

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Deteção coerente de sinais acústicos para
localização robusta de veículos subaquáticos**

Miguel Antenor Anjos Soares Alves

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Telecomunicações

Orientador: José Carlos dos Santos Alves

Junho de 2013

Resumo

Nesta dissertação foi desenvolvido, implementado e validado um sistema digital dedicado para a detecção robusta e precisa de sinais acústicos destinado a integrar um sistema de localização e navegação de veículos autônomos submarinos. Este sistema tem como objetivo melhorar a precisão e robustez dos sistemas de localização LBL (*Long Baseline*) utilizados nos veículos subaquáticos, utilizando para isso processos de detecção coerente baseados em correlação e tecnologia FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

O sistema implementado descodifica sequências binárias que modulam uma portadora em BPSK, através de correlação. A escolha deste tipo de modulação e detecção permite uma imunidade bastante elevada às variações de amplitude, provocadas pelos fenômenos subaquáticos, assim como o possível envio de informação básica para estes veículos. Esta maior imunidade faz com que a medição dos instantes de chegada dos sinais acústicos seja mais precisa e robusta do que na detecção da envolvente, o método vulgarmente utilizado por este tipo de sistemas para cálculo da localização.

A escolha adequada da frequência da portadora assim como da frequência de amostragem permite também simplificar drasticamente o processo de cálculo da correlação tornando possível calcular em paralelo várias sequências binárias à custa de um aumento reduzido da complexidade lógica.

O sistema foi validado com recurso a modelos de simulação construídos em Matlab e em sinais reais obtidos em ensaios de campo.

Abstract

In this dissertation was developed, implemented, and validated a dedicated digital system to accurately detect acoustic signals in order to integrate a localization and navigation system of autonomous underwater vehicles (AUVs). The objective of the system is to improve the accuracy and robustness of the LBL (Long Baseline) localization systems used in those vehicles using processes of coherent detection based on correlation and FPGA (Field Programmable Gate Array) technology.

The implemented system decodes binary sequences that modulate a carrier in BPSK, through correlation. The choice of this kind of modulation and detection allows for an elevated immunity to amplitude variations, caused by underwater phenomena, and also making it possible to send basic information to these vehicles. This greater immunity makes the measurements of the acoustic signal's propagation times more accurate and robust than those resulting of the envelope detection, which is the common method used by this kind of systems to calculate the vehicle's localization.

The adequate choice of this carrier's frequency and of the sampling frequency also allows to drastically simplify the process of calculating the correlation making it possible to calculate in parallel various binary sequences at the cost of a reduced grow of the logic complexity.

The system was validated using simulation models made in Matlab and real samples obtained in field tests.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Prof. José Carlos Alves por todo o apoio e extrema disponibilidade demonstrados durante a realização deste trabalho.

Gostaria também de dedicar esta dissertação aos meus queridos avós e madrinha.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos	v
Índice.....	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xii
Abreviaturas e Símbolos	xiii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Estrutura	2
Capítulo 2	5
Estado da arte	5
2.1 - Sistemas de localização subaquática	5
2.1.1 - Localização com base em rede de transdutores acústicos	6
2.1.1.1 - <i>Long Baseline (LBL)</i>	6
2.1.1.2 - <i>Short Baseline (SBL)</i>	8
2.1.1.3 - <i>Ultra Short Baseline (USBL)</i>	9
2.1.2 - Esquemas de detecção acústicos	9
2.1.2.1 - Detetor de envolvente	9
2.1.2.2 - <i>Matched Filter</i>	10
2.1.3 - <i>Deadreckoning</i>	11
2.2 - Acústica subaquática	11
2.2.1 - Atenuação	12
2.2.1.1 - Dispersão geométrica	12
2.2.1.2 - Absorção	12
2.2.1.3 - Perda total	13
2.2.2 - Velocidade de propagação	13
2.2.3 - Multi-caminhos	14
2.2.4 - Ruído	15
2.2.5 - Efeito de Doppler	16
2.3 - Sistemas de processamento de informação	17
2.3.1 - Field Programmable Gate Array (FPGA) vs. Sistemas convencionais	17
2.4 - Trabalhos relevantes desenvolvidos na área.....	17

2.4.1 - <i>Modular Autonomous Robot for Environmental Sampling (MARES)</i>	17
2.4.1.1 - Características físicas	18
2.4.1.2 - Características de software	19
2.4.1.3 - Sistema de detecção acústico analógico	19
2.4.2 - Processador integrado para a navegação de AUVs	20
2.4.2.1 - Sistema de detecção digital	20
2.4.2.2 - Processamento digital dedicado	21
2.4.2.3 - Limitações	22
Capítulo 3	25
Sistema desenvolvido	25
3.1 - Visão geral do sistema	26
3.2 - Técnicas utilizadas	27
3.2.1 - Modulação BPSK	27
3.2.2 - Correlação	28
3.2.3 - Restrição da frequência de amostragem	28
3.2.4 - Modelação do ruído	29
3.3 - Modelos de simulação Matlab	30
3.3.1 - Transmissão e propagação dos sinais	30
3.3.2 - Detecção dos sinais	33
3.4 - Circuito de detecção digital	36
3.4.1 - Correlacionador	37
3.4.2 - Decisor	40
3.4.3 - Simulações	43
3.5 - Possíveis melhorias	45
3.5.1 - Compensar o efeito de Doppler	45
3.5.2 - Envio de comandos para o veículo	45
Capítulo 4	47
Implementação e resultados experimentais	47
4.1 - Implementação	47
4.2 - Simulação com amostras reais	48
4.2.1 - Detetor Matlab	49
4.2.2 - Detetor implementado	51
Capítulo 5	55
Conclusões	55
5.1 - Conclusões	55
Referências	57

Lista de figuras

Figura 2.1 - Localização por utilização da <i>baseline</i>	7
Figura 2.2 - Exemplo de área de operação desejável com 2 boias.....	7
Figura 2.3 - Rede acústica móvel.	8
Figura 2.4 - Sistema de detecção FSK (<i>Frequency Shift Keying</i>) baseado no detetor de envolvente.....	10
Figura 2.5 - Esquema de detecção baseado num <i>matched filter</i>	11
Figura 2.6 - Reflexão subaquática na superfície e no fundo com resultados de detecção.	15
Figura 2.7 - Reflexão subaquática numa fronteira de temperatura diferente com diferentes posicionamentos do recetor.	15
Figura 2.8 - Principais fontes de ruído subaquático.	16
Figura 2.9 - O AUV MARES.	18
Figura 2.10 - Características de software modular do MARES.	19
Figura 2.11 - Sistema de detecção digital inspirado no sistema atual do MARES.	21
Figura 3.1 - Esquema geral do detetor coerente desenvolvido.	26
Figura 3.2 - Esquema representativo da modulação BPSK.	27
Figura 3.3 - Restrição da frequência de amostragem em relação à frequência da portadora.	29
Figura 3.4 - Esquema geral do modelo de comunicação desenvolvido.	30
Figura 3.5 - Sinal BPSK transmitido com base numa sequência Kasami.	31
Figura 3.6 - Cenário simulado de transmissão e receção dos sinais BPSK em ambiente subaquático.	32
Figura 3.7 - Janelas temporais de cada transmissor e sua receção pelo veículo.	33
Figura 3.8 - Resultados da correlação para cada sequência de referência para uma relação sinal-ruído de 20dB.	34

Figura 3.9 - Sinal “mergulhado” em ruído à entrada do detetor.....	35
Figura 3.10 - Distinção de ruído e de sinal por comparação de amplitudes para uma relação sinal ruído de 100dB e outra de -10dB.	35
Figura 3.11 - Resultados da correlação para cada sequência de referência para uma relação sinal-ruído de -10dB.	36
Figura 3.12 - Esquema do sistema dedicado de detecção coerente do sinal.	37
Figura 3.13 - Correlacionador para uma sequência de referência.	37
Figura 3.14 - Comportamento da fila FIFO para cada instante de receção de uma nova amostra.	38
Figura 3.15: Correlacionador para 3 sequências de referência.....	39
Figura 3.16 - Disposição das sequências na BRAM2 por colunas.	40
Figura 3.17 - Organização interna do bloco decisor.	41
Figura 3.18 - Decisor para 3 sequências de referência.	41
Figura 3.19 - Nível de decisão em função da variância para uma probabilidade de detecção de ruído de 1×10^{-7}	42
Figura 3.20 - Aproximação por retas do nível de decisão em função da variância para uma probabilidade de detecção de ruído de 1×10^{-7}	43
Figura 3.21 - Resultados da correlação no modelo Matlab e no modelo Verilog.	44
Figura 3.22 - Gráfico de erro absoluto entre os resultados gerados pelo Matlab e pelo Modelsim para a 1ªsequência de correlação.	44
Figura 3.23 - Estrutura de estimação/compensação do efeito de Doppler.....	45
Figura 3.24 - Esquema que ilustra o possível envio de informação para o veículo.	46
Figura 4.1 - Ocupação de recursos da Spartan 3E-500 para o detetor desenvolvido em função do nº de sequências base de referência	48
Figura 4.2 - Resultados do conversor A/D após receção do sinal transmitido.	49
Figura 4.3 - Correlação do sinal recebido com as 3 sequências base de correlação assim como o nível de decisão gerado.	50
Figura 4.4 - Níveis de decisão gerados na zona temporal onde apenas existe ruído.	50
Figura 4.5 - Instante de detecção do valor máximo no detetor de Matlab.	51
Figura 4.6 - Resultados de correlação do detetor Matlab e do detetor Verilog.	52
Figura 4.7 - Gráfico de erro absoluto entre os resultados gerados pelo Matlab e pelo Modelsim para a 1ªsequência de correlação.	52
Figura 4.8 - Resultados do nível de decisão Matlab e do nível de decisão Verilog.....	53
Figura 4.9 - Gráfico de erro absoluto entre os resultados gerados pelo Matlab e pelo Modelsim para os níveis de decisão.	53

Figura 4.10 - Resultados de deteção Verilog impressos na consola do programa de simulação Modelsim.....	54
Figura 4.11 - Instante de deteção do valor máximo no detetor implementado.	54

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características físicas do MARES.	18
Tabela 4.1 - Utilização de recursos da Spartan 3E-500 para o detetor desenvolvido com 3 sequências base de referência.....	47
Tabela 4.2 - Utilização de recursos da Spartan 3E-500 para o detetor desenvolvido com 3 sequências base de referência (excluindo estimador de ruído).	48

Abreviaturas e Símbolos

AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
A/D	Analógico/Digital
BRAM	<i>Block Random Access Memory</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift-Keying</i>
DPSK	<i>Diferencial Phase Shift Keying</i>
DS	<i>Direct Sequence</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FIFO	<i>First In First Out</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GIB	<i>GPS Intelligent Buoys</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
LBL	<i>Long baseline</i>
MARES	<i>Modular Autonomous Robot for Environment Sampling</i>
MIEEC	Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
OOK	<i>On-Off Keying</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RF	Rádio-Frequência
SBL	<i>Short baseline</i>
SDRAM	<i>Synchronous Dynamic Random Access Memory</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
USBL	<i>Ultra-Short baseline</i>

Capítulo 1

Introdução

Desde os tempos primitivos que a necessidade de localização no meio aquático é de extrema importância. Os primeiros marinheiros começaram por localizar-se pela visão que tinham da costa, à medida que se foram afastando de terra começaram a guiar-se pelas estrelas. Nos tempos modernos existe a localização precisa do GPS (*Global Positioning System*). Mas e debaixo de água?

Atualmente os sistemas de comunicação e informação são responsáveis pelo avanço da humanidade em praticamente todas as áreas. A maioria destes sistemas utiliza ondas eletromagnéticas como meio de transportar a informação pelas suas excelentes características de propagação na atmosfera e no vácuo. O único meio onde são bastante atenuadas é na água devido à condutividade da mesma.

As ondas acústicas são o meio atual mais poderoso de comunicação subaquática. Possuem uma velocidade de propagação aproximadamente 4 vezes mais rápida que no ar, sofrem menor atenuação e podem percorrer grandes distâncias [1]. Estes sinais são utilizados para a transmissão de dados servindo também para a localização de veículos subaquáticos já que os meios de localização convencionais (GPS) não funcionam dentro de água.

O problema é que o meio subaquático afeta a transmissão destes sinais através de vários fatores como multi-caminhos/reverberação ou variações de velocidade que fazem com que a precisão e robustez dos sistemas de localização destes veículos seja bastante afetada. Surge então a necessidade de se desenvolverem sistemas mais robustos face a este tipo de problemas.

Sendo o planeta maioritariamente constituído por água e estando a dimensão subaquática por explorar torna-se imperativo desenvolver sistemas de comunicação e informação fiáveis debaixo de água para que a humanidade possa conhecer este meio misterioso. Um dos veículos responsável por esta busca por conhecimento é o AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). Trata-se de um pequeno veículo subaquático capaz de aceder a locais de difícil acesso e de realizar inúmeras tarefas como exploração de gás e petróleo, mapeamento dos oceanos, explorações arqueológicas, atividades militares, etc.

Em 2006 deu-se o início de um projeto de desenvolvimento de um AUV na FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) denominado MARES (*Modular Autonomous Robot for Environmental Sampling*). Este veículo possui um tipo de construção

modular, tanto a nível físico como a nível de software, que o torna inovador em relação a outros veículos do género permitindo a incorporação de novas tecnologias de uma forma mais prática, não estando sujeito a restrições de sistemas proprietários. O seu sistema de localização baseia-se numa rede acústica de transdutores denominada LBL (*Long Baseline*) que tem por base de cálculo a medição de tempos de propagação dos sinais acústicos trocados entre o veículo e boias à superfície.

O sistema de deteção do MARES foi desenvolvido como sendo um sistema eletrónico inteiramente analógico, o que introduz problemas inerentes à própria tecnologia. Interferências eletromagnéticas, variações dos parâmetros dos componentes, motivados por desvios de temperatura que se traduzem em alterações das características dos filtros ao longo das missões, ou a dificuldade de reconfiguração ao ter de substituir componentes sempre que se queira alterar frequências, são alguns dos exemplos dessas dificuldades.

Desde então foram desenvolvidos e incorporados trabalhos de melhoria com vista à transposição para tecnologias digitais. Um destes trabalhos, desenvolvido no âmbito de uma dissertação do MIEEC (Mestrado Integrado de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) no ano letivo de 2010/2011, foi o desenvolvimento de um sistema inteiramente digital baseado no esquema de deteção analógico previamente existente neste veículo. Esta versão digital eliminou os problemas já referenciados mas manteve o processo de deteção da envolvente do sinal o que, sendo um método bastante simples, apresenta no entanto algumas limitações em termos de precisão e de imunidade aos fenómenos naturais do meio subaquático.

Com a evolução dos sistemas digitais e respetivas capacidades de processamento abrem-se portas à implementação de técnicas de deteção computacionalmente exigentes como é o caso dos detetores coerentes baseados em correlação. Em sistemas embutidos, estes processos de deteção mostram um potencial de imunidade muito elevado às adversidades dos fenómenos aquáticos sendo mais robustos que os sistemas de deteção baseados na comparação da envolvente do sinal recebido.

Pretende-se demonstrar nesta dissertação que o uso deste tipo de deteção, recorrendo a plataformas digitais baseadas em lógica reconfigurável (*FPGA - Field Programmable Gate Array*), permite uma maior flexibilidade do sistema de processamento mediante a adaptação a requisitos de operação. Isto tem em vista melhorar a precisão das medidas obtidas e, ao mesmo tempo, potenciar uma melhor imunidade a fenómenos adversos que ocorrem no canal acústico submarino permitindo assim uma localização mais robusta e precisa de veículos subaquáticos.

1.1 - Estrutura

No capítulo 2 é descrito o estado da arte no domínio dos sistemas de localização de veículos subaquáticos assim como conceitos de acústica subaquática importantes para a compreensão das dificuldades que este meio apresenta neste tipo de sistemas. São também apresentadas as vantagens da utilização de plataformas digitais baseadas em FPGA no processamento da informação sendo, no final do capítulo, referenciadas algumas características importantes do AUV MARES e descrito um trabalho atual baseado neste tipo de tecnologia.

No capítulo 3 é explicado em termos gerais o sistema que foi desenvolvido assim como as técnicas de processamento digital utilizadas e o seu impacto em termos de precisão,

imunidade a ruído e complexidade lógica realçando as vantagens em relação aos sistemas anteriormente descritos. São também apresentados modelos de simulação em ambiente Matlab nos quais se comprova na teoria o sistema idealizado e é apresentado o sistema em hardware no qual se efetuam algumas simulações.

A implementação desse sistema em FPGA é apresentada no capítulo 4, o qual culmina com a apresentação de resultados obtidos por simulação com amostras reais.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho realizado e abre portas a futuras evoluções.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 - Sistemas de localização subaquática

O meio subaquático é ainda bastante desconhecido para a humanidade. Sendo a maior parte do planeta coberto por água surge a necessidade de exploração desta área através da utilização de veículos adequados. Neste contexto surgiram os AUVs, pequenos veículos autônomos submarinos responsáveis pelo acesso a locais de difícil acesso e realização de várias tarefas como exploração de gás e petróleo, mapeamento dos oceanos, explorações arqueológicas, atividades militares, etc. Estes veículos necessitam de navegar e serem monitorizados o que implica saber a sua localização física num dado instante.

Atualmente são utilizados no mundo inteiro sistemas de localização baseados em ondas RF (Rádio-Frequência). Estes sinais possuem excelentes características de propagação exceto no ambiente subaquático, onde sofrem uma forte atenuação.

As ondas acústicas apresentam características de propagação neste meio superiores à propagação no ar sendo adotadas pelos sistemas de localização para saber o posicionamento horizontal de veículos debaixo de água, já que o posicionamento vertical pode ser dado diretamente através de um medidor de pressão. Este posicionamento poderá também ser dado por sensores de movimento ou por uma bússola por conhecimento da posição inicial, o problema é que estes métodos são afetados de erro cumulativo com o passar do tempo provocando graves desvios da posição real.

Torna-se assim importante, independentemente do processo de localização, existir a capacidade de detetar, com precisão, o instante de receção de um sinal acústico e também discriminar sinais provenientes de diversas fontes sonoras, com vista à localização precisa e robusta de veículos debaixo de água.

De seguida irão ser apresentados os diferentes sistemas de localização subaquáticos atuais assim como irá ser explicado o processo de cálculo de posição em que se baseiam.

2.1.1 - Localização com base em rede de transdutores acústicos

Aproveitando as boas características de propagação do som na água foram usados, desde há várias décadas, processos de localização subaquática baseados em redes de transmissores e recetores. São utilizados transdutores com localização conhecida (boias ou barcos à superfície, ou equipamentos ancorados no fundo da água) para enviar/receber sinais acústicos, sendo a posição de um objeto subaquático determinada em relação à posição dessa infraestrutura.

O processo usual inicia-se pelo envio de um sinal de interrogação de um transdutor 1 de frequência f_1 para um transdutor 2, o qual responde com um sinal de resposta de frequência f_2 . Sabendo a velocidade de propagação do som (v) e o tempo que demora a chegar a resposta (Δt) é possível o transdutor 1 saber a que distância se encontra do transdutor 2: $d = v \times \frac{\Delta t}{2}$.

As frequências utilizadas nestas transmissões de sinal estão, no entanto, limitadas a uma determinada banda devido à sua atenuação na água. Esta atenuação aumenta, não só com a distância à fonte sonora, mas também com a frequência como será verificado mais adiante neste capítulo.

Com base neste processo de troca de sinais entre transdutores foram desenvolvidos vários sistemas de localização de veículos subaquáticos, descritos de seguida [2].

2.1.1.1 - Long Baseline (LBL)

Este sistema baseia-se na fixação de um determinado número de boias à superfície, dependendo do tamanho da área de operação, distanciadas de 50 m a 2000 m (daí o termo *long*). Estas boias são equipadas com GPS (GIB - *GPS Intelligent Buoys*) o que, para além da maior facilidade de colocação, permitem um posicionamento absoluto do sistema.

Consideremos o transdutor 1 integrado num veículo subaquático e o transdutor 2 numa boia de referência à superfície. Utilizando apenas estes 2 elementos o veículo saberá apenas que estará num determinado raio de alcance da boia não sabendo a posição ao certo. Se for introduzida uma 2ª boia e o veículo souber a posição das 2 boias é possível reduzir a localização a 2 pontos por interseção das circunferências. Para saber a localização exata teria de existir uma terceira boia de frequência f_3 para permitir uma triangulação.

No entanto existe uma alternativa, poderá ser traçada uma reta imaginária entre as boias (*baseline*) restringindo a área de operação a 1 dos lados. O veículo saberá assim a sua posição relativamente às boias sabendo à partida a sua área de operação em relação à *baseline* (Fig. 2.1).

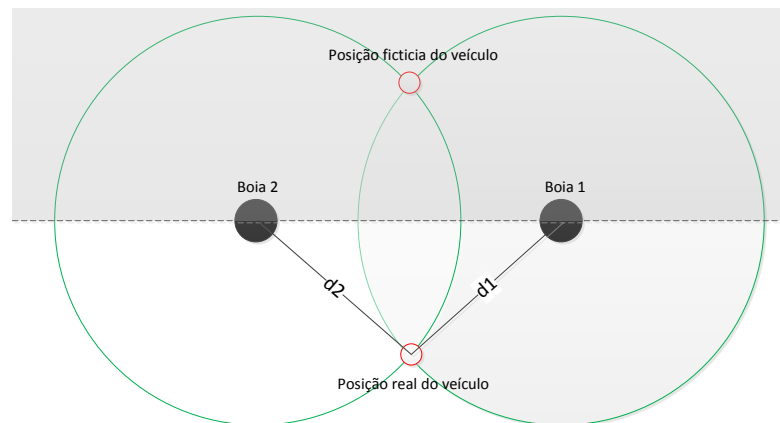


Figura 2.1 - Localização por utilização da *baseline*.

Na definição desta área de operação deverão sempre ser tidos em conta os fatores de imprecisão nos cálculos da distância. Por exemplo, segundo [3], para utilização de 2 boias, foi considerado que essa área deveria cumprir certos requisitos geométricos por questões de precisão. Deveria consistir numa caixa distanciada da *baseline* de $\frac{1}{4}$ vezes a distância entre as boias com distância máxima a distância entre as boias (Fig. 2.2).

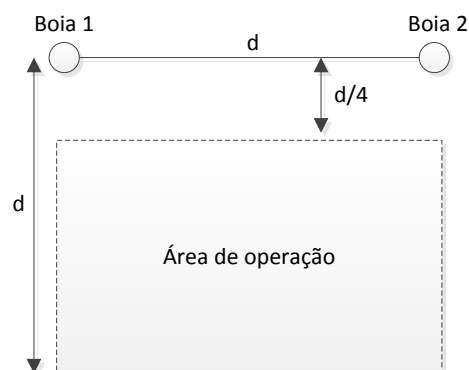


Figura 2.2 - Exemplo de área de operação desejável com 2 boias.

Existe também uma variante que permite montar uma rede acústica móvel estando os transdutores acoplados, não em boias, mas em veículos que se movimentam à superfície o que poderá ter interesse para cobrir grandes áreas de operação consumindo menos recursos (Fig. 2.3) [4].

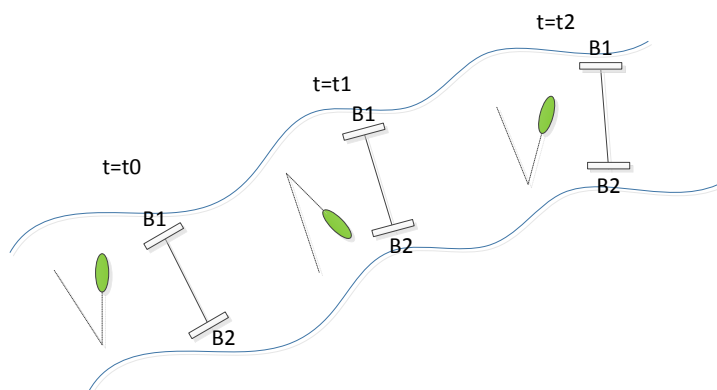


Figura 2.3 - Rede acústica móvel.

Este tipo de sistemas com base em pergunta/resposta leva a uma baixa frequência de obtenção de posição e também a uma imprecisão da determinação de posição quando o veículo está em movimento. Isto deve-se ao facto de o veículo ter de esperar que cada boia responda, o que aumenta com o número de veículos ou de boias, e da sua posição ser modificada enquanto são adquiridos os dados necessários à determinação da posição. Para além disso, uma vez que para atingir distâncias longas o processo de transmissão exige potências elevadas, o facto de constantemente inquirir as diferentes boias leva a consumos de energia elevados, o que não é desejável para um veículo autónomo.

Foram então desenvolvidos sistemas que utilizam faróis com sinal de relógio sincronizado. Os faróis enviam sinais periódicos em instantes determinados e conhecidos pelo veículo subaquático, o qual regista os tempos de chegada e faz de imediato o cálculo da distância [5], o que permite que o veículo não precise de transmissor acústico. Este processo requer relógios sincronizados em todos os elementos da rede acústica. Se à superfície isso pode ser facilmente obtido à custa do relógio de referência dos sistemas de posicionamento global (como o GPS), debaixo de água é necessário utilizar relógios eletrónicos, de elevada precisão e estabilidade, que consigam manter a contagem de tempo dentro de limites aceitáveis para o processo de localização, durante o tempo esperado para as missões dos veículos. Este processo permite uma maior autonomia, maior frequência de obtenção de posição e maior precisão que os sistemas com base em pergunta/resposta.

2.1.1.2 - Short Baseline (SBL)

Neste tipo de sistema os transmissores/recetores, em vez de se encontrarem posicionados ao longo de uma área estão acoplados na parte de baixo de uma estrutura que se encontra à superfície (barco, navio, plataforma, etc.) estando distanciados entre si de 20 m a 50 m. São normalmente 3 ou 4 dispostos em triângulo ou retângulo o mais afastados possível entre si porque como estão próximos uns dos outros, a não ser que seja uma estrutura de grandes dimensões, sofrem um impacto muito maior de multi-caminhos, fenómeno explicado mais adiante, devido à sua proximidade tornando o sistema menos preciso que o LBL.

Como normalmente a estrutura onde os dispositivos estão acoplados sofre de inclinação, balanço e guinada, por se encontrarem numa superfície instável como a água, estes fatores de

rotação vão afetar as distâncias calculadas sendo necessário compensar através da utilização adicional de sensores que meçam estes parâmetros [6].

Os sistemas SBL são bastante populares na área de investigação sendo, por exemplo, utilizados para monitorizar veículos debaixo do gelo na Antártida no projeto SCINI [7].

2.1.1.3 - *Ultra Short Baseline (USBL)*

Sistema semelhante ao SBL mas que apenas utiliza 1 transmissor/recetor acoplado à estrutura. Este dispositivo contém no seu interior vários transdutores separados entre si menos de 10 cm (*ultra short*). A distância é medida da forma habitual, sendo a posição do veículo determinada pelo ângulo que este faz com a estrutura. Este ângulo é determinado através de um método de diferenciação de fase utilizado na fila de transdutores. Este método é ainda menos preciso que o SBL devido à proximidade dos transdutores, mas tem a vantagem de ser de fácil utilização tornando-o no sistema mais popular dos sistemas de localização subaquática [2, 8].

2.1.2 - Esquemas de deteção acústicos

Os processos de deteção de sinais acústicos mais frequentemente utilizados em aplicações de localização acústica submarina são baseados na deteção de envolvente e em processos baseados em correlação (*matched filters*). Estes detetores serão apresentados em detalhe de seguida.

2.1.2.1 - Detetor de envolvente

O detetor de envolvente é o processo mais rudimentar mas também o mais simples utilizado para detetar o instante de chegada de um sinal acústico.

Esta deteção é efetuada através da desmodulação de amplitude do sinal recebido. Por não depender da frequência nem da fase do sinal recebido é simples de realizar e imune a variações temporais (frequência e fase) provocadas pelo canal mas, em contrapartida, sofre mais influência de fatores de alteração de amplitude, como ruído ou atenuação, exigindo uma preocupação de equalização do canal acústico através da utilização de amplificadores e da definição de níveis de deteção que garantam que a potência do sinal é maior que a do ruído. Mesmo que ocorra deteção, não se garante precisão temporal da ocorrência devido às variações constantes de amplitude.

Nos sistemas de localização subaquática, em que é necessária a distinção entre vários sinais, utilizam-se várias frequências para o efeito. Isto faz com que existam vários filtros passa-banda de elevado fator de qualidade e detetores de envolvente para os diferentes sinais, dando origem a esquemas de deteção como o da figura 2.4. Neste esquema podemos visualizar os sinais modulados a serem rececionados juntamente com ruído ($s(t)+n(t)$), estes são selecionados em frequência pelos filtros passa-banda e desmodulados em amplitude pelo

detetor de envolvente ($r(t)$). A decisão acerca da deteção é efetuada verificando se a amplitude ultrapassou um determinado nível de decisão.

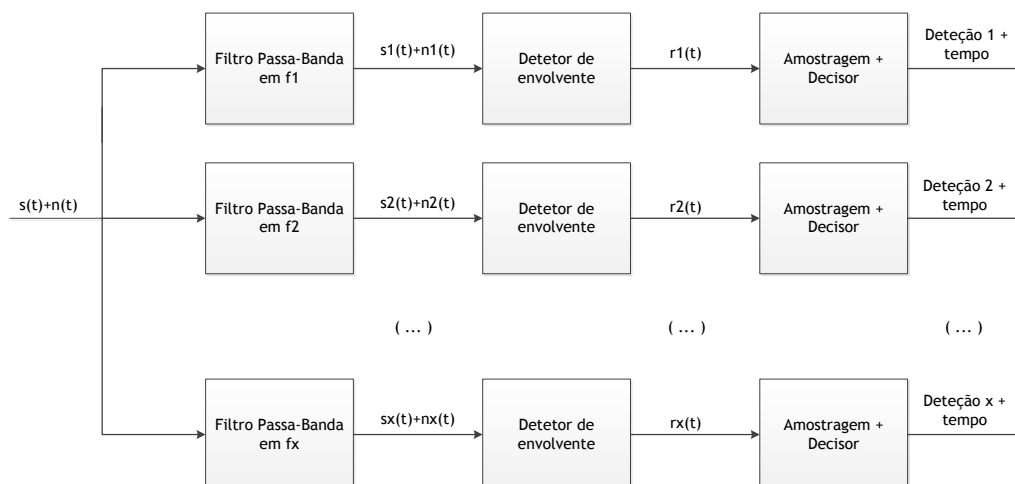


Figura 2.4 - Sistema de deteção FSK (*Frequency Shift Keying*) baseado no detetor de envolvente.

2.1.2.2 - *Matched Filter*

Um detetor baseado em *matched filter*[9] é realizado à custa de correlação entre o sinal recebido e o sinal que se pretende detetar (eq. 2.1).

$$corr(s[n], r[n]) = \sum_{m=0}^w s[m].r[n + m] \quad (2.1)$$

Uma das funções vai “deslizando” sobre a outra multiplicando as amostras com o mesmo índice e somando tudo segundo o tamanho da janela. Se a dada altura as funções forem iguais irá ser gerado um pico que indicará essa semelhança. É um processo mais complexo que o da deteção de envolvente exigindo maior capacidade de processamento de informação por parte do sistema de deteção.

Este tipo de detetor pode utilizar variações de fase para a deteção de sinais. Através da codificação de informação em fase torna-se possível discriminar sinais através da sua correlação, desmodulando o sinal recebido através de uma portadora local, com a mesma frequência da portadora transmitida. Este método permite uma imunidade bastante alta ao ruído, por não estar dependente da amplitude, e uma precisão temporal de deteção bastante elevada relacionada com essa imunidade e a sincronização com a portadora.

Na figura 2.5 pode ser verificado um esquema de deteção baseado neste processo de correlação. O sinal recebido com ruído ($s(t)+n(t)$) é amostrado numa determinada frequência de amostragem ($s[n]+n[n]$) sendo de seguida correlacionado com a sequência da portadora de referência. No final é decidido qual dos sinais foi recebido assim como o instante de deteção pela seleção do maior dos máximos numa determinada janela temporal de cálculo.

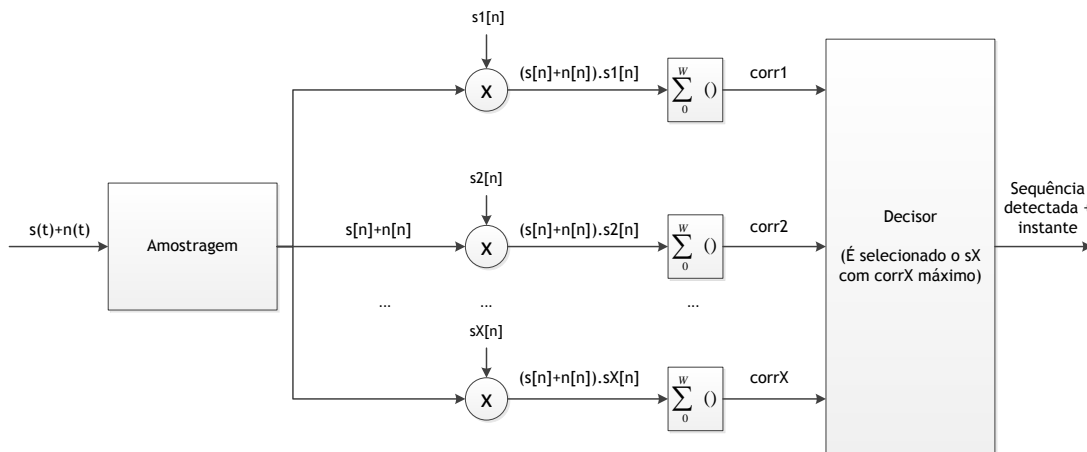


Figura 2.5 - Esquema de detecção baseado num *matched filter*.

2.1.3 - *Deadreckoning*

O *Deadreckoning* é uma técnica não-acústica que estima a futura posição do veículo relativamente a uma posição inicial. Esta técnica não depende da utilização de outros equipamentos externos geograficamente espaçados mas apenas da informação de sensores internos e da posição inicial.

Este método reúne informações de aceleração e velocidade angular do veículo através de acelerómetros, giroscópios ou outros sensores de movimento. Ao integrar os dados, pequenos erros de medição, normais deste tipo de sensores, vão-se acumulando ocorrendo um desvio cada vez maior da posição inicial com o passar do tempo. Tem então de existir algum tipo de correção de posição.

Por este motivo este método é combinado com os sistemas de redes de transdutores acústicos, anteriormente falados, de forma a corrigir o seu posicionamento através de um filtro de Kalman. Este tipo de sistemas híbridos faz com que a resolução do posicionamento do veículo seja maior e mais precisa. Poderão também ser detetados e eliminados erros graves de desvios provocados por multi-caminhos [3].

2.2 - Acústica subaquática

Depois de se ter revisto os sistemas de localização atuais é importante voltar a referir que, independentemente do processo de localização acústico utilizado, a deteção dos instantes de chegada dos sinais tem de ser efetuada com precisão, de modo a que os cálculos envolvidos no posicionamento sejam também eles precisos. Neste contexto torna-se essencial compreender as dificuldades que o meio subaquático apresenta na obtenção destas medidas.

Os sinais acústicos subaquáticos consistem numa movimentação de partículas da água provocada por uma fonte de energia sonora. Estes sinais atravessam um canal que apresenta muitas fontes de imprecisão. A atenuação que os sinais sofrem, a não uniformidade da velocidade do som na água, os fenómenos dos multi-caminhos, o ruído para vários valores de frequência e os desvios provocados pelos efeito de Doppler são os principais exemplos.

Todos estes fenómenos apresentam um impacto na amplitude do sinal presente no recetor num dado instante, podendo também ser desviado em frequência pelo efeito de Doppler. A amplitude torna-se assim um aspeto essencial a ter em conta no desenvolvimento do sistema de deteção, nomeadamente em sistemas que dependem diretamente deste parâmetro como os detetores de envolvente. Estas variações aleatórias causam assim variações na envolvente do sinal detetado pelos veículos gerando erros no cálculo da sua localização. Torna-se assim importante que a escolha do método de deteção contrarie ao máximo estes obstáculos naturais do meio subaquático que serão descritos de seguida.

2.2.1 - Atenuação

Quando é gerado um sinal acústico debaixo de água este expande-se em todas as direções. A onda vai perdendo energia conforme se afasta da origem por causa de fatores geométricos e de absorção pela própria água.

2.2.1.1 - Dispersão geométrica

A dispersão geométrica é o resultado da dispersão de energia no espaço com o afastamento da fonte acústica [6]. Dependendo do meio onde é gerado o sinal essa dispersão pode assumir diferentes formas geométricas, variando com as alterações de velocidade do canal. Considerando a velocidade uniforme, a geração de um sinal acústico em águas que sejam profundas (profundidade superior a 100 m [10]) pode ser vista como uma propagação esférica, já em águas pouco profundas pode ser considerada cilíndrica. Pode ser então dito que esta atenuação depende, fundamentalmente, da distância percorrida pelo sinal, e da forma como se distribui geometricamente durante o caminho percorrido:

$$N_{\text{spr}} = 10n \log \left(\frac{r}{r_0} \right), \quad (2.1)$$

onde:

n = depende da forma como a onda se propaga, tem valor 2 para propagação esférica

r = distância percorrida (m)

r_0 = distância de referência (m)

2.2.1.2 - Absorção

Outra forma de atenuação é a absorção do sinal pela própria água. Quando o sinal se propaga pelo meio subaquático, parte da sua energia é absorvida pela água sendo convertida em calor. Este tipo de atenuação depende de vários fatores como a temperatura, a salinidade e a profundidade. A frequência é também um fator que afeta bastante esta absorção, quanto maior for a frequência utilizada na transmissão, maior é a atenuação sofrida pelo sinal sendo que os mecanismos de relaxamento (resposta a perturbações) ao nível molecular do próprio meio também influenciam esta absorção, quanto maior for o seu tempo de resposta, menor é a sua frequência de relaxamento.

$$N_{\text{att}} = \alpha r, \quad (2.2)$$

onde:

r = distância percorrida (km)

α = coeficiente de atenuação=

$$= \left[\frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{0.70f_T f^2 (S/35)}{f_T^2 + f^2} \frac{0.03f^2}{f_T} \right] (1 - 65 \times 10^{-6}d) \text{ dB/km} \quad (2.3)$$

f = frequência (kHz)

f_T = frequência de relaxamento (kHz) = $21.9 \times 10^6 - 1.520/(T+273)$

T = temperatura (°C)

S = salinidade (partes por milhar)

d = profundidade (m)

2.2.1.3 - Perda total

$$N_T = N_{\text{spr}} + N_{\text{att}} \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

A soma destes fatores faz com que, sinais provenientes de transmissores a diferentes distâncias do recetor ou com frequências distintas de transmissão cheguem com amplitudes distintas, variação esta provocada por fatores do meio. Estes sinais podem assim chegar ao recetor com menor amplitude do que o ruído, ou do que um sinal resultante de um multicaminho provocado pela dispersão geométrica, tornando-se difícil a sua distinção pelos valores de amplitude.

2.2.2 - Velocidade de propagação

A velocidade de propagação do som na água é outra variável que depende de vários fatores. Não existindo uma fórmula exata de cálculo foram feitos estudos até à atualidade baseados numa fórmula empírica de Wilson (1960) com o objetivo de descobrir a melhor fórmula, baseado em [11] uma solução de modelação será:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016D \text{ (m/s)}, \quad (2.5)$$

que será aceitável para as seguintes gamas de valores:

T = Temperatura = 0° a 35° C

S = Salinidade = 0 a 40 partes por milhar

D = Profundidade = 0 a 1000 m

Como se pode verificar, a temperatura e a profundidade são fatores com bastante peso, tanto no cálculo da velocidade como da atenuação, para além disso o facto de existirem

zonas de diferentes temperaturas e salinidade faz com que ocorra uma estratificação da água. O que acontece é que a onda acústica, ao atravessar zonas de diferente pressão, pode ser refletida e refratada alterando a direção do sinal, ou seja, para além de se ter que fazer cálculos de distâncias com expressões aproximadas de velocidade que variam consoante o ambiente, há que ter em conta possíveis multi-caminhos resultantes desta disposição por camadas de zonas de diferente velocidade. Já se começa então a perceber a dificuldade de deteção de ondas acústicas com fiabilidade e com precisão neste meio.

2.2.3 - Multi-caminhos

Durante a propagação da onda acústica vários fatores podem provocar o desvio da sua direção fazendo com que o mesmo sinal chegue repetido e distorcido ao destino gerando erros na deteção do sinal. Pode ter origem em reflexões e refrações quando a onda atravessa zonas de temperatura, salinidade ou pressão diferentes, resultando em múltiplos caminhos. Estes multi-caminhos provocam réplicas do sinal com diferentes amplitudes que poderão induzir em erro o detetor, ou até mesmo fazer com que não ocorra receção de sinal.

A formação dos multi-caminhos varia fundamentalmente com a profundidade e as fronteiras do meio subaquático em questão e a localização do veículo recetor em relação ao transmissor. Este fenómeno tem muito mais impacto, por exemplo, em regiões de baixa profundidade com margens próximas, como rios, do que no oceano sendo que a localização relativa também pode ter influência. Alguns exemplos podem ser visualizados nas figuras seguintes. Na figura 2.6 podemos ver o impacto em termos de deteção de sinal na presença de réplicas do sinal originado e na figura 2.7 a influência de diferentes posicionamentos em relação ao transmissor[6], que poderá fazer com que o veículo nem receba sinal. Nesta última figura podemos visualizar fronteiras subaquáticas originadas por diferenças de temperatura (termoclinas), estas fronteiras fazem com que o sinal ao incidir, dependendo do ângulo de incidência, refrata ou reflita, sendo que quanto mais perpendicular ao interface menor é a reflexão, no limite é o canal vertical. Esta posição ideal é representada em Rx3, o Rx1 recebe o sinal direto assim como uma reflexão do sinal que iria para Rx2, o qual não o recebe.

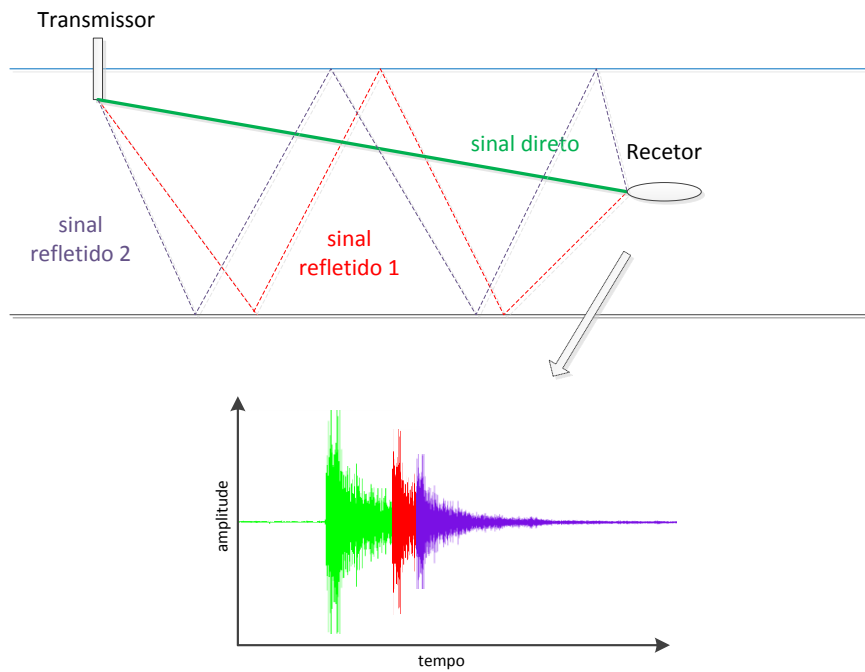


Figura 2.6 - Reflexão subaquática na superfície e no fundo com resultados de detecção.

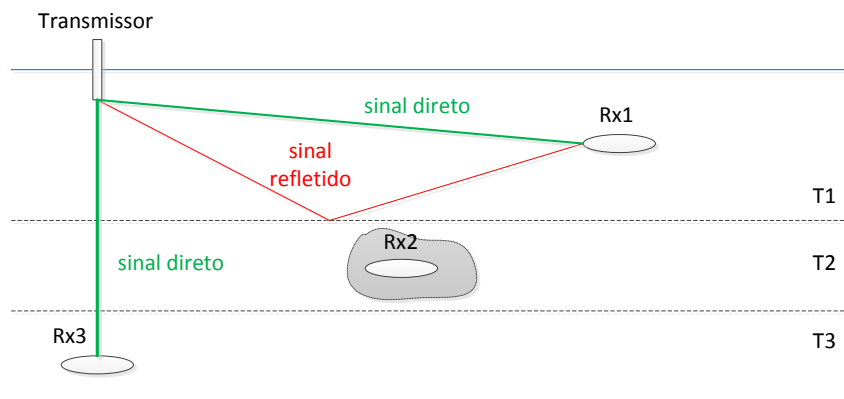


Figura 2.7 - Reflexão subaquática numa fronteira de temperatura diferente com diferentes posicionamentos do recetor.

2.2.4 - Ruído

Outro fenómeno que interfere na deteção de sinais é o ruído. O ruído é todo o sinal acústico não desejado presente no meio subaquático. Em situações normais é bastante reduzido mas na presença de certas fontes pode, no entanto, interferir na amplitude do sinal distorcendo-o para valores mais elevados e para quaisquer frequências.

Este ruído pode ser provocado por diversas fontes a várias frequências (Fig.2.8) podendo ser esporádico ou contínuo, fazendo variar de forma aleatória a sua amplitude num dado instante interferindo nas amplitudes dos sinais rececionados. O homem com os seus veículos ou a própria natureza através dos animais marinhos ou até a movimentação da água à superfície são alguns exemplos [12]. A figura 2.8 mostra, para as várias bandas de frequência,

as principais fontes de ruído no meio subaquático, o que poderá ter interesse para a escolha de frequências de transmissão mediante o meio onde o veículo opera ou para a modelação do próprio ruído.

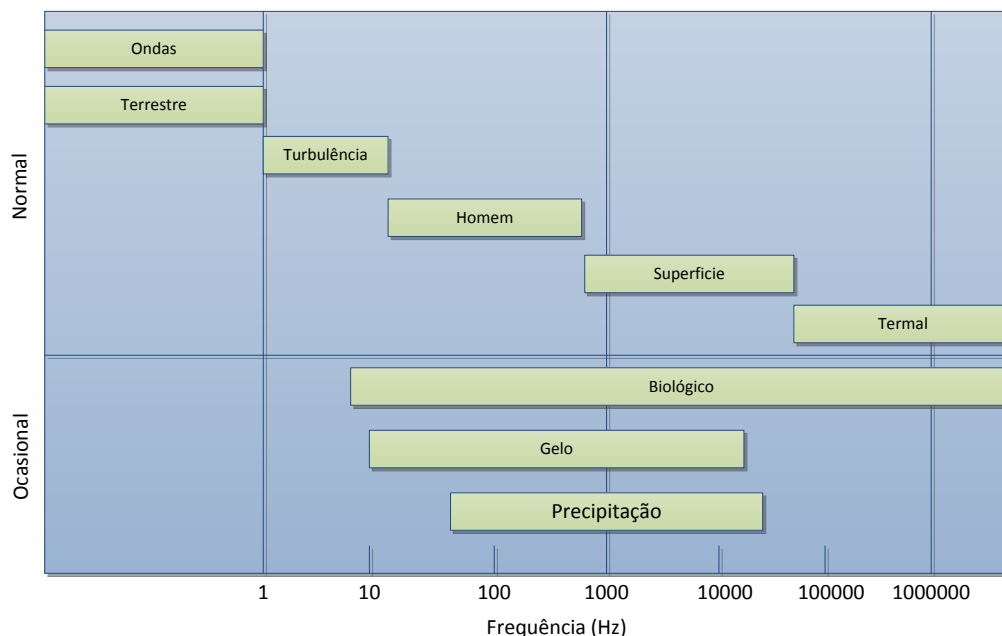


Figura 2.8 - Principais fontes de ruído subaquático.

2.2.5 - Efeito de Doppler

A movimentação relativa de estruturas subaquáticas enquanto enviam ou recebem sinais acústicos provoca a ocorrência de um desvio na frequência do sinal recebido. Este desvio é chamado efeito de Doppler e faz com que a comunicação e deteção de sinais acústicos subaquáticos possa ser bastante afetada, em particular quando a frequência dos sinais usados é diretamente explorada no processo de deteção.

Este desvio pode ser definido como, a razão entre a velocidade da fonte relativamente à velocidade de propagação da onda na água, $\Delta = \frac{\pm v}{c \pm v}$. Traduz-se então num desvio na frequência do sinal como:

$$\omega_n = \omega'_n(1 + \Delta) \text{ rad/s} , \quad (2.6)$$

onde:

ω'_n = Frequência original (rad/s)

ω_n = Frequência alterada pelo efeito de Doppler (rad/s)

No entanto, para as velocidades reduzidas com que os veículos subaquáticos autónomos geralmente operam (inferiores a 2 m/s), as consequências de variação de frequência dos sinais recebidos devido ao efeito de Doppler não são relevantes para os processos de deteção acústica referidos antes.

2.3 - Sistemas de processamento de informação

2.3.1 - Field Programmable Gate Array (FPGA) vs. Sistemas convencionais

Uma FPGA é um sistema eletrónico que permite a construção, por parte do utilizador, de circuitos digitais reconfiguráveis.

Este tipo de sistema possui uma matriz de células lógicas que permite a construção de hardware dedicado para o processamento de informação, o que faz com que a rapidez de processamento de dados seja muito elevada comparativamente a um processador convencional. O facto de se manipular bits diretamente, a possibilidade de criar caminhos paralelos para diferentes operações de processamento assim como não estar dependente da atribuição de recursos por parte de sistemas operativos, entre outras vantagens, permite um grau elevado de liberdade para aumentos de desempenho de partes específicas de sistemas.

No caso em concreto dos sistemas de localização de veículos subaquáticos pode permitir a construção de sistemas de deteção computacionalmente exigentes como os detetores coerentes baseados em correlação, sem alterar o ritmo de funcionamento do sistema onde se integra, que poderá ser baseado num processamento convencional da informação, sendo a parte dedicada à deteção acelerada pela FPGA. Além disso, a capacidade das FPGAs de poderem ser reconfiguradas de forma rápida permite que um mesmo sistema de processamento possa ser facilmente adaptado a diferentes requisitos de operação, mesmo durante a realização de uma missão.

2.4 - Trabalhos relevantes desenvolvidos na área

Esta secção tem como objetivo compreender trabalhos atuais que foram desenvolvidos na área dos sistemas de localização subaquáticos e realçar a importância do tema desta dissertação numa perspetiva evolutiva desses sistemas.

2.4.1 - *Modular Autonomous Robot for Environmental Sampling (MARES)*

O AUV MARES (Fig. 2.9) é um veículo subaquático que foi desenvolvido na FEUP pelo Ocean Systems Group, um grupo de investigação responsável pelo desenho, desenvolvimento e investigação de sistemas robóticos, com o principal objetivo de recolher dados em ambiente submarino. Este AUV foi desenvolvido numa lógica modular tanto a nível físico como de software para permitir o desenvolvimento futuro de novos subsistemas, onde se enquadra a possível inclusão de dispositivos FPGA, e facilitar a reconfiguração dos já existentes não dependendo de sistemas proprietários onde é difícil a incorporação de novos dispositivos. De seguida irão ser descritas algumas características deste veículo, realçando

em particular o seu sistema de navegação que utiliza um esquema de localização LBL com detecção de envolvente, implementado de forma puramente analógica [13].



Figura 2.9 - O AUV MARES.

2.4.1.1 - Características físicas

Das características físicas deste veículo é de salientar que a sua modularidade permite facilmente acrescentar módulos com instrumentação dedicada a diferentes missões. A existência de propulsores verticais também é uma vantagem em relação a outros AUVs na medida em que permite uma maior capacidade de manobra debaixo de água, nomeadamente pairar de forma controlável, o que é desejável para alguns tipos de operações de inspeção. As suas principais características podem ser visualizadas na tabela seguinte:

Comprimento	1.5 m
Diâmetro	20 cm
Peso no ar	32 Kg
Límite de profundidade	100 m
Propulsão	2 propulsores horizontais + 2 verticais
Velocidade horizontal	0 - 2 m/s
Energia	Baterias Li-Ion, 600 Wh
Autonomia	Cerca de 10 h

Tabela 2.1 - Características físicas do MARES.

2.4.1.2 - Características de software

O software foi desenvolvido em C++, corre no sistema operativo Linux e é também modular sendo composto por vários processos independentes dedicados aos vários módulos de hardware. A comunicação entre os módulos é feita através de *User Datagram Protocol* (UDP) podendo ser modelados segundo o esquema da figura 2.10.

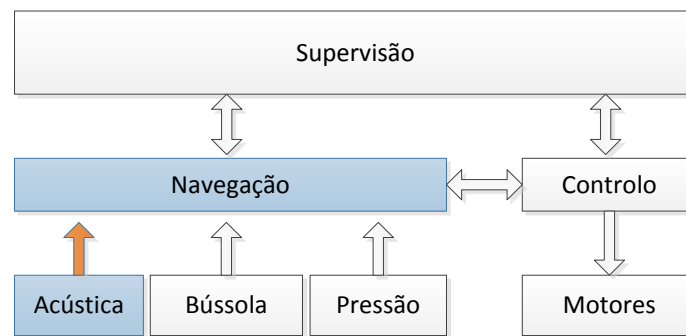


Figura 2.10 - Características de software modular do MARES.

2.4.1.3 - Sistema de deteção acústico analógico

A principal preocupação deste sub-sistema é a determinação da sua posição horizontal já que a posição vertical e a sua orientação são diretamente dados pelo sensor de pressão e pela bússola digital.

O veículo transporta um transdutor acústico omni-direccional capaz de transmitir e receber sinais acústicos sendo a sua posição horizontal estimada por um filtro de Kalman que funde dados resultantes de *Deadreckoning* e *Long Baseline* (LBL), o sistema de localização acústico utilizado.

Esta parte do sistema, responsável pela deteção e envio dos sinais acústicos, tem um papel fundamental na determinação da posição horizontal do veículo.

O AUV inquirere a boia respetiva através de um sinal numa determinada frequência, o sinal de resposta é depois enviado pela boia, através do mesmo transdutor de receção, fazendo uso de impulsos de 2 ms no canal pretendido (8 frequências possíveis) [14].

Quando o AUV recebe o sinal de resposta, o transdutor envia um sinal para um amplificador o qual amplifica o mesmo enviando-o de seguida para uma série de filtros passa-banda analógicos, construídos com elementos passivos. Estes filtros possuem um elevado fator de qualidade Q e estão sintonizados a diferentes frequências entre os 20 e os 27 kHz. São 8 no total, o que torna possível o envio e receção em 8 canais. A saída de cada filtro passa por detetores de envolvente e por circuitos de deteção, circuitos estes que verificam se o nível de deteção passou um determinado valor, valor este configurável através de potenciómetros digitais.

Estes circuitos de deteção são monitorizados por um micro-processador que possui um relógio interno de 16 bits com uma resolução de 250 μ s (4 kHz). Sempre que seja detetado

um sinal, o micro-processador regista o valor do relógio e envia-o, por porta-série, assim como qual o canal em que foi recebido, para o processador principal do MARES.

De referir também os equipamentos de suporte necessários para o funcionamento deste sistema. Para operar com o MARES é necessário, no mínimo, possuir 2 boias acústicas de navegação e um computador que comunique com essas boias e com o AUV, quando este se encontre à superfície, através de rádio, permitindo à estação de controlo acompanhar a trajetória do veículo em tempo-real.

As boias de navegação estão equipadas com transdutores multi-frequência ressonante nas frequências entre os 20 kHz e os 30 kHz, iguais ao do AUV. Tanto o veículo como as boias podem transmitir e receber em 8 frequências. Possuem também um localizador GPS e um modem rádio.

Estas boias são colocadas em posições conhecidas, formando um sistema de localização LBL, permitindo assim ao AUV triangular a sua posição. Para além de participarem na localização do MARES, também enviam dados em tempo-real para a estação de controlo. A localização GPS destas boias é também acompanhada, visto que a sua localização varia bastante durante as missões derivado do vento e das correntes marítimas. Isto serve para posteriormente tentar aumentar a precisão da localização dos veículos.

2.4.2 - Processador integrado para a navegação de AUVs

No âmbito de uma dissertação do MIEEC em 2010/2011 foi desenvolvido um sistema totalmente digital, através de tecnologias baseadas em FPGA, com o objetivo de substituir o sistema analógico descrito anteriormente, com todas as vantagens digitais inerentes, desde maior imunidade ao ruído até à maior facilidade de configurações. Este processador será descrito em detalhe de seguida realçando as suas vantagens e limitações.

2.4.2.1 - Sistema de deteção digital

O sistema de deteção baseia-se no atual sistema analógico do MARES mas implementado de forma digital. Na figura 2.11 mostra-se um diagrama de blocos do sistema de processamento da informação.

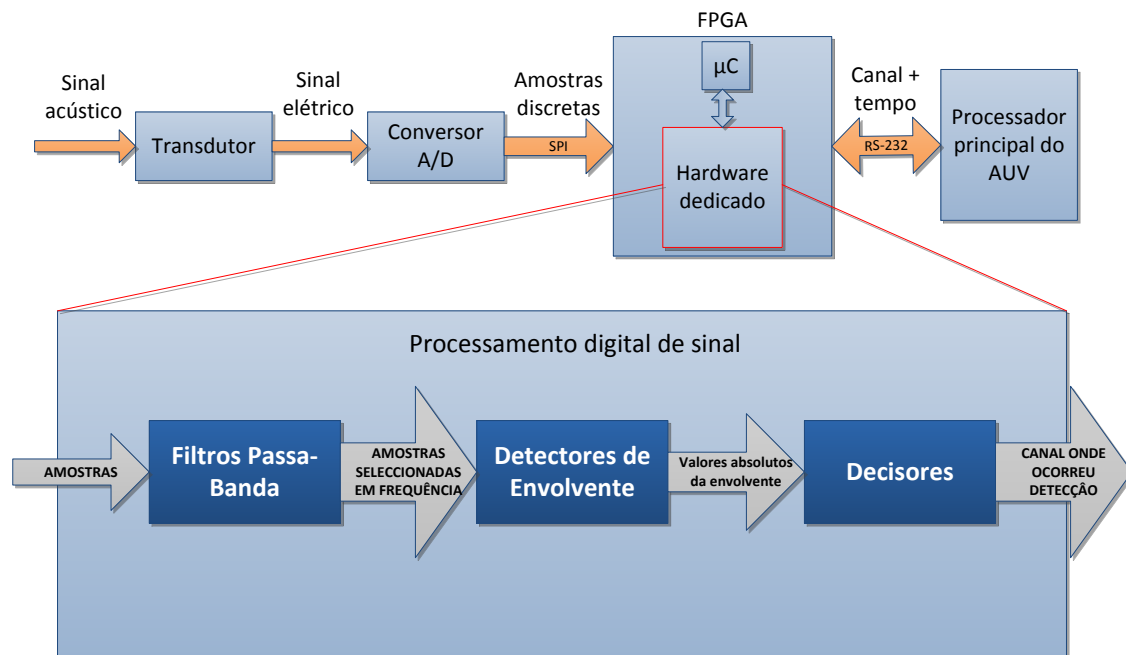


Figura 2.11 - Sistema de detecção digital inspirado no sistema atual do MARES.

O transdutor recebe o sinal acústico analógico, o qual é amplificado e amostrado de seguida para digital através de um conversor A/D (Analogico/Digital) com doze bits de resolução a uma frequência de amostragem de 100 kHz. Estas amostras são enviadas para posterior processamento na FPGA por interface série onde está implementado o circuito dedicado de detecção não-coerente. Neste bloco de processamento digital os sinais são selecionados em frequência sendo de seguida detetadas as suas envoltivas para posterior decisão acerca da detecção. A informação resultante é enviada para o processador principal do MARES para cálculo da posição [15]. De seguida apresenta-se alguma informação acerca deste bloco de processamento dedicado assim como da FPGA onde se encontra inserido.

2.4.2.2 - Processamento digital dedicado

A plataforma FPGA utilizada para a construção do bloco de processamento dedicado foi uma Suzaku SZ-130. Esta placa foi desenvolvida pela AmarkTechno e é baseada numa FPGA XILINX Spartan 3E-1200, com 32 MByte de DRAM, 8 MBytes de memória flash, e interface de rede num circuito dedicado. Esta plataforma vem acompanhada com um projeto para as ferramentas ISE/EDK da XILINX, que inclui um microprocessador Microblaze com um conjunto mínimo de periféricos e apto a executar o sistema operativo uCLinux.

O bloco de hardware responsável pelo processamento dedicado da informação possui, para além do bloco principal representado, outros blocos de suporte não representados incluindo um controlador A/D responsável por capturar as amostras vindas do conversor a uma frequência de 561 kHz o que, trabalhando a FPGA a uma cadência de 51 MHz, fornece cerca de 92 ciclos de relógio para processamento dos dados.

O primeiro bloco da cadeia principal de processamento digital são os filtros passa-banda. Estes filtros foram implementados com base numa equação às diferenças resultante do cálculo, pelo método da transformação bilinear, de um filtro digital passa-banda IIR:

$$y[n] = -a.y[n - 1] - b.y[n - 2] + c.x[n] - c.x[n - 2] \quad (2.7)$$

Foi calculado que, para cerca de 92 ciclos de relógio, recorrendo a um processamento sequencial com pipeline, daria para processar cerca de 20 frequências diferentes sendo que, no caso do MARES, apenas 8 seriam necessárias. Aqui se pode verificar a capacidade de aceleração de processamento de dados por parte de uma FPGA, utilizando o processamento em sequência. Se não fosse possível o processamento de todos os dados, a capacidade de processamento paralelo da placa, à custa de mais recursos, daria para contornar essa hipotética hipótese.

Os valores deste bloco são, de seguida, enviados para um detetor de envolvente. Este tipo de deteção consiste basicamente numa filtragem às altas frequências do valor absoluto do sinal. Em termos de implementação este bloco é semelhante ao anterior, usando mais coeficientes para o cálculo do filtro de 2ª ordem. Neste caso a deteção não se poderá basear apenas numa amostra sendo necessário guardar versões anteriores das entradas de cada detetor na BRAM. Este módulo é mais lento que o anterior sendo necessário atrasar os filtros passa-banda.

Por último os valores são comparados com os níveis de decisão e sinalizados caso ocorra deteção. Em termos lógicos consiste numa BRAM que guarda todos os níveis de deteção e um comparador. Sempre que algum dado passa acima do 1º nível de deteção, fica-se a aguardar que o sinal passe abaixo de um 2º nível de deteção, só aí é que é sinalizada uma deteção num canal. É necessário também garantir que a escolha do 2º nível de deteção tenha em conta que, em ausência de sinal, o ruído não passe acima desse nível para evitar falsas deteções. É a última etapa da filtragem do sinal amostrado.

2.4.2.3 - Limitações

Existem vários fatores que limitam a precisão e o alcance do sistema relacionados com os fenómenos subaquáticos descritos anteriormente.

Este sistema tem os seus níveis de decisão regulados para um alcance máximo. Como o sinal é atenuado com a distância o amplificador é regulado para um alcance máximo o que faz com que, para distâncias mais curtas, o sinal à entrada dos filtros sature, transformando-se numa onda quadrada. Como o ruído também é amplificado, este fenómeno não linear pode fazer com que a onda passe o zero mais cedo ou tarde que o esperado introduzindo erro na medição da distância. Para além disso a potência do ruído pode variar a qualquer altura da missão o que, não existindo nenhum mecanismo de estimação do mesmo em tempo real, pode aumentar ainda mais esse erro ou até mesmo gerar falsas deteções.

Este mesmo ruído é atenuado pelos filtros passa-banda, mas não completamente. A variação do tempo de resposta em função do ruído pode ser modelada segundo $\Delta t = \tau.e[15]$. Sendo τ a constante de tempo do filtro e o ruído, quando maior for esta constante maior será a variação do tempo de resposta dos filtros e com isso maior será o erro na medida da distância. Para ter uma constante de tempo menor é preciso uma largura de banda maior o

que leva a um aumento do ruído. Tem então que existir também um compromisso entre estes 2 parâmetros.

Para além das questões de atenuação natural e do ruído, o fenómeno dos multi-caminhos pode fazer com que ocorram falsas deteções pois uma reflexão ou refração do sinal gerado poderá possuir uma atenuação inferior à do sinal original caso, por exemplo, hajam obstáculos no caminho direto entre o veículo e a boia. Pode então ser complicado distinguir réplicas do sinal original tendo impacto direto na fiabilidade das medições dos tempos de chegada.

Voltando agora à questão do efeito de Doppler, este efeito provoca desvios de frequência mediante a velocidade a que o emissor ou recetor se deslocam. Assumindo que o AUV atinge uma velocidade máxima de 2 m/s, e que a velocidade de propagação do som na água é de, aproximadamente, 1500 m/s. Para uma frequência máxima transmitida pelo AUV de 29 kHz, pode ocorrer um desvio máximo de, aproximadamente, 39 Hz. Apesar de no processo de deteção de envolvente implementado isso se traduzir numa redução da amplitude do sinal à saída dos filtros passa-banda, esse desvio não se traduz em desvios relevantes na determinação do tempo de chegada.

Capítulo 3

Sistema desenvolvido

O sistema LBL previamente apresentado e que é utilizado pelo MARES tem como base a troca de sinais entre as boias e o veículo o que faz com que, para se calcular a posição do veículo se tenha de esperar pela resposta das boias. Isto faz com que, em ambientes onde existam múltiplos veículos, o tempo que se demora a estimar a posição com base nos instantes de detecção seja bastante elevado, sendo proporcional ao número de veículos.

Como já foi verificado, existem sistemas já implementados que se baseiam apenas no envio de sinais por parte das boias, bastando para isso o veículo saber o instante em que estes sinais foram enviados. Estando o veículo sincronizado com as boias é possível adotar este sistema fazendo com que o AUV não necessite de transmissor possuindo maior autonomia e resolução de posição. Este sistema foi então escolhido como base no desenvolvimento deste trabalho.

A maior capacidade de processamento de informação por parte das FPGA em relação aos processadores convencionais permite que seja possível pensar em esquemas de detecção computacionalmente mais exigentes e mais imunes aos problemas naturais do meio subaquático do que os sistemas normalmente implementados, baseados na detecção de envolvente.

O detetor coerente baseado em correlação é um tipo de detecção que se baseia no cálculo do produto interno entre o sinal recebido e um sinal de referência. Se estes sinais forem iguais num determinado instante irá ocorrer a geração de um pico que permitirá discriminar o instante de receção de um determinado sinal permitindo assim cálculos de localização.

Usando sinais modulados em fase que codificam sequência binárias ortogonais, é possível transmitir simultaneamente diferentes sinais na mesma frequência. Além de aumentar a imunidade ao ruído, fornece a possibilidade de transmissão de dados oferecendo também um aumento de precisão nas medidas obtidas de tempos de detecção por não estar tão dependente da amplitude como o detetor de envolvente.

O cálculo da correlação requer várias operações de multiplicação e soma de valores o que requer tempo e recursos para processamento. Como foi apresentado no processador digital do capítulo 2, a integração de uma plataforma digital baseada em FPGA neste tipo de veículos abre as portas à inclusão de técnicas mais complexas em termos de cálculo por aceleração do processamento dos dados e manipulação de bits.

De seguida será feita uma apresentação do sistema que foi desenvolvido e irá ser explicado e comprovado de que forma os métodos utilizados na transmissão e deteção do sinal contribuíram para o ultrapassar das limitações dos sistemas atuais neste tipo de veículos. Foram também desenvolvidos modelos de simulação em Matlab deste detetor e do sistema onde se insere.

3.1 - Visão geral do sistema

O esquema de deteção desenvolvido pode ser visualizado na figura 3.1:

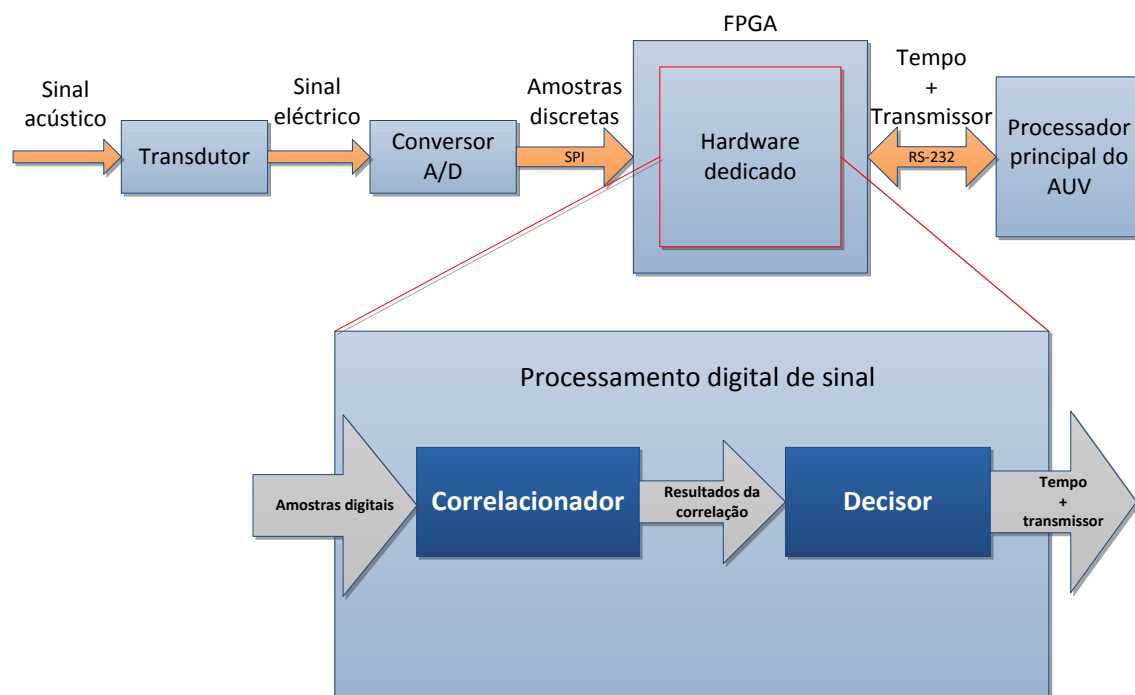


Figura 3.1 - Esquema geral do detetor coerente desenvolvido.

É um esquema semelhante ao do trabalho revisto no capítulo 2 mas com um sistema de deteção diferente e que utiliza uma placa FPGA mais simples.

O sinal acústico analógico é convertido pelo transdutor para um sinal eléctrico, o qual é amostrado e convertido para digital segundo uma taxa de amostragem de 100 kHz com uma resolução de 12 bits. Estes sinais entram na cadeia de processamento dedicada da FPGA, os quais são correlacionados com cada um dos sinais de referência a uma frequência de relógio de 100 MHz, o que faz com que, para cada amostra recebida, se possuam 1000 ciclos de relógio para efetuar os cálculos.

Os resultados da correlação são enviados para um novo bloco que decide se ocorreu ou não deteção e em que instante. Este bloco possui também um estimador que estima em tempo real a potência do sinal correlacionado. Este bloco permite estimar a potência do ruído correlacionado na ausência de sinal de forma a definir um nível de decisão que permite uma maior imunidade a falsas deteções.

Detetados os sinais é enviada a informação para o processador principal do veículo, composta pela identificação da sequência detetada e o tempo em que ocorreu o pico.

3.2 - Técnicas utilizadas

3.2.1 - Modulação BPSK

Como foi verificado na revisão do sistema implementado a bordo do MARES, este utiliza um sistema de envio de sinais em banda base, produzindo impulsos com a duração de 2 ms.

A modulação de um sinal consiste na variação de um determinado parâmetro, amplitude, frequência ou fase, de uma onda sinusoidal de uma determinada frequência ou através da variação de outros parâmetros de uma sequência de impulsos como amplitude, posição, largura ou frequência. Estas variações fazem com que o sinal original seja transportado por um outro (portadora) situado numa gama de frequências diferente adaptada ao canal de transmissão.

Nesta dissertação foi desenvolvido um sistema de deteção baseado no envio de ondas moduladas em BPSK (*Binary Shift Keying*). Este tipo de modulação digital consiste na codificação de informação binária, distinguindo 0 de 1 pela variação de fase em 180° de uma onda sinusoidal, o que corresponde apenas a trocar o sinal da amplitude (Fig. 3.2). Torna-se assim possível distinguir diferentes transmissores com diferentes códigos ou enviar outros tipos de informação para o veículo como comandos.

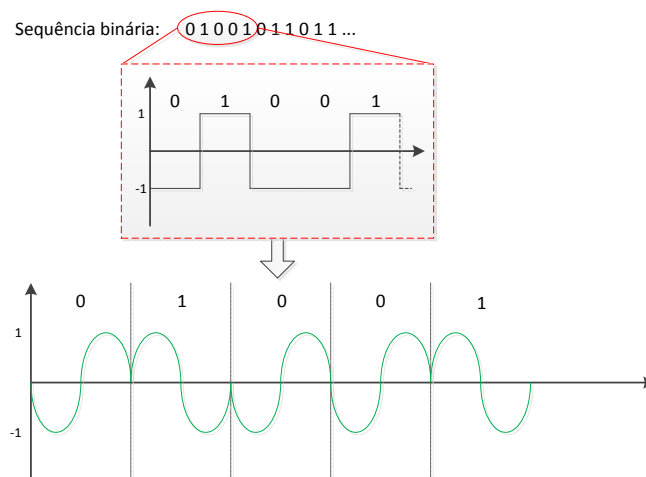


Figura 3.2 - Esquema representativo da modulação BPSK.

O facto de se utilizar a fase como parâmetro permite maior imunidade a variações não-lineares de amplitude como é o caso do canal não-linear subaquático. Este tipo de modulação apresenta também uma probabilidade de bit errado em função da relação sinal-ruído mais baixa que outras modulações PSK como DPSK (*Diferencial Phase Shift Keying*) e do que

modulações coerentes e não-coerentes FSK (*Frequency Shift Keying*) e OOK (*On-Off Keying*) [12, 16], o que significa maior robustez e detetabilidade.

3.2.2 - Correlação

Revedo o que já foi apresentado nos *matched filters* a correlação consiste num processo de cálculo que permite avaliar a semelhança entre duas funções através de um processo muito semelhante à convolução:

$$\text{corr}(s[n], r[n]) = \sum_{m=0}^w s[m].r[n + m] \quad (3.1)$$

Uma das funções vai “deslizando” sobre a outra multiplicando as amostras com o mesmo índice e somando tudo segundo o tamanho da janela. Se a dada altura as funções forem iguais irá ser gerado um pico que indicará essa semelhança.

Como a correlação é efetuada em sequências binárias moduladas em BPSK, significa que o sinal de referência que codifica uma sequência binária é uma onda sinusoidal que apenas varia a sua fase como resultado de multiplicar a amplitude por +1 ou -1, o que corresponde apenas a alterar o sinal da sua amplitude. Várias sequências binárias são assim obtidas à custa da mesma senoide base (portadora) por variação da sua fase o que significa que no processo de desmodulação todos os sinais recebidos têm de ser correlacionados com a codificação da portadora correspondente dando origem a vários correlacionadores. Como iremos verificar mais adiante na secção 3.4, este processo poderá ser otimizado através de correlações parciais e também da restrição da frequência de amostragem que irá ser introduzida de seguida.

3.2.3 - Restrição da frequência de amostragem

Uma simplificação importante que pode ser realizada consiste em estabelecer uma restrição para a frequência de amostragem que terá de ser superior em quatro vezes à frequência do sinal transmitido.

Esta simplificação faz com que o sinal de referência seja uma senoide que tem exatamente 4 amostras por período a que correspondem os valores 0, 1, 0 e -1. Assim, o cálculo da correlação requer apenas realizar o produto das amostras do sinal recebido por essas 4 amostras do sinal de referência, o que evita a necessidade de realizar multiplicações e resume o processo de correlação apenas a somar ou subtrair amostras do sinal recebido (Fig. 3.3).

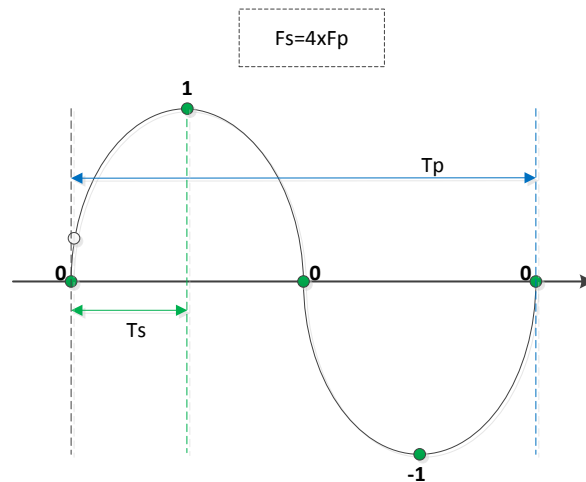


Figura 3.3 - Restrição da frequência de amostragem em relação à frequência da portadora.

3.2.4 - Modelação do ruído

A presença de ruído no meio subaquático faz com que na ausência de sinal o detetor receba sinais não desejados que irão ser correlacionados com o sinal de referência. Tem então de existir uma forma de, na ausência de sinal, o detetor não acusar a presença de picos de amplitude, o que poderá ser efetuado pela definição de níveis de decisão que garantam uma probabilidade do ruído não ultrapassar esse valor.

O ruído presente no meio subaquático pode ser modelado como ruído branco gaussiano com média nula. Assim sendo, a sua função densidade de probabilidade pode ser definida segundo a seguinte fórmula estatística:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{n^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.2)$$

onde,

- p - densidade de probabilidade
- n - valor de ruído
- σ - variância

Considerando a média do ruído nula podemos definir um determinado nível de decisão se for conhecida a variância e uma determinada probabilidade do ruído de ultrapassar esse valor.

A variância pode ser calculada somando o quadrado de todas as amostras e dividindo pelo total de amostras. Considerando a média nula a probabilidade de o ruído ultrapassar um determinado valor 'a', é dado pela função [17]:

$$Q\left(\frac{a}{\sigma}\right) = p(X > a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_a^{\infty} e^{-\frac{\lambda^2}{2\sigma^2}} d\lambda \quad (3.3)$$

Esta função encontra-se relacionada com a função de erro do matlab $\text{erfc}(x)$ da seguinte forma:

$$Q\left(\frac{a}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (3.4)$$

Com o conhecimento da probabilidade de detetar ruído que se pretende e da variância, pode-se definir o nível de decisão:

$$a = \sqrt{2\sigma^2} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}\left(2 \cdot Q\left(\frac{a}{\sigma}\right)\right) \quad (3.5)$$

A variância é calculada dinamicamente para uma determinada janela de amostras o que permite uma definição do nível de decisão em tempo-real. Contudo, para aplicação no circuito digital, devido à complexidade da equação, esta foi aproximada por funções lineares obtidas à custa de regressão linear de pontos da função, para gamas de vários valores de variância. Assim sendo, a cada gama de valores de variância corresponde uma equação de reta mais simples de cálculo. As gamas de valores foram escolhidas com base em sinais reais de ruído gravados num ensaio de campo realizado no rio Douro.

3.3 - Modelos de simulação Matlab

Com base nos conhecimentos previamente apresentados foram desenvolvidos modelos de Matlab de um sistema de localização LBL constituído por 3 transmissores e 1 veículo recetor. Estes modelos parametrizáveis simulam a transmissão de dados, as alterações que estes sofrem ao atravessar o canal acústico subaquático assim como o detetor coerente idealizado, fornecendo uma base de cálculo e de comparação de resultados com o sistema real desenvolvido (Fig.3.4). De seguida irão ser apresentadas as funções realizadas de modelação deste sistema assim como os resultados obtidos.

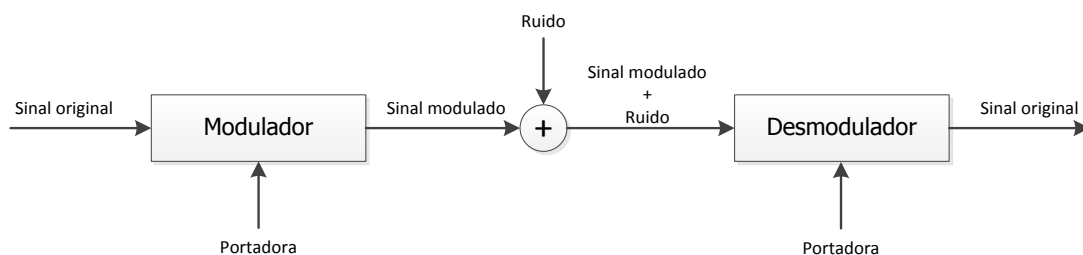


Figura 3.4 - Esquema geral do modelo de comunicação desenvolvido.

3.3.1 - Transmissão e propagação dos sinais

Inicialmente foi desenvolvida uma função responsável por gerar sinais BPSK, com base em sequências binárias geradas aleatoriamente. Estes sinais seriam afetados de ruído gaussiano branco segundo uma determinada potência de ruído apresentando-se à sua saída um sinal modulado afetado de ruído. Os valores do comprimento da sequência binária, assim como o

número de períodos da senoide portadora presentes em cada bit e o número de amostras por período eram parâmetros que poderiam ser alterados assim como a relação sinal-ruído presente no canal.

Como ao longo do trabalho foi sempre utilizado o mesmo comprimento do sinal modulado consideramos esses parâmetros constantes, mantendo-se apenas o parâmetro da relação sinal-ruído.

Um modelo de transmissão baseado apenas nestes parâmetros seria demasiado simples, não representando a realidade de um canal subaquático visto que este sofre atenuação assim como atrasos mediante a distância do recetor ao transmissor, que são essenciais no cálculo da localização. Para além disso, a escolha das sequências binárias geradas possui um papel importante em termos de qualidade das correlações cruzadas e na auto-correlação no recetor, pelo que sendo aleatórias não é garantida máxima qualidade neste processo.

Assim sendo, o modelo transmissor inicialmente desenvolvido deu origem a um modelo mais sofisticado e adaptado à realidade do trabalho.

Este novo modelo gera sequências binárias Kasami [18], que possuem a particularidade de gerar valores baixos de correlação cruzada em relação a outros tipos de sequências. Mediante a escolha da distância a cada um dos transmissores, este modelo também atrasa e atenua os sinais segundo as equações de velocidade e atenuação apresentadas no capítulo 2. De referir também que o sistema foi desenvolvido numa ótica de não-interferência entre sinais, pelo que cada transmissor possui uma janela temporal bem definida dentro da qual o veículo recetor poderá detetar o sinal. A suposição de que 2 sinais poderiam chegar ao mesmo tempo teria influência na precisão dos cálculos e implicaria cálculos mais complexos de energia base dos sinais por conhecimento da distância atual do veículo, pelo que não se optou por este caminho.

Os sinais gerados por este modelo são também exportados para ficheiro de forma a serem utilizados na simulação do circuito digital desenvolvido assim como as sequências binárias de referência.

Na figura 3.5 poderemos visualizar uma das sequências binárias Kasami utilizadas, e sua representação na modulação BPSK (3 períodos por bit) para os primeiros 4 bits. De salientar, as variações de fase visíveis do sinal modulado, características dos sinais BPSK.

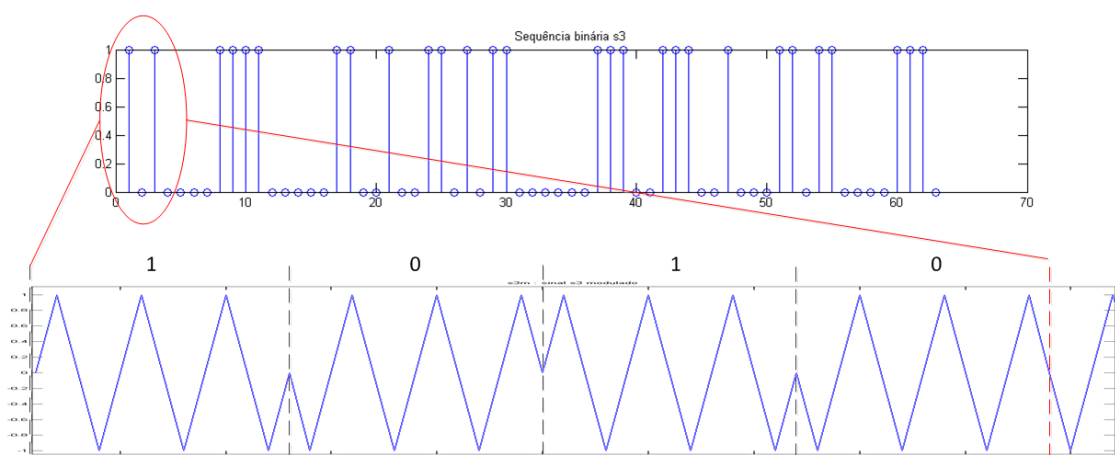


Figura 3.5 - Sinal BPSK transmitido com base numa sequência Kasami.

Foi simulado um cenário em que se encontra um veículo recetor e três faróis de transmissão, em que cada farol está posicionado a uma distância distinta do veículo (100 m, 50 m e 20 m) (Fig. 3.6).

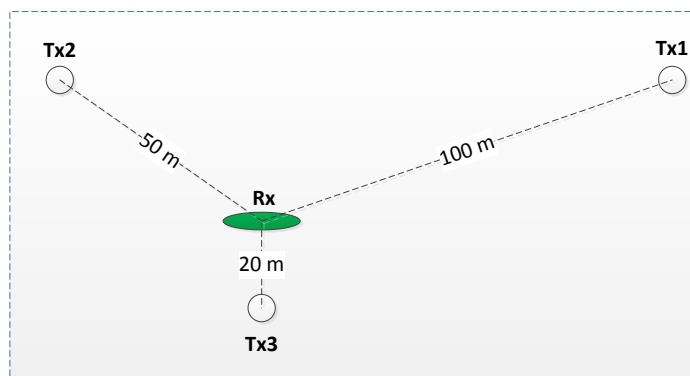


Figura 3.6 - Cenário simulado de transmissão e recepção dos sinais BPSK em ambiente subaquático.

Na figura 3.7 podemos visualizar os sinais recebidos pelo veículo, afetados com ruído e atraso em cada janela temporal (por questões de simplicidade de visualização excluíram-se as atenuações dos sinais), assim como os sinais gerados pelos transmissores.

Para o cálculo da velocidade, utilizada para simular os atrasos, foi utilizada a equação mencionada no capítulo 2 para as condições de frequência de 25 kHz, temperatura de 13° C, uma salinidade de 35 ppm (partes por milhar) e uma profundidade de 10 m.

A azul encontra-se a geração dos sinais em janelas temporais distintas por cada um dos 3 transmissores com uma periodicidade gerada de acordo com um alcance máximo de 200 metros do veículo a cada farol, contando também com o tempo que demora a ser gerado o sinal e algum tempo para que se dissipe ao ser recebido, por causa dos efeitos da reverberação (na realidade, a duração do espaço de tempo alocado a cada canal depende da distância entre as boias transmissoras, o que não foi tido em conta para efeitos exemplificativos):

$$\frac{756\text{amostras}}{100k} + \frac{200}{1500} + 3 \cdot \frac{756\text{amostras}}{100k} \cong 0.16 \text{ segundos} \quad (3.6)$$

Os 100 kHz correspondem à frequência de amostragem e os 1500 m/s à velocidade aproximada do som.

A vermelho encontram-se os mesmos sinais afetados de ruído com uma relação sinal-ruído de 20 dB (potência do ruído inferior em 10 vezes a potência do sinal) e atrasos para distâncias respetivas de 100, 50 e 20 metros do veículo a cada transmissor.

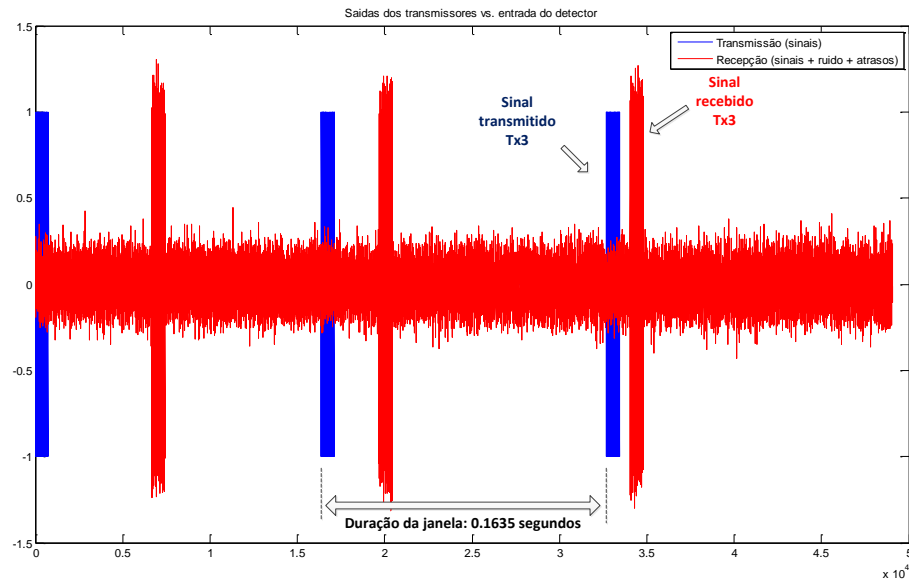


Figura 3.7 - Janelas temporais de cada transmissor e sua recepção pelo veículo.

3.3.2 - Detecção dos sinais

Para efetuar a detecção dos sinais foi desenvolvido um modelo que recebe os sinais com os atrasos e afetação de ruído gerados anteriormente e estima a distância a que estes se encontram da fonte por detecção do valor máximo do resultado da correlação. Neste modelo de simulação não está presente a estimação de ruído no bloco de decisão pelo que apenas se efetua uma busca pelo máximo ao longo do período de tempo alocado a cada canal. Pretende-se apenas realçar a precisão de detecção na presença de ruído, sem haver, para já, preocupação com falsas detecções, assumindo que ocorre sempre recepção de sinal em cada janela.

Mais adiante, na simulação com sinais reais gravados num ensaio de campo no rio Douro, irá estar presente um bloco de estimação de ruído, sobre o qual irão ser realçadas vantagens.

Neste modelo foram implementadas as ideias de cálculo de correlação parcial podendo ser visualizado na figura 3.8 os resultados para cada sequência Kasami base correspondente a cada transmissor.

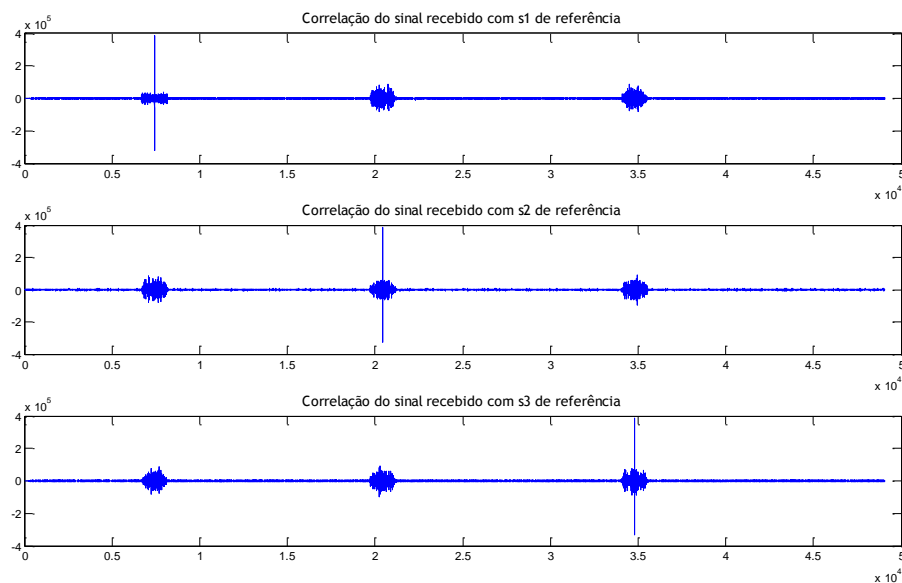


Figura 3.8 - Resultados da correlação para cada sequência de referência para uma relação sinal-ruído de 20dB.

Pode-se verificar que, para cada detetor correspondente, é gerado um pico de correlação no instante em que os sinais são iguais. Realizando os cálculos com base nos instantes detetados são gerados os valores de 99,98 m para o 1º transmissor, 49,98 m para o 2º e 19,99 m para o 3º. O pequeno erro verificado prende-se com arredondamentos efetuados na transposição das distâncias para os instantes temporais, cujos valores têm de ser inteiros.

Efetuuou-se também um teste à sua imunidade ao ruído considerando uma relação sinal-ruído de -10dB (potência do ruído superior em, aproximadamente, 3 vezes a potência do sinal). Pode-se verificar que os sinais recebidos ficam completamente “mergulhados” em ruído (Fig.3.9).

Para se visualizar bem essa dificuldade de distinção de amplitudes, na figura 3.10 podemos comparar uma parte de um dos sinais recebidos com ruído bastante baixo (relação sinal-ruído de 100dB) e a mesma porção de sinal com relação sinal-ruído de -10db. Enquanto que, para o gráfico superior, é possível distinguir bem o ruído do sinal, no gráfico inferior não é possível, por observação das amplitudes, efetuar essa distinção.

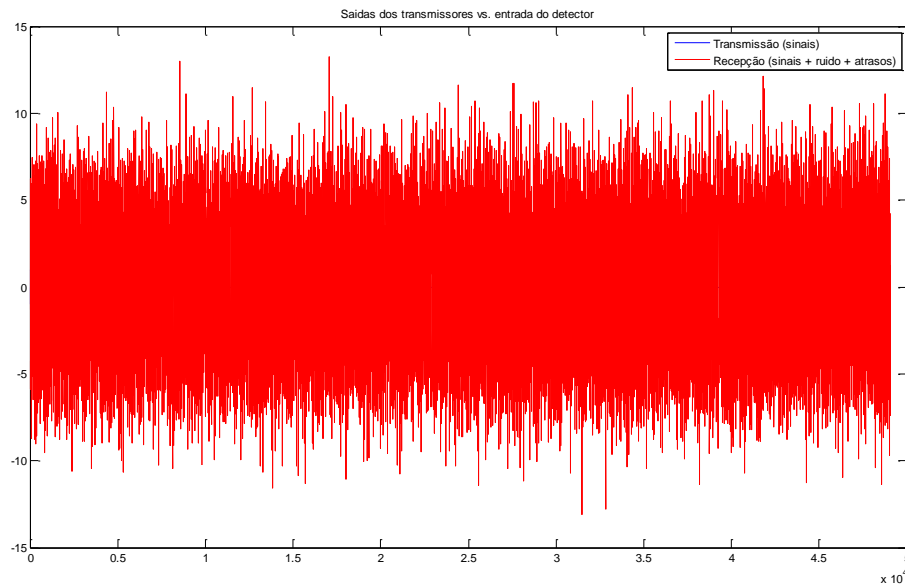


Figura 3.9 - Sinal “mergulhado” em ruído à entrada do detetor.

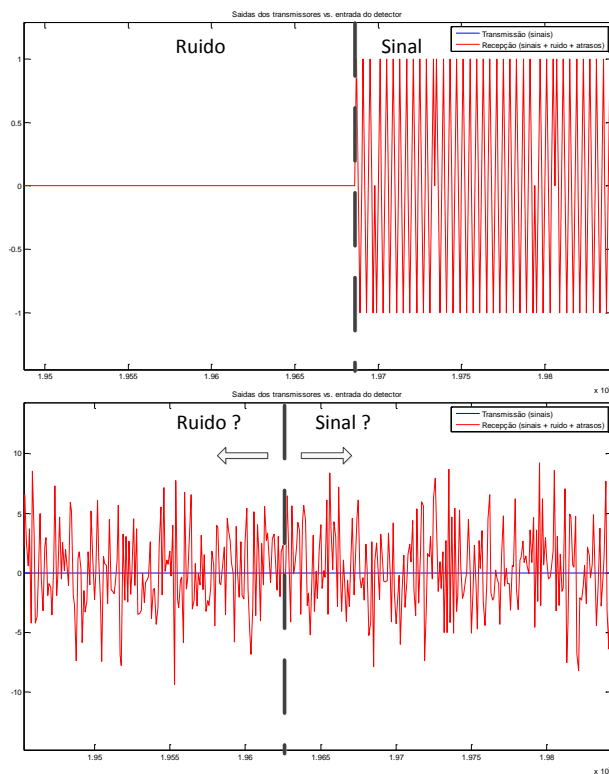


Figura 3.10 - Distinção de ruído e de sinal por comparação de amplitudes para uma relação sinal ruído de 100dB e outra de -10dB.

Na figura 3.11 encontram-se os resultados da correlação onde podemos verificar que os picos da correlação continuam bem definidos o que ilustra a grande imunidade deste sistema às alterações de precisão e detetabilidade provocadas pelos fenómenos subaquáticos de alterações de amplitude. Seria impossível para um detetor de envoltório detetar sinal nestas condições.

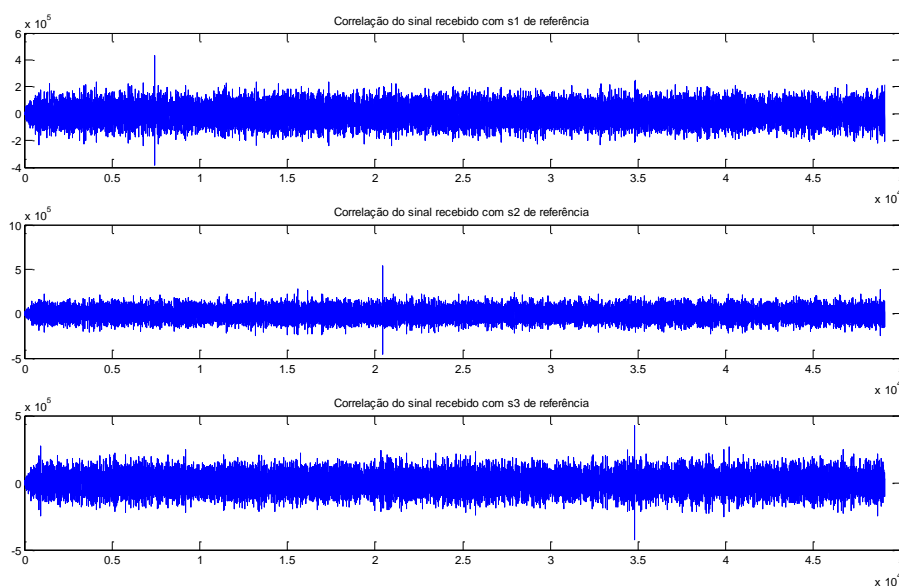


Figura 3.11 - Resultados da correlação para cada sequência de referência para uma relação sinal-ruído de -10dB.

Os resultados presentes nestes modelos irão servir de base de comparação com os resultados obtidos com o circuito digital desenvolvido, que irá ser apresentado de seguida.

3.4 - Circuito de deteção digital

O circuito de deteção digital foi elaborado, recorrendo à linguagem de descrição de hardware Verilog e implementado numa plataforma com uma FPGA XILINX Spartan3E. Este sistema implementa um processo de cálculo de correlação que permite uma deteção robusta de sinais para múltiplos transmissores à custa de um número de recursos lógicos reduzido, possibilitando com isso a utilização de dispositivos FPGA de baixa capacidade e consumo reduzido de energia. Este último aspeto é fundamental para a integração em veículos autónomos de pequenas dimensões como é o caso do AUV MARES que motivou este desenvolvimento.

Para além disso, fazendo uso da reconfigurabilidade dos dispositivos FPGA, foram parametrizadas várias variáveis o que permite, em tempo-real, alterar o circuito desenhado de forma a suportar novas condições de transmissão como, por exemplo, alterar a dimensão das sequências. O futuro suporte de novos transmissores através da adição de mais correlacionadores de forma também parametrizável é uma possível evolução.

Este circuito foi também testado através da elaboração de modelos de verificação com recurso aos ficheiros gerados pelo Matlab, e também com base em sinais reais captados em ensaios de campo.

Revedo o que foi apresentado anteriormente este sistema baseia-se em 2 blocos principais de processamento, o correlacionador e o decisor (Fig.3.12). Estes blocos serão descritos em detalhe de seguida.

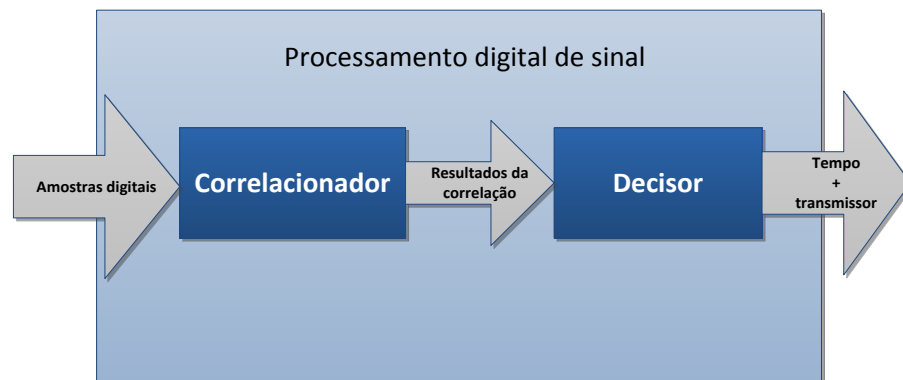


Figura 3.12 - Esquema do sistema dedicado de detecção coerente do sinal.

3.4.1 - Correlacionador

Relembrando o que já foi apresentado, o processo de correlação consiste na comparação de uma sequência de amostras recebidas com uma sequência de referência. Durante este processo as amostras recebidas são desmoduladas por multiplicação com a portadora de referência. Ao considerar a frequência de amostragem 4 vezes superior à frequência da portadora a multiplicação é efetuada pelos valores 0, 1, 0 e -1, o que pode ser feito de forma eficiente por um bloco multiplexador. O esquema da figura 3.13 mostra um diagrama de blocos do correlacionador implementado.

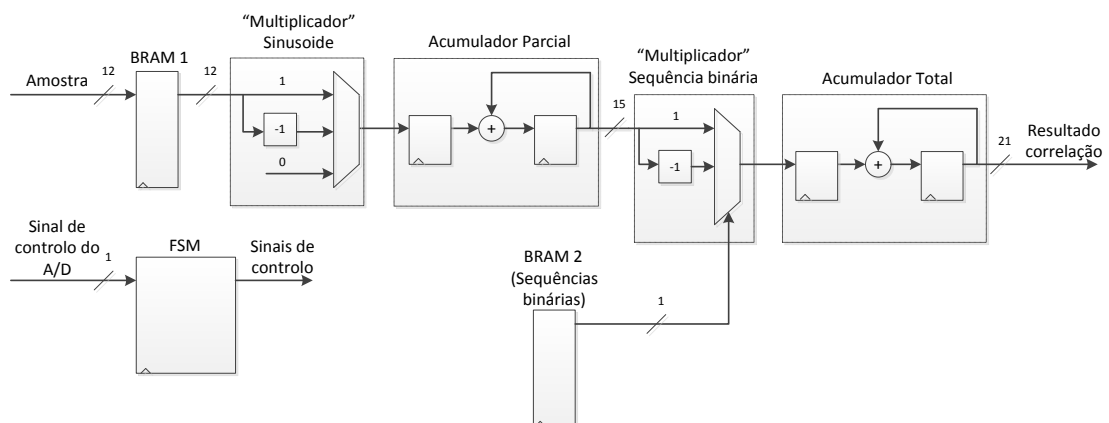


Figura 3.13 - Correlacionador para uma sequência de referência.

As amostras de 12 bits chegam do conversor A/D a uma frequência de 100 kHz, sendo também gerado um sinal digital de controlo que indica que a amostra está disponível para ser capturada. Todas as amostras são escritas numa memória RAM que tem de ter, no mínimo, capacidade para o número de amostras do sinal de referência com o qual é realizada a correlação. Neste trabalho foram adotadas sequências binárias de 63 bits em que cada bit tem uma duração igual a 3 períodos da portadora. Sendo a frequência de amostragem igual a

4 vezes a frequência da portadora, o sinal completo a processar é composto por um total de $63 \times 3 \times 4 = 756$ amostras.

Como o circuito trabalha a uma frequência de relógio de 100 MHz, o período de amostragem (10 μ s) corresponde a 1000 ciclos de relógio durante os quais deve ser completada uma correlação. A construção de vários correlacionadores que processem o sinal recebido com diferentes sinais de referência pode ser feita de forma a que operem em paralelo sem que isso afete o desempenho temporal do sistema.

A memória BRAM1 implementa uma FIFO (*First-in-First-out*) que mantém as 756 últimas amostras recebidas. O esquema da figura 3.14 traduz o comportamento dessa fila em cada instante de recepção de uma nova amostra, exemplificando para um tamanho de fila de 12 amostras.

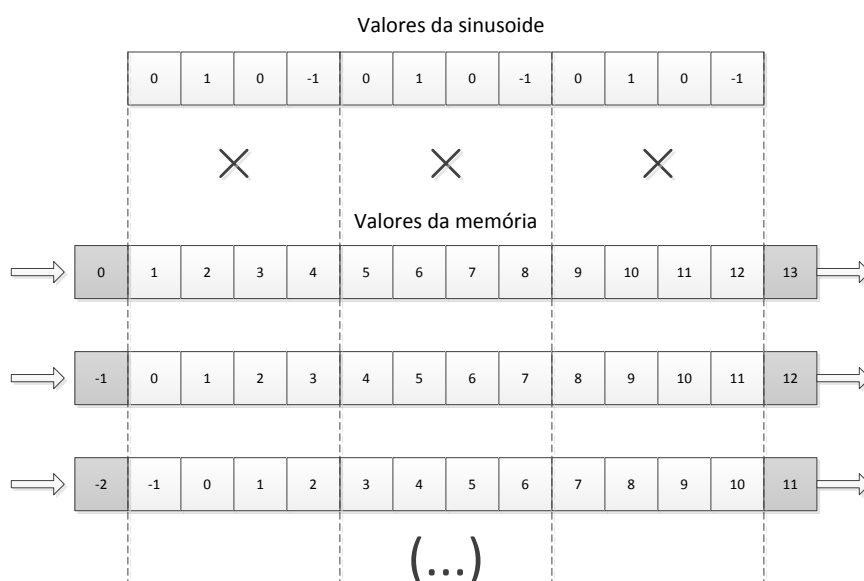


Figura 3.14 - Comportamento da fila FIFO para cada instante de recepção de uma nova amostra.

Entre cada intervalo de recepção de uma nova amostra os cálculos de multiplicação entre as amostras presentes na fila e a senoide base são realizados de forma comum a todos os sinais de referência. O facto de se possuir uma relação entre a frequência da portadora e a frequência de amostragem de 4x faz com que as multiplicações sejam reduzidas apenas a trocas de sinal, sinal original ou sinal nulo, não necessitando por isso de multiplicações.

Este troço de circuito comum de correlações parciais fica assim reduzido a um multiplexador e um acumulador.

Por cada bit de informação (12 amostras, correspondentes a 3 períodos da portadora) é então gerado um resultado de correlação parcial que irá ser multiplicado por cada bit de cada sequência binária de referência. Mais uma vez, como se trata de sinais BPSK, as mudanças de fase que codificam cada bit traduzem-se apenas numa mudança ou não de sinal desse valor de correlação parcial (0 multiplica por -1 e 1 multiplica por 1). Os valores das correlações parciais são assim multiplicados pelos bits de cada sequência binária sendo esses valores acumulados para gerar os resultados das correlações com cada sequência binária.

Isto traduz-se num esquema paralelo de 1 multiplexador e 1 acumulador por cada sequência a detetar o que, em termos de recursos ocupados na FPGA é muito baixo. Pode-se assim ter um número elevado de sequências a detetar suportadas neste tipo de esquema digital (Fig. 3.15). As sequências binárias de referência estão guardadas numa memória com M palavras de N bits (BRAM2 no esquema da figura 3.14). Nesta memória, o conjunto dos bits b_k ($k=0,N-1$) das M palavras armazenadas nessa memória representa uma das N sequências binárias com M bits com as quais é realizada a correlação. Esta organização simplifica o processo de geração das várias correlações pois, de cada vez que se lê a memória, acede-se em paralelo a todos os bits necessários para todas as correlações (Fig. 3.16).

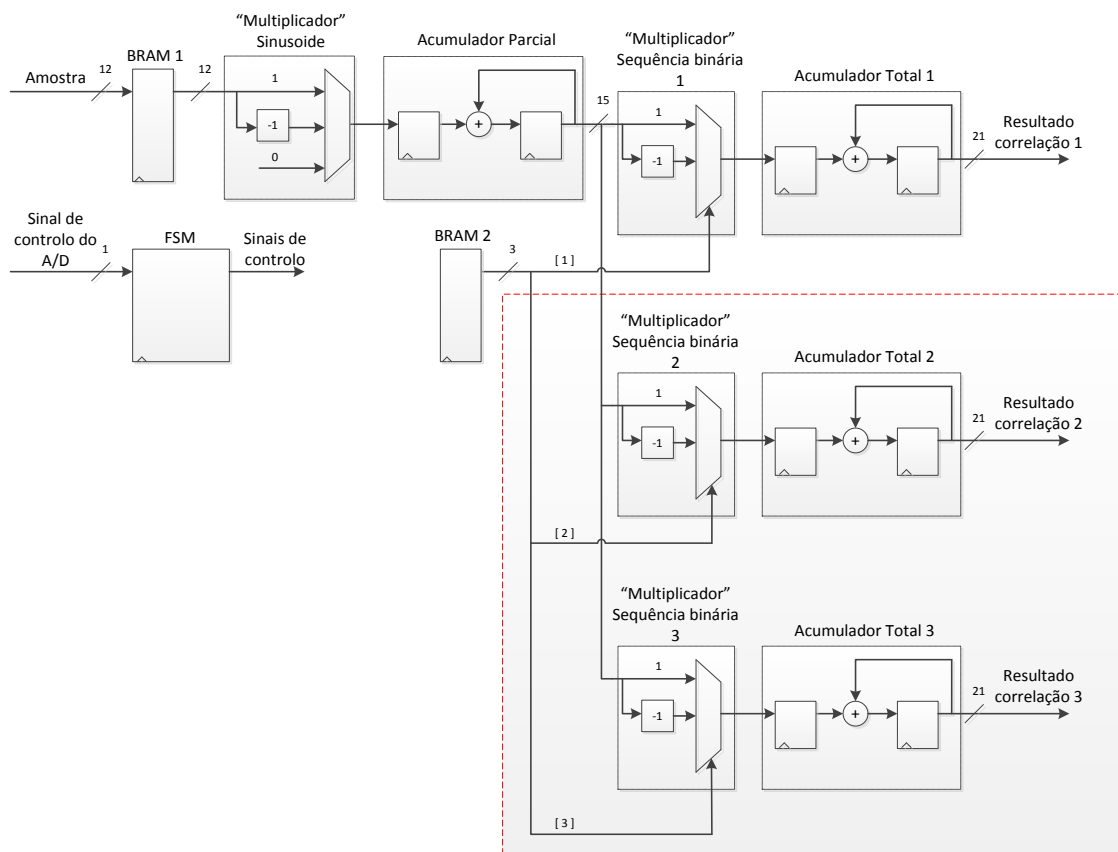


Figura 3.15: Correlacionador para 3 sequências de referência.

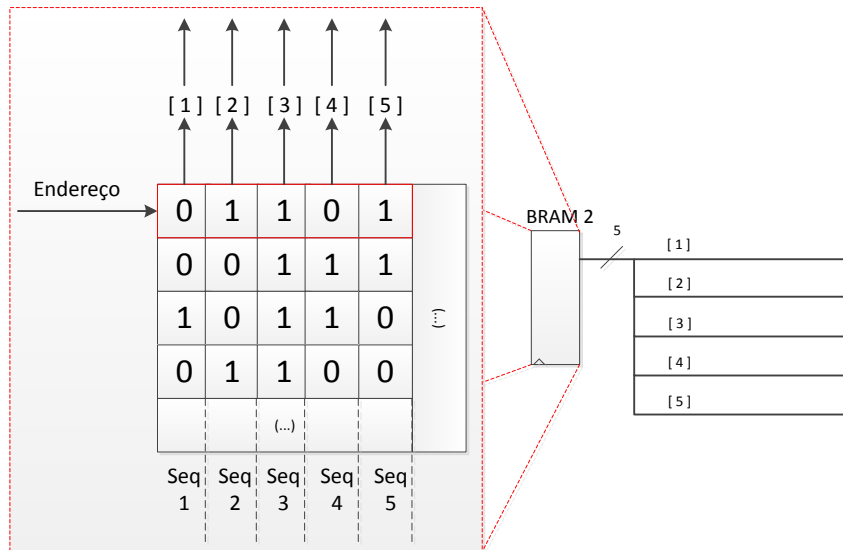


Figura 3.16 - Disposição das sequências na BRAM2 por colunas.

A controlar todos estes blocos foi desenvolvida uma máquina de estados. É de referir também que todos os cálculos de correlação que não dependam da nova amostra são realizados antes desta chegar, o que faz com que, após a chegada de uma nova amostra demore apenas 5 ciclos de relógio a gerar um resultado de correlação, sendo que todos os outros cálculos demoram 935 ciclos. Este tempo de cálculo poderá, posteriormente, ser reduzido para metade já que as multiplicações por 0 estão a ser realizadas, o que não é necessário. Pode-se assim reduzir a frequência de relógio da FPGA para metade reduzindo o consumo elétrico

3.4.2 - Decisor

O decisor (Fig.3.17) é o bloco responsável por processar os dados provenientes de cada saída do correlacionador de modo a decidir se alguma sequência foi transmitida, qual foi o transmissor e em que instante de tempo foi recebida. Este bloco inclui uma unidade para cálculo de estimativa da potência do ruído de correlação que gera um nível de decisão com base na probabilidade de deteção de ruído. Sempre que o valor de correlação ultrapasse este nível os decisores irão procurar numa determinada janela temporal o valor máximo para cada saída de correlação, evitando assim a deteção de máximos locais de apenas ruído. O sinal detetado irá possuir um pico bem definido em relação às outras correlações o que fará com que seja identificada a transmissão sendo enviado também o instante em que ocorreu.

Para determinar o tempo de chegada de um sinal acústico, os máximos das correlações devem ser anotados com o instante de tempo em que ocorreram. Para isso, cada bloco calculador de máximo inclui um contador que é iniciado através de um sinal de sincronismo enviado pelo AUV.

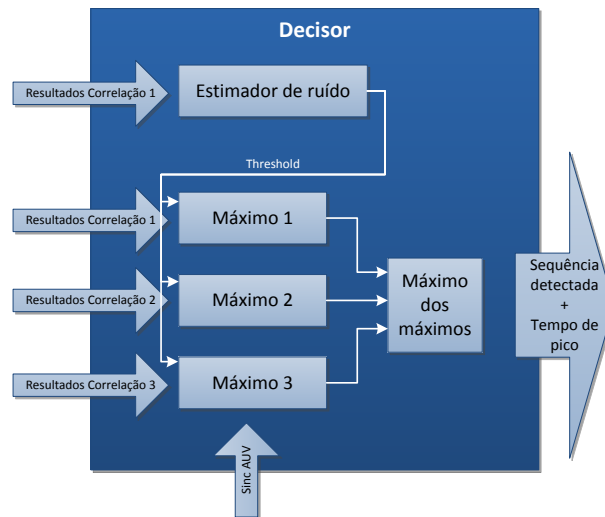


Figura 3.17 - Organização interna do bloco decisor.

A figura 3.18 mostra um diagrama de blocos detalhado do bloco decisor.

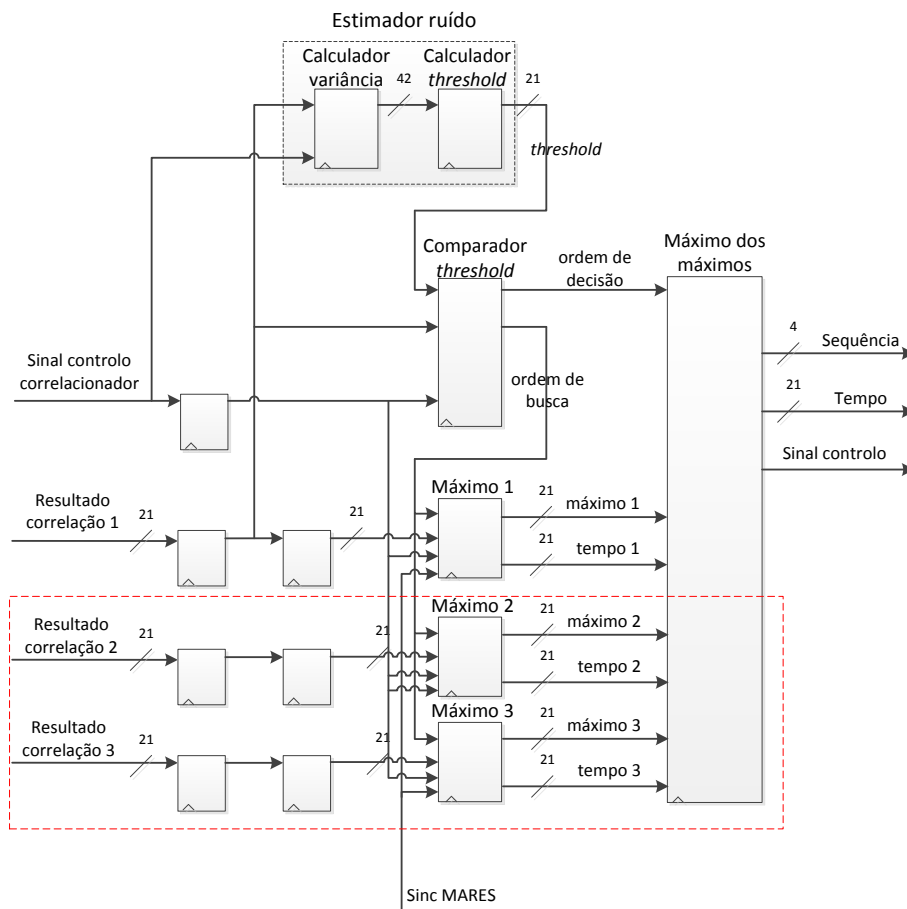


Figura 3.18 - Decisor para 3 sequências de referência.

O correlacionador envia um sinal ao decisor que indica que a correlação está pronta a ser captada. O decisor envia o valor para uma fila de memória, semelhante à que foi implementada no correlacionador, existente no bloco de estimação do ruído. Esta fila serve para efetuar o cálculo da variância que é um pouco mais complexo que os cálculos anteriores porque implica multiplicações. Este cálculo baseia-se no produto interno dos resultados da correlação utilizando uma janela de 1024 resultados para facilitar os cálculos aritméticos, visto que uma divisão por 1024 corresponde a shiftar um número binário 10 bits para a direita. Após calcular a variância, a equação que foi calculada anteriormente e permite calcular o nível de decisão para uma determinada probabilidade de detetar ruído é aproximada por troços lineares, recorrendo a regressão linear para diferentes valores de variância.

Relembrando a equação que relaciona a variância com o nível de decisão (Fig.3.19):

$$a = \sqrt{2\sigma^2} \cdot \text{erfc}^{-1} \left(2 \cdot Q \left(\frac{a}{\sigma} \right) \right), \quad (3.7)$$

Esta equação foi aproximada recorrendo ao método da regressão linear que consiste em aproximar um conjunto de pontos de uma função através de uma recta, desta forma, torna-se mais simples a sua implementação em circuito digital. Estas aproximações foram efectuadas para 8 gamas de valores de variância (Fig.3.20).

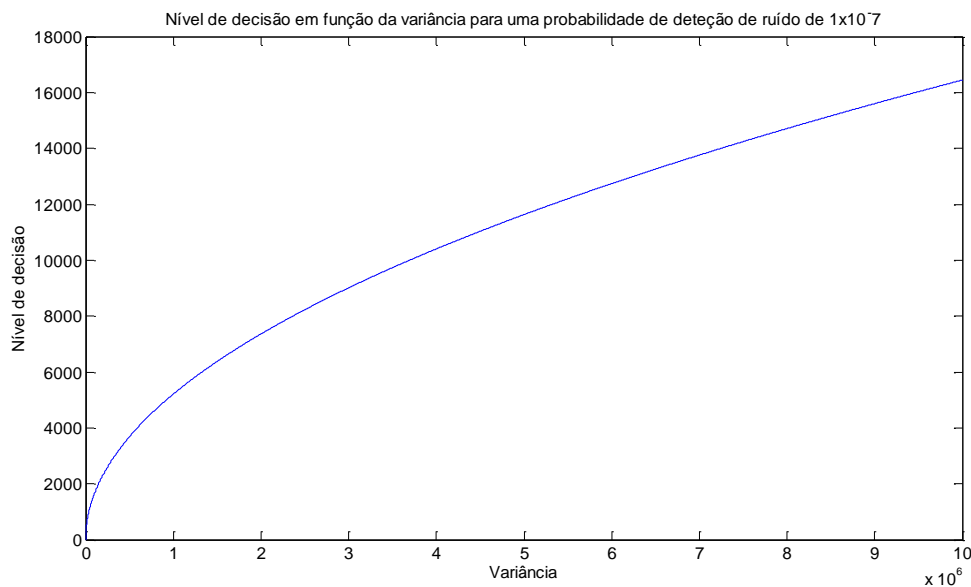


Figura 3.19 - Nível de decisão em função da variância para uma probabilidade de detecção de ruído de 1×10^{-7} .

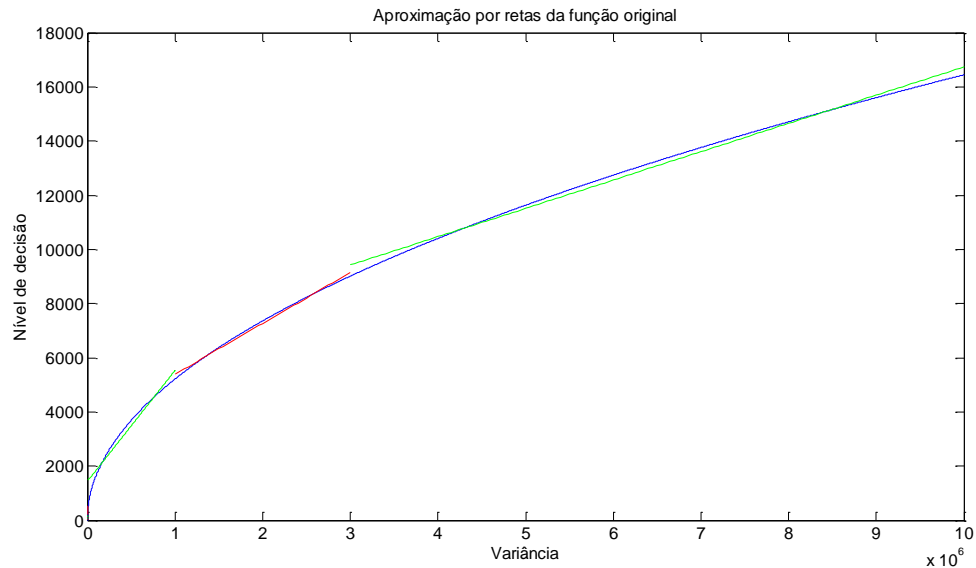


Figura 3.20 - Aproximação por retas do nível de decisão em função da variância para uma probabilidade de detecção de ruído de 1×10^{-7} .

Deste bloco sai o nível de decisão que irá ser utilizado para o bloco comparador decidir se a janela de busca vai ser iniciada ou não, basicamente este é o bloco de controlo do decisor.

Após receber um novo valor de correlação, demora 3 ciclos de relógio a ser gerado um nível de decisão. Após este tempo esse nível é comparado com esse mesmo valor e é decidido se vai ocorrer uma busca ou não. Se a busca for iniciada é dada ordem aos blocos de cálculo de máximo, em paralelo, para que coloquem os seus máximos atuais a zero e iniciem a pesquisa. Durante a busca é calculado o máximo numa determinada janela temporal de forma a detetar o pico de correlação. O valor mínimo desta janela deverá, idealmente, ser igual ao comprimento da sequência sendo que, quanto menor for, mais imune será aos efeitos dos multi-caminhos capturando apenas o primeiro pico de correlação. Após concluir a janela de pesquisa o bloco comparador dá ordem para que se decida qual dos máximos atuais é o maior, decidindo qual foi a sequência transmitida e o tempo em que ocorreu.

Na geração deste tempo encontram-se contadores em cada um dos blocos de cálculo do máximo sendo que estes são colocados a zero sempre que seja recebido um sinal de sincronismo por parte do processador principal do AUV.

3.4.3 - Simulações

As amostras geradas anteriormente pelo Matlab irão ser utilizadas para simular a recepção de dados por parte do circuito desenvolvido. As amostras captadas a uma distância de 100, 50 e 20 m de cada um dos transmissores foram usadas na simulação do sistema desenvolvido, com uma relação sinal-ruído de 20 dB, o qual gerou resultados de correlação exatamente iguais aos do detetor desenvolvido em Matlab (Fig 3.21). Os instantes de detecção gerados foram os mesmos com a respetiva indicação da sequência detetada, comprovado pela verificação do erro absoluto entre os dois conjuntos de resultados o que é inferior a 1.2×10^{-10}

(ou um erro relativo máximo de 0.3×10^{-15}). Na figura 3.22 mostra-se o erro absoluto relativo à correlação com a primeira sequência.

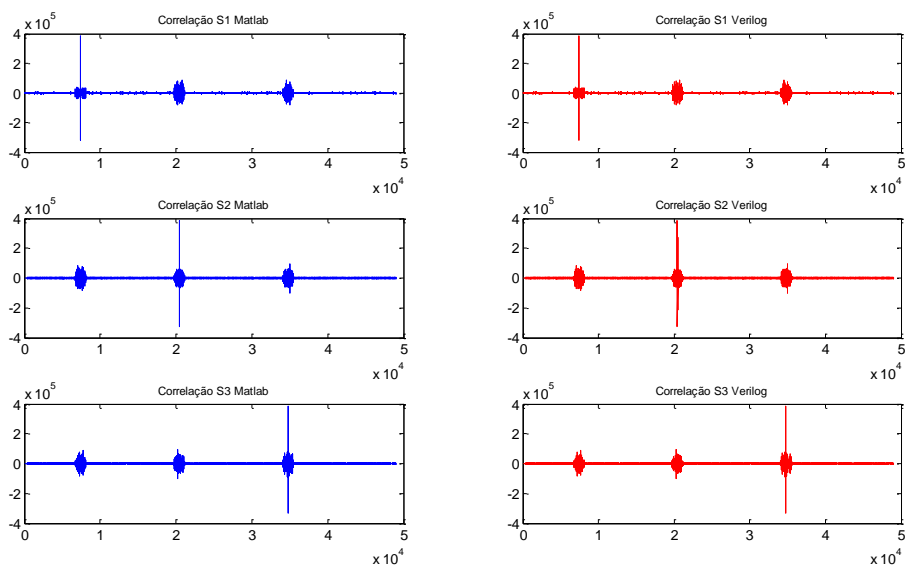


Figura 3.21 - Resultados da correlação no modelo Matlab e no modelo Verilog.

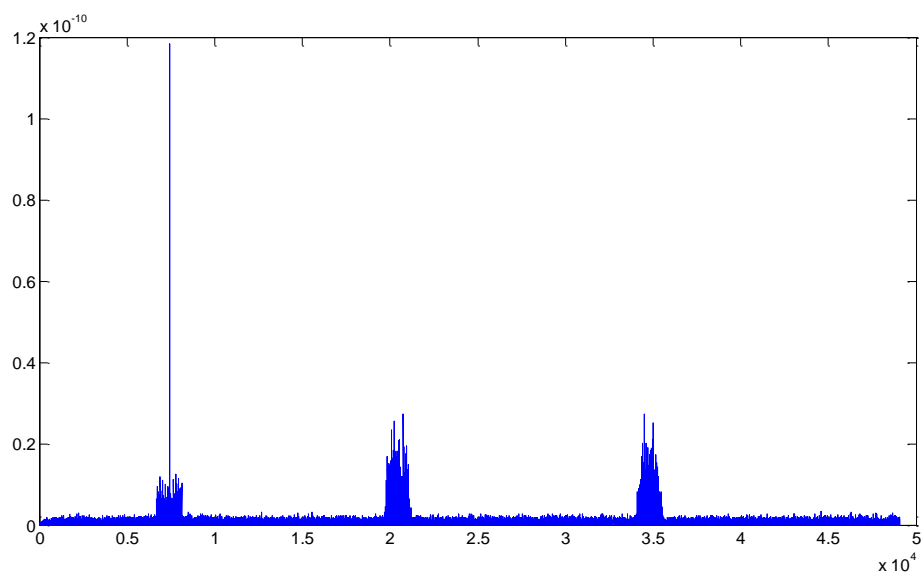


Figura 3.22 - Gráfico de erro absoluto entre os resultados gerados pelo Matlab e pelo Modelsim para a 1ª sequência de correlação.

3.5 - Possíveis melhorias

3.5.1 - Compensar o efeito de Doppler

Durante o desenvolvimento deste trabalho não foi possível, por falta de tempo, e também por este efeito não ter muito impacto devido à baixa velocidade do AUV MARES, desenvolver uma estrutura de compensação do efeito de Doppler. No entanto foi estudada uma proposta de implementação baseada em [19].

Para sinais de banda-larga o efeito de Doppler poderá ser melhor modelado no domínio dos tempos do sinal original:

$$r(t) = s((1 + \Delta)t) \quad (3.3)$$

Se o sinal for de seguida amostrado por um período de amostragem T_s ficará:

$$r(nT_s) = s((1 + \Delta)nT_s) \quad (3.4)$$

O que corresponde a uma mudança de escala com base no período de amostragem (interpolação ou decimação [20]). Verifica-se então que se o desvio Δ for conhecido é possível inverter a interpolação ou decimação através de um interpolador [21] re-amostrando o sinal antes de o receber eliminando assim o desvio (Fig.3.23).

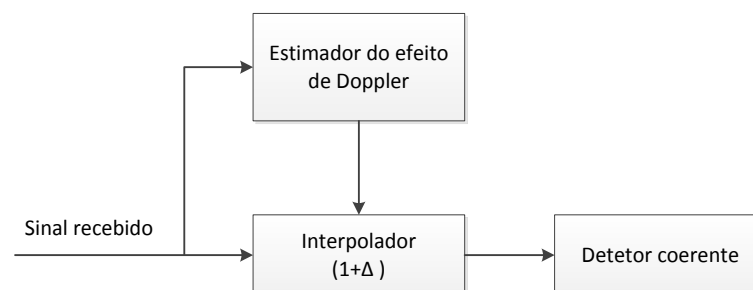


Figura 3.23 - Estrutura de estimativa/compensação do efeito de Doppler.

3.5.2 - Envio de comandos para o veículo

Com a possível integração de múltiplas sequências de referência a um baixo custo de ocupação de recursos, poderão ser associados conjuntos de referências correspondentes a cada transmissor, podendo ser transmitida informação básica para o AUV para comandos simples como de inicialização ou de interrupção de missão. Esta funcionalidade extra faz uso da própria codificação dos sinais que identificam o transmissor para transmitir informação, traduzindo-se num baixo custo de ocupação de recursos em hardware.

Se, por exemplo, existirem 3 transmissores com 2 sequências binárias associadas a cada um deles, cada transmissor pode transmitir 1 bit de informação por período de transmissão

(uma das suas 2 sequências), o que dá um total de 3 bits por período de transmissão. A figura 3.24 ilustra a possível implementação, as sequências recebidas seriam as de cor laranja.

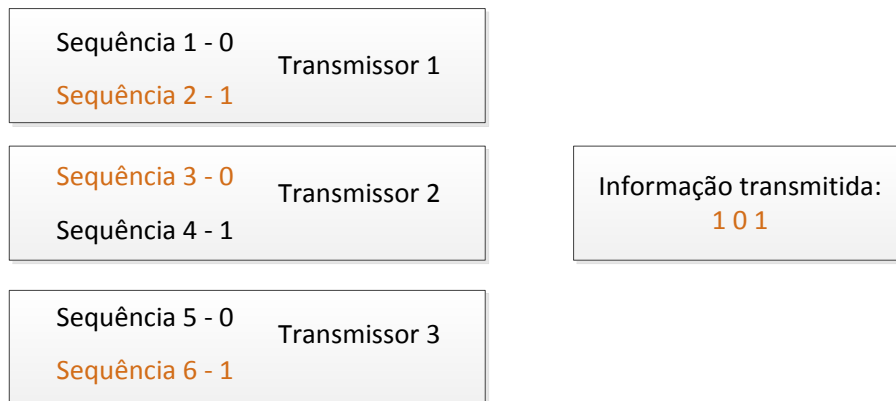


Figura 3.24 - Esquema que ilustra o possível envio de informação para o veículo.

Capítulo 4

Implementação e resultados experimentais

4.1 - Implementação

O trabalho realizado foi sintetizado para uma placa GODIL, desenvolvida pela OHO-Elektronik, baseada numa FPGA XILINX Spartan 3E-500. Trata-se de uma placa de baixo custo com consumo elétrico reduzido o que é importante em sistemas autónomos como é o caso dos veículos subaquáticos.

Na tabela 4.1 é possível verificar a ocupação de recursos da FPGA ao sintetizar este trabalho para 3 sequências base de referência. O bloco de estimação de ruído tem um impacto significativo no consumo de recursos em relação ao resto do sistema dedicado, nomeadamente ao nível de memórias e multiplicadores pelo que também foi efetuada a síntese sem este bloco para destacar a não utilização de multiplicadores por parte do correlacionador (Tab. 4.2). Encontra-se também disponível um gráfico (Fig. 4.1) que mostra a evolução da ocupação de recursos da FPGA em função do seu número de correlacionadores. Com o aumento do número de sequências base podemos verificar que a ocupação de recursos da FPGA cresce muito pouco, podemos então ter uma quantidade bastante elevada de sequências de referência à custa de uma baixa ocupação de recursos com a mesma velocidade de processamento por se tratar de processamento paralelo de dados.

Utilização lógica	Usado	Disponível	Utilização
Número de Slices	834	4656	17%
Número de LUTs	1425	9312	15%
Número de BRAMs	7	20	35%
Número de Multiplicadores	14	20	70%

Tabela 4.1 - Utilização de recursos da Spartan 3E-500 para o detetor desenvolvido com 3 sequências base de referência.

Utilização lógica	Usado	Disponível	Utilização
Número de Slices	481	4656	10%
Número de LUTs	671	9312	7%
Número de BRAMs	1	20	5%
Número de Multiplicadores	0	20	0%

Tabela 4.2 - Utilização de recursos da Spartan 3E-500 para o detetor desenvolvido com 3 seqüências base de referência (excluindo estimador de ruído).

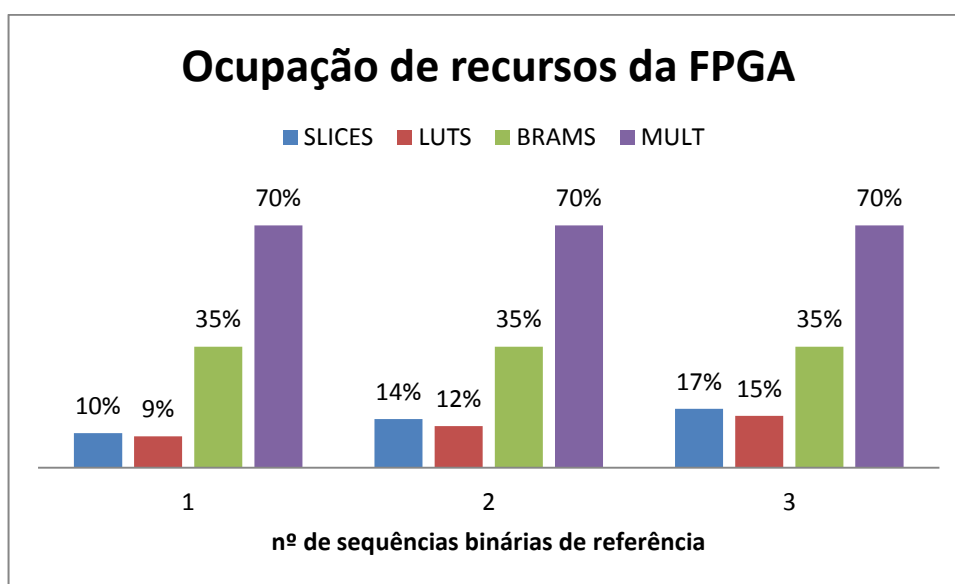


Figura 4.1 - Ocupação de recursos da Spartan 3E-500 para o detetor desenvolvido em função do nº de seqüências base de referência .

4.2 - Simulação com amostras reais

Apesar de não ter sido possível a integração do sistema desenvolvido no AUV MARES foram realizados testes com base em sinais reais gravados durante um ensaio de campo realizado no rio Douro, na região de Crestuma.

Foi transmitido um sinal BPSK, codificando uma seqüência Kasami de 63 bits, com uma portadora de 25 kHz e com tempo de bit igual a 3 períodos do sinal da portadora. O sinal foi capturado e amostrado por um conversor A/D a uma taxa de 106,852 kHz.

Para poder ser mantida a restrição da frequência de amostragem igual a 4 vezes a frequência de envio do sinal (100 kHz), teve de ser realizada uma decimação[20] dessa mesma frequência por um fator de 73/78. Esta decimação foi efetuada através de uma função de re-amostragem escrita em Matlab. Os resultados da captura, por parte do conversor A/D, podem ser verificados na figura 4.2:

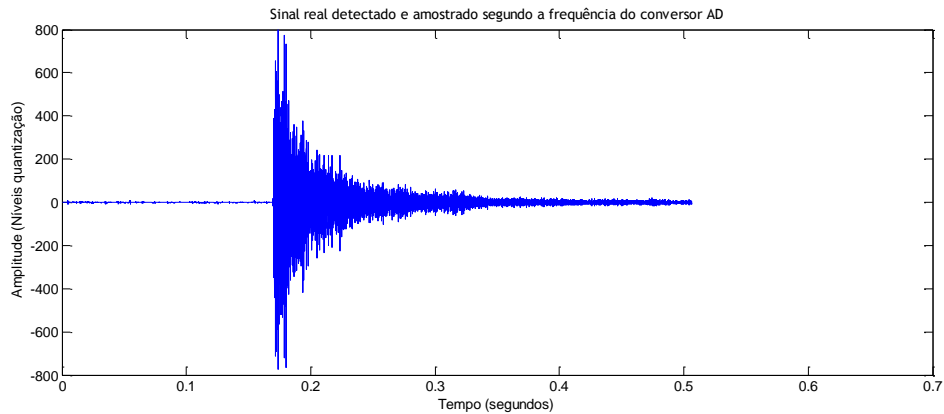


Figura 4.2 - Resultados do conversor A/D após recepção do sinal transmitido.

É bem visível o efeito da reverberação do sinal, que se prolonga por 300 ms.

De seguida, este sinal irá ser re-amostrado e detetado em Matlab e no circuito digital e comparados os resultados.

4.2.1 - Detetor Matlab

Nesta versão do detetor já foi incorporado o estimador de ruído, o que não havia sido feito na versão previamente simulada. Foi calculado um nível de decisão para uma probabilidade de erro de 10^{-7} com base em aproximações por retas da equação base, para ser semelhante ao decisor implementado, o que corresponde a dizer que em cada 10 milhões de amostras ocorre uma deteção de ruído acima do nível de decisão. A sequência transmitida corresponde à sequência base nº 1 do detetor coerente.

Na figura 4.3 podem ser visualizadas as 3 sequências de correlação de saída com destaque para o pico gerado pela 1ª sequência, como seria de esperar, também se pode visualizar o nível de decisão gerado.

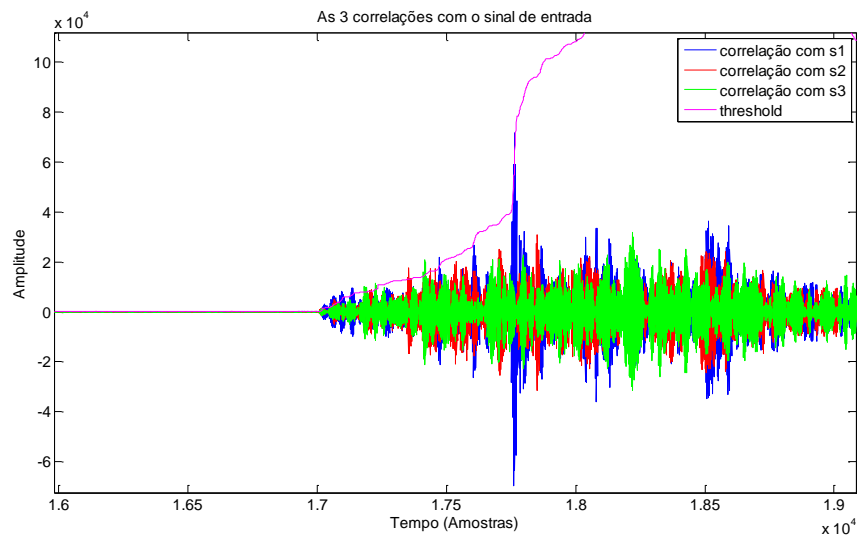


Figura 4.3 - Correlação do sinal recebido com as 3 sequências base de correlação assim como o nível de decisão gerado.

Aproximando a imagem na fronteira da zona só com ruído e da zona onde o sinal começa a ser recebido podemos verificar visualmente que enquanto há só ruído não ocorrem falsas detecções (Fig. 4.4):

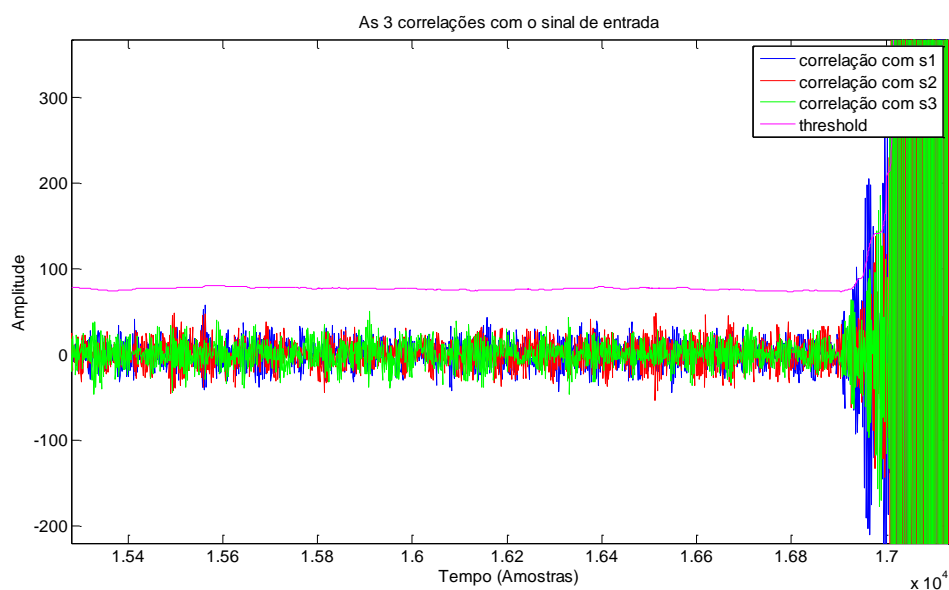


Figura 4.4 - Níveis de decisão gerados na zona temporal onde apenas existe ruído.

Após o ultrapassar do nível de decisão, iniciou-se a pesquisa pelo máximo onde foi detectado o pico na amostra nº 17763 (Fig. 4.5) o que corresponde a dizer que o sinal foi recebido na amostra $17763-756=16997$, que em termos temporais corresponde a 169,97 ms ($F_s=100$ kHz) correspondendo a uma distância de 254,955 metros, considerando a velocidade do som igual a 1500 m/s. No entanto, neste ensaio não foram obtidas medidas precisas de

posição entre o transmissor e recetor nem da velocidade de propagação do som, pelo que não é possível comprovar a exatidão desta medida.

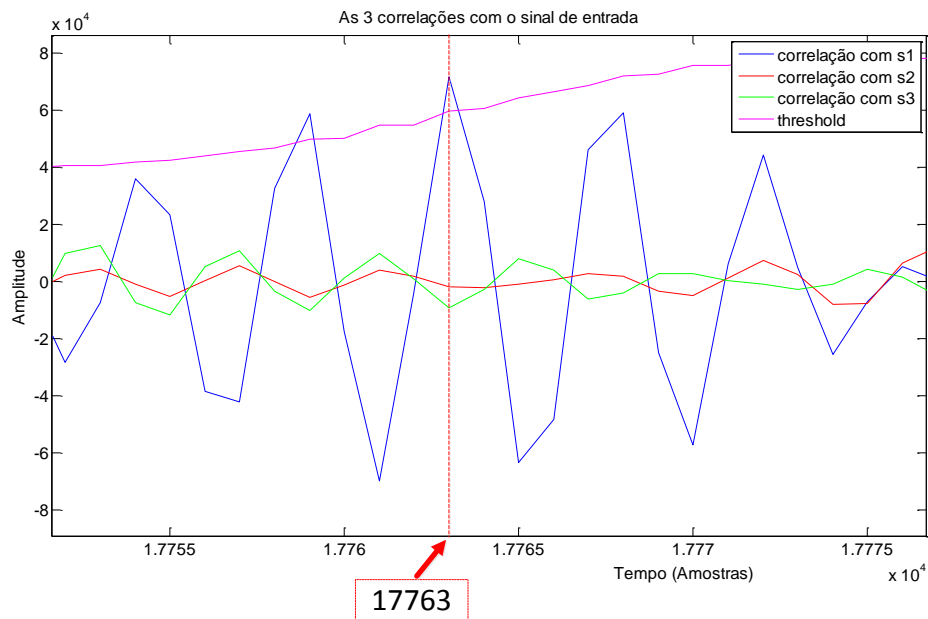


Figura 4.5 - Instante de deteção do valor máximo no detetor de Matlab.

4.2.2 - Detetor implementado

Efetuada a simulação com o detetor desenvolvido em Verilog foi verificado que os resultados são exatamente iguais aos do Matlab. Podem ser visualizados na figura 4.6 os resultados da correlação sendo aparentemente iguais, essa igualdade é comprovada com o erro absoluto para a 1ª sequência de correlação apresentado na figura 4.7 (erro máximo de 2.4×10^{-11}).

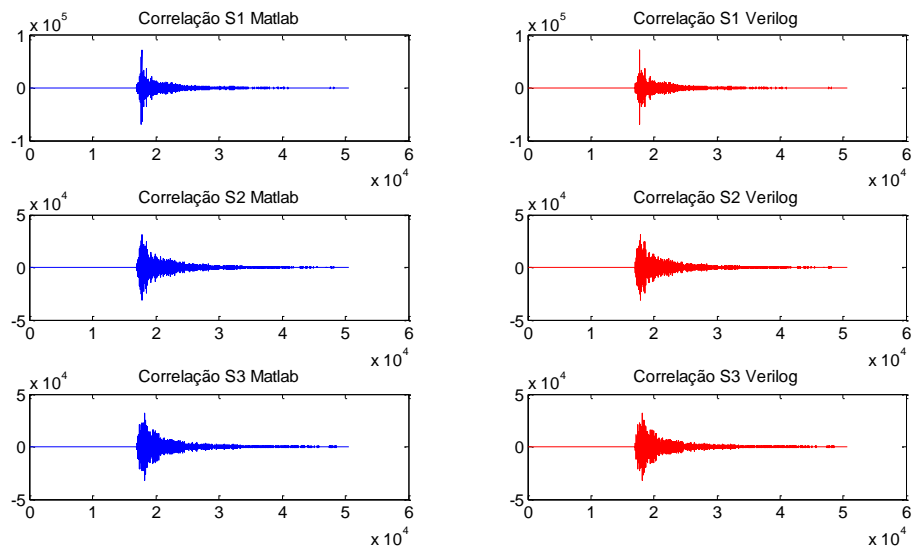


Figura 4.6 - Resultados de correlação do detetor Matlab e do detetor Verilog.

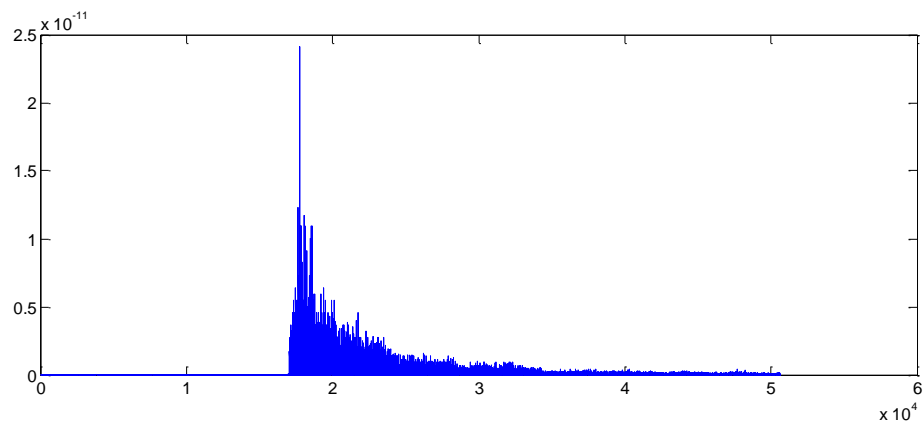


Figura 4.7 - Gráfico de erro absoluto entre os resultados gerados pelo Matlab e pelo Modelsim para a 1ª sequência de correlação.

O resultados dos níveis de decisão também foram visualmente comparados (fig. 4.8) assim como o seu erro absoluto analisado (fig.4.9). Na análise desse erro podemos verificar que são aproximadamente iguais, mais uma vez os pequenos desvios verificados são originados pela truncatura da aritmética implementada no circuito digital.

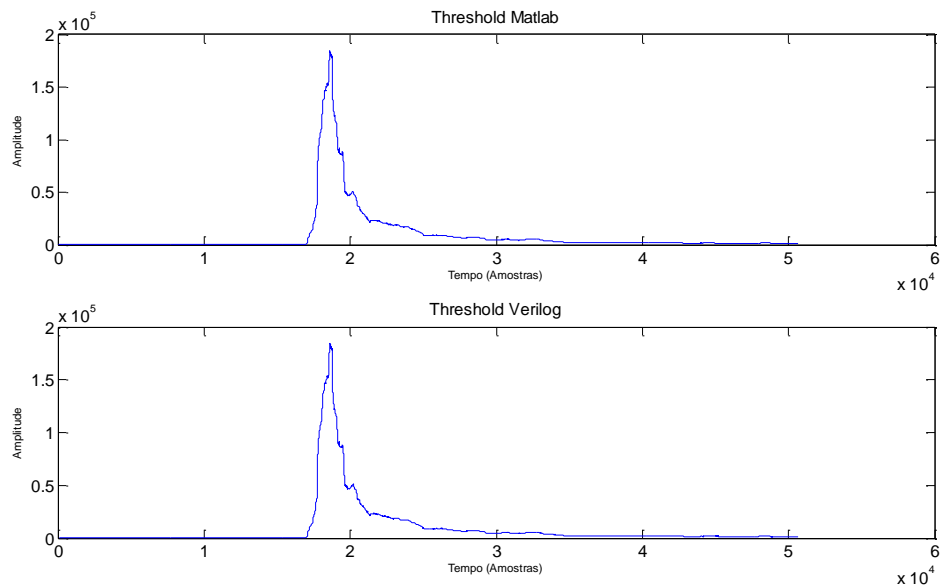


Figura 4.8 - Resultados do nível de decisão Matlab e do nível de decisão Verilog.

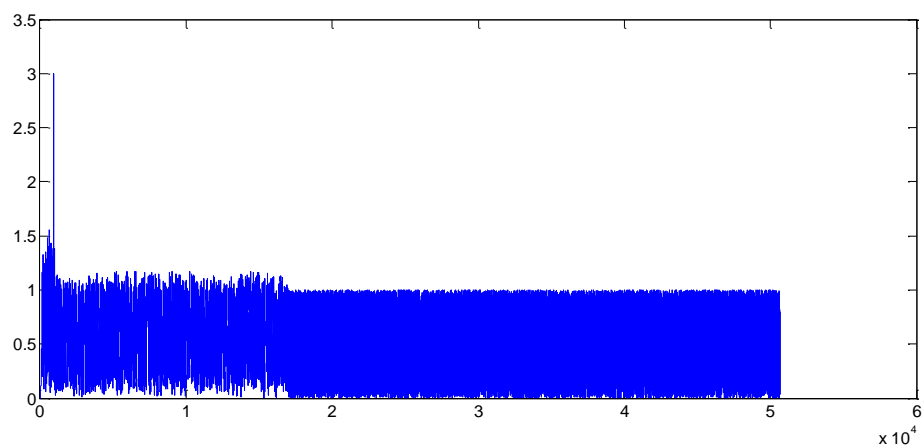


Figura 4.9 - Gráfico de erro absoluto entre os resultados gerados pelo Matlab e pelo Modelsim para os níveis de decisão.

Analisando agora os instantes em que ocorrem as detecções, podemos verificar que as saídas do detetor são as corretas. Na imagem da consola do programa de simulação do Modelsim estão imprimidos os instantes de detecção assim como as sequências correspondentes detetadas (Fig. 4.10). A detecção marcada com o tempo 995 corresponde a uma falsa detecção resultante da inicialização do módulo de cálculo do nível de decisão no início da simulação. Pode-se também visualizar o instante do pico de correlação máximo numa aproximação do gráfico gerado com os resultados de correlação das 3 sequências (Fig. 4.11), os instantes de detecção gerados pelo decisor foram os mesmos que os obtidos em Matlab assim como as sequências detetadas.

```
VSIM 15> run -all
# Sequence number: 1
# Time: 995
# Sequence number: 1
# Time: 17763
# Break in Module coherent_detector_tb at C:/Verilog/coherent_detector_tb.v line 119
VSIM 16>
```

Ln: 119 Col: 0	READ	Ln: 119 Col: 0	READ	Project : coherent_detect	Now: 506,290,133 ns	Delta: 0
----------------	------	----------------	------	---------------------------	---------------------	----------

Figura 4.10 - Resultados de detecção Verilog impressos na consola do programa de simulação Modelsim.

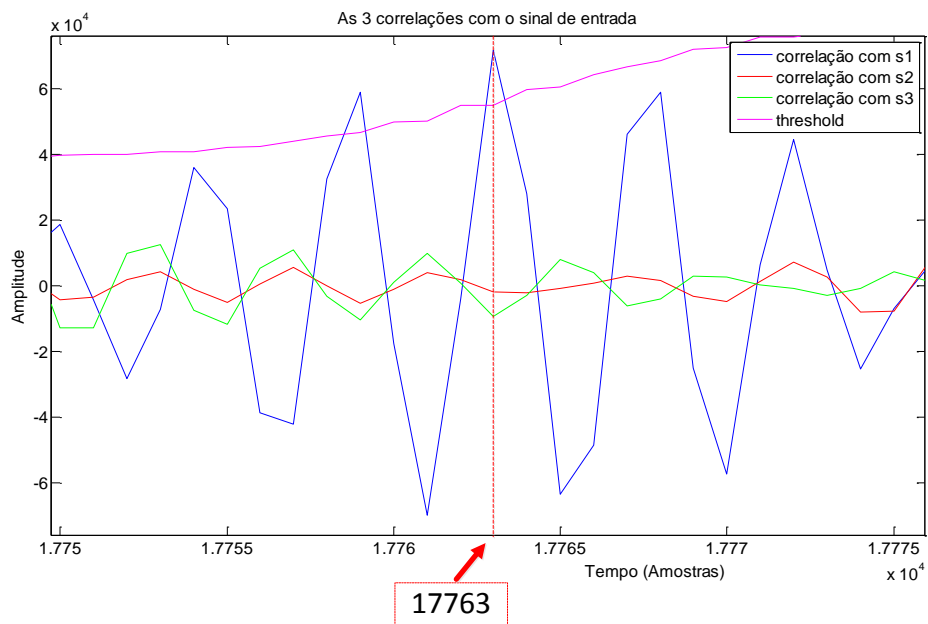


Figura 4.11 - Instante de detecção do valor máximo no detetor implementado.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 - Conclusões

Ficou demonstrado na realização desta dissertação que é possível a utilização de técnicas de detecção mais complexas do que a simples análise da envolvente do sinal, utilizando plataformas computacionais dedicadas, como é o caso das FPGA, para tornar a localização dos veículos subaquáticos mais precisa e robusta.

A implementação de detetores coerentes em sistemas de localização subaquática faz com que estes sejam mais imunes a variações de amplitude provocadas pelos fenómenos naturais do meio subaquático. Esta maior imunidade torna este tipo de sistemas mais fiáveis e precisos do que os detetores de envolvente que apresentam limitações, sobretudo provocadas pelas variações deste mesmo parâmetro. A possibilidade de se implementarem técnicas de modulação de fase assim como o alargamento da largura de banda através do espalhamento espectral permite uma maior imunidade a interferências de ruído ou de outros sinais.

A construção deste detetor poderá também suportar muitas sequências de referência graças à restrição aplicada à frequência de amostragem. O facto de ser quatro vezes superior à frequência da portadora permite construções lógicas simples, que ocupam poucos recursos da FPGA, podendo utilizar o restante para outras aplicações ou para a inserção de mais correlacionadores. Esta inserção também poderá ser realizada de uma forma dinâmica graças à capacidade de reconfiguração em tempo-real da FPGA, o que permite a qualquer instante, redefinir o circuito dedicado.

Para além da detecção mais precisa dos instantes de receção para cálculos de localização do veículo e à maior imunidade aos fenómenos naturais, o facto de se enviarem sinais codificados permite também suportar o envio de comandos básicos para o AUV, como um resultado lateral do processo de localização.

Para além desta possível futura implementação de comandos básicos, é também possível reduzir a interferência resultante do efeito de Doppler, através da estimação desse fenómeno e respetiva re-amostragem do sinal recebido. Esta futura estrutura poderá aumentar ainda mais a robustez e precisão deste sistema, e tornar mais fiável a localização de veículos que se movimentem a velocidades mais elevadas.

Referências

- [1] Lurton, X., *An introduction to underwater acoustics : principles and applications*. 2002, New York: Springer.
- [2] Tan, H.-P., et al., *A survey of techniques and challenges in underwater localization*. *Ocean Engineering*, 2011. **38**(14-15): p. 1663-1676.
- [3] Matos, A., et al. *Development and implementation of a low-cost LBL navigation system for an AUV*. in *Proceedings of the OCEANS '99 MTS/IEEE - Riding the Crest into the 21st Century, September 13, 1999 - September 16, 1999*. 1999. Seattle, WA, USA: IEEE.
- [4] Matos, A. and N. Cruz. *AUV navigation and guidance in a moving acoustic network*. in *Oceans 2005 - Europe, 20-23 June 2005*. 2005. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- [5] Casey, T., B. Guimond, and J. Hu. *Underwater vehicle positioning based on time of arrival measurements from a single beacon*. in *Oceans 2007 MTS/IEEE Conference, September 29, 2007 - October 4, 2007*. 2007. Vancouver, BC, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [6] Christ, R.D. and R.L. Wernli Sr, *The ROV Manual*. Materials & Mechanical. 2007: Butterworth-Heinemann. 1.
- [7] Laboratories, M.L.M. *SCINI Project*. Available from: scini.mlml.calstate.edu.
- [8] Association, I.M.C., *Guidance on Vessel USBL Systems for Use in Offshore Survey and Positioning Operations*, 2011.
- [9] Turin, G., *An introduction to matched filters*. *Information Theory, IRE Transactions on*, 1960. **6**(3): p. 311-329.
- [10] Stojanovic, M., *Underwater Acoustic Communication*, D.o.E.a.C. Engineering and N. University, Editors.: Boston.
- [11] Talib, K.H., et al. *Determination of speed of sound using empirical equations and SVP*. in *2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing & its Applications (CSPA 2011), 4-6 March 2011*. 2011. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- [12] Christiansen, D., C.K. Alexander, and R.K. Jurgen, *Standard handbook of electronic engineering*. 2005, New York: McGraw-Hill.
- [13] Cruz, N.A. and A.C. Matos. *The MARES AUV, a modular autonomous robot for environment sampling*. in *OCEANS 2008, 15-18 Sept. 2008*. 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- [14] Cruz, N., et al. *A versatile acoustic beacon for navigation and remote tracking of multiple underwater vehicles*. in *Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings, 5-8 Nov. 2001*. 2001. Washington, DC, USA: Marine Technol. Soc.

- [15] Campos, H.F.S., *Processador integrado para a navegação de AUVs*, ed. J.C.d.S. Alves and A.C.C.d. Matos. 2011, Porto:: [s. n.].
- [16] Moreira, S.A.A., *Modulações digitais lineares com detecção coerente - Modulações binárias (ASK e PSK)*, in *Fundamentos de Telecomunicações 1*. 2004: FEUP.
- [17] Moreira, S.A.A., *Transmissão de impulsos através de um canal com ruído aditivo - Probabilidades de erro com detecção no ponto central*, in *Fundamentos de Telecomunicações 1*. 2004: FEUP.
- [18] Moreira, S.A.A., *Sequências pseudo-aleatórias e outras*, in *Fundamentos de Telecomunicações 2*. FEUP.
- [19] Sharif, B.S., et al., *A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000. **25**(1): p. 52-61.
- [20] Crochiere, R.E. and L.R. Rabiner, *Interpolation and decimation of digital signals-a tutorial review*. Proceedings of the IEEE, 1981. **69**(3): p. 300-31.
- [21] Oetken, G., T.W. Parks, and H.W. Schussler, *New results in the design of digital interpolators*. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1975. **ASSP-23**(3): p. 301-9.