



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Eduardo Manuel da Silva Machado

Modem Acústico Subaquático a 1 Mbit/s



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Eduardo Manuel da Silva Machado

Modem Acústico Subaquático a 1 Mbit/s

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre
em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Marcos Silva Martins

e co-orientação do
Professor Doutor José Manuel Tavares Viera Cabral

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero deixar duas palavras em especial, uma na pessoa do meu orientador, Professor Doutor Marcos Martins, pela paciência e calma em todos os momentos mais difíceis, pela sabedoria partilhada e ajuda incondicional.

Outra, na pessoa do meu co-orientador, o Professor Doutor José Cabral, que tanto estimo, sempre pronto a partilhar o seu conhecimento e as suas experiências ao longo deste processo.

A todos os meus companheiros de turma desde a entrada na faculdade, a eles o meu obrigada por todos os momentos de reflexão, descontração e diversão.

E finalmente queria agradecer aos meus pais, por toda a ajuda mesmo em alturas mais difíceis. Ajudaram-me a alcançar os objetivos a que me propus, e acima de tudo a construir aquilo que sou. Por todo o apoio, obrigado.

Resumo

O objetivo desta dissertação é a implementação de um *modem* de comunicação acústica subaquática com alto débito binário de baixo consumo. Este *modem* é constituído por um módulo emissor e um módulo recetor que permite comunicar num ambiente subaquático em tempo real através de sinais acústicos. As principais dificuldades neste tipo de comunicação são as características do ambiente subaquático que atenuam e degradam bastante o sinal ao longo da sua propagação. Após o desenvolvimento do *modem*, foram feitos vários testes em cenário real aos diferentes módulos e em diferentes condições.

O *modem* acústico é constituído por dois módulos (emissor e recetor) e vários blocos associados. Em relação ao módulo emissor, fazem parte os seguintes blocos: interface do utilizador, modulador baseado em FPGA, conversor digital-analógico, amplificador de sinal e transdutor acústico. O módulo recetor é constituído por um hidrofone, amplificador/filtro, desmodulador baseado também em FPGA e finalmente, a interface com o utilizador. O principal fator que permitiu ao *modem* atingir elevados débitos, foi a técnica de modulação implementada. O modulador OOK de dois canais, possui duas ondas portadoras de 1 MHz e 0.5 MHz que permitem uma transmissão com um débito máximo de 1 Mbps.

O ambiente aquático acrescentou bastantes dificuldades a este trabalho devido às suas características: elevadas atenuações a longas distâncias, existência de grande diversidade de ruído, fenómeno do multi-percurso, reduzida velocidade de propagação acústica na água (cerca de 1500 m/s) e o efeito de *Doppler*.

Por fim, os testes realizados após o desenvolvimento do *modem*, revelaram que os objetivos iniciais foram cumpridos. O sistema foi capaz de transmitir sinais modulados e proceder à sua desmodulação de forma a serem corretamente interpretados pelo recetor.

Abstract

The goal of this thesis is the development of a high data rate and low power ultrasonic wireless broadband communication system. This system is composed by a transmitter and a receiver module that enable underwater communication in real time through acoustic waves. The main difficulties to develop this type of system are: the features of the underwater environment that attenuate and degrade the signal along its spread. Once developed, tests were made in a real scenario with different modules and under different conditions.

The system is divided in two main modules (transmitter and receiver). The transmitter module, is composed by the following blocks: a user interface, a modulator implemented in FPGA, a digital to analog converter, a signal amplifier and a transducer. On the other hand, the receiver module is formed by a hydrophone, an amplifier / filter, a demodulator also implemented in a FPGA and, finally, a user interface. The factor that allowed this system to achieve high data rate, was the selected modulation scheme. The OOK modulator with two data channels, has two carriers of 1 MHz and 0.5 MHz that allows to achieve a maximum bitrate of 1Mbps.

The aquatic environment increased the level of difficulty on this work due its characteristics, which includes factors such as: large attenuation in long distances, the existence of great diversity of noise, the multipath phenomenon, the low speed of acoustic propagation in water (about 1500 m/s) and the *Doppler* effect.

Finally, the tests carried out after the development of the system revealed that the initial objectives were accomplished. The system is capable of transmitting modulated signals and perform their demodulation in order to be correctly interpreted by the receiver.

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Conteúdo	ix
Listas de Figuras	xii
Lista de tabelas	xiv
Lista de Acrónimos	xv
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	2
1.2 Objetivos	5
1.3 Estrutura da Dissertação	5
2. Estado da arte	2
2.1.1 Sistema de comunicação ótica	2
2.1.2 Sistema de Comunicação por ondas eletromagnéticas	3
2.1.3 Sistema de Comunicação Acústica	4
2.1.4 Sumário dos Sistemas de Comunicação Subaquáticos.....	5
2.2 Características do canal.....	5
2.2.1 Efeito <i>Doppler</i>	5
2.2.2 Ruído Ambiente	6

2.2.3	Atenuação	7
2.2.4	Spreading loss	8
2.2.4.1	Espalhamento esférico	8
2.2.4.2	Espalhamento Cilíndrico	9
2.2.4.3	Espalhamento Direcional	10
2.2.5	Absorption loss.....	11
2.2.6	Atraso de Propagação	12
2.2.7	Multi-percurso	13
2.2.8	Bolhas.....	15
3.	Técnicas de Modulação Digital	2
3.1	Comunicação Analógica versus Digital	3
3.2	Vantagens da Comunicação Digital	4
3.2.1	Desvantagens da Comunicação Digital	5
3.3	Técnicas de Modulação Digital	6
3.3.1	ASK	6
3.3.2	BPSK	7
3.3.3	FSK.....	8
3.3.4	OOK	9
3.3.5	QPSK.....	10
3.4	Sistemas Existentes	11
4.	Arquitetura do Sistema	14
4.1	Hardware.....	14
4.1.1	Arquitetura do sistema	15

4.1.2	FPGA.....	18
4.1.3	Eletrónica de Instrumentação	20
4.1.3.1	Conversor Digital-Analógico	20
4.1.3.2	Conversor Analógico - Digital (ADC).....	21
4.1.4	Amplificador de Potência.	21
4.1.5	Transdutor emissor	22
4.1.6	Transdutor hidrofone recetor	23
4.1.7	Filtro e Amplificador Recetor	24
4.2	Software	24
4.2.1	Matlab/Simulink.....	24
4.2.2	ISE Design Suite Evalution	25
4.3	Implementação	25
4.4	Modulador.....	26
4.5	Desmodulador	30
4.5.1	Desmodulador Canal 1 MHz.....	32
4.5.2	Desmodulador canal 0.5 MHz	35
5.	Resultados e discussão	39
5.1	Arquitetura do Sistema de Teste.....	39
5.2	Cenário de testes.....	41
5.3	Resultados experimentais	43
5.4	Análises dos Resultados Obtidos.....	47
6.	Conclusões	49
7.	Referências	51

Lista de figuras

Figura 1-1-Sistema de comunicação acústica [4].	3
Figura 2-1-Densidade espectral de potência do ruído ambiente. [12].....	7
Figura 2-2 Espalhamento esférico	8
Figura 2-3 Espalhamento cilíndrico	9
Figura 2-4 Espalhamento direcional.....	10
Figura 2-5 Absorção em água do salgada.....	12
Figura 2-6 Velocidade do som de acordo com a equação de Mackenzie [20].	13
Figura 2-7 Efeito multi-percurso [21].	14
Figura 3-1 Modelo de um sistema de modulação.....	2
Figura 3-2 Modulação ASK.	6
Figura 3-3 Modulação BPSK.	7
Figura 3-4 Modulação FSK.....	8
Figura 3-5 Modulação OOK.	9
Figura 3-6 Modulação QPSK.....	10
Figura 4-1 Diagrama de blocos <i>hardware</i>	15
Figura 4-2 Arquitetura do sistema.	16
Figura 4-3 Estrutura básica FPGA.	18
Figura 4-4 FPGA Spartan-6.	19
Figura 4-5: Placa de instrumentação.....	20

Figura 4-6 Amplificador emissor.	22
Figura 4-7 Transdutor emissor PVDF [30] [31].	22
Figura 4-8 Hidrofone.	23
Figura 4-10 Modulador OOK de dois canais.	27
Figura 4-11 Gerador de onda sinusoidal de 1 MHz e 0.5 MHz.	28
Figura 4-12 Saída Modulador OOK de dois canais de dados.	29
Figura 4-13 Desmodulador OOK de dois canais.	31
Figura 4-14 Interface gráfica filtro	32
Figura 4-15 Filtro passa-alto.	33
Figura 4-16 Filtro passa-baixo.	34
Figura 4-17 Filtro passa-baixo.	70
Figura 4-18 Filtro passa-baixo.	37
Figura 5-1 Arquitetura do sistema em testes experimentais.	40
Figura 5-2 Aquário de teste.	41
Figura 5-3 Pico Scope 2000.	42
Figura 5-4 Entrada de fluxo de dados e modulação do sinal.	43
Figura 5-5 Sinal modulado á saída do DAC.	44
Figura 5-6 Saída do hidrofone.	45
Figura 5-7 Desmodulação do sinal.	46

Lista de tabelas

Tabela 2-1-2-Tabela de taxa de dados consoante a distância [4].	4
Tabela 3-3-Correspondência entre bits e fase.	10
Tabela 3-4- <i>Modems</i> acústicos subaquáticos.....	12
Tabela 4-1-2-Especificações FPGA Spartan 6 XC6SLX9.....	49
Tabela 4-1-3-Saída da corrente analógica	21

Lista de acrónimos

ADC	Analog-to-Digital Converter
AGC	Automatic Gain Control
ASK	Amplitude Shift Keying
BASK	Binary Amplitude Shift Keying
BER	Bit Error Rate
BFSK	Binary Frequency
BPSK	Binary Phase Shift Keying
DAC	Digital-to-Analog Converter
DSP	Digital Signal Processor
FIR	Finite Impulse Response
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSK	Frequency Shift Keying
OOK	On-Off Keying
PSK	Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SSB	Single Side Band
SNR	Signal to Noise Ratio
USB	Universal Serial Bus

1.Introdução

A ideia de transmitir e receber informação debaixo de água provém já do tempo de Leonardo da Vinci quando descobriu que através da extremidade de um tubo colocado debaixo de água se poderia escutar navios a longas distâncias. No entanto, a grande evolução da comunicação subaquática teve lugar nos EUA durante a segunda guerra mundial com a invenção de um telefone capaz de comunicar com os seus submarinos [1]. Este telefone fazia uso de uma modulação SSB com frequências entre os 8-11 kHz e permitia enviar sinais acústicos ao longo de muitos quilómetros. Mais tarde, com o desenvolvimento de circuitos integrados foram criadas ferramentas de processamento digital de sinal com grande eficiência energética. Seguidamente surgiram sistemas complexos de processamento de sinal com algoritmos de compressão de dados. Este avanço tecnológico aumentou significativamente a eficácia das comunicações subaquáticas sem fios, que até então, eram exclusivas para fins militares e agora ganhavam espaço no setor comercial.

Atualmente os sistemas de comunicação subaquática sem fios são imprescindíveis para aplicações de controlo remoto em plataformas petrolíferas, monitorização de poluição em sistemas ambientais, recolha de dados em localizações inacessíveis para a comunidade científica, comunicações entre mergulhadores, mapeamento do fundo do oceano para deteção de objetos e descoberta de novos recursos. Este tipo de tecnologia no sector comercial está a crescer exponencialmente e existe a necessidade de tornar esta tecnologia mais competitiva através da redução dos custos dos equipamentos e aumento o seu desempenho. Esta tarefa não é fácil porque o meio aquático é um meio onde é bastante difícil de comunicar devido às suas características que dificultam todo o processamento do sinal envolvido. Entre estas destacam-se o ruído, absorções do sinal, efeitos multi-percurso e efeito *Doppler*. Neste sentido, as investigações realizadas nesta área passam pelo desenvolvimento de comunicações mais

eficientes, com novos algoritmos de processamento de sinal, métodos de acesso múltiplo e implementações de modulações mais eficazes.

1.1 Enquadramento e motivação

Nos últimos anos os oceanos têm vindo a ganhar cada vez mais importância junto de todos os países, principalmente nos países costeiros. Isto acontece porque os recursos naturais existentes são cada vez mais escassos e a competição pela sua busca e exploração é cada vez maior o que aumenta consideravelmente o seu valor.

Portugal ocupa a 11^a posição dos países com maior área de águas jurisdicionais, ficando à frente de países como a Indonésia e China. Atualmente a área jurisdicional exclusiva portuguesa é aproximadamente de 3.9 milhões de km^2 o que significa que 97% do país é mar. A importância que o mar tem atualmente para Portugal equivale a 11% do PIB e 12% do emprego [2]. O mar português é um ativo crítico no contexto económico e na criação de emprego.

Segundo a Estratégia Nacional para o Mar 2013-2020, em Portugal existe uma vasta área geográfica marítima amplamente inexplorada, dotada de elevados recursos vivos e não vivos. Entre os recursos vivos existe um sector com potencial de crescimento referente ao desenvolvimento de biotecnologia marinha através da utilização de organismos marinhos em aplicações farmacêuticas, médicas e cosméticas. Entre os recursos não vivos existe um potencial elevadíssimo na exploração dos hidratos de metano onde foram já confirmadas várias ocorrências a sul e a sudoeste de Portugal Continental [3].

Por todas as razões enumeradas anteriormente, é necessário investir no desenvolvimento de tecnologia de forma a acelerar e otimizar o processo do conhecimento e monitorização da nossa área marítima, recolhendo o máximo de informação possível sobre os recursos existentes a fim de ganhar a notoriedade da comunidade internacional e atrair investidores. No contexto desta dissertação foi desenvolvido um sistema comunicação sem fios que serve de apoio à monitorização

e exploração do meio subaquático. O modem acústico de comunicação subaquática apresenta alto desempenho no que diz respeito ao débito de dados e ao seu baixo consumo, permitindo estabelecer comunicação sem fios em tempo real. A Figura 1-1 apresenta um dos possíveis cenários práticos. É possível observar vários dispositivos móveis subaquáticos a comunicar sem fios entre si, com routers através de ondas acústicas. Os routers servem como elo de ligação a bases terrestres. A comunicação é feita através do ar entre as bases terrestres e *routers* colocados à superfície marítima para que a comunicação seja mais rápida (alta velocidade de propagação). Posteriormente os routers transmitem a informação aos dispositivos móveis através de ondas acústicas.

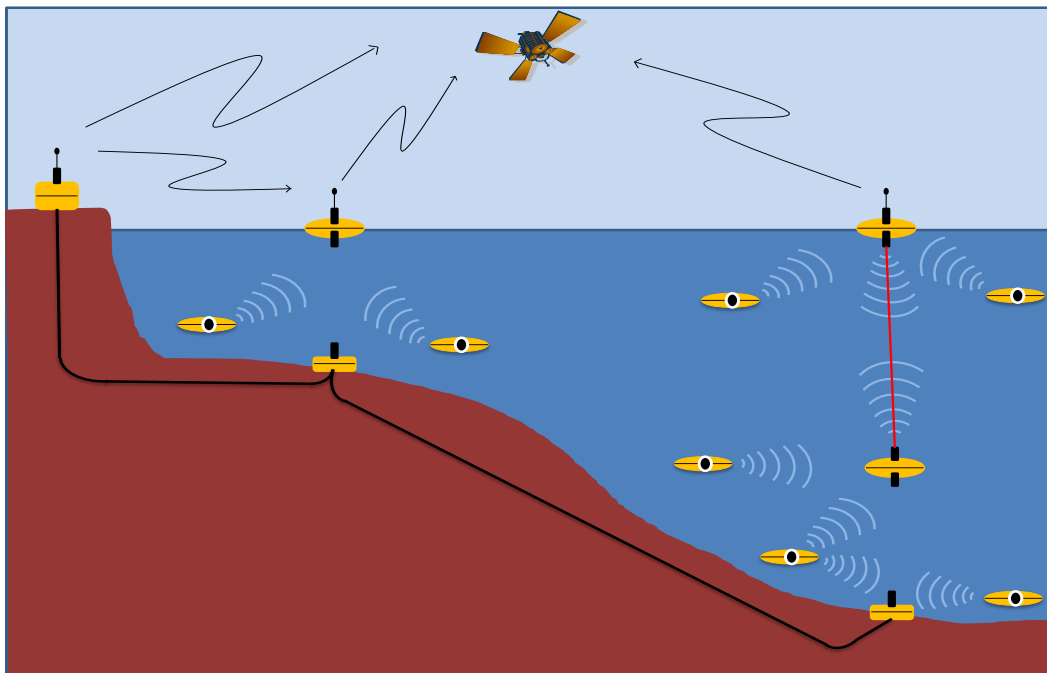


Figura 1-1-Sistema de comunicação acústica [4].

Os dispositivos móveis também poderão comunicar entre si através de ondas acústicas. Isto permite criar uma rede de monitorização e controlo de dispositivos subaquáticos móveis com a missão de recolha de dados da nossa costa marítima. Os modelos atuais são muito dispendiosos. Uma equipa de pesquisa para fazer o

Capítulo 1

levantamento de dados de uma determinada área tem que se fazer acompanhar de navios especializados, submarinos e mergulhadores. Com o modelo desenvolvido, este acompanhamento seria feito à distância e os principais custos associados eram a instalação e manutenção do equipamento. [5]

Esta tecnologia é bastante difícil de implementar devido às características do meio aquático que degrada e atenua bastante o sinal. Atualmente os sistemas de comunicação subaquática sem fios mais utilizados são o acústico, eletromagnético e ótico. Os sistemas com transmissões de sinais eletromagnéticos e óticos são inviáveis à aplicação desejada porque no caso da tecnologia ótica o sinal é bastante afetado pelo espalhamento apesar de não sofrer muita atenuação; já a tecnologia eletromagnética opera a frequências demasiado baixas e requer antenas grandes com elevadas potências de transmissão. Ambas as tecnologias funcionam bastante bem em curtas distâncias, mas a grandes distâncias, que é o objetivo desejado, revelam-se ineficazes.

A comunicação subaquática sem fios através de sinais acústicos é a tecnologia mais utilizada neste tipo de ambientes pois é a única que consegue comunicar a longas distâncias (até 20 km) em águas profundas com condições térmicas estáveis[6]. Esta tecnologia também apresenta as suas limitações, como a reduzida velocidade de propagação acústica na água (cerca de 1500 m/s), ruído ambiente, atraso de propagação, o efeito *Doppler*, efeito multi-percurso e bolhas.

O tipo de modulação usada nos sistemas de comunicação subaquática acústica é bastante importante porque para além de ajudar a ultrapassar grande parte das limitações referidas anteriormente (efeito *Doppler*, ruído e multi-percurso), aumenta também o débito binário, a capacidade e a eficiência do sistema. O esforço que tem sido feito ao longo destes últimos para otimizar esta tecnologia tem tido resultados fantásticos, mas ainda existem algumas limitações ao nível da eficiência da transmissão de dados para aplicações em tempo real.

1.2 Objetivos

O *modem* de comunicação acústica subaquática que se encontra em desenvolvimento é a consequência de vários projetos anteriores. O objetivo desta dissertação é dar continuidade a este projeto, aumentando a robustez e a eficiência do *modem*. Para que seja possível utilizar este *modem* em aplicações de tempo real, é necessário garantir elevados débitos de dados, aumentar a capacidade do sistema e a sua robustez contra erros. Neste contexto, surgiu a necessidade desenvolver um esquema de modulação/desmodulação para cumprir todas as exigências enumeradas acima. Assim, será implementando o esquema de modulação OOK (*On Off Keying*) com dois canais de dados e ondas portadoras de 1 MHz e 0.5 MHz respetivamente. Inicialmente será feito o estudo das características do meio aquático, como o efeito da absorção, multipercurso e *Doppler*, pesquisa sobre sistemas de modulação existentes e obtenção de um conhecimento sólido de tudo aquilo que já foi feito neste projeto e as suas limitações.

Numa fase posterior serão realizados testes em ambientes reais e simulações com recurso a ferramentas de *software*, que permitam otimizar o sistema e poupar tempo e recursos nos testes em ambiente reais.

1.3 Estrutura da dissertação

Este documento encontra-se estruturado em 7 capítulos:

- Capítulo 1, Introdução,
- Capítulo 2, Estado da arte,
- Capítulo 3, Modulações existentes,
- Capítulo 4, Arquitetura do sistema,
- Capítulo 5, Resultados e discussão,
- Capítulo 6, Conclusões.

Capítulo 1

2.Estado da arte

As tecnologias que permitem comunicar sem fios debaixo de água estão a crescer exponencialmente no sector comercial. Existem inúmeras atividades e diferentes aplicações para estas tecnologias. O aumento da sua procura levou os engenheiros a investigarem sobre novos métodos de transmissão de sinal subaquático sem fios. Atualmente os sistemas de comunicação sem fios que mais se destacam são os sistemas de comunicação ótica, eletromagnética e acústica. Estes sistemas têm características únicas que lhe conferem diferentes propósitos. De seguida, serão analisados todos estes sistemas e as suas características.

2.1.1 Sistema de comunicação ótica

A tecnologia de comunicação ótica subaquática sem fios tem evoluído no sentido de desenvolver aplicações de observação submarina e sistemas de monitorização do mar. Esta tecnologia de comunicação poderá desempenhar um papel de destaque na investigação de mudanças climáticas, previsão de desastres naturais e na descoberta de recursos. Embora a comunicação subaquática através de ondas acústicas seja bastante utilizada neste ambiente devido às grandes distâncias que é possível atingir, esta tecnologia é pouco eficaz a altas velocidades. A comunicação ótica sem fios tem sido proposta como a melhor alternativa, a fim de superar as limitações da comunicação acústica. Assim sendo, em curtas distâncias e apesar de a luz ser dispersada e absorvida pela água, a comunicação ótica pode ser uma solução alternativa muito fiável. Com a utilização de díodos emissores de luz e de díodos laser que são componentes fiáveis e relativamente baratos, foi possível estabelecer comunicações omnidirecionais na ordem dos 10Mbps e 1Gbps [7][8] [9].

2.1.2 Sistema de comunicação por ondas eletromagnéticas

As comunicações através de sinais eletromagnéticos subaquáticos foram investigadas desde os primeiros dias do rádio, e só voltou a receber atenção considerável durante a década de 1970. Na verdade, a única aplicação implementada com êxito foi o sistema de comunicação subaquática de frequência extremamente baixa. Este sistema operado a 76 Hz no sistema norte-americano e 82 Hz no sistema russo permitiu a transmissão de alguns caracteres por minuto a distâncias na ordem dos milhares de quilômetros. [10]

As ondas eletromagnéticas são caracterizadas principalmente por quatro parâmetros: permeabilidade, permissividade, condutividade e volume de densidade de carga. Estes fatores influenciam bastante a propagação eletromagnética na água porque esta é caracterizada pela alta permissividade e condutividade elétrica. A atenuação também é elevada comparada com o ar e aumenta rapidamente com a frequência.

As possíveis aplicações para as comunicações através de sinais eletromagnéticos em ambientes subaquáticos são as comunicações de curto alcance (<100m) com velocidades de comunicações relativamente altas [11].

Na Tabela 2-1-2 resume-se a relação entre o alcance e o débito para sistemas de comunicação subaquáticos por ondas eletromagnéticas.

Tabela 2-1-2 débito binário em função da distância [4].

Alcance	<1m	10m	50m	200m	2km	10km
Em oceano	Acima dos 100Mbps	100kbps	5kbps	100bps	10bps	1bps
Em água doce	Acima dos 100Mbps	1Mbps	100kbps	1kbps	10bps	1bps

2.1.3 Sistema de comunicação acústica

Nos últimos anos a comunicação acústica subaquática tem recebido muita atenção e as suas aplicações, que até agora eram maioritariamente militares, começaram a convergir na direção das aplicações comerciais. O investimento financeiro e tecnológico nesta área tem crescido substancialmente nos últimos anos. Este investimento justifica-se pela eficácia da comunicação acústica, sobretudo a longas distâncias em relação às demais.

O processo que permite gerar ultrassons baseia-se em materiais piezoelétricos. Este material converte os sinais elétricos em vibrações criando assim ondas sonoras. O processo inverso também é possível, ou seja, receber ondas sonoras e convertê-las em sinais elétricos. O grande problema destas tecnologias é a dificuldade de comunicar no meio aquático. A propagação do sinal é afetada por efeitos como a refração, absorção e o espalhamento sobre a água, mas a atenuação do sinal, à semelhança das tecnologias descritas anteriormente, é o maior obstáculo. A atenuação significa a perda gradual da intensidade do sinal à medida que se move sobre um meio. Nos sistemas de comunicação acústicos a atenuação dos sinais é

Capítulo 2

muito maior na água do que no ar. Também existem problemas como as elevadas reflexões do sinal na água.

O caminho a seguir para combater todas estas barreiras e alcançar débitos binários elevados passa pela otimização de algoritmos de processamento de sinal e a implementação de modulações com esquemas de codificação mais eficazes.

2.1.4 Sumário dos sistemas de comunicação subaquáticos

Nos capítulos anteriores foram abordadas as características dos três principais sistemas de comunicação subaquática. Cada sistema apresenta as suas vantagens e desvantagens que lhes conferem características únicas. Não se pode distinguir um sistema como o melhor depende do cenário de aplicação. O custo, a complexidade do sistema, os consumos, as distâncias de comunicação e as características do próprio meio aquático são os principais fatores que podem influenciar a escolha de cada tecnologia.

2.2 Características do canal

A comunicação acústica subaquática tem uma grande variedade de aplicações. Entre elas encontram-se a recolha de dados oceânicos, controlo sobre veículos submarinos ou até mesmo a exploração oceânica por parte da indústria farmacêutica ou petrolífera. Estas aplicações requerem comunicações eficazes com altos débitos e que operem entre grandes distâncias. Estes objetivos são difíceis de atingir devido às características do canal aquático como o ruído, a elevada atenuação, o efeito multi-percurso e o efeito *Doppler*.

2.2.1 Efeito *Doppler*

O efeito *Doppler* consiste no desvio da frequência do sinal recebido devido ao movimento das estruturas subaquáticas. Este desvio provoca imensas dificuldades

na comunicação principalmente em modelos que se baseiam na frequência do sinal como método de descodificação e interpretação do mesmo.

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:

$$w_n = w'_n(1 + \Delta)rad/s,$$

Onde:

w'_n =Frequência original (rad/s)

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

No entanto, se estas estruturas se moverem a uma velocidade inferior 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 [12].

2.2.2 Ruído ambiente

A propagação do sinal acústico é muito eficaz a baixas frequências, contudo a sua largura de banda é extremamente limitada.

O ruído é um dos fatores que mais influência a comunicação acústica subaquática. A característica do ruído depende de cada ambiente aquático e fatores externos a esse ambiente como por exemplo, a passagem de um navio ou o gelo a quebrar-se. Tudo isto provoca ruídos. O ruído do ambiente provém de fontes como a turbulência da água, a rebentação de ondas e a chuva.

A Figura 2-1 mostra a densidade espectral de potencia do ruído ambiente para diversos valores de velocidade do vento (o vento influencia o comportamento das ondas do mar) e vários níveis de atividade de navios (são quantificados numa escala de 0 a 1). A densidade espectral de potência do ruído ambiente decai a uma taxa de cerca de 18 dB/década e é representada pela linha reta tracejada [13].

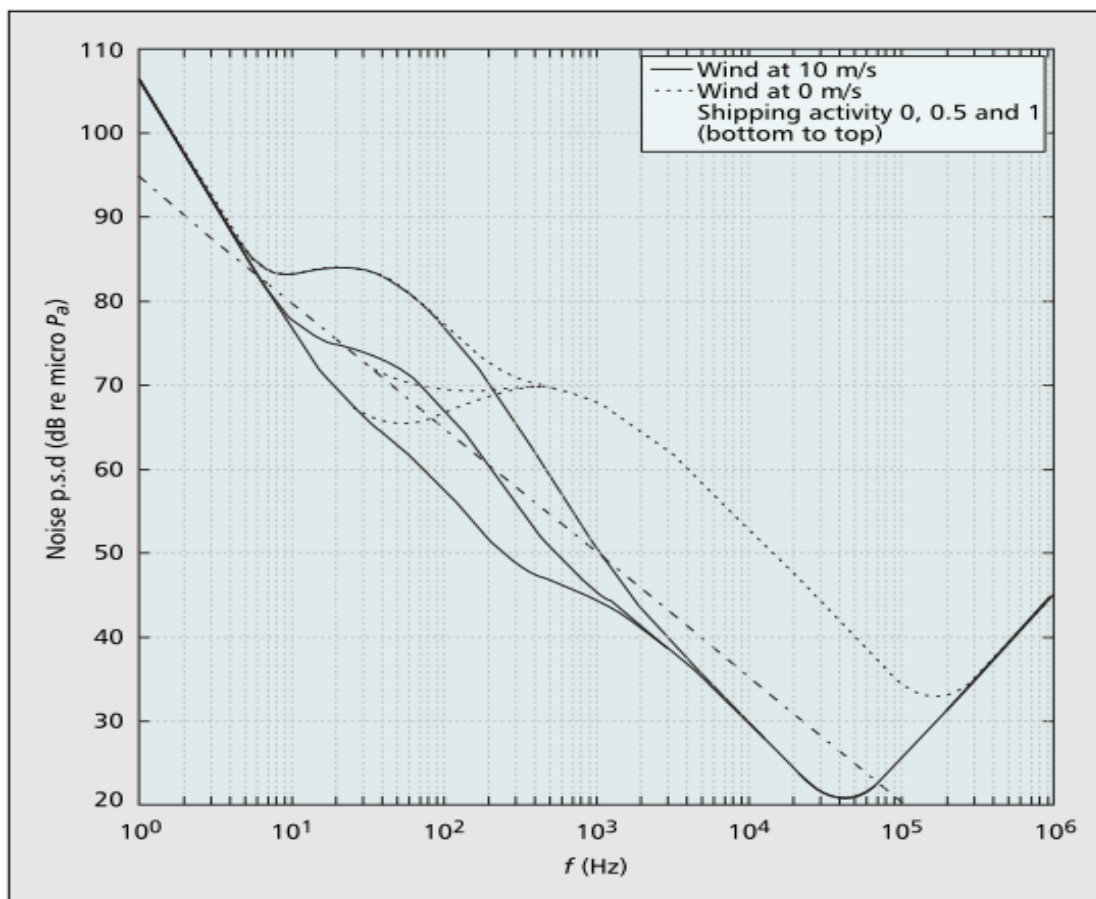


Figura 2-1-Densidade espectral de potência do ruído ambiente [12].

2.2.3 Atenuação

A atenuação consiste numa redução da potência do sinal ao longo do meio de transmissão e aumenta com a distância e frequência. No meio subaquático, se os níveis de atenuação acústica forem relativamente baixos, podem-se atingir comunicações na ordem de dezenas de quilómetros [15].

Assim sendo é importante perceber os fatores que provocam a atenuação do sinal acústico subaquático de forma a poder-se estudar e estipular um alcance que permita ao emissor e recetor estabelecerem uma comunicação eficaz. A atenuação é caracterizada principalmente por três fatores: *spreading loss*, *absorption loss* e *scattering loss*.

Contudo, existem outros fatores que também atenuam o sinal embora de uma forma mais reduzida.

2.2.4 Spreading loss

Spreading loss ou perda por espalhamento, é a perda de energia que sofre um sinal quando se propaga por uma área cada vez maior. Esta perda de energia cresce com o aumento da área que o sinal atravessa. Existem três tipos de espalhamento: esférico, cilíndrico e direcional. Neste trabalho será analisado com mais detalhe o espalhamento direcional, uma vez que foi o único a ser usado na fase de testes e simulações. A seguir, serão estudadas as suas características assim como os cálculos para determinar a perda por transmissão expressa em decibéis de todos os tipos de espalhamentos.

2.2.4.1 Espalhamento esférico

Espalhamento esférico, ocorre quando a fonte se encontra no meio do oceano e transmite um sinal que é distribuído uniformemente sobre todas as direções, como é demonstrado na Figura 2-2.

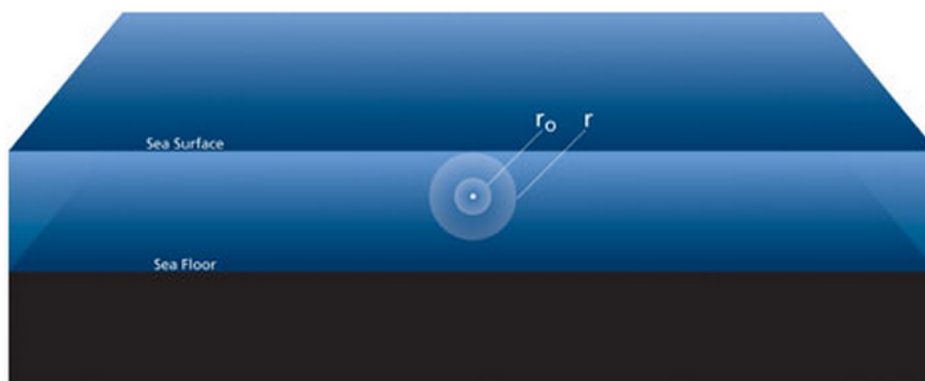


Figura 2-2 Espalhamento esférico

A perda por transmissão pode ser expressa em Decibéis através da seguinte equação:

$$TL = -10 \text{Log}_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 \text{Log}_{10}(r^2) = 20 \text{Log}_{10}(r) \text{ dB}$$

Onde I_0 é a intensidade acústica referente à distância r_0 e I corresponde à intensidade acústica referente à distância r .

2.2.4.2 Espalhamento cilíndrico

No espalhamento cilíndrico, o som não se propaga uniformemente em todas as direções porque é limitado pela superfície e o fundo do oceano. Isto acontece quando a fonte de transmissão se encontra num meio aquático com pouca profundidade. Em baixo, na Figura 2-3 pode-se observar que a onda acústica começa por espalhar-se sob a forma esférica até a atingir a superfície e o fundo do oceano. Quando a onda acústica atinge a superfície e o fundo oceânico, esta começa gradualmente a espalhar-se sob a forma cilíndrica com o som a propagar-se horizontalmente em relação à fonte de transmissão.

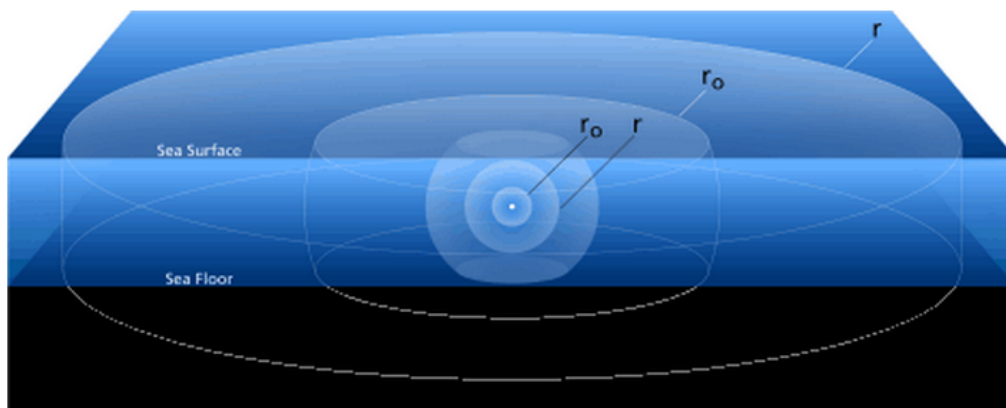


Figura 2-3 Espalhamento cilíndrico

A perda por transmissão pode ser expressa em decibéis através da seguinte equação:

$$TL = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 \text{Log}_{10}(r) \text{ dB}$$

Onde I_0 é a intensidade acústica referente à distância r_0 e I corresponde à intensidade acústica referente à distância r .

2.2.4.3 Espalhamento direcional

O espalhamento direcional acontece em situações em que a fonte de transmissão emite somente um sinal numa determinada direção ao contrário do espalhamento cilíndrico e esférico que é propagado em todas as direções. Quando isto acontece, a onda sonora é propagada sob a forma de um feixe com um determinado ângulo. A Figura 2-4 mostra um exemplo do espalhamento direcional.

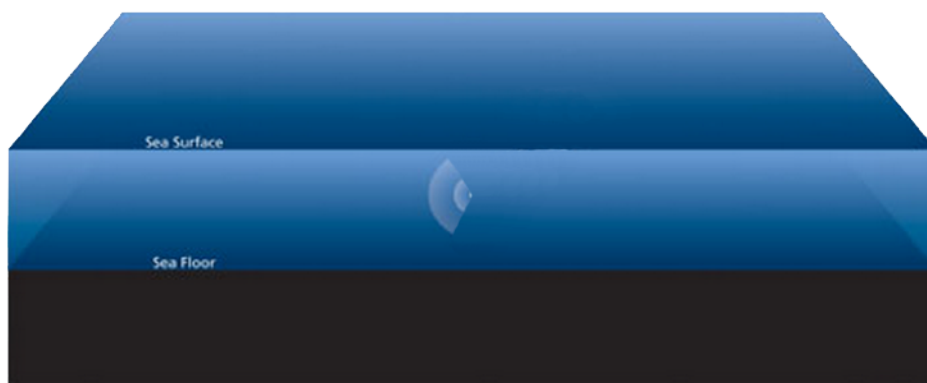


Figura 2-4 Espalhamento direcional.

Para se calcular a perda por transmissão é necessário de calcular o valor do ângulo de divergência do feixe (δ) que é dado por [16]:

$$\delta = 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{D}\right)$$

Onde, D é o diâmetro do transdutor e λ é o comprimento de onda.

A perda por transmissão é expressa através da seguinte equação:

$$TB = 10\text{Log}\left(\frac{I_0}{I}\right) = 10\text{Log}\left(\frac{\delta r^2}{\pi r_0^2}\right)$$

Onde TB é expresso em dB, I_0 é a intensidade acústica referente à distância r_0 e I corresponde à intensidade acústica referente à distância r .

2.2.5 Absorption loss

Quando uma onda acústica se propaga no meio subaquático é inevitável ocorrer uma perda gradual do sinal por absorção. A perda por absorção significa a conversão de energia acústica em calor devido à viscosidade, a reações químicas que envolvem iões na água do mar e à condutividade térmica [17]. Esta perda pode ser expressa em decibéis através da equação de Ainslie & McColm, que relaciona a temperatura, a profundidade, as reações químicas do ácido bórico e sulfato de magnésio e finalmente a acidez da água (pH) [18].

$$\alpha(f) = \frac{0.106(f_1 f^2) e^{(pH-S/0.56)}}{f_1^2 f^2} + \frac{0.52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{S}{35}\right) (f_2 f^2) e^{(-\frac{D}{6})}}{f_2^2 f^2} + 0.00049 f^2 e^{-\left(\frac{T}{27} + \frac{D}{17}\right)}$$

T representa o valor da temperatura em graus Celsius, S simboliza a salinidade em ppt, D é a profundidade em metros, pH é acidez da água, f_1 e f_2 são as frequências introduzidas pelo ácido bórico e o sulfato de magnésio respetivamente.

De uma forma mais específica, o efeito da viscosidade é significativo acima dos 100kHz; já o efeito das reações iónicas são unicamente sentidas entre os 10 kHz até os 100 kHz. De uma forma geral o coeficiente de absorção α aumenta com o aumento de frequência e decresce com o aumento da profundidade [19].

O coeficiente de absorção é também significativamente maior na água do mar relativamente à água doce devido às reações iónicas.

A Figura 2-5 mostra segundo o modelo de Ainslie & McColm, a contribuição das diferentes fontes de absorção em função da frequência.

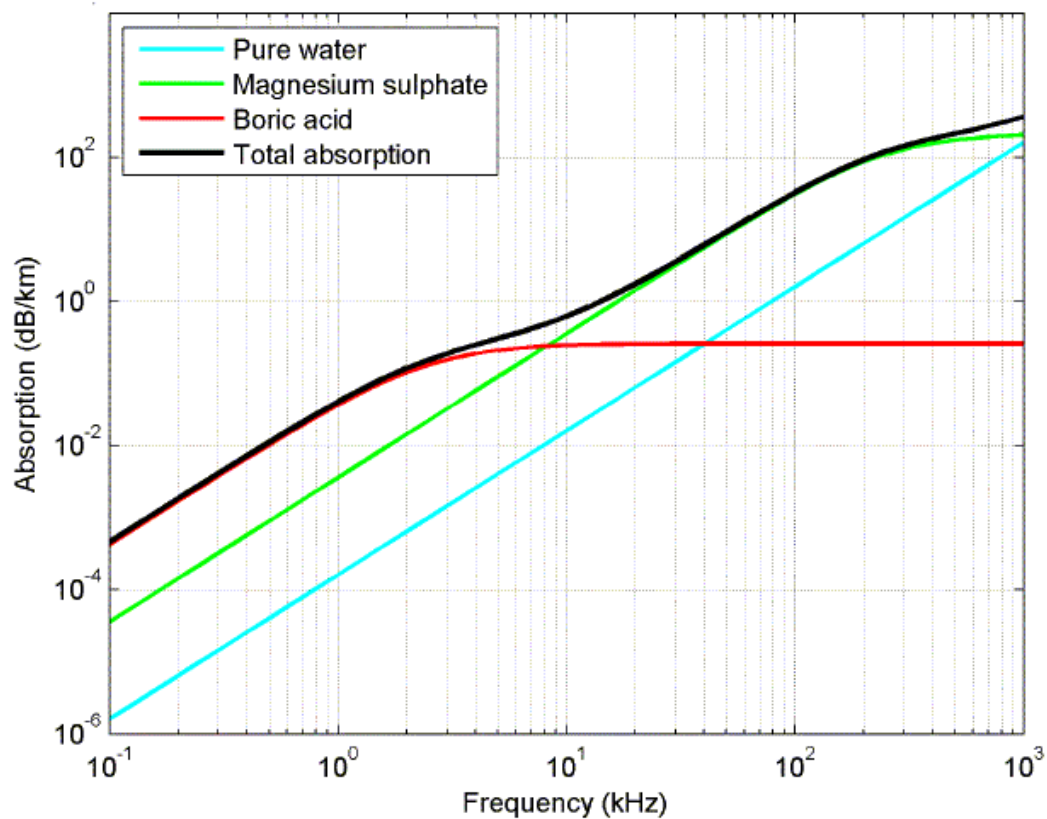


Figura 2-5 Absorção em água do salgada.

2.2.6 Atraso de propagação

A velocidade típica de ondas acústicas perto da superfície do oceano é cerca de 1500m/s, mais de quatro vezes mais rápido que a velocidade do som no ar. No entanto, a velocidade do som no meio subaquático é bastante afetada pela temperatura, profundidade e salinidade. Estes parâmetros são variáveis e diferem de lugar para lugar na água, logo a velocidade também é variável [20].

A velocidade do som na água v pode ser calculada de acordo com a equação de Mackenzie [21].

Capítulo 2

$$v = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) \\ + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S - 35) \\ - 7.139 \times 10^{-13}TD^3$$

Onde:

T,D e S correspondem à Temperatura ($2-30^{\circ}C$), Profundidade (0-8000m) e Salinidade (25-40PPT), respetivamente.

A Figura 2-6 representa um estudo realizado sobre o perfil da velocidade do som até 200 m de profundidade. É possível verificar que a profundidade e a temperatura têm muita influência sobre a velocidade do som no meio aquático.

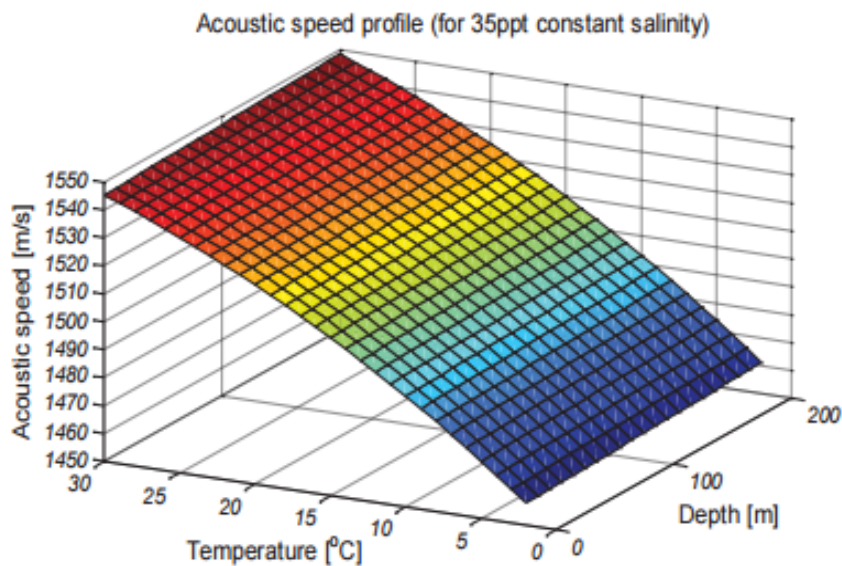


Figura 2-6 Velocidade do som de acordo com a equação de Mackenzie [20].

2.2.7 Multi-percurso

O efeito multi-percurso é um problema bastante comum na comunicação acústica subaquática. Quando um sinal é transmitido, várias réplicas desse sinal irão atingir o recetor através de diferentes caminhos, com diferentes atenuações e atrasos. Este efeito resulta na interferência inter-simbólica e tem origem em dois

acontecimentos: a reflexão e a refração do som no oceano. A reflexão acontece quando as ondas atingem a superfície, o fundo ou qualquer objeto que esteja no seu caminho. Normalmente este efeito está mais associado a ambientes com águas rasas. A refração das ondas acústicas está mais relacionada com águas profundas, onde a velocidade do som varia com a profundidade [22].

Desta forma o sinal transmitido vai chegar ao recetor com uma série de ecos, e quanto maior for o número de reflexões menor vai ser a amplitude de cada um deles [23]. Em termos práticos, este efeito vai criar problemas no processamento do sinal no domínio dos tempos e o desempenho do sistema pode ser bastante afetado. Nos melhores dos cenários podem-se ter dezenas de multi-percursos ou centenas no caso de longas distâncias.

A Figura 2-7 representa o efeito multi-percurso no domínio dos tempos. O cenário tem as seguintes características: profundidade da água igual a 90 m, distância horizontal 1000 m, profundidade do transmissor de 15 m, profundidade do recetor 83 m.

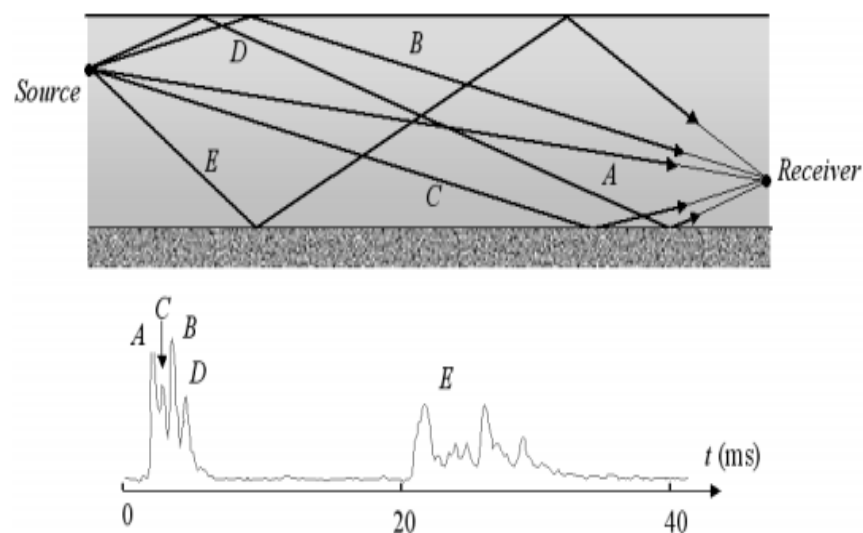


Figura 2-7 Efeito multi-percurso [21].

Capítulo 2

É de notar que as ondas com menos reflexões nomeadamente a A e B chegam ao recetor com menos atenuação. O grau das reflexões também influenciam os caminhos a serem percorridos por cada onda, variando o tempo de receção como por exemplo o primeiro grupo que demora cerca de 4 ms e o segundo grupo que chega 20 ms mais tarde.

2.2.8 Bolhas

As bolhas geradas pelo rebentamento das ondas na superfície do mar têm uma grande influência na propagação das ondas acústicas de alta frequência, tanto em locais costeiros como em alto mar. As camadas de bolhas junto à superfície podem provocar atenuações significativas dos sinais dispersos por esta zona [14]. Mas não existem somente bolhas na natureza, os transdutores podem também criar bolhas e apesar de não serem tão significativas podem influenciar o processamento do sinal acústico.

Experiências realizadas sobre a influência das bolhas num sinal acústico a uma frequência de 30 Hz, revelaram uma atenuação de cerca de 3dBs [24].

3. Técnicas de modulação digital

A comunicação é o processo de transmissão de dados através do espaço e tempo. A informação transmitida pode ser vídeo, imagem, áudio ou qualquer outra informação que possa ser digitalizada e enviada sob a forma de sinais elétricos. O desafio que se vive atualmente na era das comunicações é a investigação e desenvolvimento de sistemas capazes de ultrapassar problemas como congestão espectral, interferências ou ruídos dos canais de comunicação e, ao mesmo tempo, garantir elevados débitos binários de forma segura e eficaz. Isto é um processo extremamente complexo que envolve a criação de novas técnicas de codificação e modulação [25].

A modulação, assume desta forma um papel crucial nas comunicações. Modular é a modificação de um sinal eletromagnético inicialmente gerado, antes de ser radiado, para que este transporte informação sob uma onda portadora. Normalmente, sobrepõe-se uma onda portadora ao sinal que se pretende transmitir, como pode ser visto na Figura 3-1.

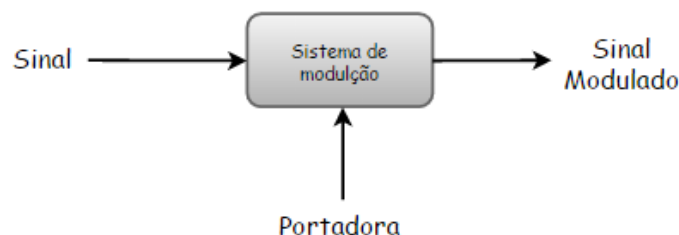


Figura 3-1 Modelo de um sistema de modulação.

Assim, através da utilização de uma onda portadora que geralmente é uma onda sinusoidal de alta frequência, obtêm-se as propriedades mais adequadas do sinal para os canais de transmissão. Neste propósito, se a variação da onda portadora é contínua no domínio do tempo, tem-se uma modulação analógica, caso seja discreta tem-se uma modulação digital.

É ainda importante referir que geralmente a onda portadora é uma senoide de acordo com a seguinte expressão:

$$V_c(t) = \text{Cos}(2\pi f_c t + \phi)$$

Onde os parâmetros A , f_c e ϕ podem variar com o propósito das transmissão de dados, sendo eles a amplitude, a frequência e a fase da modulação respetivamente.

Independentemente da modulação escolhida ser analógica ou digital, é sempre necessário reverter todo este processo para que o recetor possa recuperar a informação do sinal original, este processo designa-se por desmodulação.

Ainda neste capítulo serão estudadas as diferentes técnicas de modulação que existem para os sistemas de comunicação analógico e digital. Além disso, serão discutidas as suas vantagens e desvantagens e as devidas comparações entre elas.

3.1 Comunicação analógica versus digital

Quando se iniciaram as comunicações sem fios, a comunicação analógica era a tecnologia predominante. Atualmente, os sistemas de rádio ainda funcionam com modulação analógica, contudo a tecnologia digital ganhou maior notoriedade com os seus progressos, conferindo cada vez mais vantagens em relação à tecnologia analógica.

Pode-se também afirmar, que o facto de a comunicação analógica existir há tanto tempo, levou à sua estagnação em termos de inovação. Ao invés, as plataformas digitais têm vindo a evoluir exponencialmente nos seus desempenhos e aplicações, nomeadamente no setor das telecomunicações. Grande parte dos sistemas utilizados atualmente são digitais e o impacto financeiro e económico neste setor é elevadíssimo. A escolha entre estes dois tipos de comunicações face às necessidades de um sistema não é fácil, a comunicação analógica tem um passado histórico muito forte e longo o suficiente para que as suas funcionalidades e características fossem melhoradas. A sua principal vantagem é que se for necessário implementar um sistema de comunicação analógica para realizar uma determinada

tarefa, é muito provável que a solução já se encontre disponível no mercado. Por outro lado, a comunicação digital confere um leque bastante elevado de vantagens sobre a comunicação analógica no setor das telecomunicações, sendo por isso a eleita a ser usada neste trabalho.

3.2 Vantagens da comunicação digital

Os sistemas de comunicação digitais representam um aumento na complexidade em relação aos sistemas de comunicação analógicos. Por isso, em baixo serão apresentadas algumas das razões que levaram à substituição dos sistemas de comunicação analógicos pelos sistemas comunicação digitais.

- **Simples e baratos**

Devido aos avanços nas tecnologias de circuitos integrados digitais e computadores de alta velocidade, os sistemas de comunicação digitais são mais simples de construir e apresentam um custo mais baixo. No mercado existem muitas soluções de sistemas num *chip* que podem ser facilmente integradas em novos projetos, sendo possível reprogramar *hardware* e atualizar o sistema, sem qualquer custo.

- **Mais seguro**

Com utilização da encriptação de dados, apenas os recetores admitidos são autorizados a detetar os dados transmitidos. É muito útil em aplicações militares.

- **Maior alcance**

Os sinais conseguem atingir um maior alcance desde que os dados sejam convertidos em formato digital.

- **Capacidade de multiplexagem**

Usando multiplexagem, os dados de áudio, vídeo e até outros, podem ser incorporados e transmitidos através do mesmo canal.

- **Maior tolerância ao ruído**

Na amplificação do sinal, o ruído não é amplificado.

- **Deteção e correção de erros**

Com a utilização da codificação do canal, é possível detetar e corrigir os erros nos recetores. Resultando numa melhoria da taxa global de erro de bit.

3.2.1 Desvantagens da Comunicação Digital

Apesar da comunicação digital ser uma tecnologia apontada como bastante superior à comunicação analógica, devido às suas inúmeras vantagens, existem algumas desvantagens que podem por em causa a sua escolha. As desvantagens são:

- **Eficiência energética**

A eficiência energética é a capacidade de preservar com fidelidade uma mensagem digital a baixos níveis de energia. O problema é que para combater o ruído, é necessário aumentar a potência do sinal.

- **Eficiência de largura de banda**

A eficiência de largura de banda refere-se à eficiência com que a largura de banda alocada é usada. O aumento da taxa de dados implica a redução do pulso de cada símbolo digital, que provoca o aumento da largura de banda do sinal.

- **Compensações**

Se adicionarmos códigos de controlo de erros, reduz a eficiência da largura de banda, mas aumenta a eficiência energética.

- **Custo e complexidade dos recetores.**

O custo e a complexidade dos recetores em relação à comunicação digital são maiores.

3.3 Técnicas de modulação digital

3.3.1 ASK

Neste tipo de modulação a amplitude do sinal varia com a sequência binária, mantendo a sua fase e a frequência inalteradas. Quando um bit é “1” a amplitude aumenta para um valor específico, quando o bit é “0” a amplitude do sinal decresce para outro valor. Na Figura 3-2 pode-se observar o resultado desta técnica de modulação.

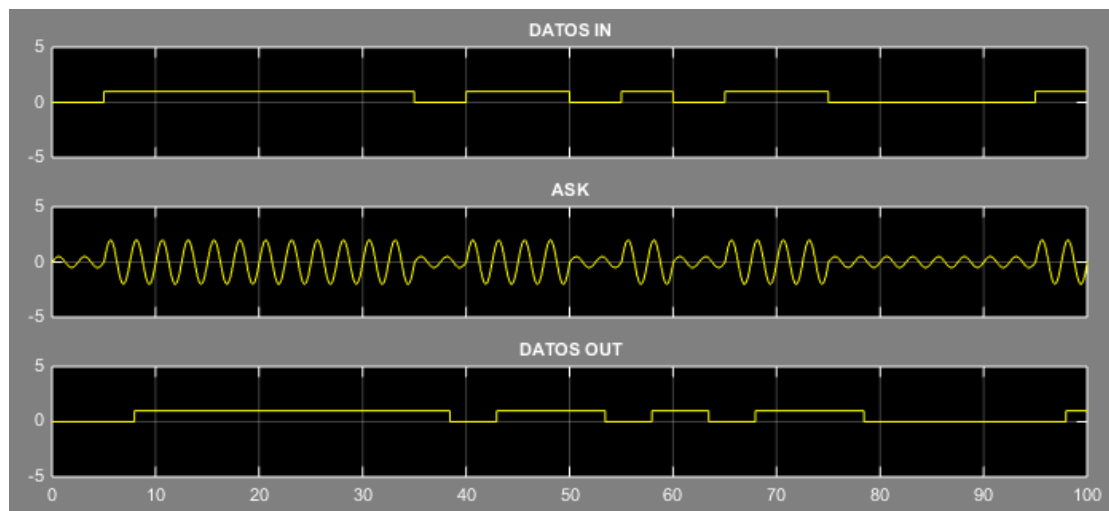


Figura 3-2 Modulação ASK.

A vantagem e a desvantagem desta modulação são:

- Vantagem:

Capítulo 3

- Simplicidade.
- Desvantagem:
 - Muito suscetível a interferência de ruído.

3.3.2 BPSK

Na modulação BPSK, o sinal transmitido é uma senoide de amplitude e frequência fixa. Este sinal tem uma fase fixa quando o bit de dados é “1”, quando o bit de dados é “0”, a fase é alterada em 180 graus. A Figura 3-3 representa o resultado da modulação BPSK.

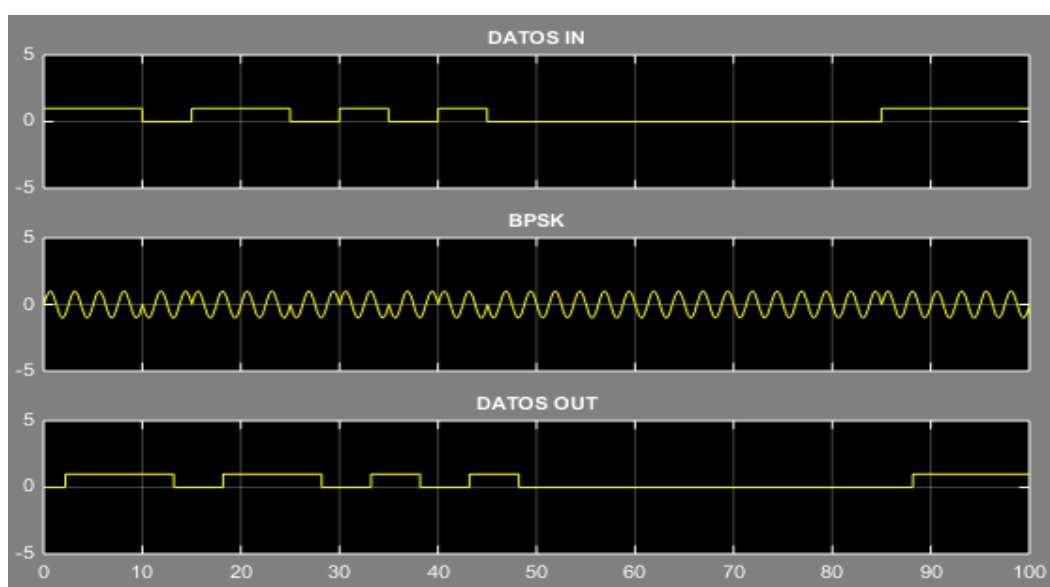


Figura 3-3 Modulação BPSK.

As vantagens e desvantagens são:

- Vantagens:
 - A modulação BPSK é menos suscetível a erros do que a modulação ASK e requer a mesma largura de banda.
 - É mais eficiente no uso da largura de banda em relação à modulação FSK.
- Desvantagens:

- Os processos de recuperação e detecção de sinal são mais complexos.

3.3.3 FSK

Nesta técnica de modulação, o princípio é variar a frequência consoante o valor binário. Quando se encontra na sequência binária um bit a “1”, a frequência do sinal tem um determinado valor, quando o bit muda para “0” a frequência muda para outro valor específico. O resultado desta técnica de modulação pode ser observado na Figura 3-4.

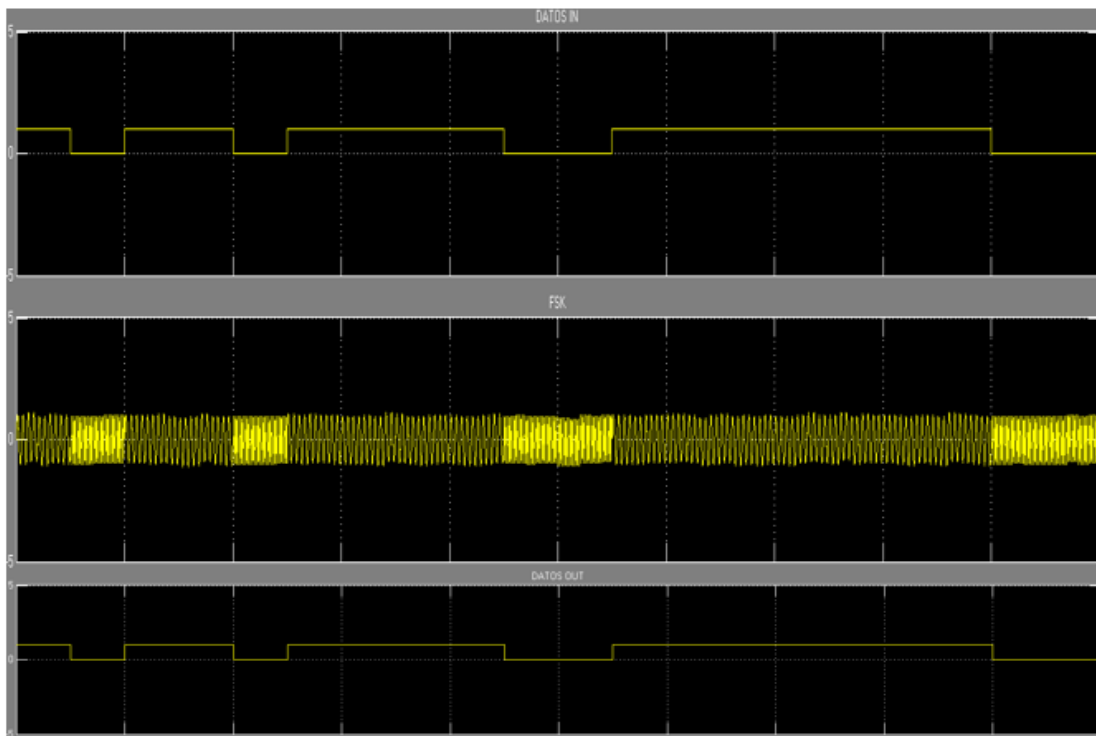


Figura 3-4 Modulação FSK.

Capítulo 3

As vantagens e desvantagens desta modulação são:

- Vantagens:
 - A modulação FSK é menos suscetível a erros do que a modulação ASK, uma vez que o recetor procura uma alteração de frequência sobre intervalos de tempo, permite que o ruído seja eliminado.
- Desvantagens:
 - O espectro da modulação FSK é duas vezes maior que o da modulação ASK.

3.3.4 OOK

Esta técnica de modulação é um caso particular da técnica de modulação ASK. A diferença é que quando o bit “0” é transmitido a amplitude fica a zero no sinal modulado. Na Figura 3-5 pode ser observado o resultado desta técnica de modulação.

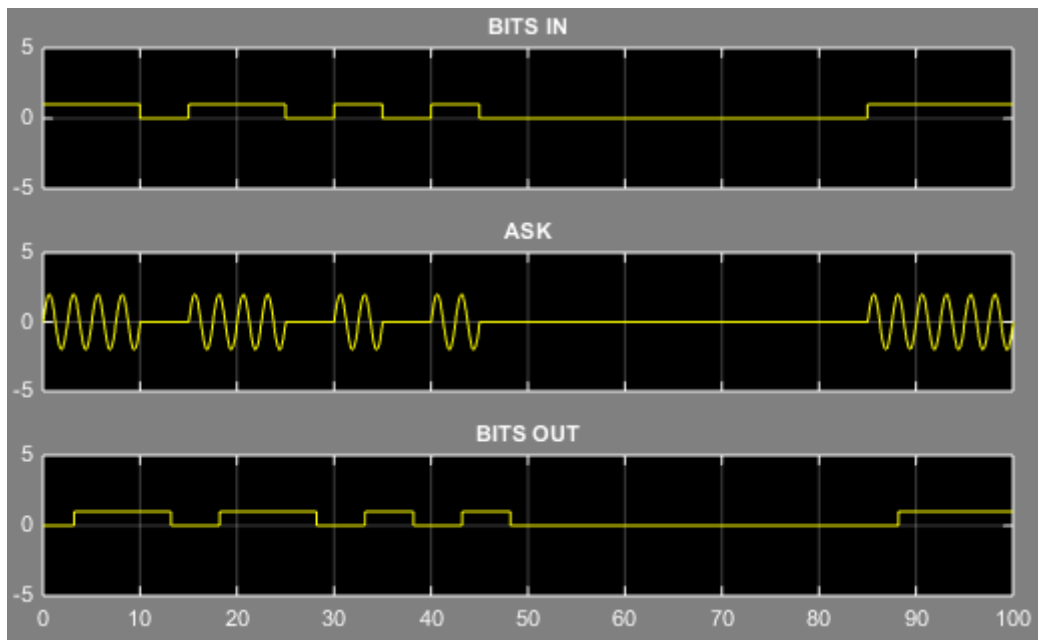


Figura 3-5 Modulação OOK.

As vantagens e desvantagens desta técnica são:

- Vantagens:
 - Esta técnica permite ao transmissor ficar inativo durante a transmissão do bit "0", aumentando a poupança de energia.
 - Simplicidade e custo de implementação.
- Desvantagens:
 - Muito sensível a ruído e interferências pois um sinal indesejado pode ser detetado como um falso bit a "1".

3.3.5 QPSK

O princípio da técnica de modulação QPSK é o mesmo que a técnica de modulação PSK, a fase do sinal varia consoante a sequência de bits que entra. A única diferença é que a fase varia 90 graus, ao contrário dos 180 graus da técnica PSK, o que possibilita codificar 2 bits por intervalo, ou seja, são gerados quatro sinais diferentes que representam 2 bits cada um deles (tabela 3-3). Na Figura 3-6 pode-se observar um exemplo desta modulação.

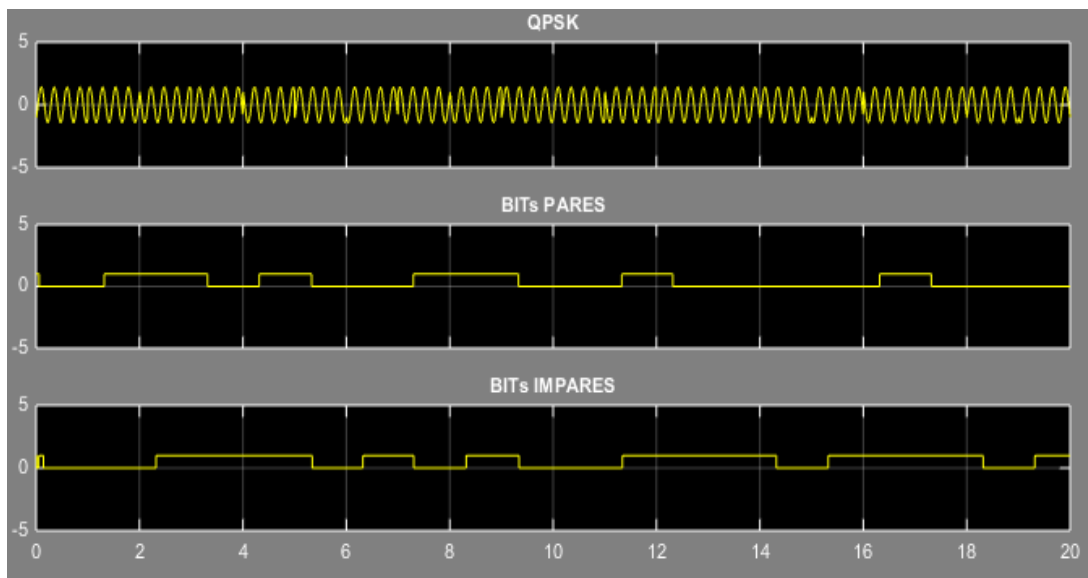


Figura 3-6 Modulação QPSK.

Tabela 3-3 Correspondência entre bits e fase.

Bits	Fase
00	0
01	90
10	180
11	270

3.4 Sistemas existentes

O foco desta dissertação tem como base o desenvolvimento de um *modem* acústico subaquático. Neste contexto, é importante saber que produtos existem disponíveis no mercado, quais as suas especificações e os seus custos. Na Tabela 3-4 apresentam-se as características mais importantes de vários produtos comercializados desde o custo, a largura de banda, a técnica de modulação utilizada, a distância, a profundidade, a potência de transmissão e a potência de receção.

Tabela 3-4-Modems acústicos subaquáticos

	LinkQuest UWM 2200	WHOI Micro- Modem	Aquamodem	Benthos 903 Séries ATM- 903
Taxa de transmissão de dados	19200-38400 bps	300-5400bps	300 - 2000 bps	2560 -15,360 bps
Largura de Banda	54.55-89.25 kHz	25 kHz	7.5 - 12 kHz	9 - 14 kHz 16 - 21 kHz 22 - 27 kHz
Técnica de modulação	Não fornecido	FSK e PSK	FSK e DPSK	PSK e MFSK
Distância	1 km	Até 4 km	até 20 km	2 - 6 km
Profundidade	1 km ou 2 km	500 m	1 km	200 m, 500 m ou 6 km
Potência de transmissão	6 W	10-100 W	20 W	2 a 20W
Potência de recepção	1 W	158 mW-2W	0.6 W	720 mW
Custo	5812 €	2905 €	Não está a ser comercializado de momento.	4359 €

Capítulo 3

Existem investigadores como Wills [26] e Nam [27] que apostaram no desenvolvimento de *modems* menos complexos. No caso de Wills, o *modem* é baseado numa técnica de modulação FSK; já Nam baseou-se na técnica de modulação ASK. Ambos os sistemas apresentam baixos consumos energéticos e elevados débitos binários. Contudo grande parte dos trabalhos existentes ainda se encontra em desenvolvimento ou em fase de testes.

Uma das grandes motivações desta dissertação advém no sentido desta tecnologia de comunicação subaquática ainda se encontrar numa fase muito prematura em termos de desenvolvimento e com informação pouco disponível. Assim, espera-se dar mais um contributo para a comunidade científica e criar uma oportunidade para a comercialização de um produto que visa ajudar a monitorização e exploração subaquática de toda a área económica marítima portuguesa.

4.Arquitetura do sistema

Esta dissertação é o seguimento de outras envolvidas no projeto do *modem* acústico subaquático. Para que seja possível atingir os objetivos desta dissertação é necessário conhecer todo o trabalho desenvolvido até agora. Este capítulo será dividido em duas partes, as secções *hardware* e *software*. Na secção *hardware* é abordado tudo o que foi feito até agora, desde as decisões técnicas, a caracterização de todos os componentes envolvidos e, finalmente, a estrutura do sistema dividida em blocos. A secção *software* aborda todas as ferramentas utilizadas para a implementação do modulador/desmodulador.

4.1 Hardware

O modem acústico é um sistema constituído por dois módulos interligados entre si: o módulo de comunicação e o módulo acústico.

O módulo de comunicação é um computador pessoal que interage com o módulo acústico sob a forma de emissor ou recetor de dados. Em casos particulares pode exercer uma comunicação bilateral ou seja receber e enviar dados.

O módulo acústico é dividido em dois: um módulo responsável pela modulação e transmissão de dados para o meio aquático sob a forma de um sinal acústico, e outro módulo responsável pela receção e desmodulação desse sinal acústico. É no módulo acústico que se encontram todos os componentes eletrónicos, que são divididos em blocos e serão estudados com mais detalhe na secção “Arquitetura do sistema”. Na Figura 4-1 é possível observar o diagrama de blocos de *hardware*.

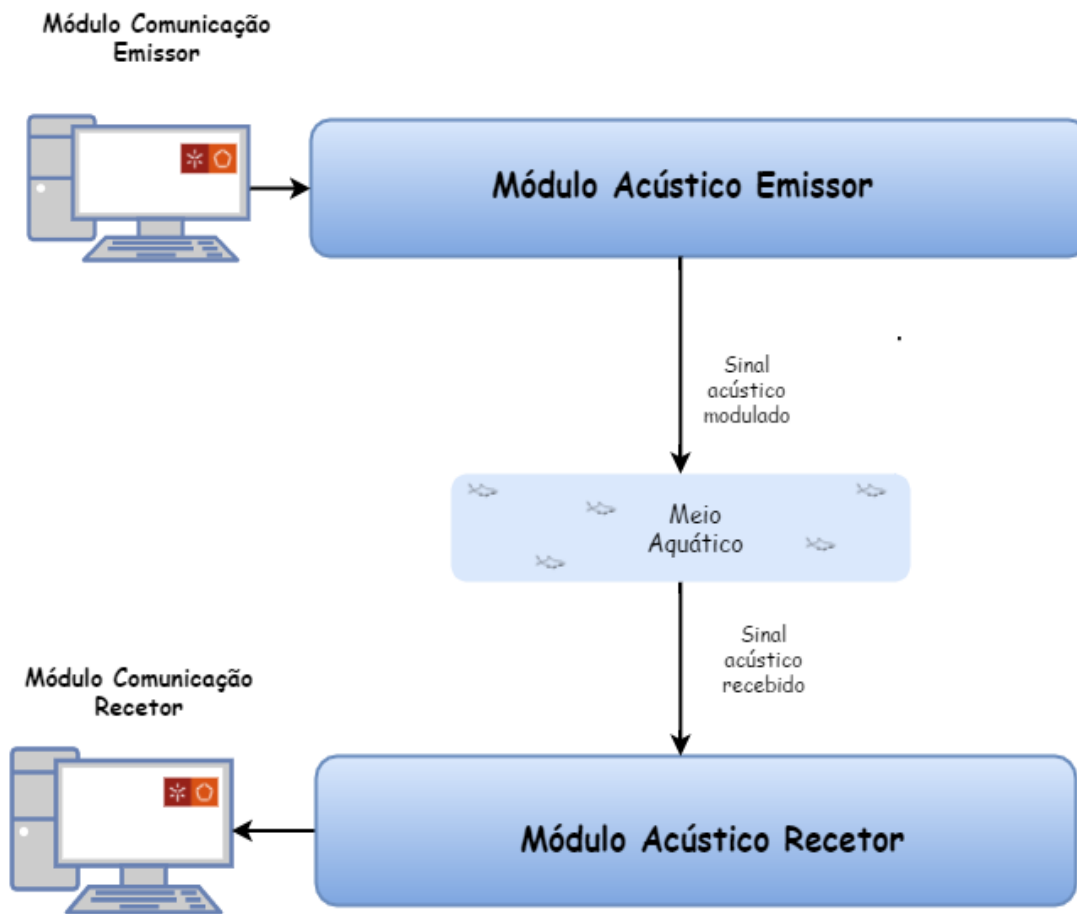


Figura 4-1 Diagrama de blocos *hardware*.

4.1.1 Arquitetura do sistema

Para uma melhor compreensão do sistema de comunicação acústico subaquático é necessário analisar com mais detalhe o módulo acústico e os seus componentes eletrónicos. De seguida, com o apoio da Figura 4-2, será explicado, de uma forma geral, a arquitetura e funcionamento do sistema. Ainda neste capítulo será analisado individualmente cada componente eletrónico do módulo acústico devido a sua complexidade.

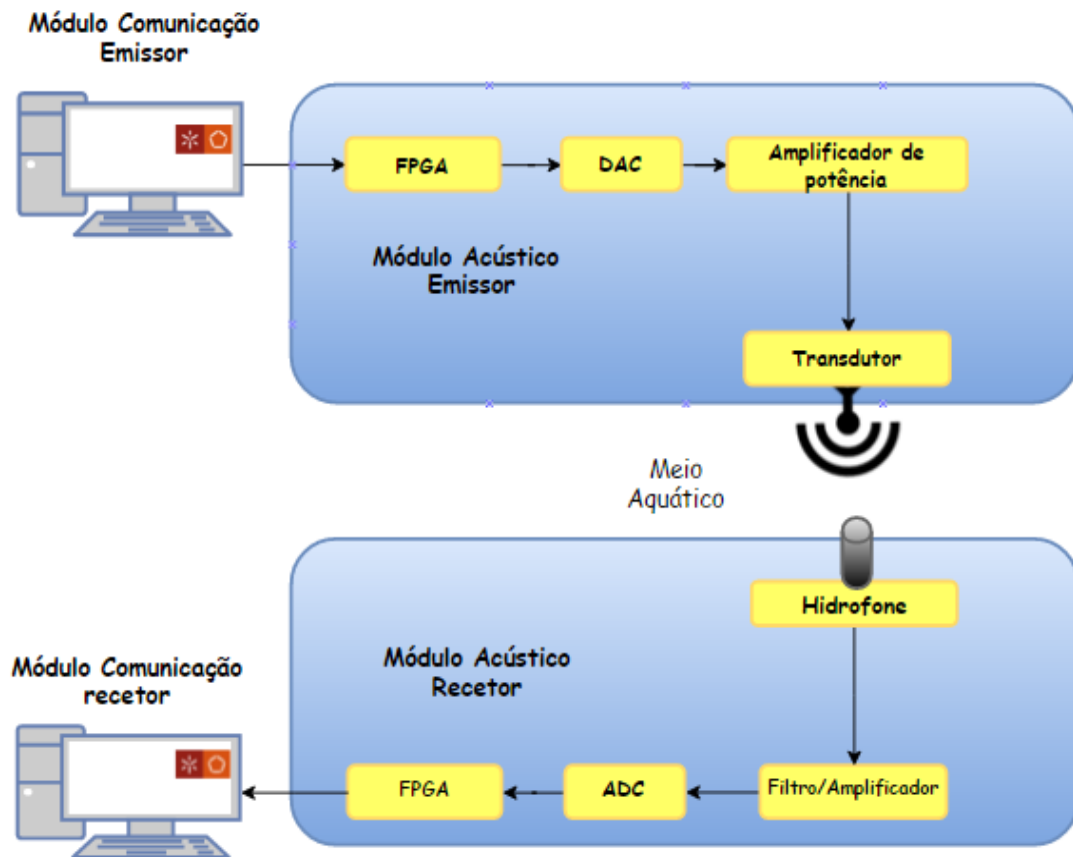


Figura 4-2 Arquitetura do sistema.

O processo de transmissão do sinal para o meio aquático é efetuado da seguinte forma: um computador pessoal envia dados sob a forma de um sinal elétrico para o módulo acústico. Este sinal elétrico é processado e modulado digitalmente através de uma FPGA. De seguida um conversor digital - analógico (DAC) converte o sinal. Antes de transmitir o sinal para o meio aquático, através de um transdutor, é necessário amplificar o sinal para que atinja as distâncias desejadas. sendo para tal usado um amplificador de potência. O transdutor, através das suas vibrações, transforma o sinal elétrico em ondas acústicas que são emitidas para o meio aquático.

Para receber as ondas acústicas propagadas no meio aquático é usado um hidrofone. Contudo, é necessário aplicar um filtro passa-banda (BPF) com um ganho

Capítulo 4

associado, para filtrar as frequências indesejadas e amplificar o sinal. Para que seja possível desmodular o sinal através da FPGA, este não pode chegar no formato analógico, sendo por isso usado um conversor ADC para converter o sinal analógico em digital. Depois de converter o sinal no formato digital, este é desmodulado pela FPGA e, uma vez recuperados os dados originais, estes são enviados para um computador.

Todos os componentes eletrônicos enunciados em cima, que fazem parte do módulo acústico, serão analisados individualmente para que se possam conhecer as suas características e funções.

4.1.2 FPGA

As FPGAs surgiram na década de 80 e atualmente são componentes bastante usados em áreas como a indústria militar, dispositivos médicos e nas telecomunicações. A FPGA é um Chip constituído por células lógicas programáveis, que são distribuídas em forma de uma matriz e podem se interligar em diferentes modos. A FPGA, através do código criado pelo utilizador, permite gerar fisicamente as ligações necessárias para criar a função lógica que desejamos. A FPGA é uma ferramenta muito poderosa porque, ao contrário de processador normal que executa o código sequencialmente, a FPGA permite que diferentes funções lógicas localizadas internamente, e em diferentes sítios, sejam executadas em paralelo, ou seja, se tivermos um grande número de entradas, todas elas podem funcionar em simultâneo o que permite enviar e processar muitos dados na FPGA a velocidades elevadíssimas. A Figura 4-3 é representada a estrutura básica de uma FPGA.

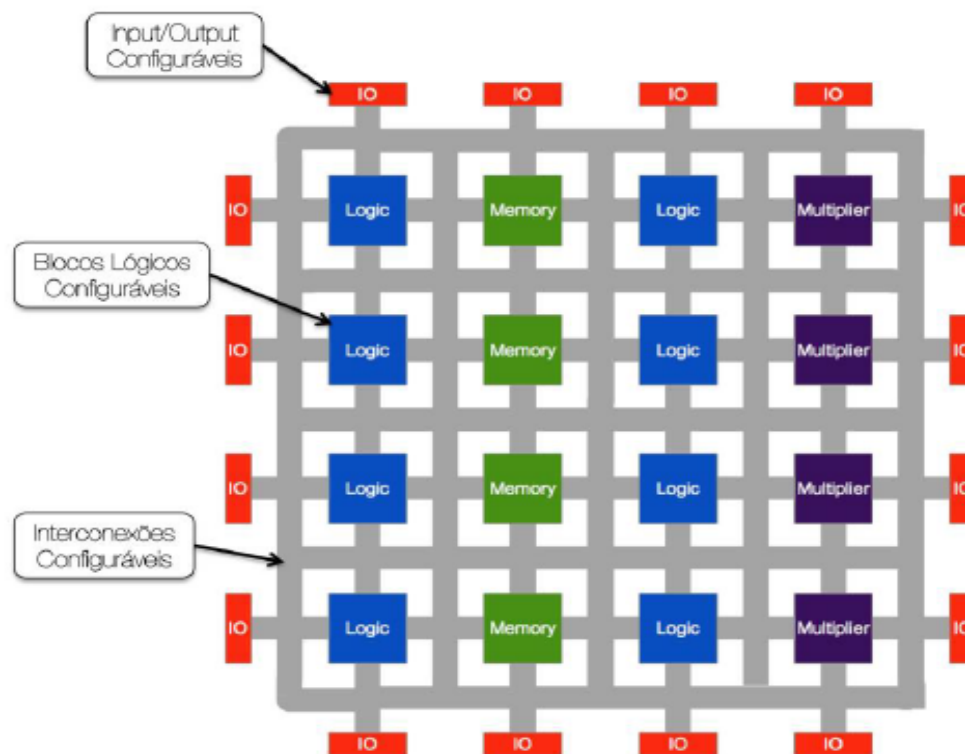


Figura 4-3 Estrutura básica de uma FPGA.

Capítulo 4

No sistema proposto a FPGA é responsável pelas funções de processamento e controlo. A tarefa principal é processar os sinais digitais através da implementação do modulador e do desmodulador. É também responsável pelo controlo dos circuitos eletrónicos do DAC e do ADC.

A FPGA utilizada neste sistema pertence à família Spartan-6 XC6SLX9 e pode ser visualizada na Figura 4-4.

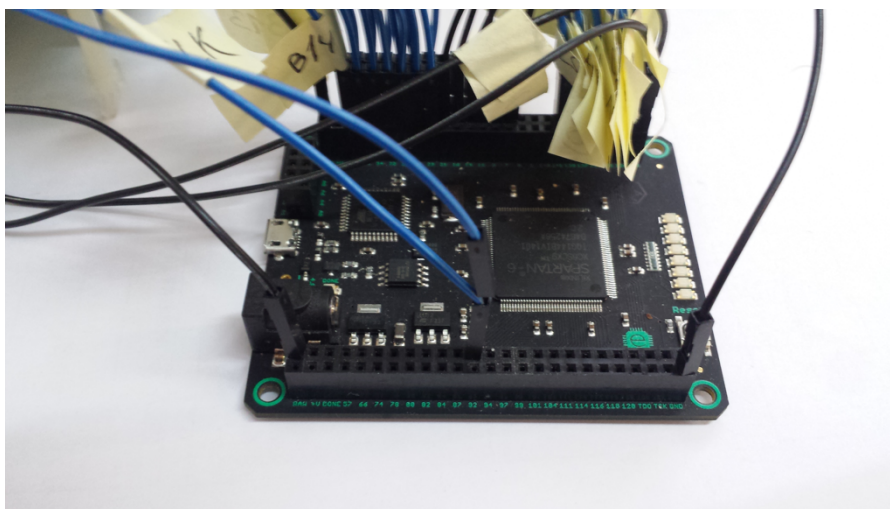


Figura 4-4 FPGA Spartan-6.

Na Tabela 4-1-2 encontram-se as suas principais especificações.

Tabela 4-1-2- Especificações FPGA Spartan 6 XC6SLX9.

FPGA Spartan-6 XC6SLX9	
Células lógicas	9152
Memória (Kb)	576
Blocos DSP	16
I/O máximos	200

4.1.3 Eletrónica de Instrumentação

A placa de instrumentação, apresentada na Figura 4-5 Placa de instrumentação., é constituída por dois módulos: o módulo conversor digital-analógico e o módulo conversor analógico-digital. O módulo conversor digital-analógico é responsável pela conversão de um código digital para um sinal analógico, por sua vez, o módulo conversor analógico-digital converte sinais analógicos (quantidade contínua) em sinais digitais (representação digital em tempo discreto). De seguida, serão analisadas todas as características destes módulos e será explicado a forma como interagem com o sistema.

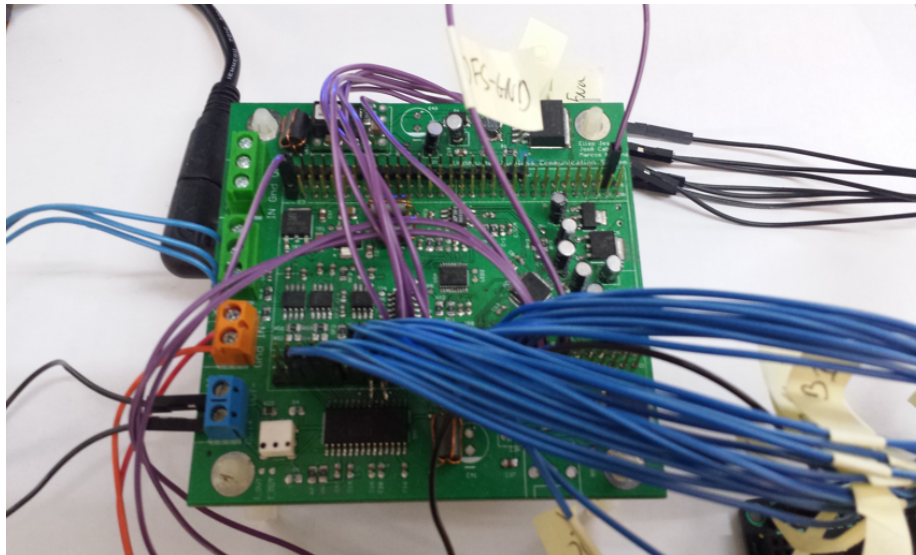


Figura 4-5 Placa de instrumentação.

4.1.3.1 Conversor Digital-Analógico

No sistema proposto o DAC é usado para converter o sinal modulado, a partir da FPGA, num sinal analógico a ser transmitido através do canal aquático. O DAC904 da Texas Instruments, foi o conversor escolhido e tem 14 bits de resolução e 165 MSPS de frequência de amostragem, o que faz dele um DAC de elevada velocidade.

Capítulo 4

A corrente de saída do DAC varia com os dados binários da entrada e tem uma gama entre os 0 e os 20 mA e opera entre +2.7 V e +5 V como se pode observar na Tabela 4-1-3.

Tabela 4-1-3 Saída da corrente do DAC.

Input Code (D13-D0)	I_{out}	$\overline{I_{out}}$
11 1111 1111 1111	20mA	0mA
10 0000 0000 0000	10mA	10mA
00 0000 0000 0000	0mA	20mA

4.1.3.2 Conversor Analógico - Digital (ADC)

O ADC foi implementado numa placa perfurada com um circuito integrado AD9244 que é responsável pela parte da conversão e alguns componentes com outras funções como o ajuste de *offset* e o ganho do sistema. A implementação do sistema numa placa perfurada, não permite que o sistema seja muito robusto, mas permite desenhar e alterar o sistema de uma forma mais rápida e economizar tempo no desenvolvimento.

A placa ADC conecta-se com a placa FPGA através de um conector de 14 bits para que o sinal digital possa ser processado (desmodulado).

4.1.4 Amplificador de potência.

Para que os sinais sonoros enviados alcancem distâncias mais elevadas é necessário que a potência do sinal seja amplificada. O amplificador de potência utilizado no emissor é apresentado na Figura 4-6 e converte um sinal de +/- 5V em +/- 16V com uma potência de saída de 120 W e um pico de 240 W.

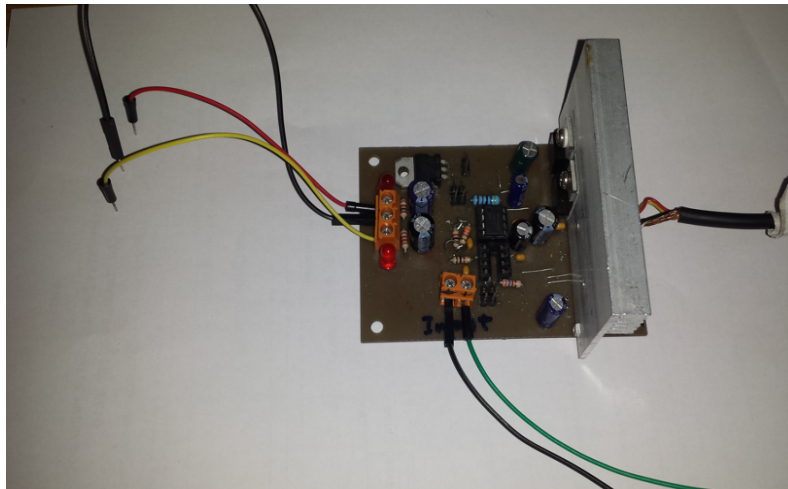


Figura 4-6 Amplificador emissor.

4.1.5 Transdutor emissor

O transdutor utilizado neste trabalho foi um projetor ultrassónico PVDF. Este dispositivo, que pode ser visto na Figura 4-7, converte o sinal elétrico recebido pelo amplificador em ondas sonoras. A escolha do transdutor foi feita de acordo com o trabalho de pesquisa desenvolvido pelo aluno de doutoramento Marcos Martins [5], tal como a implementação do mesmo, correspondendo ao transdutor de fluoreto de polivinilideno (PVDF).



Figura 4-7 Transdutor emissor PVDF [30] [31].

O transdutor PVDF tem as seguintes características:

- 2 X110 μm de espessura;
- 2 cm de diâmetro;
- Foco direcional com um ângulo de divergência.

4.1.6 Transdutor hidrofone recetor

O transdutor hidrofone é um dispositivo elétrico que capta as vibrações sonoras e transforma essas vibrações novamente num sinal elétrico. O hidrofone escolhido foi o C304XR que pode ser observado na Figura 4-8.



Figura 4-8 Hidrofone.

O hidrofone C304XR tem as seguintes especificações:

- Banda de frequência entre 0.012 e 1000 kHz.
- Sensibilidade eficaz de -181dB e 1 V/ μPa .

4.1.7 Filtro e amplificador recetor

Quando o sinal é recebido pelo hidrofone, este necessita de ser filtrado e amplificado devido ao ruído e às atenuações que sofre com a distância percorrida. O hidrofone usado no sistema funciona com frequências num intervalo entre os 50 Hz e os 2 MHz e devolve um sinal com um offset de 2 V. Para eliminar o offset e as componentes de interferências eletromagnéticas com frequências superiores a 2 Mhz, foi utilizado um filtro ativo passa-banda de segunda ordem de 1 kHz até 2000 kHz.

O amplificador recetor tem um ganho variável de 106 dB a -21 dB [5]. Para este trabalho foi definido um ganho de 20 dB, de modo a garantir uma amplitude de sinal no ADC de 200mV.

4.2 Software

As ferramentas de *software* Matlab/Simulink com recurso a blocos específicos do Xilinx foram as ferramentas utilizadas para programar o Modulador / Desmodulador na FPGA. Estas ferramentas, para além de tornar todo processamento do sinal relativamente simples, permitem também fazer simulações, o que poupa tempo e recursos em eventuais testes em cenários reais. Posteriormente, o modelo deve ser testado em ambiente real a fim de avaliar o seu desempenho. Ao longo deste capítulo, serão analisadas detalhadamente as ferramentas Matlab/Simulink e ISE Design Suite Evaluation.

4.2.1 Matlab/Simulink

MatLab é um ambiente de programação para o desenvolvimento de algoritmos, análise de dados, visualização e computação numérica. Este *software* pode ser utilizado numa vasta gama de aplicações, incluindo o processamento de sinal e de imagem, comunicações, biologia computacional, medições e testes entre outros.

O ambiente *MatLab/Simulink*, em conjunto com blocos específicos do *Xilinx* foram as ferramentas fundamentais para implementar os blocos de *hardware* neste sistema. *Simulink* é um *software* que está fortemente interligado com o *MatLab* e que é usado na simulação, implementação, modelação e análise de uma grande variedade de sistemas, incluindo sistemas de comunicação.

Apresenta um ambiente gráfico muito interativo e um extenso conjunto de bibliotecas prontas a usar (*MathWorks*). Este *software* permite simular vários tipos de modulações e ver os resultados num ambiente gráfico. Através do *System Generator*, o algoritmo simulado pode ser implementado na FPGA, utilizando linguagem VHDL no *Xilinx ISE 12.2* [28].

4.2.2 ISE Design Suite Evaluation

Este produto da *Xilinx* fornece poderosas ferramentas de processamento digital de sinal com elevados rendimentos, baixos custos e altas eficiências energéticas. Estas ferramentas são compatíveis com a FPGA Spartan-6 usada neste trabalho. Entre elas, destaca-se o *System Generator* que permite implementar ferramentas de processamento digital de sinal na FPGA gerando automaticamente um código HDL através de um modelo *Simulink*, sem a necessidade de escrever código para o efeito. O *System Generator* inclui blocos com funções de processamento de sinal, deteção de erros, memórias, registos e filtros. O *System Generator* integrado com o *Matlab/Simulink* torna bastante simples o processo de testar as propriedades e condições dos canais de comunicação.

4.3 Implementação

O objetivo desta dissertação é implementar uma técnica de modulação que permita atingir elevados débitos binários e que seja robusta a erros provenientes de efeitos como o multi-percurso e o efeito de *Doppler*.

Os circuitos lógicos do modulador e do desmodulador foram otimizados para reduzir os consumos e tornar possível a inclusão de novas funções no futuro.

O esquema de modulação implementado é do tipo OOK de dois canais: 1 MHz e 0.5 MHz. O uso de dois canais tem como objetivo aumentar a capacidade e débito binário do sistema, com um *bit rate* máximo de 1 Mbps. Esta descrição será dividida em duas secções: o modulador e o desmodulador. O modulador tem como função receber o sinal no formato digital (com origem num computador pessoal), modular o sinal com uma onda portadora e transmiti-lo para o meio aquático através de ondas acústicas. O desmodulador funciona como um recetor e tem como objetivo recuperar o sinal original, ou seja, fazer todo o processo inverso do modulador. Assim, deverá receber o sinal acústico que foi emitido, desmodular o sinal, e converter o sinal analógico em digital.

Os circuitos lógicos do modulador e desmodulador foram implementados em paralelo sem qualquer interconexão entre eles. Assim é possível assegurar uma comunicação *Full Duplex* otimizada sem interferências e atrasos.

De seguida, será analisado detalhadamente a função de cada bloco utilizado tanto no modulador como no desmodulador.

4.4 Modulador

O modulador OOK com dois canais de dados, implementado no âmbito desta dissertação, está dividido em vários blocos. Inicialmente o modulador recebe uma sequência de dados binários em cada canal. De seguida, através de um bloco gerador de onda, é injetada uma onda portadora no caso de ser identificado o símbolo “1” da sequência binária. Posteriormente, os sinais de cada canal são somados e convertidos num só canal através de um bloco somador. Este bloco também é responsável por alterar o valor da amplitude do sinal para que possa ser enviado para o DAC de acordo com as suas especificações. A Figura 4-9 apresenta todos os módulos constituintes do modulador OOK de dois canais de dados.

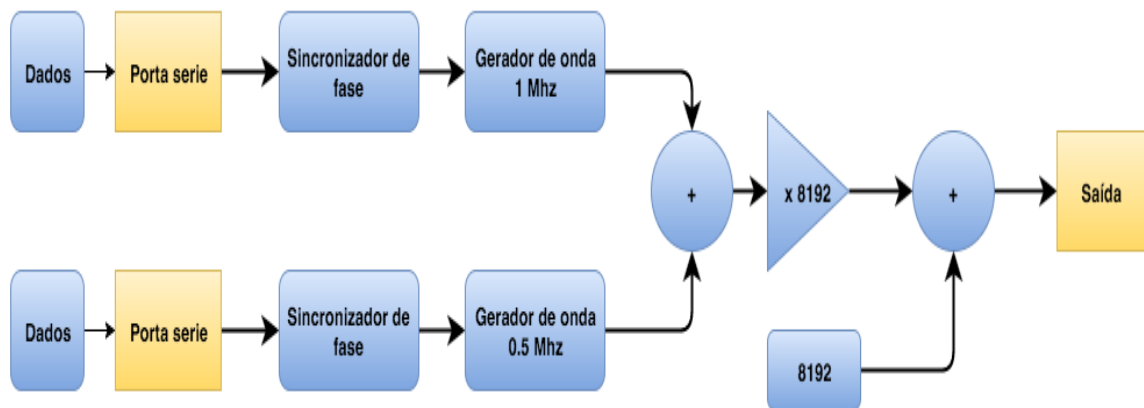


Figura 4-9 Modulador OOK de dois canais.

O processo de modulação inicia-se com o bloco Dados, que é específico da Xilinx para simular os fluxos de dados de entrada. Para testar o modulador, foi introduzido nos canais o carácter hexadecimal 55 (sequência binária 1010101). No caso do canal de 0.5 MHz foi utilizada um período de amostragem de $3200 \times 10^{-8} s$ e para canal de 1 MHz foi utilizada um período de amostragem de $6400 \times 10^{-8} s$ para facilitar a filtragem no desmodulador devido aos poucos recursos da FPGA. É importante salientar que foi definido um *clock* para a FPGA de 50 MHz.

Posteriormente o fluxo de dados é recebido pelos blocos Porta série que funcionam como *Inputs* para os dois canais. Estes dados encontram-se em formato binário e são enviados para o bloco sincronizador de fase. Para se perceber a função deste bloco é necessário explicar o bloco Gerador de onda e a sua importância no sistema. Para cada canal de dados existe um bloco gerador de onda com a função de injetar uma onda portadora de 1 MHz ou 0.5 MHz dependendo do canal.

A onda portadora, é uma onda sinusoidal com uma função $A \sin(2\pi f + \theta)$ sendo que A corresponde à amplitude do sinal que é de 1 V, θ corresponde à fase do sinal que é 0 graus e, finalmente, f que corresponde à frequência de cada canal (1 MHz ou 0.5 MHz). A onda portadora é injetada quando o bloco gerador de onda recebe como entrada o símbolo lógico “1”. No caso do símbolo lógico “0” é associado um valor nulo. Assim sendo, os dados que entram em cada canal são

modulados com uma onda portadora predefinida que servirá como ponto de referência para o processo de desmodulação.

O bloco Sincronizador de fase interage diretamente com o bloco Gerador de onda para assegurar a sincronização do fluxo de dados com a frequência da onda portadora, ou seja, quando é iniciada a transmissão de dados o bloco Sincronizador de fase ativa o *Reset* do bloco gerador de onda. Assim é garantido que a fase da onda portadora se encontra a 0 graus. Na Figura 4-10 pode-se observar a saída do Gerador de onda correspondente ao canal de 0.5 MHz e 1 MHz respectivamente.

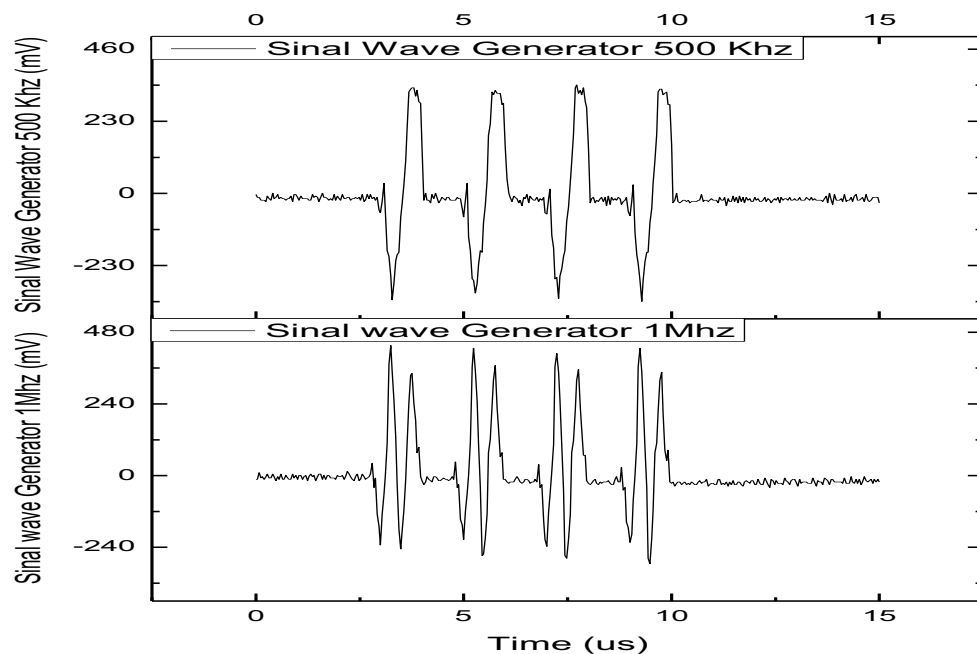


Figura 4-10 Gerador de onda sinusoidal de 1 MHz e 0.5 MHz.

Até esta etapa os dois canais foram processados de forma independente. Agora é necessário converter os dois canais num só canal para que o sinal resultante seja interpretado pelo DAC e de seguida transmitido para o meio aquático através do transdutor. Para isso, foi utilizado um bloco somador, com a finalidade de somar os sinais do canal de 1 MHz e do canal de 0.5 MHz. Para que o sinal possa ser interpretado pelo DAC é necessário que preencha determinados requisitos.

Capítulo 4

O DAC utilizado no sistema tem 14 bits de resolução, o que significa que aceita valores entre um intervalo de 0 a 16384. Neste sentido, ao sinal foi multiplicada a constante 8192 para que se encontre no intervalo entre -8192 e 8192. Para que se encontre no intervalo de 0 e 16384, adiciona-se ao sinal uma constante de 8192. Posteriormente na fase da desmodulação será recuperada a componente negativa do sinal.

Finalmente, resta salientar que foi implementado um clock para o DAC de 12.5 MHz que corresponde a 12 amostras por período para o canal de 1 MHz e 6 amostras por período para o canal de 0.5 MHz. O resultado da modulação OOK de dois canais de dados pode ser observada na Figura 4-11.

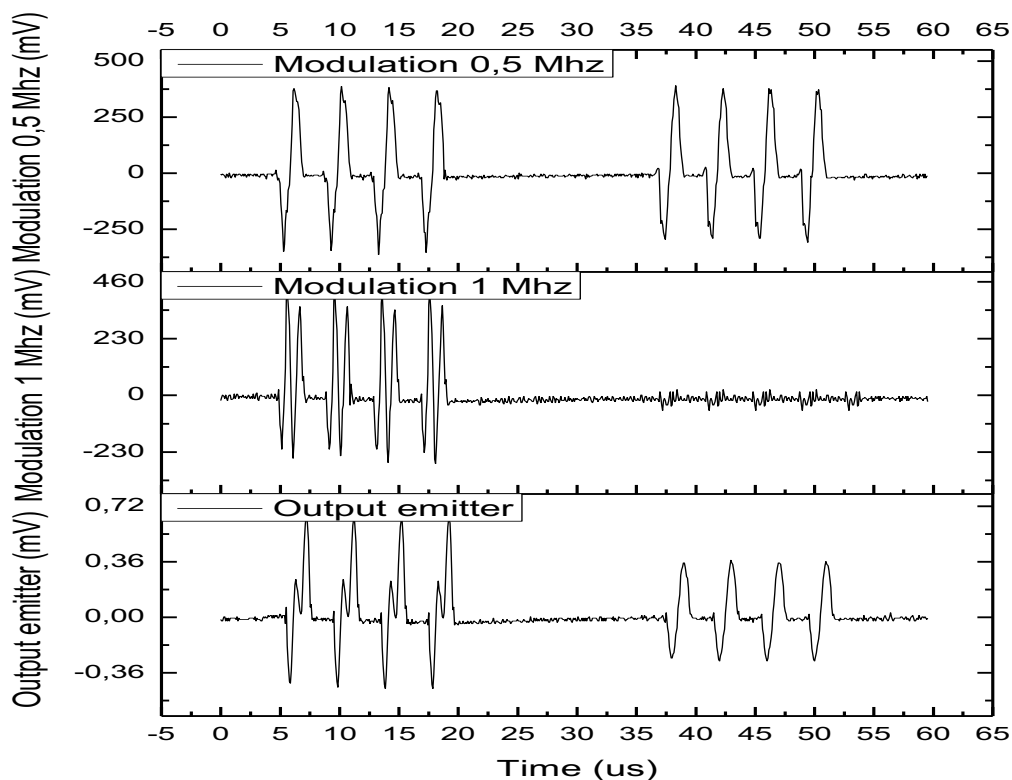


Figura 4-11 Saída do Modulador OOK de dois canais de dados.

4.5 Desmodulador

O objetivo do desmodulador é devolver as características originais do sinal antes da sua modulação. Inicialmente será feita uma explicação geral do seu funcionamento e, posteriormente, e a semelhança da secção anterior serão analisados individualmente todos os blocos que o constituem.

O passo inicial no processo de desmodulação é devolver a componente negativa do sinal que lhe foi retirada durante a fase de modulação. Posteriormente, segue-se a filtragem do ruído (meio aquático e componentes eletrónicos) que se faz sentir sob a forma da presença de sinais de alta frequência no sinal recebido. Nesta fase, o desmodulador divide-se em dois blocos. O propósito destes blocos são filtrar individualmente os sinais correspondentes aos canais de 1 MHz e 0.5 MHz e convertê-los em formato binário para que possam ser interpretados pelo recetor. Os componentes utilizados em ambos os blocos foram os mesmos, mas com algumas configurações diferentes.

Assim sendo, primeiramente foi utilizado um filtro para filtrar a frequência da portadora correspondente a cada canal. Em seguida foi implementado um bloco com a função de eliminar a componente negativa do sinal. Nesta fase, o sinal encontra-se apenas com componente positiva. Contudo falta eliminar a componente pulsante do sinal para que possa passar por um bloco de decisão.

A componente pulsante do sinal é eliminada através de um filtro passa-baixo e o bloco de decisão irá comparar o nível de amplitude do sinal com um valor de amplitude de referência. Caso seja maior que o valor de referência será colocado na saída o nível lógico "1", caso seja inferior será colocado o nível lógico "0".

Para garantir que o sinal possa ser interpretado sem erros pelo recetor, é necessário definir o número de bits que corresponde ao período de cada nível lógico encontrado. Para isso foi implementado um bloco Sincronizador de bit que, através duma função, define consoante o período de cada nível lógico de entrada, o número e nível lógico dos bits na sua saída. Na Figura 4-12 podem ser observados todos os

Capítulo 4

blocos utilizados para a implementação do desmodulador. De seguida será analisado individualmente cada bloco do Desmodulador.

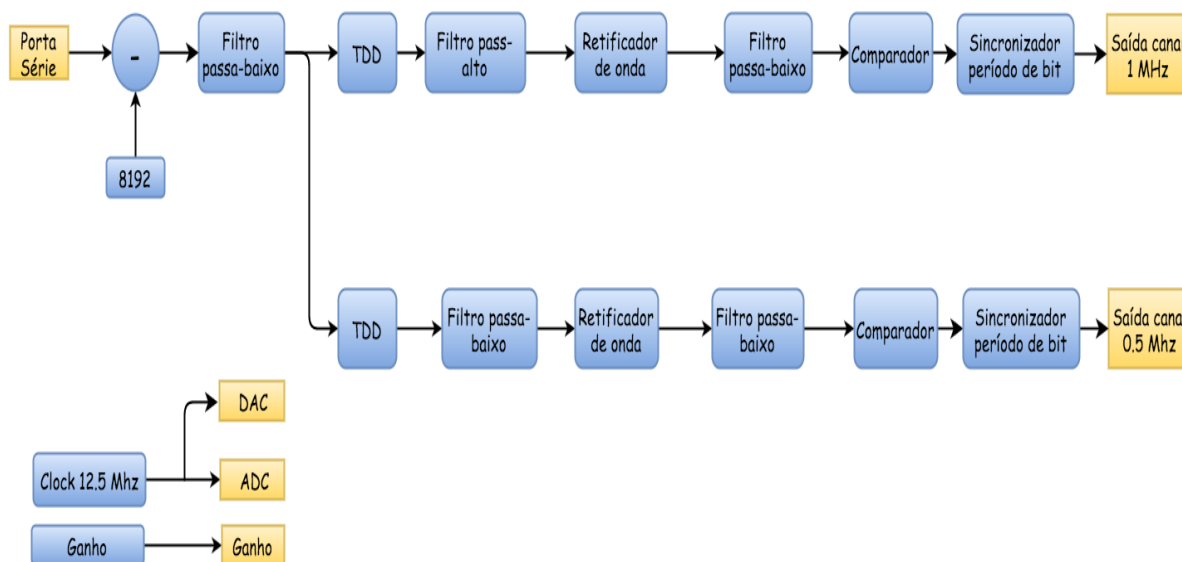


Figura 4-12 Desmodulador OOK de dois canais.

O sinal acústico modulado, proveniente do meio subaquático, é inicialmente recebido pelo hidrofone e convertido em formato digital através do conversor ADC. Nesta fase, o sinal encontra-se pronto a ser desmodulado pela FPGA.

O sinal é recebido na FPGA através de um bloco Porta série específico da Xilinx com um período de amostragem de $8 \times 10^{-8} s$. No módulo do modulador o sinal foi adicionado e multiplicado pela constante 8192 para que pudesse ser interpretado pelo DAC, retirando assim a componente negativa do sinal. Assim sendo, e após a receção do sinal pela Porta série faz-se uma subtração por 8192. O próximo passo é filtrar o sinal com o intuito de eliminar o ruído (altas frequências) originado pelo meio aquático e pelos próprios componentes eletrónicos. O filtro utilizado foi um filtro passa-baixo do tipo *FIR least-squares*, com uma frequência de amostragem de 12.5 MHz, uma frequência de passagem de 1.3 MHz, uma frequência de paragem de

1.5 MHz e, finalmente, 40 de ordem. Na Figura 4-13 é possível observar todas estas configurações.

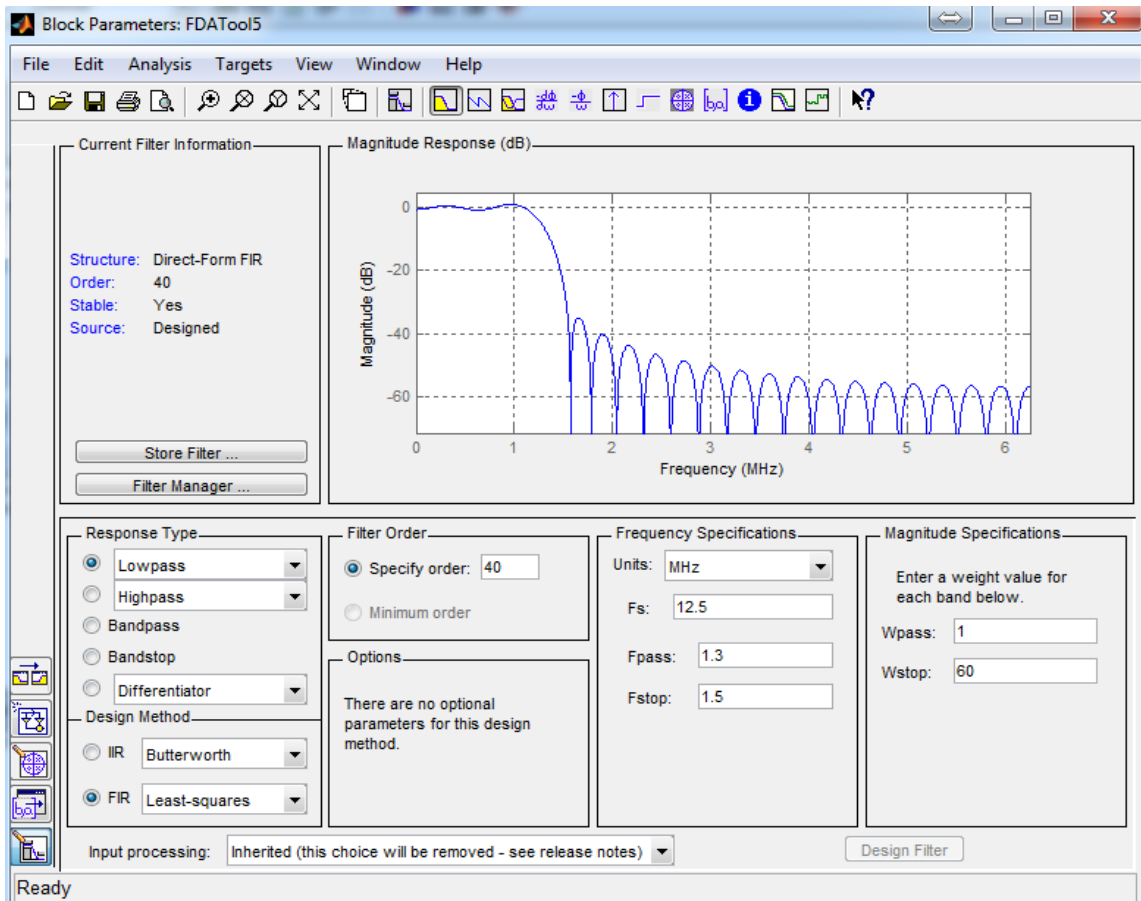


Figura 4-13 Interface gráfica filtro.

Neste momento, o sinal encontra-se pronto a ser desmodulado. Nas próximas secções serão analisados inicialmente todos os blocos relativos á desmodulação do canal de 1 MHz e, posteriormente, a desmodulação do canal de 0.5 MHz.

4.5.1 Desmodulador canal 1 MHz

A desmodulação do canal de 1 MHz inicia-se com um bloco TDD (*Time division desmultiplexer*) afim de reduzir a frequência de amostragem do sinal. O bloco TDD

Capítulo 4

foi implementado devido ao facto de os filtros digitais requerem muitos recursos. Por isso a frequência de amostragem do sistema foi reduzida 2 vezes, situando-se nos 6.25 MHz. De seguida foi utilizado um filtro com o objetivo de filtrar o sinal com a frequência de 1 MHz. O filtro utilizado é um filtro passa-alto do tipo FIR *least-squares* e é configurado com uma frequência de amostragem de 6.25 MHz, com uma frequência de paragem de 0.6 MHz, uma frequência de passagem de 0.8 MHz e uma ordem de 40. Na Figura 4-14 são apresentadas as configurações para este filtro.

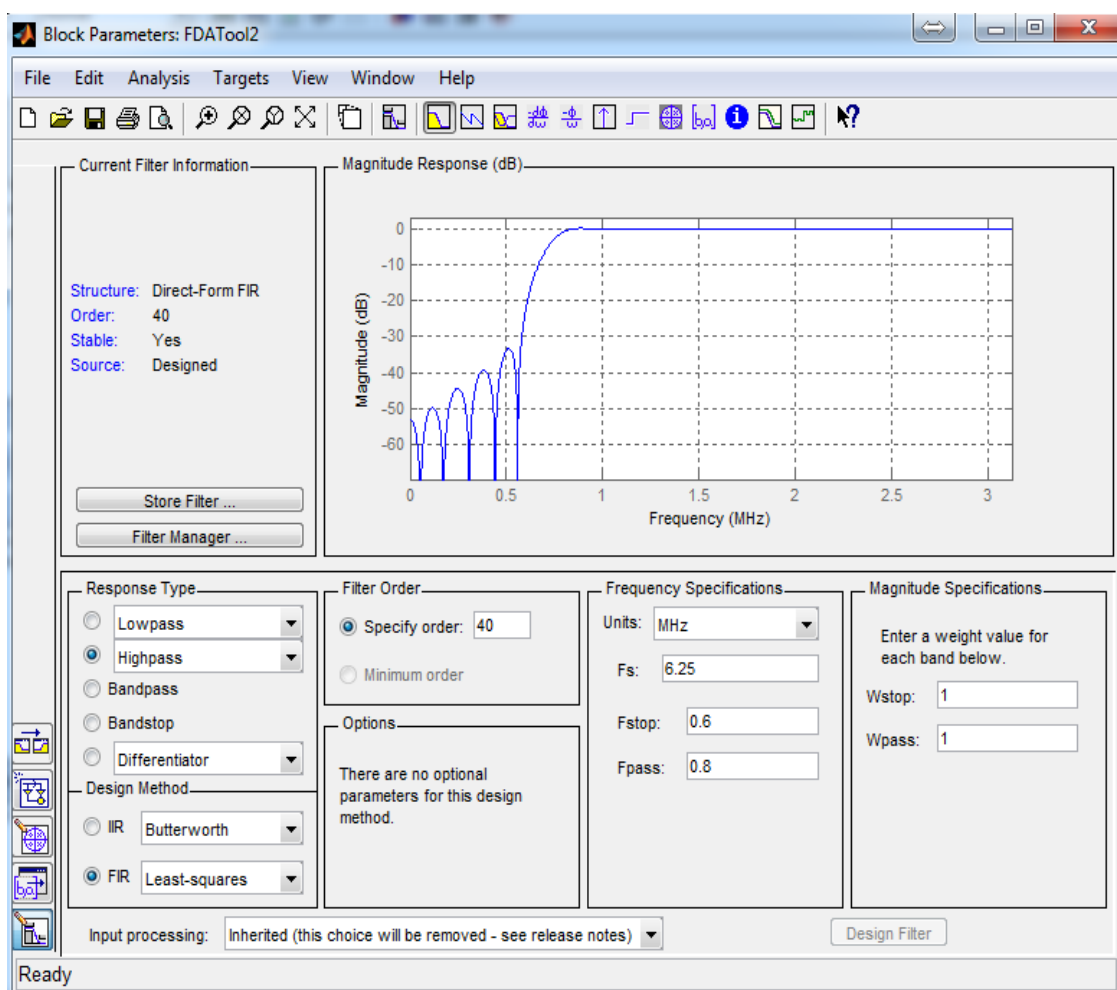


Figura 4-14 Filtro passa-alto.

Após filtrar o sinal com a frequência de 1 MHz, é necessário retificar o sinal, convertendo a sua componente negativa em positiva. Para este efeito, foi

implementado um bloco *Mcode* com uma função *Matlab* incorporada que multiplica o sinal pela constante -1. Como resultado é importante referir que este processo provoca o aumento da frequência do sinal para o dobro.

O sinal apresenta neste ponto apenas componente positiva. Contudo, para converter o sinal em formato binário é necessário eliminar a componente pulsante do sinal. A componente pulsante do sinal é eliminada através de um filtro passa-baixo do tipo FIR *Least-squares*, com uma frequência de amostragem de 6.25 MHz, uma frequência de passagem de 0.4 MHz, uma frequência de corte de 0.9 MHz e uma ordem de 12. As configurações deste filtro podem ser observadas na Figura 4-15.

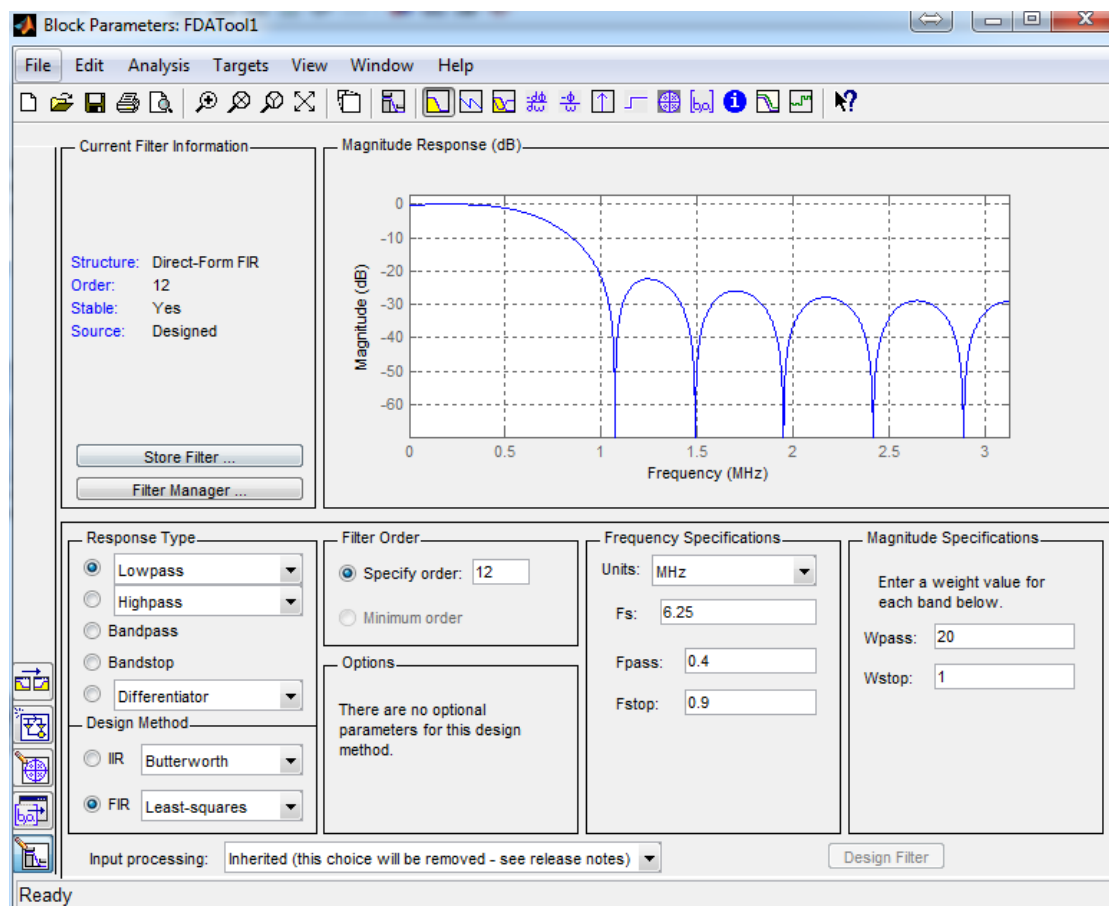


Figura 4-15 Filtro passa-baixo.

Para finalizar a desmodulação relativa ao canal de 1 MHz, foram implementados dois blocos *Mcode* com funções *Matlab*. O primeiro bloco analisa o sinal e converte-

o novamente para o formato binário para que possa ser interpretado pelo recetor. Este bloco funciona como um comparador, ou seja, contém uma função que compara o nível de amplitude do sinal com um valor de amplitude de referência (*Threshold*). Caso este seja maior que o valor de referência é colocado na saída o nível lógico “1”, caso seja inferior será colocado o nível lógico “0” na saída.

O segundo bloco é o Sincronizador de bit. Este bloco é bastante importante porque define, consoante o período de cada nível lógico de entrada, o número bits que serão apresentados à saída. Esta sincronização permite que o sinal seja interpretado dentro dos parâmetros do recetor. Em termos práticos este bloco contém uma função *Matlab* que define um intervalo de tempo correspondente a 1 bit e, mediante o período de cada nível lógico de entrada, será definido o número bits apresentados à saída. Caso o período do nível lógico não esteja dentro do intervalo de tempo de 1 bit, é considerado ruído e será descartado. Isto vai permitir que o recetor possa interpretar corretamente cada bit e filtrar eventuais ruídos.

4.5.2 Desmodulador canal 0.5 MHz

A estrutura do desmodulador do canal de 0.5 MHz é muito semelhante à estrutura do desmodulador do canal 1 MHz. Neste sentido, serão apenas analisados com mais detalhe os blocos que sofreram alterações ao nível da sua configuração. Inicialmente também foi utilizado o bloco TDD (*Time Division Desmultiplexor*) para diminuir frequência de amostragem do sinal. Neste caso reduziu-se quatro vezes situando-se nos 3.125 MHz. De seguida, foi implementado um filtro para filtrar o sinal com a frequência de 0.5 MHz. O filtro escolhido, representado na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, foi um passa-baixo do tipo FIR *Least-squares* com uma frequência de amostragem de 3.125 MHz, frequência de passagem de 0.55 MHz, frequência de corte de 0.75 MHz e ordem de 40.

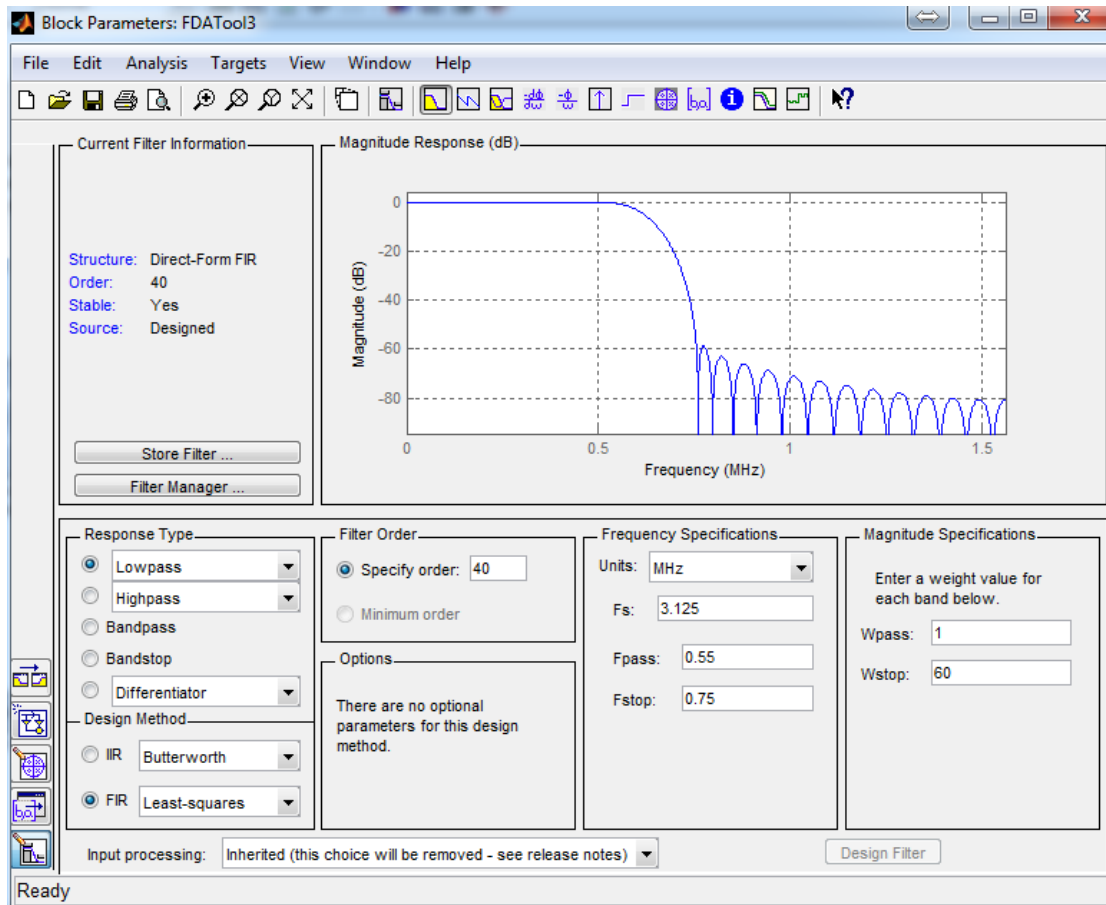


Figura 4-16 Filtro passa-baixo.

O próximo bloco utilizado foi um retificador de onda com o objetivo de converter a parte negativa em positiva. À semelhança do desmodulador de 1 MHz foi implementado posteriormente um filtro passa-baixo para remover a componente pulsante do sinal. Na Figura 4-17 é possível observar o filtro passa-baixo escolhido, do tipo *FIR Least-squares* com uma frequência de amostragem de 3.125 MHz, frequência de passagem de 250 kHz e frequência de corte de 400 kHz e ordem de 14.

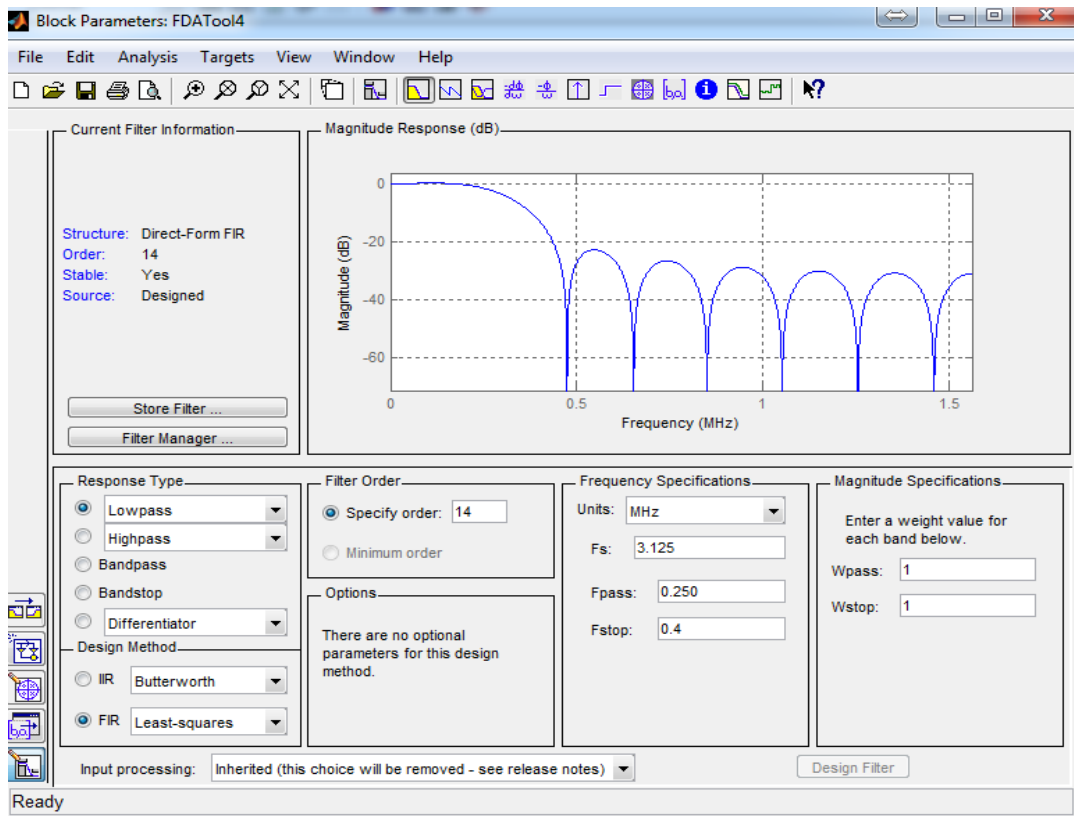


Figura 4-17 Filtro passa-baixo.

Após eliminada a componente pulsante do sinal, é utilizado um bloco comparador para converter o sinal em formato binário. Este bloco compara o valor da amplitude do sinal com um valor de amplitude de referência. Caso seja superior ao valor de referência, a saída apresenta o nível lógico “1”, caso seja inferior apresenta o nível lógico “0”.

O processo de desmodulação do canal de 0.5 MHz é finalizado com o bloco Sincronizador de bit. Este bloco é igual ao utilizado no desmodulador do canal de 1 MHz. A sua função é definir o número de bits que serão apresentados na saída, consoante o período de cada nível lógico do sinal de entrada. Este processo permite que o sinal seja interpretado corretamente pelo recetor mediante as suas especificações e permite também eliminar eventuais ruídos.

5. Resultados e discussão

No capítulo anterior foi analisada toda a estrutura do modulador / desmodulador OOK de dois canais. O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados experimentais deste *modem* acústico. Para uma melhor compreensão do que foi feito nesta fase, será demonstrado inicialmente a arquitetura do sistema, em que são apresentados todos os módulos envolvidos no teste. De seguida, será introduzido o ambiente de teste, ou seja, a estrutura física que integra o canal aquático onde o equipamento foi testado. Também será apresentado o dispositivo que permitiu fazer as medições de desempenho do sistema. Finalmente serão disponibilizados e analisados todos os resultados.

5.1 Arquitetura do Sistema de Teste

A arquitetura do sistema é bastante importante para se perceber o funcionamento do *modem* acústico. Os módulos que estão envolvidos nos testes experimentais e os resultados que se podem esperar em relação a cada módulo do sistema. O desenho de uma boa arquitetura do sistema pode simplificar bastante um projeto e poupar recursos. A Figura 5-1 representa a arquitetura do sistema nos testes experimentais.

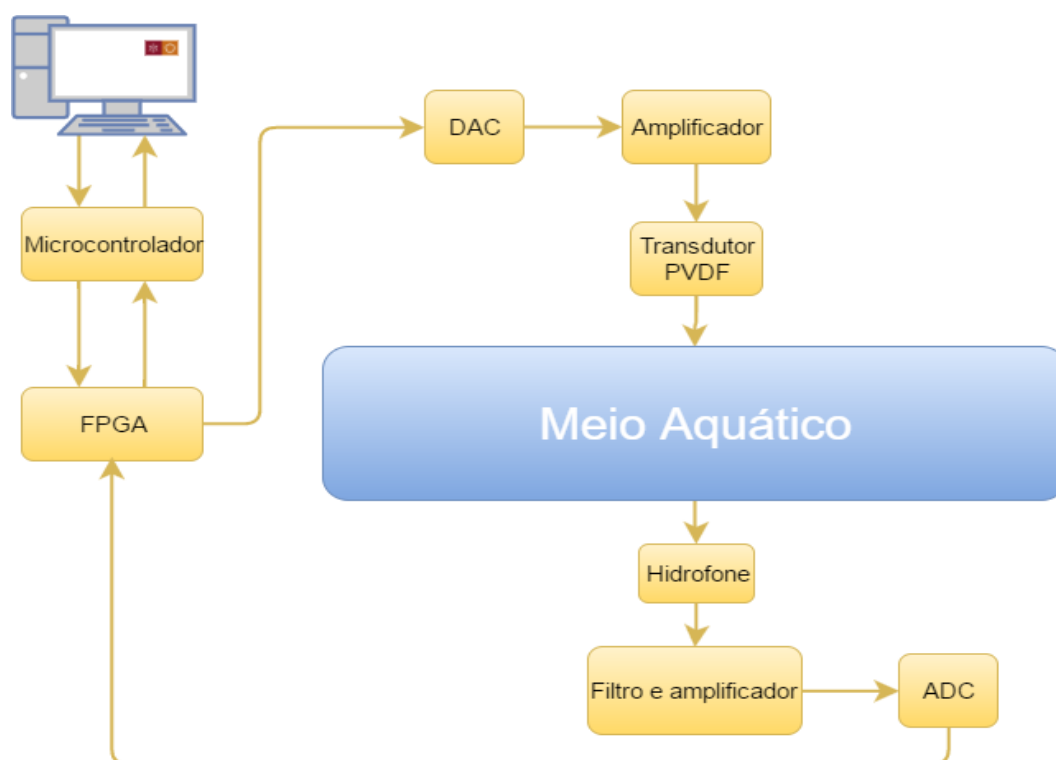


Figura 5-1 Arquitetura do sistema em testes experimentais.

Nesta fase de testes ao modem acústico, a comunicação de dados com a FPGA é feita por um computador através de um cabo RS-232 conectado a um microcontrolador. O microcontrolador tem como objetivo encaminhar os dados do computador para o modulador e do desmodulador para o computador. Devido ao facto da FPGA funcionar como modulador e desmodulador, esta encontra-se diretamente conectada ao módulo emissor e ao módulo recetor. Esta arquitetura permite medir o desempenho do sistema em vários módulos e em diferentes condições.

5.2 Cenário de testes

Os testes experimentais foram realizados num aquário desenvolvido propositadamente no âmbito desta dissertação. O ambiente de teste é bastante importante porque pode condicionar os resultados obtidos. Neste sentido, serão apresentadas todas as características deste aquário e a localização do transdutor e do hidrofone no seu interior. Na Figura 5-2 pode-se observar o aquário utilizado na fase de testes experimentais.



Figura 5-2 Aquário de teste.

Dimensões do aquário:

- 50 cm de largura,
- 150 cm de comprimento,
- 42 cm de altura.

Localização do transdutor e hidrofone:

- 25 cm da parte lateral do aquário,
- 15 cm de profundidade,
- 23 cm da parte traseira do aquário.

Capítulo 5

Para efetuar as medições, foi usado o osciloscópio digital *PicoScope 2000* Séries da *Pico Technology* que pode ser visto na Figura 5-3. Este osciloscópio tem dois canais, uma frequência de sinal de 10 MHz e 100 MSPS para cada canal, uma impedância de entrada de $1M\Omega$ e entrada USB.



Figura 5-3 Pico Scope 2000.

5.3 Resultados experimentais

Este teste experimental foi realizado com o modulador OOK de dois canais integrado no modem acústico. Este modulador foi projetado para uma transmissão máxima de dados de 1 Mbps, com ondas portadoras de 1 MHz e 0.5 MHz.

Para testar o *modem* acústico, foi enviado o carácter ASCII “85” para os canais de 1 MHz e 0.5 MHz do modulador. Este carácter corresponde à sequência binária “1010101”, que é uma das mais difíceis de desmodular devido à constante alternância de estado. Na Figura 5-4 é possível observar o fluxo de dados de entrada de cada um dos canais e a modulação do sinal com as ondas portadoras de 1 MHz e 0.5 MHz.

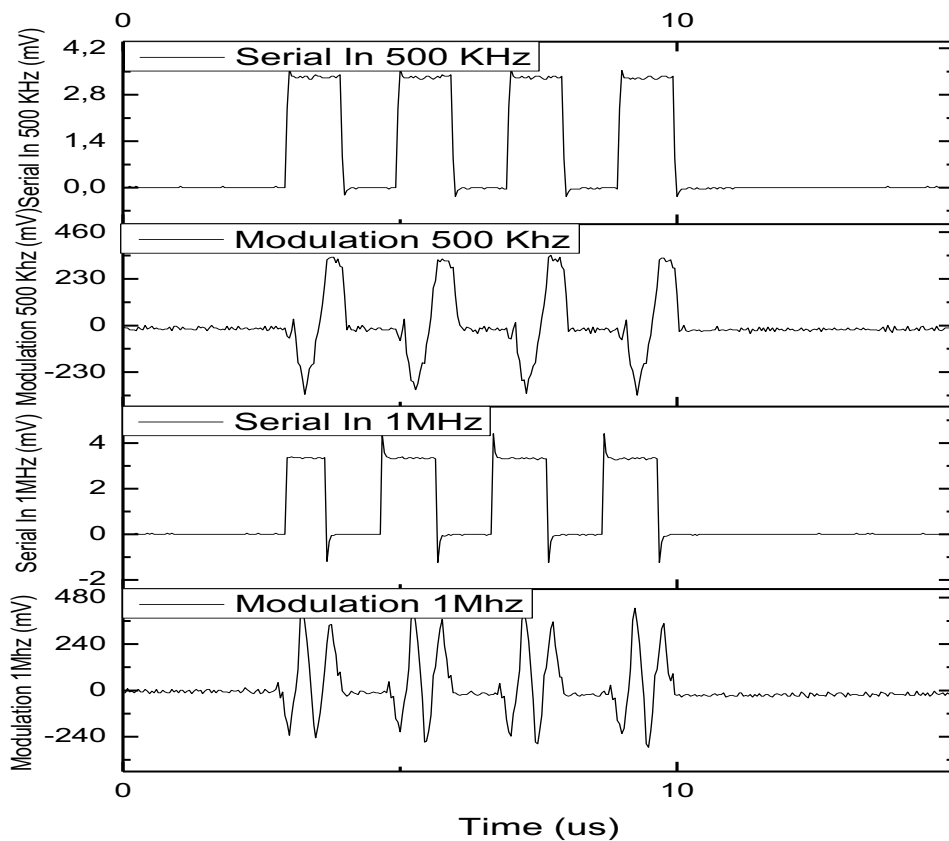


Figura 5-4 Entrada do fluxo de dados e modulação do sinal.

Depois de ser modulado pela FPGA, o formato do sinal é convertido de digital para analógico pelo conversor DAC, antes de ser amplificado e transmitido para o meio aquático através do transdutor. Na Figura 5-5, pode-se observar o sinal modulado à saída do DAC.

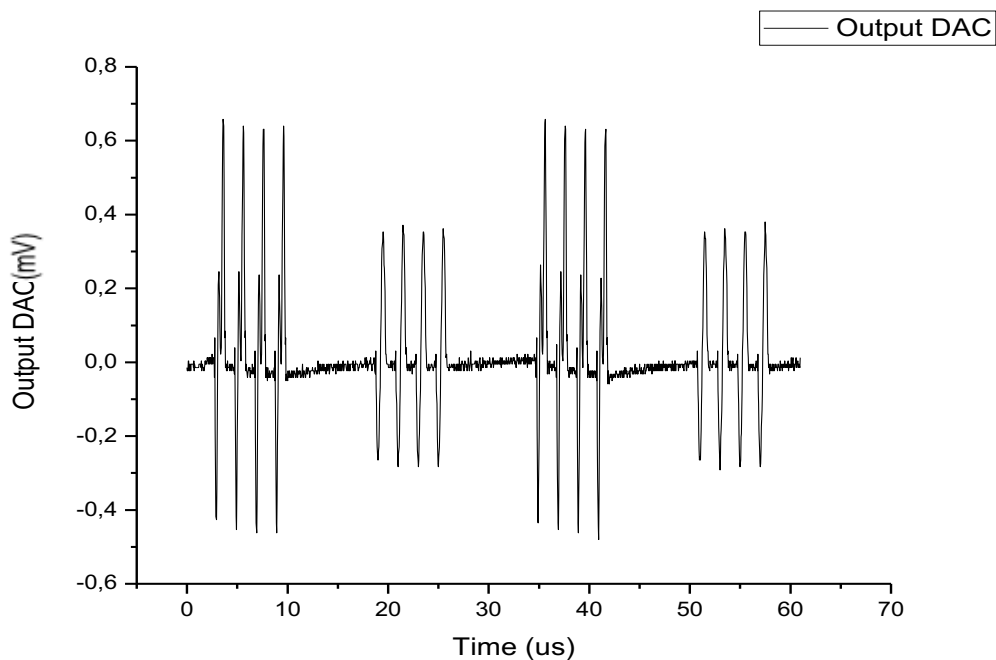


Figura 5-5 Sinal modulado à saída do DAC.

De seguida, o sinal é transmitido para o meio aquático através do transdutor PVDF. Devido às características do meio aquático, quando o sinal é recebido pelo hidrofone este encontra-se bastante atenuado e degradado como é possível observar na Figura 5-6.

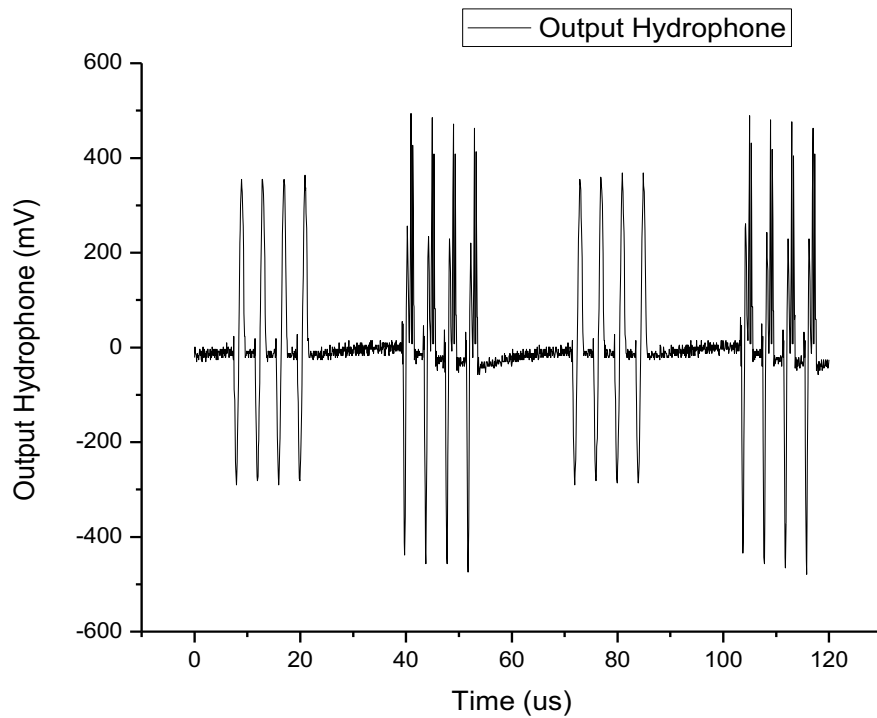


Figura 5-6 Saída do hidrofone.

Como se pode observar, o sinal encontra-se bastante atenuando e com algum ruído. É necessário filtrá-lo e amplificá-lo novamente para que possa ser interpretado pelo bloco ADC. Após a filtragem e amplificação do sinal, este é convertido de analógico para digital. Desta forma o sinal encontra-se em perfeitas condições para ser interpretado pela FPGA no sentido de se proceder à desmodulação do sinal. Neste sentido, na Figura 5-7, pode-se observar o sinal à saída do hidrofone e a saída do desmodulador relativo ao canal de 1 MHz e ao canal de 0.5 MHz.

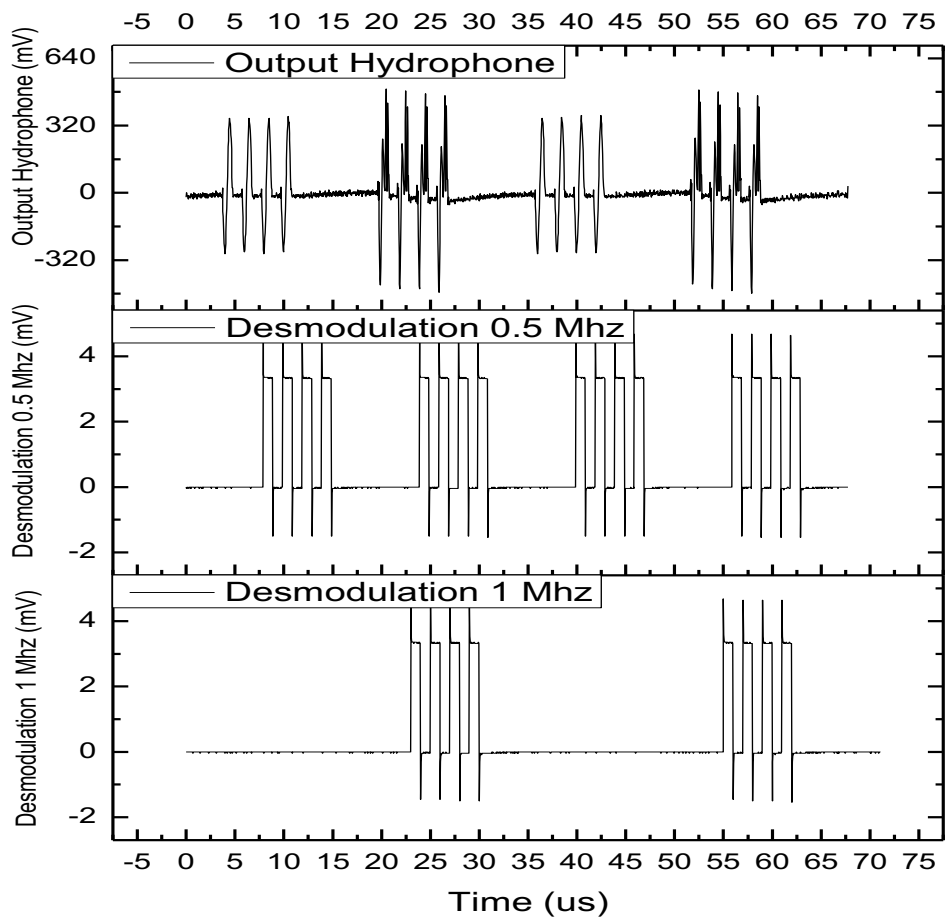


Figura 5-7 Desmodulação do sinal.

5.4 Análises dos resultados obtidos

Analisando os resultados obtidos no teste experimental, pode-se afirmar que estes estão em conformidade. É possível observar na figura 5-4 que o processo de modulação foi bem conseguido, o fluxo de dados de entrada em cada canal é devidamente modulado com as ondas portadoras de 1 MHz e de 0.5 MHz. Analisando a figura 5-7 pode-se observar que, apesar de existir algum ruído no sinal à saída do hidrofone fruto do meio aquático e dos próprios componentes eletrônicos, a desmodulação foi realizada com sucesso, existindo uma concordância entre os dados na entrada do modulador com os dados na saída do desmodulador.

As maiores dificuldades encontradas neste trabalho tiveram lugar no desenvolvimento do desmodulador, nomeadamente nas configurações dos filtros do canal de 0.5 MHz e 1 MHz. Os filtros tiveram que ser ajustados minuciosamente devido aos poucos recursos da FPGA. Ainda assim, apesar do sinal ter sido filtrado à frequência desejada, haviam picos de ruído que não eram eliminados. Este ruído era fruto dos próprios componentes eletrônicos e só foi eliminado com a implementação do bloco Sincronizador de bit, descrito no capítulo 4.5.

Na figura 5-8 é possível observar um exemplo do pico de ruído (entre os 53 μ s e os 55 μ s) no sinal à entrada do bloco Sincronizador de bit do canal de 0.5 MHz e o sinal à saída perfeitamente desmodulado.

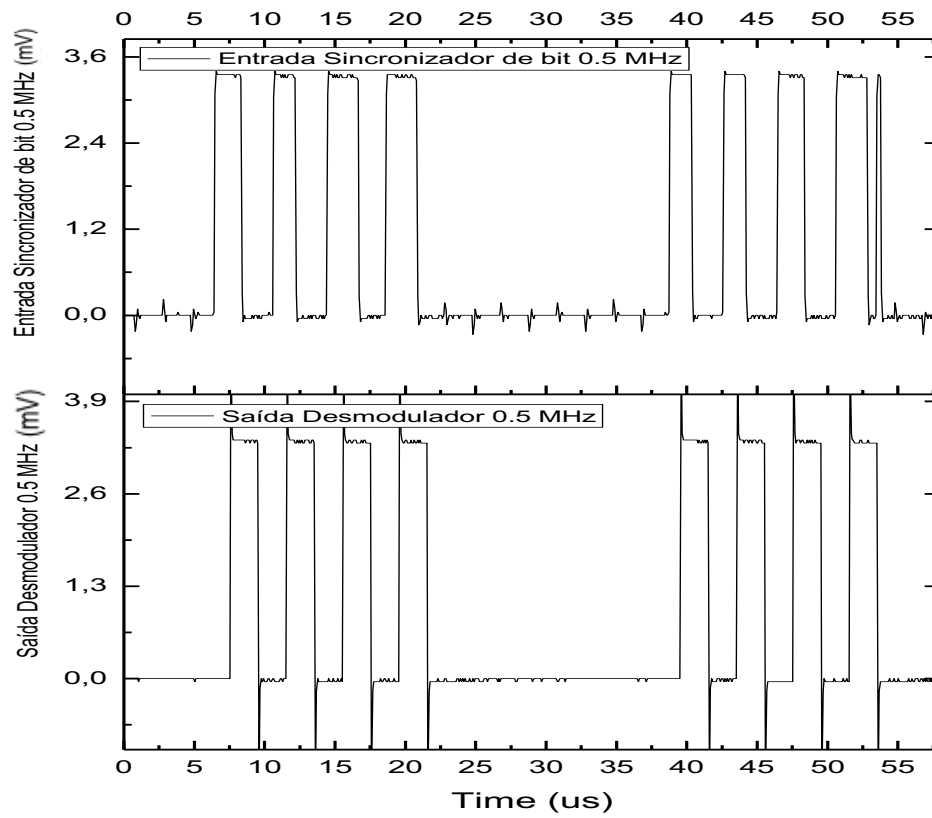


Figura 5-8 Pico de ruído.

6. Conclusões

O objetivo principal deste trabalho era implementar uma técnica de modulação digital para um sistema de comunicação acústica subaquática sem fios. Esta técnica deveria possibilitar ao sistema aumentar a sua capacidade e aumentar o seu débito binário até 1 Mbps.

Após o estudo das várias técnicas de modulação existentes, aquela que mais se apropriava mediante os recursos disponíveis e as características de todo o sistema, era técnica de modulação OOK de dois canais.

Para que o objetivo fosse cumprido, foi necessário realizar as seguintes tarefas:

- Estudar as características do canal aquático,
- Estudar a arquitetura do *modem* acústico,
- Implementar uma técnica de modulação OOK de 2 canais,
- Testar e medir o desempenho do *modem* em ambiente real (aquário).

Comparando os resultados obtidos por outros *modems* (secção 3.4), este *modem* apresenta débitos muito superiores às dos existentes no mercado. Até ao momento, a maior taxa de transmissão registada por um *modem* acústico subaquático sem fios comercial é de 38.4 kbps, sendo que o nosso regista débitos na ordem de 1 Mbps.

Contudo, futuramente existem alguns aspetos que podem ser melhorados e acrescentados, tais como:

- Substituição da FPGA por uma versão atualizada e com mais recursos,
- Implementação de um novo PCB de instrumentação com conectores adequados para ligação à FPGA,

- Implementação de um algoritmo de calibração do *threshold* de desmodulação automático,
- Implementação de um bloco de controlo automático de ganho para o ADC,
- Medição do BER e do SNR em testes de laboratório e campo,
- Otimização dos filtros digitais,
- Aumentar as taxas de transmissão,
- Implementar e testar diferentes modulações digitais de forma a aumentar a qualidade da transmissão.

Referências

- [1] E. Engineering, Underwater Acoustic Communication Milica Stojanovic, (n.d.).
- [2] <http://www.publico.pt/ciencia/noticia/mapa-que-mostra-que-97-de-portugal-e-mar-chega-as-escolas-1630635>, (n.d.).
- [3] Governo de Portugal, Estratégia Nacional para o Mar 2013 - 2020, Gov. Port. (2013) 1–73.
- [4] J. Elias, V. De Jesus, D. Marcos, S. Martins, FPGA Based Ultrasound Wireless Communication System Estrutura Introdução e Motivação Enquadramento e Objetivos, (n.d.).
- [5] M.S. Martins, M.S. Martins, Ultrasonic Wireless Broadband Communication System for Underwater Applications, 2013.
- [6] R.F. Busby, Underwater inspection/testing/ monitoring of offshore structures, Ocean Eng. 6 (n.d.) 355–491.
- [7] C.P.D. Jim A. Simpson, Brian L. Hughes, Brian L. Hughes, An underwater optical communication system implementing reed-solomon channel coding., (n.d.).
- [8] F. Hanson, S. Radic, High bandwidth underwater optical communication, 47 (2008) 277–283.
- [9] N. Farr, A. Bowen, J. Ware, C. Pontbriand, An integrated , underwater optical / acoustic communications system, (n.d.).
- [10] O. In, Re-Evaluation of RF Electromagnetic Communication in Underwater Sensor Networks, (2010) 143–151.
- [11] W. Lothian, Electromagnetic Propagation in Sea Water and its value in Military Systems, (2007) 1–6.
- [12] M. Antenor, A. Soares, Detecção coerente de sinais acústicos para localização robusta de veículos subaquáticos, (2013).
- [13] M. Stojanovic, J. Preisig, W. Hole, Underwater Acoustic Communication Channels : Propagation Models and Statistical Characterization, (2009) 84–89.
- [14] J. Preisig, Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development, ACM SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev. 11 (2007) 2. doi:10.1145/1347364.1347370.
- [15] S.Z. e J.C. L. Liu, NProspects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks Title, Wiley WCMC Spec. Issue Underw. Sens. Networks. (2008).
- [16] J.Y. G. Marani, S. K. Choi, Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs, Ocean Eng. 36 (n.d.).

- [17] D.E.W. Cheney, R. E., Distribution and Classification of Ocean Fronts, NAVOCEANO. (1976).
- [18] M. Stojanovic, J. Preisig, Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization, *Commun. Mag. IEEE.* 47 (2009) 84–89. doi:10.1109/MCOM.2009.4752682.
- [19] Mari Carmen Domingo, Overview of channel models for underwater wireless communication networks, *Phys. Commun.* 1(3):163–1 (n.d.).
- [20] A. Rahman, V. Muthukkumarasamy, E. Sithirasenan, The analysis of temperature, depth, salinity effect on acoustic speed for a vertical water column, *Proc. - IEEE Int. Conf. Distrib. Comput. Sens. Syst. DCoSS 2013.* (2013) 310–312. doi:10.1109/DCOSS.2013.63.
- [21] K. V. Mackenzie, Nineüterm equation for sound speed in the oceans, *J. Acoust. Soc. Am.* 70 (1981) 807.
- [22] X. Lurton, *An introduction to underwater Acoustics*, (n.d.).
- [23] J. Diogo, M. Xavier, *Modulation Analysis for an Underwater Communication Channel*, (2012).
- [24] P.H. Dahl, High-frequency forward scattering from the sea surface: the characteristic scales of time and angle spreading, *IEEE J. Ocean. Eng.* 26(1) (2001) 141–151.
- [25] J.C.R. A.B. Carlson, P.B. Crilly, *Communication Systems*, Int. Ed. (2002).
- [26] J. Wills, W. Ye, J. Heidemann, M. Rey, Low-Power Acoustic Modem for Dense Underwater Sensor, *WUWNet.* (2006) 79–85. doi:10.1145/1161039.1161055.
- [27] H. Nam, S. An, An Ultrasonic Sensor Based Low-Power Acoustic Modem for Underwater Communication in, (2007) 494–504.
- [28] C. Alexandre, P. Oliveira, M.S. Martins, César Alexandre Pinheiro Oliveira *Modem de Ultrassons para Comunicação Subaquática a 1 Mbit/s*, (2011).
- [29] M.J.G. Ainslie M. A., A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water, *J. Acoust. Soc. Am.* 103(3) (1998) 1671–1672.
- [30] M. Martins, V. Correia, J.M. Cabral, J.G. Rocha, Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications, *Sensors Actuators A. Phys.* (2012). doi:10.1016/j.sna.2012.06.008.
- [31] G.R. and S.L.-M. M. Martins, J. Cabral, Effect of the Acoustic Impedance in Ultrasonic Emitter Transducers using Digital Modulations, *Ocean Eng.* 100 (2015) 107–116.