introduzir o criação de *frames*, que consiste aplicar a função *FFT* para um determinada intervalo de tempo para o qual é considerado que o sinal é invariável. O resultado da operação *FFT* é um vector constituído pelo espectro de frequências de cada *frame*, sendo possível observar o exemplo de uma *frame* na Figura 5.4.

Figura 5.4: Espectro de frequências de uma *frame*.

A criação das *frames* consiste na aplicação de uma janela de *hamming* com uma determinada largura de banda e um determinado numero de sobreposição de amostras. A aplicação de uma janela de *hamming*, Figura 5.5, para delimitar o sinal original visa a minimizar a perda de informação espectral do sinal original, que é o que acontece caso se aplique uma janela quadrada a um sinal. A *toolbox* permite também parametrizar qual o tipo de escala em que se pretende efetuar a representação dos resultados, existindo a opção de escolher entre uma escala linear, ou *Erb*, ou *Mel*, ou *Bark*, Figura 5.6. Aplicando uma escala não linear, como por exemplo a *Bark* é possível obter mais resolução no eixo das frequências à medida que a frequência diminui. É possível observar a diferença de um espectrograma representado na escala linear, Figura 5.7, e na escala de *Bark*, Figura 5.8.

Figura 5.5: Exemplo de janela de *Hamming*.Figura 5.6: Escalas *Erb*, *Mel* e *Bark*.

Figura 5.7: Escala *Linear*.Figura 5.8: Escala *Bark*.

5.2.2 Detecção de picos

Analisando um espectrograma, Figura 5.7 ou 5.8, é possível observar que existem linhas horizontais ao longo do tempo. Isto significa que o nível de energia se mantém em certas frequências a quando da passagem do barco. Significando que este conjunto de frequências pode ser utilizado para identificar um barco caso estes variem de barco para barco.

Para ser possível determinar as linhas horizontais, é necessário implementar efetuar uma detecção de picos, para cada *frame*. Na Figura 5.9 é possível observar um exemplo do detector de picos implementado. Este foi configurado para apenas considerar um pico caso a energia deste fosse no máximo 70% menor que o valor de energia do pico máximo de cada *frame*.

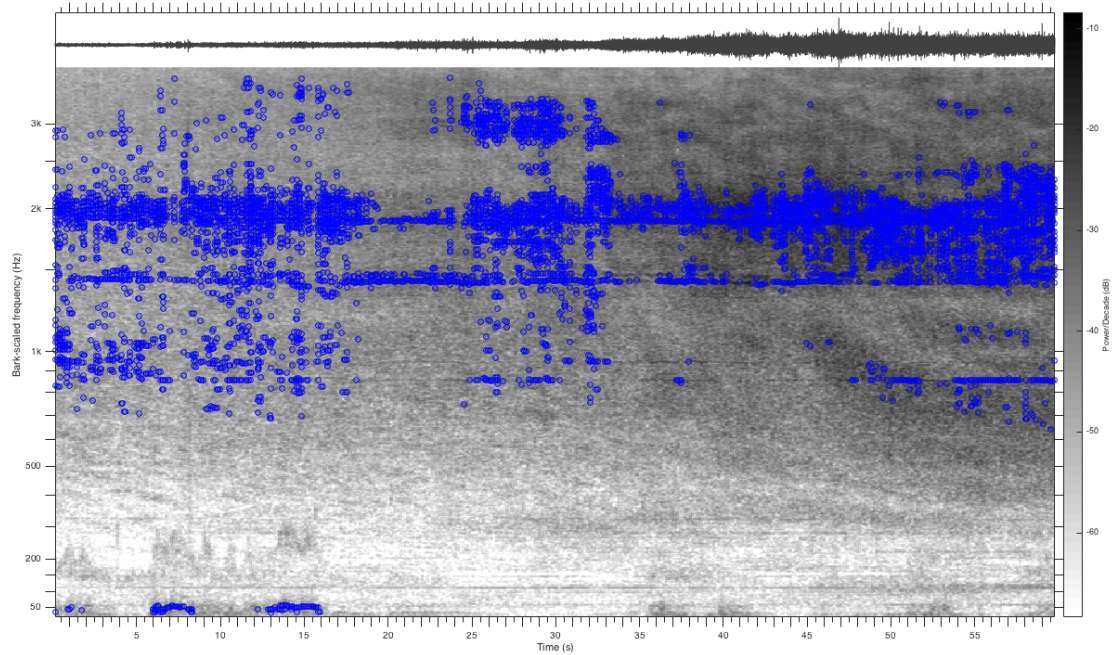


Figura 5.9: Detecção de Picos.

5.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi abordada a gravação dos sinais sonoros emitidos pelos barcos e

ainda o processo utilizado para efetuar o processamento dos sinais gravados. No próximo capítulo será possível visualizar os resultados obtidos com o processamento ilustrado.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 6

Resultados

Este capítulo tem como objetivo ilustrar e comentar os resultados obtidos após o processamento das gravações. Para suporte dos resultados, foi utilizada a ferramenta *Audacity*¹⁴, que é capaz de efetuar a representação de um espectrograma com o mesmo nível de qualidade do algoritmo implementado no âmbito desta dissertação. O *Audacity* foi apenas utilizado para ser possível gerar a análise de uma gravação por completo, uma vez que o algoritmo implementado em *Matlab* não foi otimizado para poder processar arquivos com mais de 3 min. O limite de 3 min está relacionado com os 8GB de memória RAM disponíveis no computador que foi utilizado para efetuar o processamento.

6.1 Identificação das gravações

Como enunciado anteriormente, após efetuar as gravações, é necessário identificar qual o barco que foi gravado em cada momento com recurso a fotografias.

A gravação teve uma duração aproximada de 1h30, o que possibilitou a gravação da mesma embarcação várias vezes. Algumas das embarcações que foram gravadas mais do que uma vez, em algumas situações encontravam-se muito próximas de outras embarcações. Na Tabela 6.1 é possível visualizar a duração e os barcos presentes em cada gravação.

Nas Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, é possível observar o resultado do processo de

¹⁴<http://www.audacityteam.org/>.

Log	Duração (min:s)	Barcos gravados
1	1:21	B1
3	6:09	B2, B3, B4, B5
4	5:01	B1, B4
7	16:45	B3, B7, B8, B9, B10, B11, B12
8	5:24	B11, B12
9	22:51	B1, B2, B3, B4, B5, B13, B14

Tabela 6.1: Duração e Barcos presentes em cada Gravação.

identificação de cada barco na respetiva gravação. Nas figuras é possível observar que alguns barcos são muito semelhantes, mudando apenas a cor em alguns casos, o que leva a concluir que é possível que tenham uma assinatura acústica muito semelhante caso o motor e ou hélice sejam iguais também.

LOG 1



Figura 6.1: Barcos gravados no Log 1.

Analisando as Figuras 6.2 e 6.3 é possível observar que tipicamente a amplitude sonora de cada embarcação aumentada gradualmente até um máximo e começa a diminuir até atingir uma amplitude quase nula, nunca chegando a ser nula porque está sempre presente ruído.

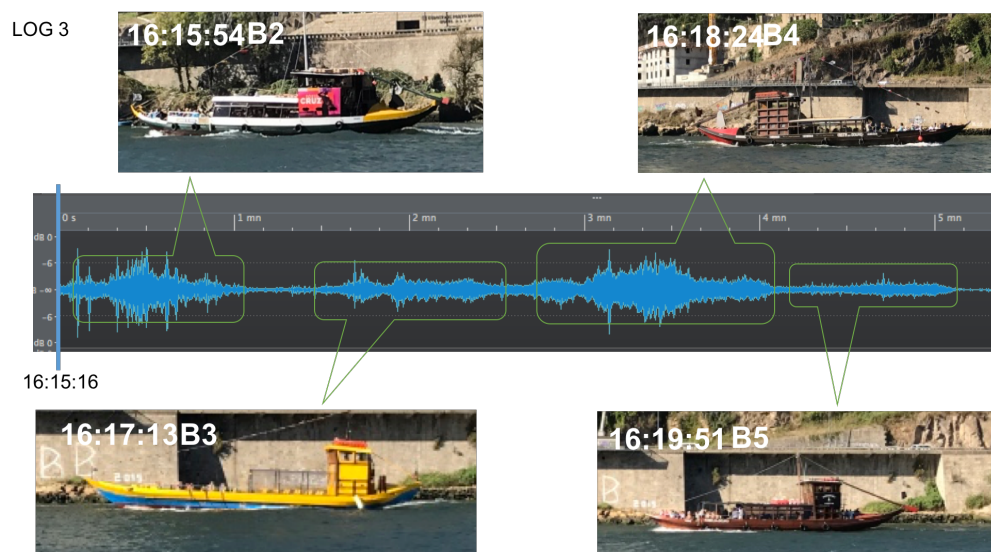


Figura 6.2: Barcos gravados no Log 3.

No caso particular do barco 1 (B1) na Figura 6.3 é possível observar que a amplitude sonora decaí abruptamente. Efetuando a reprodução do ficheiro de audio foi possível observar que neste instante a rotação do motor foi reduzida, praticamente deixando o barco a descer o rio sem qualquer tipo de propulsão.

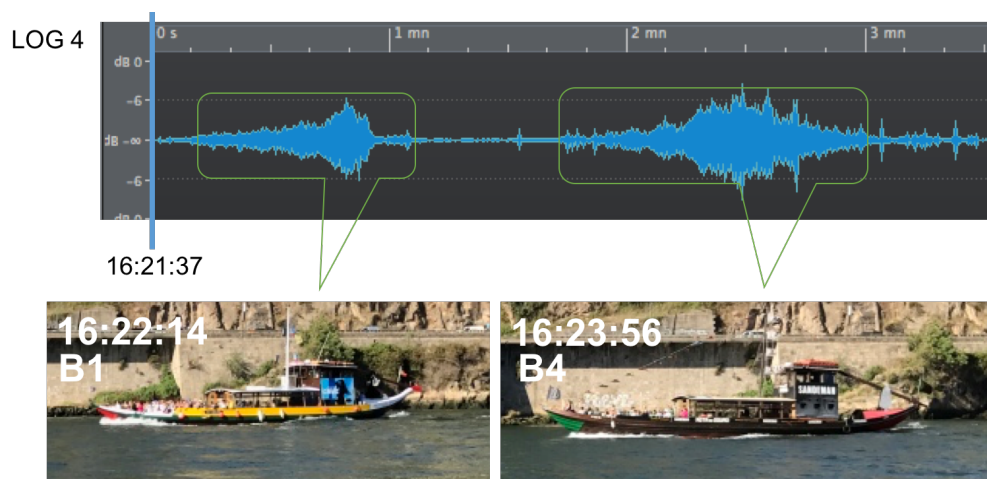


Figura 6.3: Barcos gravados no Log 4.

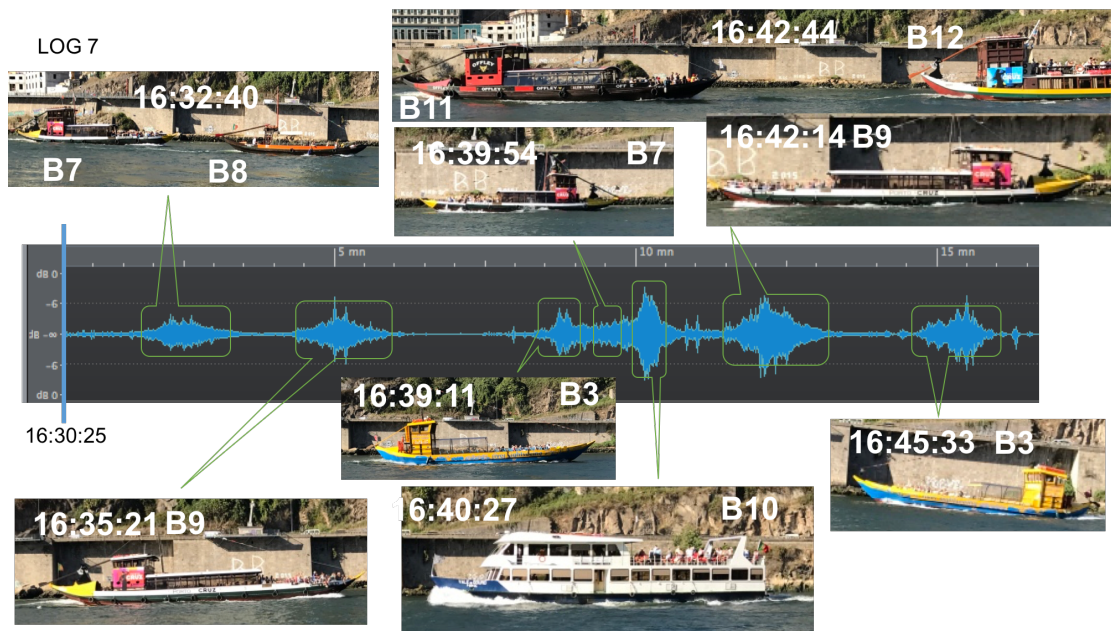


Figura 6.4: Barcos gravados no Log 7.

Observando a Figura 6.4, é possível observar que o barco 10 (B10) se destaca em relação aos outros e este deslocava-se a uma velocidade mais elevada em comparação com as outras embarcações. Também é possível observar este fato analisando a amplitude sonora no gráfico, onde esta é muito mais compacta no tempo.

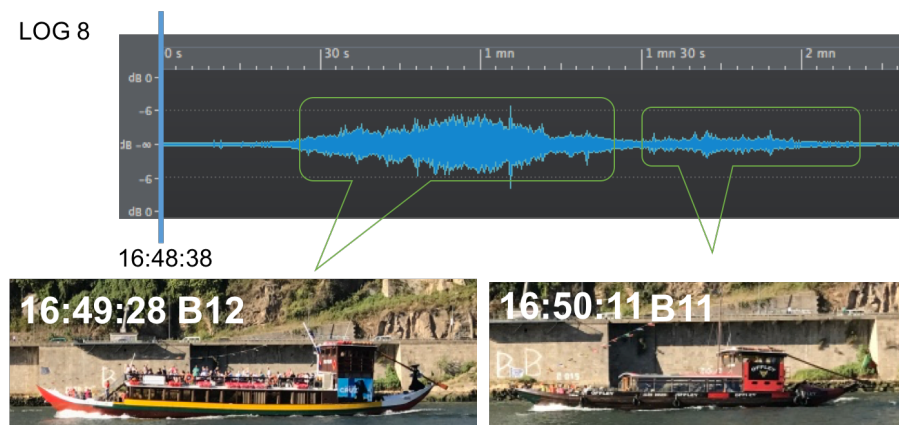


Figura 6.5: Barcos gravados no Log 8.



Figura 6.6: Barcos gravados no Log 9.

6.2 Análise utilizando o Audacity

Como referido anteriormente, a ferramenta *Audacity* foi utilizada, permitindo esta a geração de um espectrograma de uma gravação completa.

Nas Figuras 6.7, 6.8, 6.12, 6.9, 6.10, 6.11 e 6.13 é possível observar o espectrograma gerado pelo *Audacity* de cada gravação. Todos os espectrogramas encontram-se representados utilizando a escala de *Bark* nas frequências.

Para se determinar a escala em que cada espectrograma deveria ser representado, este foi sempre gerado e representado na escala máxima de 20Hz a 24kHz. A frequência mínima de 20Hz foi determinada com base nas características do hidrofone, que apresentam uma frequência mínima de 20Hz. A frequência de 24kHz representa a frequência de *Nyquist*, uma vez que as gravações foram efetuadas com uma frequência de amostragem de 48kHz.

A escala de visualização no eixo das frequências nem sempre é a mesma, esta foi adap-

tada consoante o barco que se estava a analisar. Este ajuste de escala é efetuado nas parametrizações do *Audacity*. A frequência máxima de visualização é de 2kHz nas Figuras 6.9 e 6.10, de 1kHz nas Figuras 6.8, 6.12 e 6.13 e de 500Hz para a Figura 6.7 e 6.11.

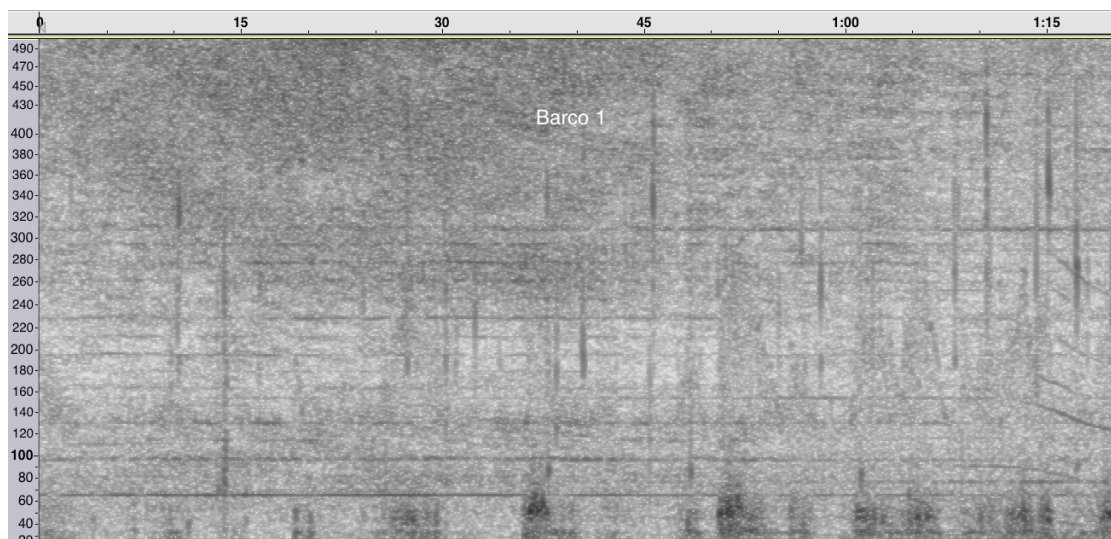


Figura 6.7: Análise Log 1.

Na Figura 6.8 é possível efetuar a comparação do ruído gerado por quatro barcos, onde é possível observar que ambos geram frequências diferentes. Analisando as linhas geradas pelo barco 2 e barco 4, estas parecem muito semelhantes, sendo possível observar várias linhas ao longo do eixo das frequências e com um espaçamento entre elas muito idêntico, no entanto existe um desvio, aparentemente constante entre as linhas dos dois barcos. Analisando a Figura 6.2, é possível observar que o barco 2 e 4 são muito parecidos, sendo possível colocar em consideração que o motor e hélice dos dois barcos podem ser idênticos. Assumindo que estes barcos tem uma assinatura acústica praticamente idêntica, a diferença das frequências de cada linha como se pode observar na Figura 6.8, pode estar relacionada com a velocidade de rotação da hélice ou do motor. Na 6.2, é possível observar que o barco 2 (B2) se encontra a descer o rio e o barco 4 (B4) a subir o rio, e durante a reprodução das várias gravações foi possível observar que quando uma embarcação se encontrava a descer o rio, esta não tinha uma intensidade sonora tão acentuada como a de uma embarcação que se encontrava a subir o rio. Isto deve-se ao facto de a embarcação necessitar de mais força de propulsão quando se encontra a deslocar em

sentido oposto ao da corrente da água, podendo desta forma assumir que à medida que a rotação do motor ou hélice aumenta, a frequência do ruído acústico gerado também aumenta. Com esta observação é possível concluir que para identificar uma embarcação é necessário complementar à análise das linhas geradas nas várias frequências à análise do padrão gerado pelas mesmas.

Ainda na Figura 6.8 é possível efetuar mais uma observação, na passagem do barco 3, é possível observar que as linhas referentes ao barco 4 também já se encontravam visíveis, querendo isto dizer que o barco 3 não gera qualquer ruído acústico na gama de frequências abaixo dos 500Hz com energia suficiente para prevalecer o ruído gerado pelo barco 4. Podendo concluir que caso seja pretendido obter a assinatura completa de uma embarcação é necessário que esta esteja num local isolado de interferências externas. No entanto, cenários como este são bem mais prováveis de acontecer e para ser possível efetuar a identificação de uma embarcação só recorrendo à assinatura acústica é necessário que exista uma fase de treino do algoritmo ou pessoa que vai estar a efetuar a análise dos resultados para ser capaz de identificar situações como esta.

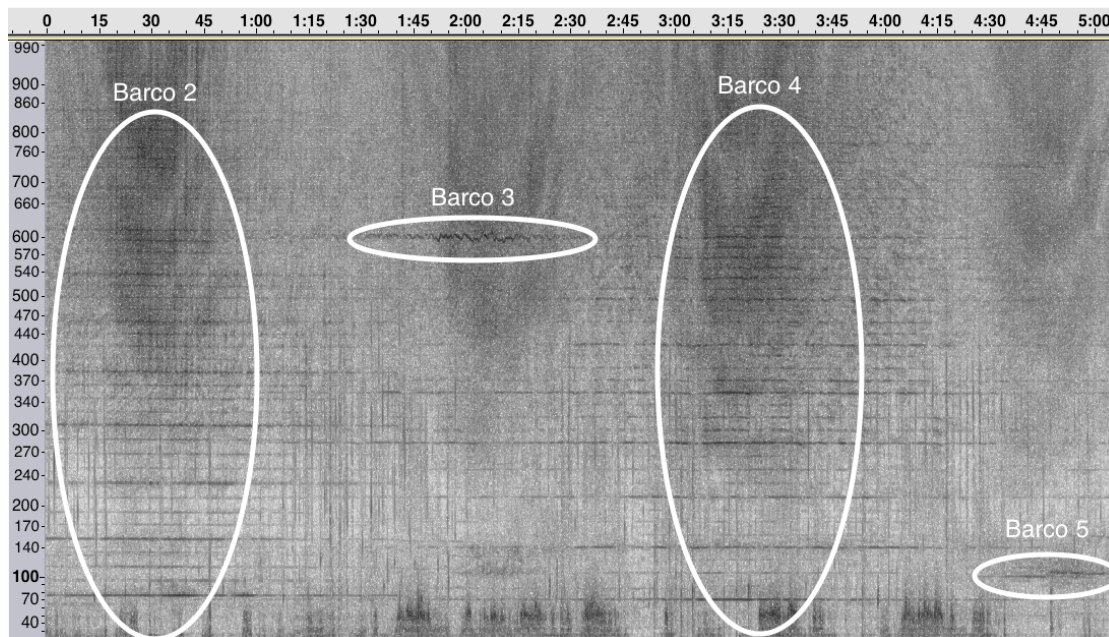


Figura 6.8: Análise Log 3.

Na Figura 6.9 encontra-se assinalado o barco 8 e barco 7, observando a Figura 6.4,

estes estavam praticamente juntos no instante de tempo em que foram gravados. Analisando as duas linhas horizontais, é possível observar que existe um desfasamento para o instante de tempo onde cada linha apresenta um valor máximo de energia. Sugerindo que estas duas linhas se tratam de dois barcos diferentes e não do mesmo barco. Como foi observado anteriormente o barco 8 encontrava-se ligeiramente mais adiantado face ao barco 7 no momento da gravação, concluiu-se então que a linha horizontal com frequência mais elevada é gerada pelo barco 8. Para complementar esta conclusão, é ainda possível observar na Figura 6.9, que um pouco mais à frente o barco 7 é gravado novamente e com recurso à linha vermelha é possível observar que as linhas horizontais nas duas passagens do barco 7 são muito idênticas no eixo das frequências. O que leva a concluir que é possível que esta seja a assinatura acústica gerada pelo barco 7.

Anteriormente observou-se que o barco 10, na Figura 6.4, tinha uma velocidade mais elevada em comparação com os outros barcos. Com uma velocidade mais elevada o nível de ruído acústico aumenta, sendo possível observar este facto na Figura 6.9, onde este se sobrepõe ao ruído acústico que estava a ser gerado pelo barco 7.

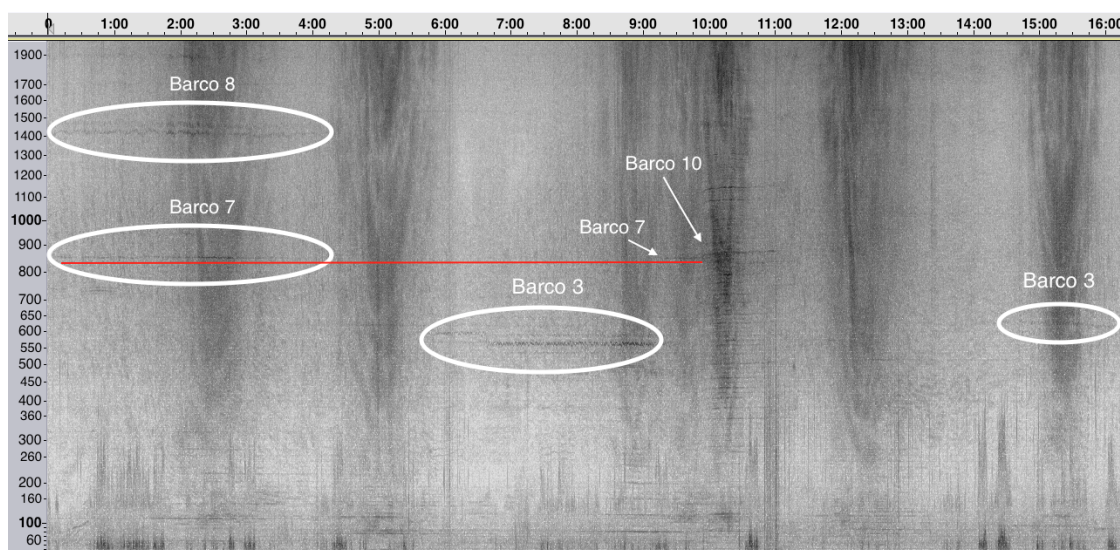


Figura 6.9: Análise Log 7.

Na Figura 6.10 encontram-se assinalados os instantes de tempo em que o barco 12 e o barco 11 foram gravados. Para o barco 11 é possível observar as linhas horizontais mas para o caso do barco 11 não é possível observar qualquer linha. De forma a detetar as

linhas horizontais foi necessário ajustar a escala das frequências, diminuindo a frequência máxima de 2kHz para 500Hz, Figura 6.11. Nesta figura já é possível observar as linhas horizontais, levando a concluir que alguns barcos geram ruído acústico com uma gama de frequências bastante distinta, permitindo uma melhor identificação dos barcos.

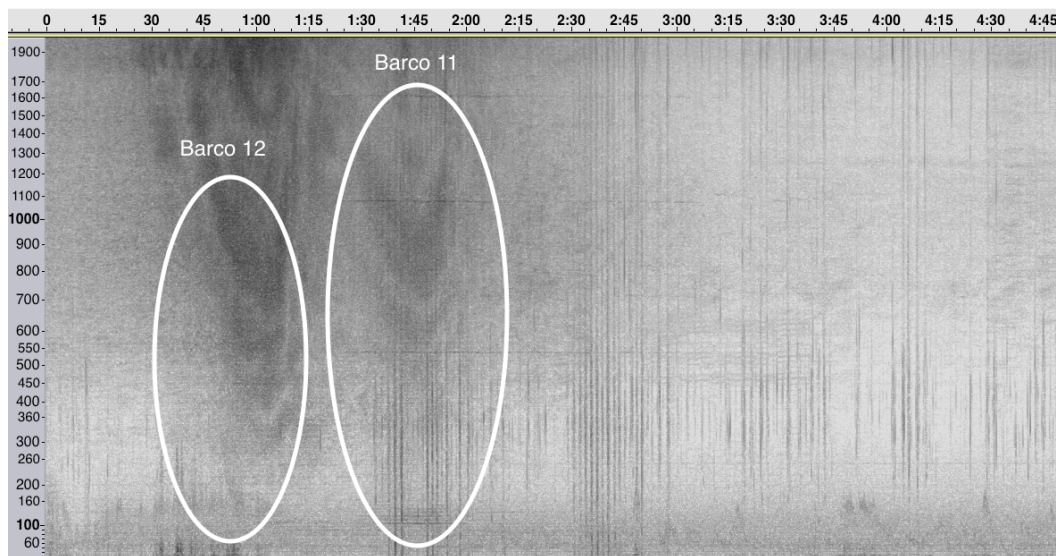


Figura 6.10: Análise Log 8.

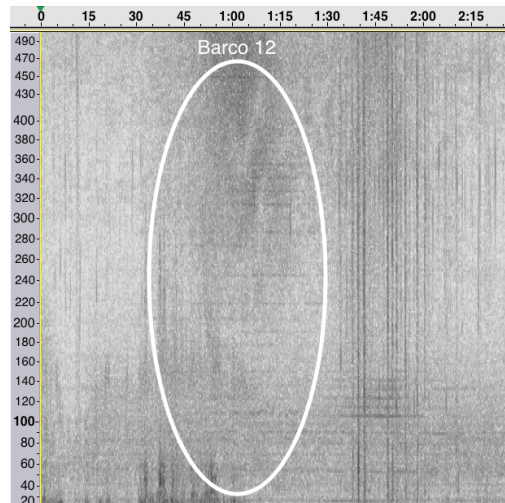


Figura 6.11: Análise Log 8 com escala ajustada para barco 12.

Utilizando a Figura 6.12 como exemplo, é possível observar que existem linhas horizontais e verticais. Cada linha horizontal representa que uma determinada frequência tem constantemente ao longo do tempo um valor de energia mais elevado em comparação com as frequências vizinhas. Concluindo que estas linhas representam o ruído sonoro que cada embarcação está a emitir. As linhas verticais correspondem a uma intensidade sonora em múltiplas frequências num instante do tempo. Na Figura 6.12 e 6.13 é possível observar com facilidade as linhas verticais, estas foram geradas por efeitos de ondulação e também por objectos que embateram no hidrofone.

Estes efeitos são bastante acentuadas devido ao local escolhido para colocar o hidrofone, onde este se encontra a cerca de 1m de distância da parede da margem e a parede era constituída de rochas. Entre as rochas que constituem a parede existem fendas que permitem a passagem de água e também de vento, o vento ao passar nestas fendas gera efeitos sonoros que são detetáveis pelo hidrofone.

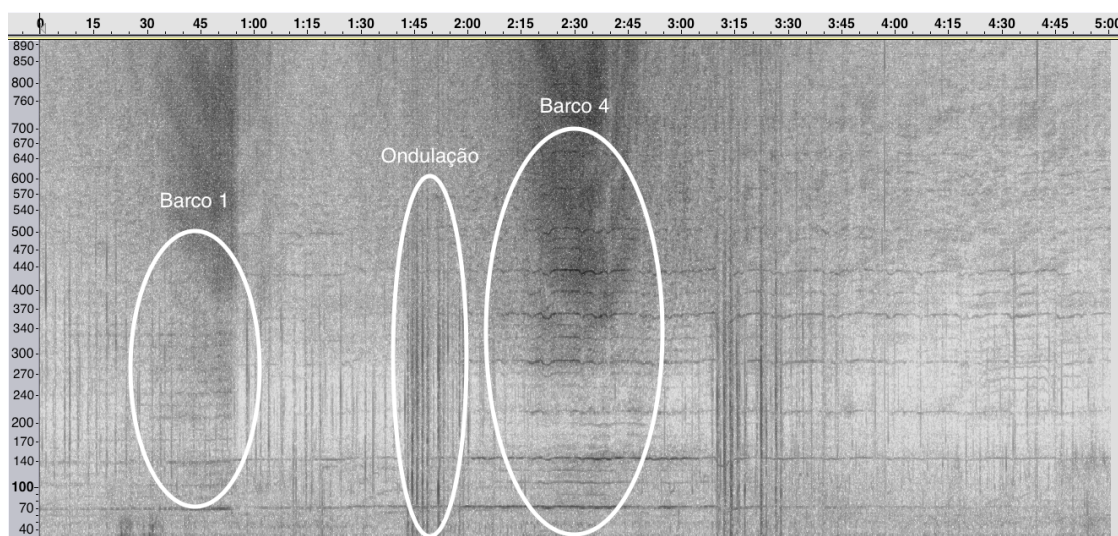


Figura 6.12: Análise Log 4.

Na Figura 6.13, encontram-se desenhadas quatro linhas vermelhas que servem de guia para analisar o barco 2. Na primeira passagem do barco 2 é possível observar que as linhas são mais longas e existem mais algumas visíveis até aos 300Hz. Na segunda passagem do barco 2 é possível observar que os as linhas são bastante mais curtas e só

estão visíveis até aproximadamente 140Hz. Este resultado pode dever-se a dois factores, o barco 3 estar muito próximo como é possível observar na Figura 6.6 e também o efeito do vento. O espectro gerado pelo vento está visível da 6.13.

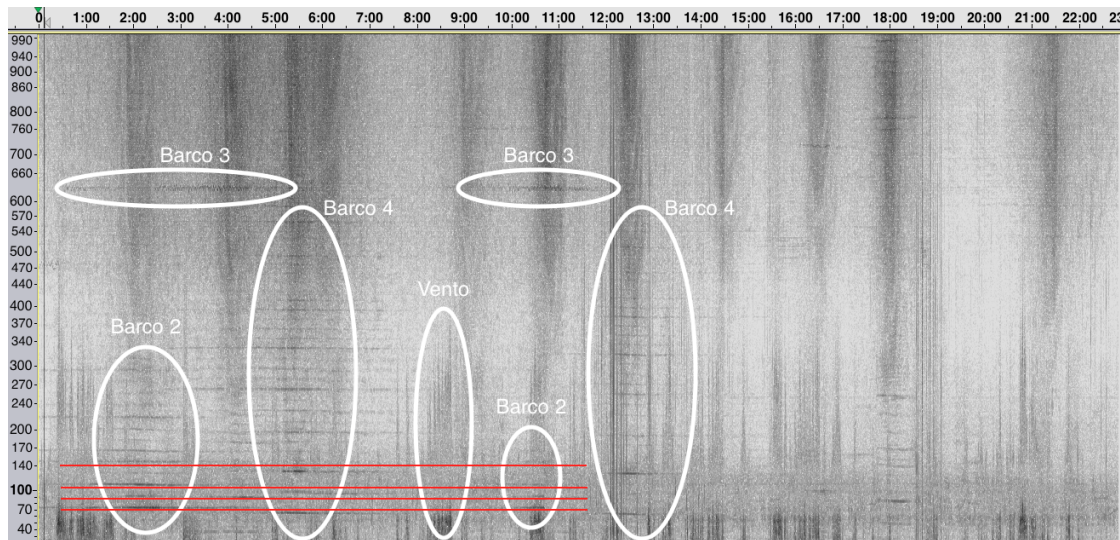


Figura 6.13: Análise Log 9.

Figura	Log	Início	Fim
6.14	3	1min 30s	2min 20s
6.15	7	7min 00s	9min 00s
6.16	7	14min 50s	16min 00s
6.17	9	2min 30s	4min 30s
6.18	9	10min 00s	11min 30s

Tabela 6.2: Período analisado em cada gravação para o Barco 3.

6.3 Análise utilizando algoritmo implementado.

Após efetuar a análise comparativa e identificação das embarcações no espectrograma gerado pela ferramenta *Audacity*, foi escolhido o barco 3 para efetuar a análise do algoritmo implementado em Matlab. Na Tabela 6.2 encontram-se representados os tempos selecionados em cada gravação para efetuar a análise do barco 3.

Analisando as Figuras 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18 é possível observar que existe sempre uma linha horizontal por volta da frequência de 600Hz. É possível também observar que esta barco não gera uma linha constante ao longo do tempo como as outras embarcações, o que implica que pode ser utilizado como mais um tipo de análise de padrão a utilizar para a identificação de uma embarcação.

A frequência observada pode variar devido consoante a velocidade de rotação da hélice ou do motor, observando a Figura 6.14 a frequência da linha encontra-se centrada nos 600Hz, no caso da Figura 6.15 a frequência encontra-se entre os 550Hz e os 600Hz e nas Figuras 6.16, 6.17 e 6.18 a frequência já se encontra entre os 600Hz e os 650Hz.

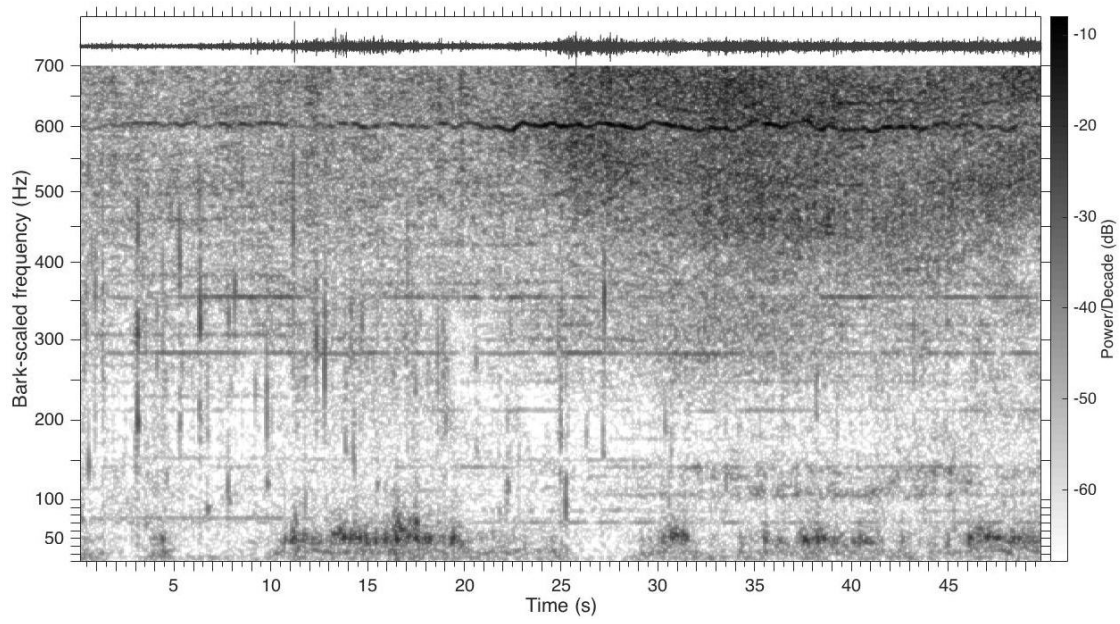


Figura 6.14: Barco 3 - Log 3 - 16:17:13.

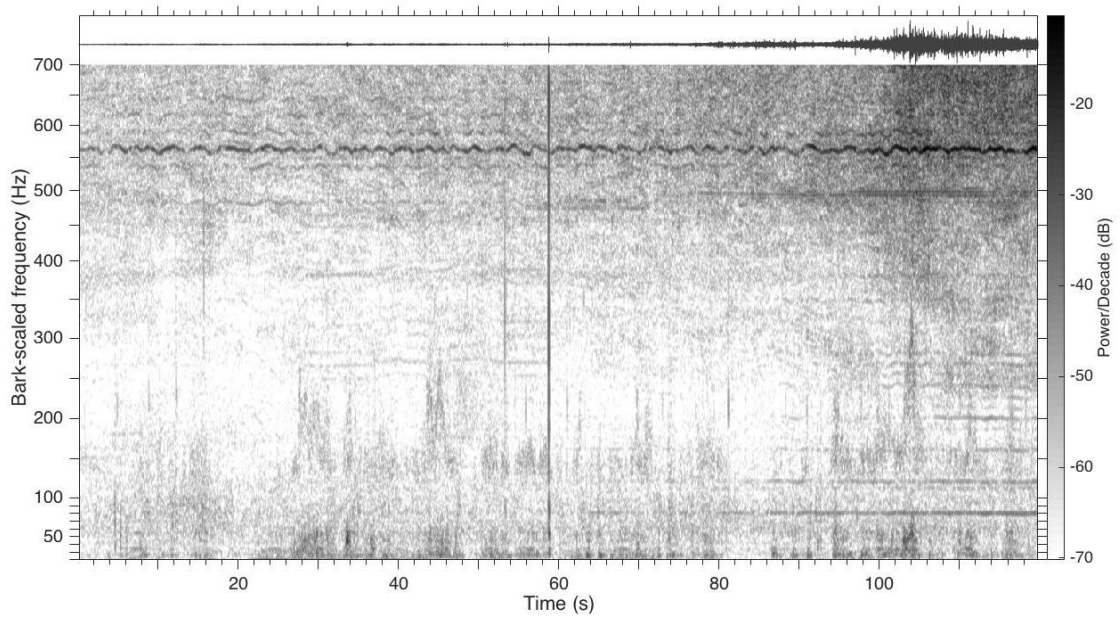


Figura 6.15: Barco 3 - Log 7 - 16:39:11.

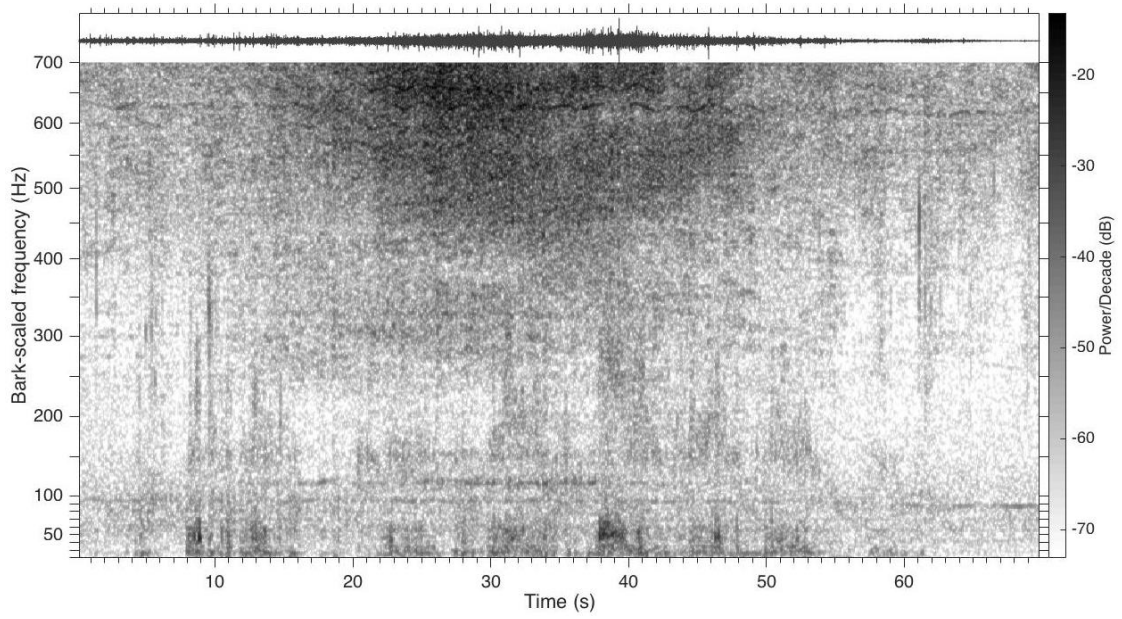


Figura 6.16: Barco 3 - Log 7 - 16:45:33.

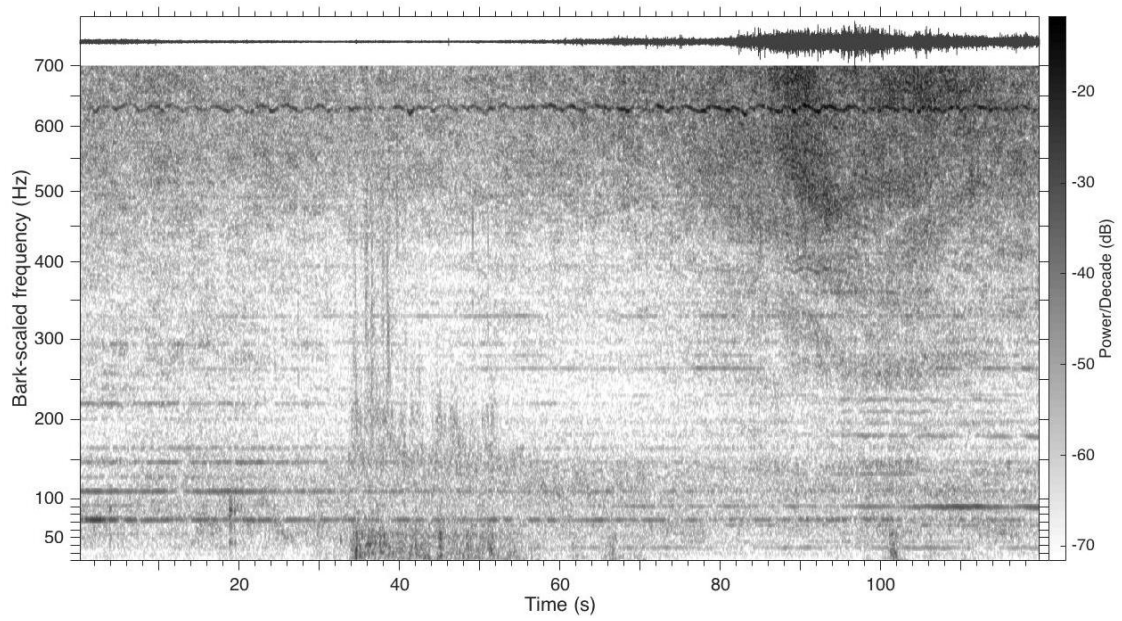


Figura 6.17: Barco 3 - Log 9 - 17:09:02.

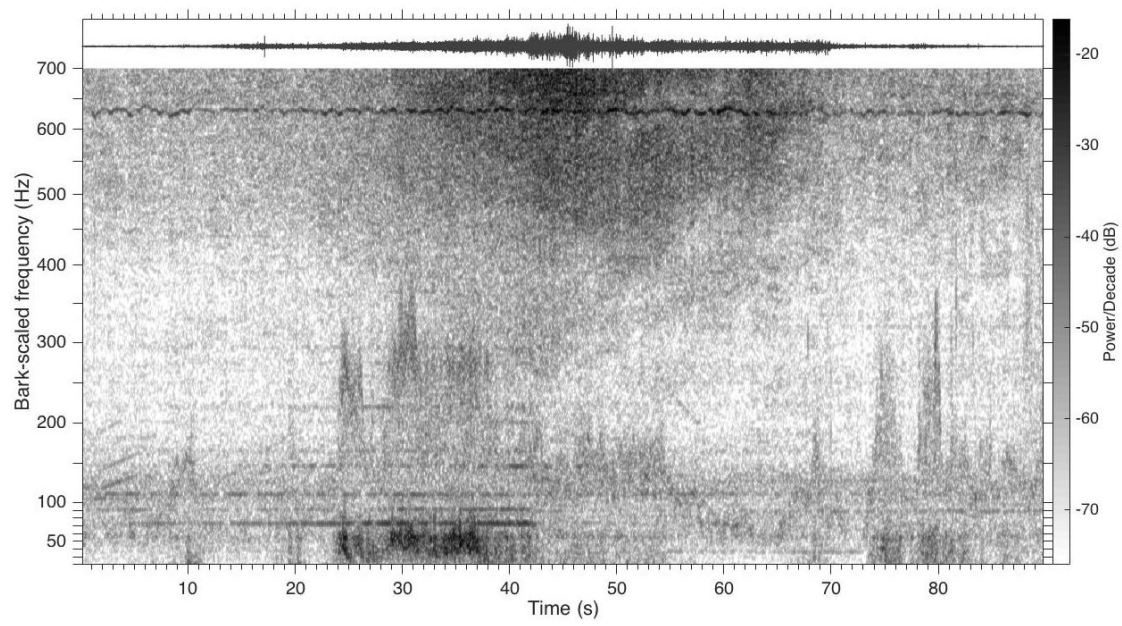


Figura 6.18: Barco 3 - Log 9 - 17:15:33.

6.4 Detecção de picos.

Para efetuar a deteção das linhas horizontais foi implementado um algoritmo de deteção de picos. Na Figura 6.19 é possível observar que o algoritmo consegue seguir a linha gerado pelo barco 3 mas também identifica ruído. Na Figura 6.20 é possível observar que o ruído presente apresenta contem mais energia que propriamente as linhas geradas pelas embarcações.

Com esta análise é possível concluir que é necessário efetuar um estudo mais aprofundado para entender a razão pelo qual este aparente ruído contem mais energia que propriamente as linhas geradas em determinadas frequências.

Por outro lado também é possível efetuar uma alteração ao algoritmo de deteção de picos para não limitar o nível a partir do qual este considera que um pico é relevante para análise, passando a identificar todos os picos existentes no espectrograma e em seguida aplicar um algoritmo de *tracking* de picos. Uma abordagem válido é um filtro de *Kalman* que devidamente parametrizado é possível efetuar o seguimento de uma linha mesmo que a energia presente nesta linha seja menor que o ruído presente na gravação. No entanto este algoritmo funciona bem após ser corretamente inicializado, podendo existir a necessidade de implementar um mecanismo adicional de que seja capaz de identificar uma linha com base num período de tempo limitado e assim que identificado a linha inicializar um filtro de *Kalman* e este por sua vez será capaz de efetuar o *tracking* da linha.

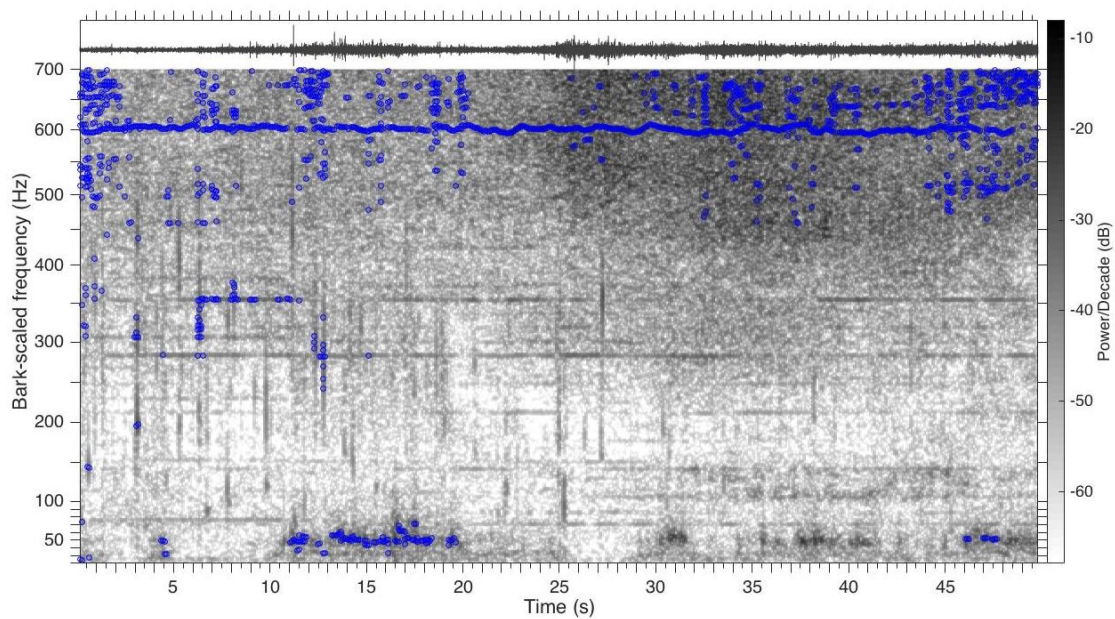


Figura 6.19: Detecção de picos Barco 3 Log 3.

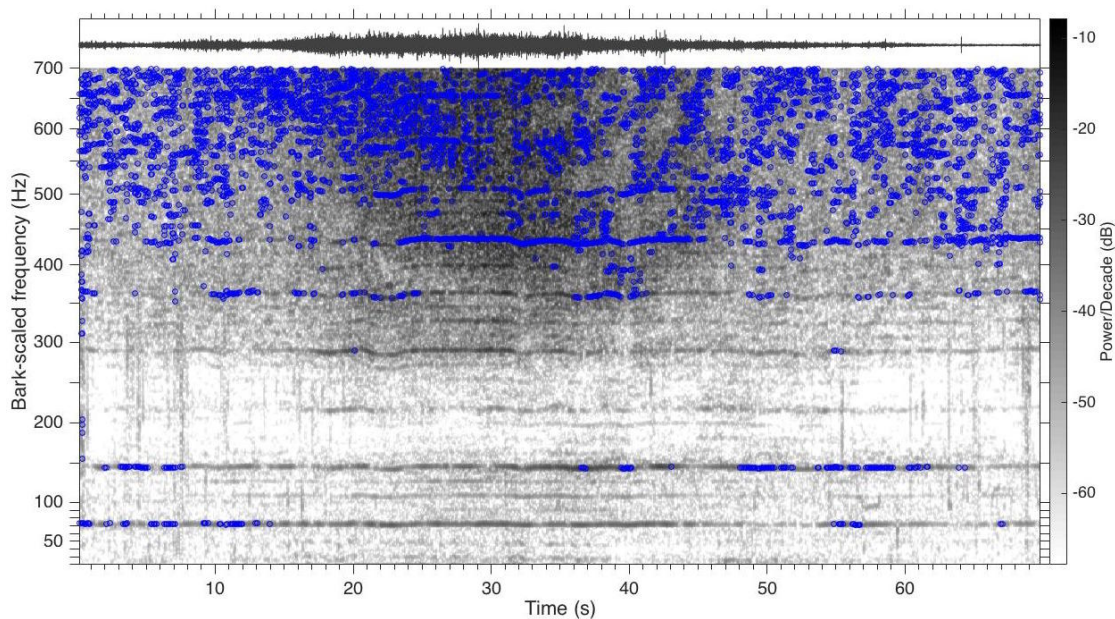


Figura 6.20: Detecção de picos Barco 4 Log 4.

6.5 Resumo do capítulo

Este capítulo permitiu obter conhecimento à cerca do ruído acústico gerado por embarcações. Foi possível concluir que existem alguns fatores que é importante ter em consideração no momento das gravações para evitar ao máximo a interferência do ruído emitido pelas embarcações com fatores externos, como a ondulação, vento ou objetos que embatem no hidrofone.

Foi possível concluir que a interpretação da assinatura acústica de uma embarcação deverá ter em consideração vários fatores, como as frequências que estão presentes ao longo do tempo que forma as linhas horizontais, o espaçamento no eixos das frequências entre as linhas detetadas, o padrão formado por estas linhas e ainda o próprio padrão da linha, que poderá não ser completamente linear ao longo do tempo como é o caso do barco 3.

Conclui-se também que a assinatura de uma embarcação pode ser muito idêntica ou mesmo igual caso as embarcações sejam idênticas em aspeto físico, podendo existir a necessidade de complementar o sistema com a captura de imagens quando é detetada a presença de uma embarcação.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalho Futuro

Com o desenvolvimento desta dissertação foi possível identificar que poderá ser possível efetuar a detecção e identificação de embarcações recorrendo à análise do ruído acústico emitido por estas. Na literatura foi possível encontrar diversos métodos que permitiam a solução desta problemática, sendo que um deles implica recorrer à teoria da transformada de *Fourier*. Esta foi adoptada para o âmbito desta dissertação por ser a base de trabalho para qualquer tipo de análise que seja efetuada em sinais acústicos.

Após a análise dos resultados, o método de utilizar a transformada de *Fourier* e recorrendo à ilustração dos resultados com um espectrograma mostrou ser capaz de extrair informação útil para a identificação de uma embarcação. No entanto esta informação ainda não se encontra totalmente tratável como foi possível observar, sendo necessário efetuar um estudo mais aprofundado de forma a lidar com o ruído existente nas gravações que por norma tem um valor energético mais elevado que as próprias frequências detetadas ao longo do tempo que dão origem às linhas horizontais.

Uma vez processado o ruído é necessário melhorar o algoritmo de detecção de picos complementado-o de um sistema de *tracking* de picos de forma a efetuar a detecção das linhas horizontais. Um sistema de *tracking* de picos permite efetuar uma análise ao longo do tempo e logo torna-se muito mais imune aos efeitos do ruído.

Foi possível encontrar na literatura métodos que recorrerem a redes neuronais para conseguirem automaticamente efetuar a detecção e classificação dos resultados obtidos da

extração de *features*. Estas tecnologias não foram enunciadas antes visto não estarem no âmbito da temática desta dissertação, mas é perfeitamente plausível a ser abordado como trabalho futuro. Com a solução existente no momento, este algoritmo tem o mesmo princípio de funcionamento de um radar que exige sempre a presença de um humano para analisar a informação que está a ser gerada.

Pode-se também concluir que de forma a ser possível efetuar uma gravação com o menor numero de interferências externas, é necessário estudar outros locais de colocação do hidrofone. É possível que o método de ancorar o sistema do leito do rio aumente a qualidade dos resultados consideravelmente, mas no entanto é só uma especulação, é necessário executar testes de forma a ser possível avaliar qual a melhor solução. Como enunciado anteriormente, pode também existir a necessidade de posicionar o hidrofone em robôs, sendo que neste caso o posicionamento do hidrofone teria de ser estudado criteriosamente.

O sistema implementado nesta solução encontra-se limitado à gama de frequências audíveis por um humano, mas será de todo o interesse implementar um sistema que permita elevar o espectro de frequências levando à possibilidade de detetar outras frequências que podem ajudar na deteção e identificação de embarcações ou até mesmo se para permitir a que o sistema seja capaz de detetar a presença de animais marinhos. Sendo que do ponto de vista conceptual o processo é idêntico e como tal as únicas limitações foram as do hardware disponível para esta dissertação.

Bibliografia

- [1] James Curry. *Engine Noise Signature for Boat Identification*. PhD thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2007.
- [2] Victor Lobo. *Ship Noise Classification*. PhD thesis, New University of Lisbon, 2002.
- [3] F. J. Harris. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform. *IEEE*, pages 51–83, 1978.
- [4] Robert Mill. *Auditory-Based Time-Frequency Representations and Feature Extraction Techniques for Sonar Processing*. PhD thesis, Speech and Hearing Research Group Department of Computer Science University of Sheffield, 2005.
- [5] Lisa M. Zurk. Extraction of small boat harmonic signatures from passive sonar. *PDXScholar*, 2011.
- [6] Fundamentals of underwater sound. *OGP –International Association of Oil & Gas Producers*, Report No: 406, May 2008.
- [7] J. S. Carlton and D. Vlastic. Ship vibration and noise. *Lloyd's Register Technical Papers*, Proceedings of the 1st International Ship Noise and Vibration Conference, London, UK, June 2005.
- [8] Kil Woo Chung. Demon acoustic ship signature measurements in an urban harbor. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Acoustics and Vibration*, Volume 2011, 2011.
- [9] J. S. Carlton and D. Vlastic. Ship vibration and noise: Some topical aspects. *Lloyd's Register*, 2005.