



César Alexandre Pinheiro Oliveira

Modem de Ultrassons para  
Comunicação Subaquática a 1 Mbit/s

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

César Alexandre Pinheiro Oliveira

Modem de Ultrassons para  
Comunicação Subaquática a 1 Mbit/s

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia de Comunicações

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Manuel Tavares Vieira Cabral  
Professor Marcos Silva Martins

outubro de 2013

## DECLARAÇÃO

Nome: César Alexandre Pinheiro Oliveira

Correio electrónico: a50018@alunos.uminho.pt

Tlm.: 969258984

Número do Bilhete de Identidade: 12897769

Título da dissertação:

Modem de Ultrassons para Comunicação Subaquática a 1 Mbit/s

Ano de conclusão: 2013

Orientador:

Professor Doutor José Manuel Tavares Vieira Cabral

Co-Orientador:

Professor Marcos Silva Martins

Designação do Mestrado:

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia de Comunicações

Escola de Engenharia

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

# Agradecimentos

A presente dissertação encerra um grande ciclo de aprendizagem, onde é indispensável apresentar os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram para a realização da mesma.

Começo por agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor José Manuel Tavares Vieira Cabral e Professor Marcos Silva Martins, pelo seu esforço, dedicação, empenho e transmissão de conhecimento, realçando a sua ajuda durante a realização desta dissertação.

Aos meus pais e irmão por toda a ajuda e compreensão nos momentos mais difíceis. Agradeço acima de tudo, todos os esforços e sacrifícios suportados para concluir esta etapa da minha vida.

Gostaria também de deixar uma grande palavra de estima a todos os meus amigos, em especial ao Luís Gonçalves e Diogo Mendes, por toda a ajuda no arranque da minha dissertação, e ainda, ao Nuno Maia, Hugo Ferreira, Freddy Gonçalves, Hélder Ribeiro, João Pinheiro por toda a força, ajuda e preocupação ao longo deste período. Gostaria ainda de agradecer a todos os meus amigos, que tiveram um papel vital ao longo do meu percurso universitário, agradecendo a amizade e todo o apoio que sempre me prestaram.

Por último, à minha namorada Ana Almeida, manifesto o meu profundo agradecimento pelo seu incansável companheirismo, paciência, compreensão e incentivo ao longo deste período.

Obrigado a todos.



# Resumo

Esta dissertação tem como objetivo descrever todo o trabalho de pesquisa realizado para a implementação de um modem acústico subaquático de alto débito e baixo consumo. O ambiente subaquático é considerado um meio instável para as comunicações, devido a inúmeros fatores que afetam a propagação das ondas acústicas.

Assim, inicialmente, foi necessário realizar um levantamento, a fim de entender como estes fatores podem afetar a comunicação em ambientes subaquáticos, e posteriormente, efetuar um estudo sobre técnicas de modulações digitais usadas neste tipo de sistemas.

De seguida, elaborou-se uma pesquisa dos modems acústicos subaquáticos existentes tendo em atenção as suas características e finalidades. Depois de realizar uma pesquisa aprofundada sobre este assunto, foi desenvolvido um modem acústico subaquático recorrendo a vários componentes de Hardware e Software de forma a atingir os objetivos propostos.

Inicialmente foi desenvolvido um modem acústico subaquático usando a ferramenta *MatLab/Simulink* com blocos específicos do *Xilinx*, para simular e permitir uma análise teórica sobre o seu comportamento.

De modo a verificar o funcionamento do modem acústico subaquático foram realizados testes práticos numa piscina com 11 m (metros) de comprimento, 3 m de largura dianteira, 6 m de largura traseira e 1,5 m de profundidade. Com os transdutores, emissor e recetor colocados a 6 m de distância um do outro, foi possível verificar uma taxa de transmissão de 1 Mbps, usando apenas 1.4 W de consumo de energia, atingindo uma taxa de erro de bit (BER) de  $3 \times 10^{-3}$ .

**Palavras-chave:** Modem acústico subaquático, Comunicações subaquáticas, Modulação, Desmodulação, Sinal, Ondas sonoras, Sinais acústicos, Transmissão, Receção, Meio aquático, Taxa de Transmissão de Dados.



# Abstract

This dissertation aims to describe all the study conducted to the implementation of an underwater acoustic modem of high data rate and low consumption. The underwater environment is highly unstable for the communication systems due to numerous factors affecting the acoustic wave's propagation such as: high attenuation for long distances, low velocity of sound, existence of big diversity of noise, multipath phenomenon and the Doppler Effect. These characteristics imply an extreme difficulty to establish any kind of underwater communication.

Therefore, initially, it was necessary to make an exhaustive survey of all researches in this area, in order to understand how these features can affect communication in underwater environment, and posteriorly, elaborate a study about digital modulations technics used in this kind of systems.

Then, a research about all the existent acoustic modems was accomplished, taking attention to theirs features and purposes. After an intense research about this matter, it was developed an underwater acoustic modem appealing to several Hardware and Software components, so that it can achieve all the purpose objectives.

The first modem created was made using the MatLab/Simulink tool, with specific Xilinx blocks to simulate and allow a theoretical analysis about its behavior.

In order to verify the underwater acoustic modem operation, tests were performed in a pool with 11 m length, 3 m wide front, 6 m wide back and 1,5 to 1,8 m depth. With transducers emitter and receiver, placed in a distance 6 m far from one another, it was possible to verify a Data Rate of 1 Mbps, only using 1.4 W of power consumption, reaching a Bit Error Rate (BER) of  $3 \times 10^{-3}$ .

**Keywords:** Underwater acoustic modem, Underwater communications, Modulation, Demodulation, Signal, Acoustic waves, Acoustic signals, Transmission, Reception, Underwater Environment, Data rate.



# Conteúdo

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Conteúdo.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas .....	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
1- Introdução .....	1
1.1- Motivação e Objetivos.....	3
1.2- Cenários de Aplicação .....	4
1.3- Estrutura da Dissertação .....	6
2- Estado da Arte.....	7
2.1- Sistemas de Comunicação .....	7
2.2- Comunicações Sem Fios Subaquáticas.....	10
2.2.1- Sistema de Comunicação Ótica .....	11
2.2.2- Sistema de Comunicação Eletromagnética.....	13
2.2.3- Sistema de Comunicação Acústica.....	15
2.2.4- Sumário dos Sistemas de Comunicação Subaquáticos.....	18
2.3- Características do Canal Subaquático.....	19
2.3.1- Atraso de Propagação .....	20
2.3.2- Atenuação .....	23
2.3.3- Ruído Ambiente.....	25
2.3.4- Efeito <i>Doppler</i> .....	27
2.3.5- Multi-percurso .....	29
2.3.6- Bolhas .....	30
2.4- Modulações.....	30
2.4.1- Comunicação Analógica versus Digital.....	33
2.4.2- Técnicas de Modulação Digital .....	36

2.5-	Visão Geral dos Modems Acústicos Subaquáticos Existentes .....	39
2.5.1-	Modem Acústico (HS-HFAM) .....	40
2.5.2-	Modem Acústico Omnidirecional Baseado no Cortex-M3 .....	41
2.5.3-	Modem Acústico de Baixo Custo e Alta Eficiência para Redes de Sensores Subaquáticas .....	42
2.5.4-	Teledyne Benthos .....	44
2.5.5-	LinkQuest Inc. ....	45
2.5.6-	Woods Hole Oceanographic Institution.....	46
2.5.7-	Aquatec Group.....	48
2.5.8-	Sumário da Visão Geral dos Modems Acústicos Subaquáticos ..	49
2.6-	Sumário.....	50
3-	Arquitetura do Sistema (Modem Acústico).....	51
3.1-	Caracterização do Sistema.....	51
3.1.1-	Decisões Técnicas.....	55
3.1.2-	Decisões do Protótipo .....	56
3.2-	Hardware.....	57
3.2.1-	FPGA .....	58
3.2.2-	Conversor Digital - Analógico (DAC) .....	60
3.2.3-	Amplificador Emissor.....	61
3.2.4-	Transdutor (Projetor) .....	62
3.2.5-	Hidrofone .....	64
3.2.6-	Filtro e Amplificador Recetor.....	64
3.2.7-	Conversor Analógico - Digital (ADC) .....	66
3.3-	Software.....	67
3.3.1-	Matlab/Simulink .....	67
3.3.2-	System Generator.....	68
3.3.3-	Implementação.....	70
4-	Testes e Resultados.....	81
4.1-	Cenário de Teste .....	82
4.2-	Resultados.....	83
4.3-	Comparação e Análise dos Resultados Obtidos .....	88

5- Conclusão .....	89
Referências .....	91



# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Exemplos de sistemas de comunicação. ....	8
Figura 2.2 - Diagrama de blocos de um sistema de comunicação.....	9
Figura 2.3 - Exemplo de um sistema de comunicação ótica subaquático (Cox, 2007).....	11
Figura 2.4 - Sistema de comunicação ótica. ....	12
Figura 2.5 - Atenuação da radiação eletromagnética na água (Cox, 2007). ....	13
Figura 2.6 - Barco a chamar um submarino e um mergulhador através de ondas eletromagnéticas (Gonçalves, 2012).....	14
Figura 2.7 - Experiência para medir a velocidade do som na água (Vosbein, 2010).....	17
Figura 2.8 - Visão geral de um sistema de comunicação acústica.....	17
Figura 2.9 - Perfil típico da velocidade do som nas profundezas do oceano (Stern., 2008). ....	21
Figura 2.10 - Gráfico da atenuação do som na água (Mendes, 2011). ....	23
Figura 2.11 - Coeficiente de absorção (Preisig M. S., 2009).....	24
Figura 2.12 - Fontes de ruído (Stern., 2008).....	26
Figura 2.13 - Efeito Doppler (Mendes, 2011). ....	28
Figura 2.14 - Demonstração do efeito multi-percurso.....	29
Figura 2.15 - Sistema de modulação.....	32
Figura 2.16 - Cadeia de repetidores regenerativos para reduzir o efeito da degradação em cascata.....	34
Figura 2.17 - Sistema de comunicação digital genérico. ....	35
Figura 2.18 - Modulação em amplitude OOK (Gonçalves, 2012) ....	37
Figura 2.19 - Modulação em frequência (BFSK) (Gonçalves, 2012).....	38
Figura 2.20 - Modulação em fase (BPSK) (Gonçalves, 2012).....	39
Figura 2.21 - Fonte HS-HFAM (à esquerda) e recetor (à direita) (J.Beaujean, 2007).....	40

Figura 2.22 - Modem acústico subaquáticos baseado no Cortex-M3 (Tae-Hee Won, 2011) .....	41
Figura 2.23 - Protótipo do modem (A. Sanchez, 2011).....	43
Figura 2.24 - Modem acústico Benthos 903 Series ATM-903 (Benthos, 2013). .....	44
Figura 2.25 - Modem acústico LinkQuest UWM 2200 (LinkQuest, 2013). ....	46
Figura 2.26 - WHOI Micro-Modem (WHOI, 2013).....	48
Figura 2.27 - AQUAmodem 1000 (Group, 2013).....	48
Figura 3.1 - Arquitetura do sistema COMA subaquático. ....	52
Figura 3.2 - Tipos de transdutores existentes a) projetores (emissores) b) hidrofones (recetor) (Gonçalves, 2012). ....	54
Figura 3.3 - Diagrama de blocos de suporte do sistema. ....	58
Figura 3.4 - Estrutura básica da FPGA. ....	59
Figura 3.5 - FPGA usada no sistema (Fernandes, 2012). ....	60
Figura 3.6 - DAC utilizado no sistema (Fernandes, 2012). ....	61
Figura 3.7 - Amplificador emissor usado no sistema (Gonçalves, 2012).....	62
Figura 3.8 - Transdutor (Projetor) de ultrassons PVDF usado no sistema (Gonçalves, 2012).....	63
Figura 3.9 - Hidrofone usado no sistema (Gonçalves, 2012) .....	64
Figura 3.10 - Filtro passa-banda com ganho associado usado no sistema (Gonçalves, 2012).....	65
Figura 3.11 - ADC usado no sistema (Gonçalves, 2012) .....	66
Figura 3.12 - Interação do Matlab/Simulink com o System Generator e a FPGA. (Fernandes, 2012).....	70
Figura 3.13 - Diagrama de blocos do sistema de comunicação subaquático....	71
Figura 3.14 - Modulador OOK. ....	72
Figura 3.15 - Data Stream gerado no interior da FPGA. ....	75
Figura 3.16 - Processo de definição da escala de valores para o DAC. ....	76
Figura 3.17 - Clock do DAC a 25 MHz.....	76
Figura 3.18 - Resultado da modulação OOK.....	75
Figura 3.19 - Ampliação do resultado da modulação OOK .....	75

Figura 3.20 - Desmodulador OOK. ....	76
Figura 3.21 - Implementação do filtro LPF FIR através da ferramenta FDATool1.....	77
Figura 3.22 - Implementação do filtro LPF FIR1 através da ferramenta FDATool2.....	78
Figura 3.23 - Resultado da desmodulação OOK.....	79
Figura 4.1 - Arquitetura do sistema experimental.....	81
Figura 4.2 - Ambiente de teste.....	82
Figura 4.3 - Data Stream enviado através da porta série RS-232.....	83
Figura 4.4 - Saída do DAC.....	84
Figura 4.5 - Data Stream e saída do DAC.....	84
Figura 4.6 - Saída do amplificador.....	85
Figura 4.7 - Saída do hidrofone.....	86
Figura 4.8 - Saída do filtro com ganho associado.....	86
Figura 4.9 - Saída final.....	87



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Taxas de transmissão de dados esperadas para sistemas de comunicações EM (Rhodes, 2007).....	15
Tabela 2.2 - Largura de banda acústica subaquática para diferentes distâncias. .....	18
Tabela 2.3 - Comparação entre as ondas acústicas, EM e óticas no mar (Lanbo Liu, 2008). .....	19
Tabela 2.4 - Variações da velocidade do som (aproximadamente) (Stern., 2008). .....	22



# Lista de Acrónimos

<b>ADC</b>	Conversor Analógico para Digital
<b>AGC</b>	Controlo Automático de Ganho
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying
<b>BASK</b>	Binary Amplitude Shift Keying
<b>BER</b>	Taxa de Erro do Bit
<b>BFSK</b>	Binary Frequency Shift Keying
<b>BPSF</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>COMA</b>	Comunicação Acústica
<b>COMO</b>	Comunicação Ótica
<b>DAC</b>	Conversor Digital para Analógico
<b>DPSK</b>	Differential Phase-Shift Keying
<b>DSP</b>	Digital Signal Processor
<b>EM</b>	EletroMagnética
<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate Array
<b>FSK</b>	Frequency Shift Keing
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>ISI</b>	Interferência InterSimbólica
<b>LDs</b>	Díodos de Laser
<b>LEDs</b>	Díodos Emissores de Luz
<b>MFSK</b>	Multiple Frequency Shift Keying
<b>NSS</b>	Nós de Sensores Subaquáticos
<b>OOK</b>	On - Off Keying
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying
<b>PVDF</b>	Fluoreto de PoliViniliDeno
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RF</b>	Rádio Frequência
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol

<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>VAS</b>	Veículos Autónomos Subaquáticos

# 1- Introdução

Ao longo da história humana, a comunicação através de sons desempenhou um papel importante no desenvolvimento da sociedade, proporcionando um meio de comunicação entre a humanidade. Devido a isto, foi possível a evolução da espécie humana até agora. Então, por que não fazer o mesmo com o mar, a fim de adquirir ainda mais conhecimento?

No século quinze (XV), o conhecido Leonardo da Vinci, disse: "Se pararmos um navio e mergulharmos a extremidade de um longo tubo na água, iremos ouvir o barulho do navio a uma grande distância" (Wong, 2005). Após esta afirmação de Leonardo da Vinci, começaram a surgir os primeiros esboços sobre comunicações subaquáticas usando ondas sonoras. No entanto, pode-se dizer, que foi durante a 1ª Guerra Mundial que este tipo de comunicação teve sua grande evolução com a aparição dos sonares (Borowski, 2010).

No início do século vinte (XX) ficou muito claro que as ondas sonoras poderiam propagar-se na água muito mais eficientemente do que as ondas eletromagnéticas, pois sofrem menor atenuação comparativamente com ondas eletromagnéticas (Wong, 2005).

Devido às particularidades do ambiente aquático, há uma ampla variedade de aplicações interessantes que podem ser desenvolvidas (alguns exemplos destas aplicações são indicados na secção Cenários de aplicação). No entanto, o desenvolvimento e a implementação destas aplicações exigem um grande esforço em termos de investigação. Por isso, e porque a tecnologia sem fios é muito difícil de implantar no ambiente subaquático é importante continuar a executar vários projetos de investigação nesta área, tornando assim, a tecnologia de comunicação sem fios subaquática muito importante no campo de investigação científica.

Hoje em dia, os sistemas de comunicação subaquáticos envolvem três tipos de transmissão, que têm sido alvo de grande interesse: eletromagnético, ótico e acústico (Lanbo Liu, 2008) (Mendes, 2011). O primeiro é limitado pela

elevada taxa de absorção de sinais eletromagnéticos na água, o que torna aconselhável o seu uso num tipo de sistemas especializados ou mais específicos (Rhodes, 2007). Igualmente, o sistema ótico sofre da mesma limitação e tem a desvantagem adicional de ser afetado por elevados níveis de luz ambiente (especialmente na superfície da água) e à dispersão devido às partículas suspensas (Arnon, 2010), (Ge., 2006). Consequentemente, a aplicação destes tipos de sistemas, também tem sido limitada a poucas aplicações. Assim, os sistemas de comunicação acústica são a principal forma de comunicação sem fios subaquática, uma vez que há uma menor atenuação do som, quando o canal de comunicação é a água (Mendes, 2011). Esta técnica é considerada a mais utilizada neste ambiente, especialmente em águas profundas, com um fator térmico estável (Lanbo Liu, 2008). Um dos primeiros sistemas subaquáticos deste tipo foi desenvolvido nos Estados Unidos, em 1945, para tornar possível a comunicação com submarinos (Stojanovic, 1999).

Apesar das vantagens das comunicações acústicas no ambiente subaquático quando comparadas com as óticas e eletromagnéticas, esta técnica também tem alguns desafios significativos que influenciam o desenvolvimento dos sistemas de comunicação acústicos subaquáticos, nomeadamente a reduzida velocidade de propagação acústica na água (cerca de 1500 m/s). Apesar, deste valor ser significativamente menor do que a velocidade das ondas eletromagnéticas, é considerado suficientemente rápido para proporcionar a resposta adequada a várias aplicações (Wong, 2005).

Alguns fenómenos de propagação relevantes nos canais acústicos subaquáticos são a atenuação, ruído ambiente, atraso de propagação, o efeito *doppler*, efeito multi-percurso e bolhas. Estes processos físicos têm uma importância diferente de acordo com a localização do sistema, porque as características ambientais estão em constante mudança, devido a fatores tais como: correntes, ondas, marés, o que faz com que o sistema enfrente sempre desafios diferentes. Devido a estas características, e de modo a reduzir o efeito destas, é necessário recorrer a técnicas de modulação.

Hoje em dia, a pesquisa das comunicações acústicas subaquáticas tem aumentado devido à variedade de aplicações nos ambientes subaquáticos. Até ao início da década passada, os esquemas de modulação *Frequency Shift Keying* (FSK) não coerentes, tornaram-se bastantes favoráveis para explorar as comunicações acústicas subaquáticas, devido às características oferecidas no canal subaquático (Gonçalves, 2012). Esta tecnologia baseia-se na deteção de energia, que é um método robusto para as características encontradas no canal acústico subaquático (Ian Akyildiz, 2005), (Haug, 2009). Com a evolução dos últimos 30 anos novas técnicas de modulação foram utilizadas em modems acústicos, de modo a aumentar a velocidade de transmissão e a distância dos mesmos.

As comunicações acústicas subaquáticas têm sido utilizadas para comunicações de longa distância, até 20 km, em águas profundas com condições térmicas estáveis. Mas, apesar das comunicações sem fios subaquáticas mostrarem fortes avanços nos últimos anos, ainda existem muitas limitações relativas às taxas de transmissão de dados e robustez para aplicações em tempo real (M. Chitre, 2008). No entanto, as altas frequências de comunicação também levantam fortes problemas relacionados com a atenuação.

Assim, na dependência de tudo mencionado acima, construir um sistema robusto, que funciona perfeitamente numa enorme gama de ambientes distintos, a uma alta velocidade e a grande distância, continua a ser um desafio.

## **1.1- Motivação e Objetivos**

Porquê estudar as comunicações acústicas subaquáticas? E, qual é a motivação para ler esta dissertação?

Estas duas perguntas são respondidas ao longo deste documento, mas neste subcapítulo estão presentes alguns tópicos que nos ajudam a responder a essas perguntas. Se olharmos para a história da humanidade, as comunicações têm um papel muito importante na interação entre as pessoas e no

desenvolvimento da sociedade. Os oceanos cobrem 70% da superfície da terra e a maior parte deste permanece inexplorado, quando comparado com as áreas de terra (Mendes, 2011). Então, por que não estudar os oceanos a fim de adquirir mais conhecimento?

Hoje em dia, ainda existem muitos mistérios a serem revelados e muito conhecimento a ser adquirido, que estão escondidos nos oceanos. Uma das ferramentas que podem ser utilizadas para melhorar esta situação é a utilização de sistemas de comunicação subaquáticos. Para o uso correto e eficiente deste tipo de sistemas de comunicação, é necessário compreender as ondas acústicas, as propriedades da água e todos os outros processos presentes na criação deste tipo de sistemas. Com isto, surge a necessidade de traçar certos objetivos para este trabalho, a fim de definir um método que permite a abordagem e análise de todos os aspectos importantes que são realizáveis dentro do tempo disponível.

Os principais objetivos desta dissertação são:

- Estudar e identificar os aspectos importantes exigidos para desenvolver um modelo de um sistema de comunicação subaquático;
- Adquirir uma visão geral dos modems acústicos subaquáticos existentes e quais as suas características;
- Simular um modem acústico subaquático utilizando modulações digitais através do *Matlab*, *Simulink* e *Xilinx*;
- Desenvolver um modem acústico subaquático utilizando modulações digitais usando uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*);
- Realizar testes experimentais para validar o que foi estudado anteriormente.

## **1.2- Cenários de Aplicação**

A transmissão sem fios através dos oceanos é uma tecnologia que permite o desenvolvimento de futuros sistemas de observação do ambiente

aquático, servindo como suporte para a indústria do petróleo, fornecendo ferramentas de monitoramento para estudar e pesquisar mais e melhor sobre a vida marinha.

Atualmente, as aplicações para comunicações subaquáticas são exploradas em áreas militares, comerciais e acadêmicas, tornando assim o seu uso ainda mais amplo e diverso.

Algumas destas aplicações que podem ser usadas para transmissão de dados em oceanos, rios e lagos são: (Ian Akyildiz, 2005), (Gonçalves, 2012)

### **1. Monitoração ambiental**

- Poluição (química, biológica e nuclear);
- Monitoração das correntes marítimas e dos ventos;
- Melhoria da previsão do tempo;
- Mudanças climáticas;
- Previsão do efeito das atividades humanas sobre os ecossistemas marinhos.

### **2. Explorações subaquáticas**

- Exploração da vida marinha;
- Detecção de campos petrolíferos ou reservatórios subaquáticos;
- Auxílio na exploração de minerais valiosos.

### **3. Prevenção de desastres**

- Medição da atividade sísmica para evitar maremotos;
- Estudo dos efeitos dos terremotos subaquáticos.

### **4. Missões de resgate**

- Ajuda em naufrágios.

### **5. Coletar informações**

- Mapeamento do oceano;
- Estudo da vida marinha.

### **6. Comunicações Subaquáticas**

- Comunicação de mergulhador para mergulhador ou de mergulhador para navio;

- Internet subaquática através de nós de sensores subaquáticos (NSS).

#### **7. Navegação assistida ou autónoma**

- Veículos Autónomos Subaquáticos (VAS).

### **1.3- Estrutura da Dissertação**

Este documento descreve toda a pesquisa desenvolvida para especificar e desenvolver um modem acústico subaquático de alto débito e baixo consumo, estando dividido em 5 capítulos. Após esta introdução, o capítulo 2 apresenta, de forma resumida, os principais temas que estão relacionados com esta dissertação, sendo estes: sistemas de comunicação, comunicações sem fios subaquáticas, características do canal subaquático, modulações digitais e ainda uma visão geral dos modems acústicos subaquáticos existentes.

O capítulo 3 apresenta toda a arquitetura do sistema (modem acústico), passando pelas decisões técnicas, decisões de prototipagem, pelo Hardware de suporte ao sistema e ainda pelo software incluído na implementação.

O capítulo 4 apresenta os testes e resultados efetuados para a validação do sistema, apresentando o cenário de teste e os resultados obtidos.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões desta dissertação, incluindo algumas possíveis modificações para melhoramentos do sistema e ainda indicando algumas ideias a ter em conta para trabalhos futuro.

## **2- Estado da Arte**

Este capítulo foi concebido com a intenção de reunir os conceitos básicos necessários para realizar o trabalho descrito ao longo desta dissertação, fornecendo uma base de teoria essencial para uma melhor percepção do mesmo.

Antes de iniciar qualquer aplicação, será necessário realizar a análise teórica das tecnologias circundantes, bem como os requisitos a que o sistema está sujeito.

Inicialmente, serão apresentados alguns conceitos importantes sobre os sistemas de comunicação, com a intenção de explicar como eles funcionam. Em seguida, vários tipos de comunicação sem fios subaquática, conhecidos até à data, serão discutidos. Após isto, serão introduzidos todos os fenómenos que influenciam a propagação das ondas acústicas no meio subaquático. Depois serão discutidas as comunicações digitais versus as comunicações analógicas e os processos de modulação mais importantes. Finalmente é apresentada uma visão geral dos modems acústicos subaquáticos existentes.

### **2.1-Sistemas de Comunicação**

Comunicação é o processo mediante o qual uma mensagem é enviada por um emissor, por meio de um determinado canal, e entendida por um recetor.

O sistema de comunicação é a rede através da qual fluem as informações, que permitem o funcionamento da estrutura de uma forma integrada e eficaz. Por outras palavras um sistema de comunicação pode então ser definido como um meio (canal de transmissão), através do qual flui informação, a partir de um determinado local (emissor) para um outro local (recetor) (Mendes, 2011). Hoje em dia, muitos sistemas de comunicação estão presentes no quotidiano de uma forma bastante diversificada. Telefones nas nossas mãos, rádios nas salas de estar, computadores com acesso à internet em casa, canais de TV transmitidos via satélite e até mesmo o nosso discurso

(observar Figura 2.1), são exemplos de sistemas de comunicação no nosso dia-a-dia (Haykin, 2001).

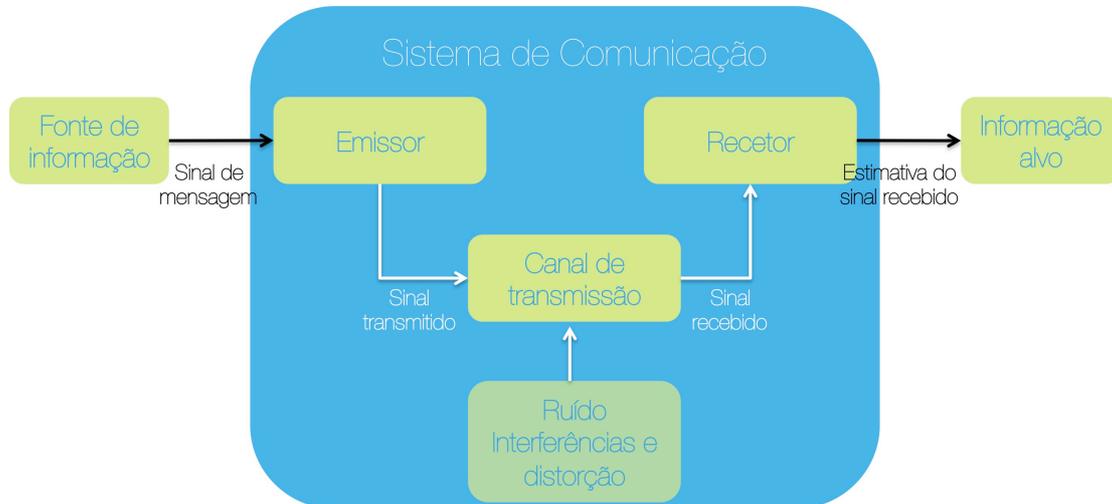


**Figura 2.1 - Exemplos de sistemas de comunicação.**

Durante uma transmissão, ocorrem uma sequência de processos específicos, descritos de seguida (Haykin, 2001) (Mendes, 2011):

- Geração de um sinal de mensagem (voz, música, fotos, dados);
- Descrição desse mesmo sinal, com alguma precisão, através de um conjunto de símbolos: elétricos, áudio ou visual;
- A codificação desses símbolos, da maneira mais apropriada, tendo o meio físico em questão;
- Transmissão dos símbolos codificados para o seu destino;
- Decodificação e reprodução dos símbolos originais;
- Reconstrução do sinal de mensagem com a deterioração da sua qualidade, em conformidade com as imperfeições presentes no sistema;

Independentemente do processo de comunicação em questão, três elementos básicos estão sempre presentes num sistema de comunicação, chamados, **emissor**, **canal** e **recetor**, retratados na figura 2.2.



**Figura 2.2 - Diagrama de blocos de um sistema de comunicação.**

O emissor tem o propósito de converter o sinal de mensagem produzido pela fonte de informação, num "formato" apropriado para a sua propagação através do meio (canal) pelo qual será transmitido.

No entanto, como o sinal transmitido se propaga ao longo do canal, é distorcido devido a imperfeições do mesmo. Além disso, ruído e sinais de interferência (originados a partir de outras fontes) são adicionados à saída do canal, resultando assim o sinal recebido numa versão danificada do sinal transmitido. Finalmente o recetor tem a tarefa de processar o sinal de receção, de modo a reconstruir uma forma "reconhecível" do sinal de mensagem original, para ser corretamente interpretado (Haykin, 2001).

Sendo assim, por palavras simples, num sistema de comunicação, deve ser entendido:

- O que deve ser comunicado;
- De onde vem a informação;
- Para quem deve ir a informação;
- Quando deve ser comunicado;
- Como deve ser comunicado;

- Por que deve ser comunicado;
- Quanto deve ser comunicado.

Como referido anteriormente, existem muitos exemplos de sistemas de comunicação. De um modo simplista eles podem ser dispostos em dois grupos principais: os sistemas de comunicação com fios e sistemas de comunicação sem fios.

Os sistemas de comunicação com fios incluem as comunicações por cabo de telefone, cabo coaxial, fibra ótica, entre outros.

Por outro lado, os sistemas de comunicação sem fios consistem em comunicações através de ondas acústicas, de ondas eletromagnéticas, sinais óticos, satélite, entre outros.

Deste modo, a escolha dos tipos de sistemas de comunicação para utilização, será dependente dos critérios acima descritos, para tornar o sistema mais robusto e eficaz quanto possível. Mais tarde serão descritas, com maior detalhe, as comunicações sem fios para transmissão de dados subaquáticas.

É necessário ainda salientar que, devido à sua forma, os sinais não podem ser enviados diretamente através dos canais de transmissão. Então, antes de ocorrer uma transmissão, todos os sinais passam por um processo chamado modulação. Este processo permite superar as limitações do canal de transmissão, a redução dos efeitos do ruído (interferência), a escolha das frequências desejadas e ainda filtrar ou amplificar os sinais. Com todas estas operações, é possível obter uma melhor compatibilidade entre o sinal e o canal de transmissão.

## **2.2- Comunicações Sem Fios Subaquáticas**

Hoje em dia, a tecnologia de comunicação sem fios tornou-se uma ferramenta indispensável nas nossas vidas. Um interesse crescente no desenvolvimento de sistemas de comunicações subaquáticas levou à pesquisa intensa sobre os métodos que permitem a transmissão sem fios subaquática. Como resultado, três grandes sistemas surgiram nesta área: Comunicações

Óticas (COMO), comunicações usando ondas Eletromagnéticas (EM) e sistemas de comunicação acústica (COMA) (Mendes, 2011).

### 2.2.1- Sistema de Comunicação Ótica

Os sistemas de comunicação ótica (COMO) subaquáticos foram desenvolvidos devido à necessidade crescente de comunicações de alta velocidade, pois alguns cenários de aplicação exigem altas taxas de transmissão de dados em tempo real (Arnon, 2010).

Um exemplo deste tipo de sistema pode ser observado na Figura 2.3, em que um Veículo Autónomo Subaquático (VAS) comunica com um recetor subaquático usando tecnologia ótica.



Figura 2.3 - Exemplo de um sistema de comunicação ótica subaquático (Cox, 2007).

Basicamente, um sistema de COMO subaquático é realizado com um pequeno grupo de componentes (ver Figura 2.4). A fonte de informação envia dados para o emissor, que converte os dados recebidos (sinal elétrico) num sinal ótico. Quando emitido, o sinal atravessa a água (meio de transmissão), até que chega ao recetor. O recetor deteta o sinal ótico e converte-o de volta para um sinal elétrico, e os dados são enviados para o seu destino (Mendes, 2011).



**Figura 2.4 - Sistema de comunicação ótica.**

Existem vários tipos de fontes de luz, mas, devido às características destes sistemas e do ambiente em que são colocados, podemos dizer que a escolha é restrita entre dois tipos: os díodos emissores de luz (LEDs) e os díodos laser (LDs). A escolha entre LEDs e LDs é complicada porque cada um tem os seus pontos fortes e fracos, como se pode concluir lendo (Brundage, 2010).

Após seleccionar a fonte de luz é ainda necessário ter em consideração a escolha da cor da luz. A partir da figura 2.5 podemos observar a atenuação da radiação eletromagnética na água e concluindo que o comprimento de onda azul ou verde são a melhor opção para ambientes subaquáticos.

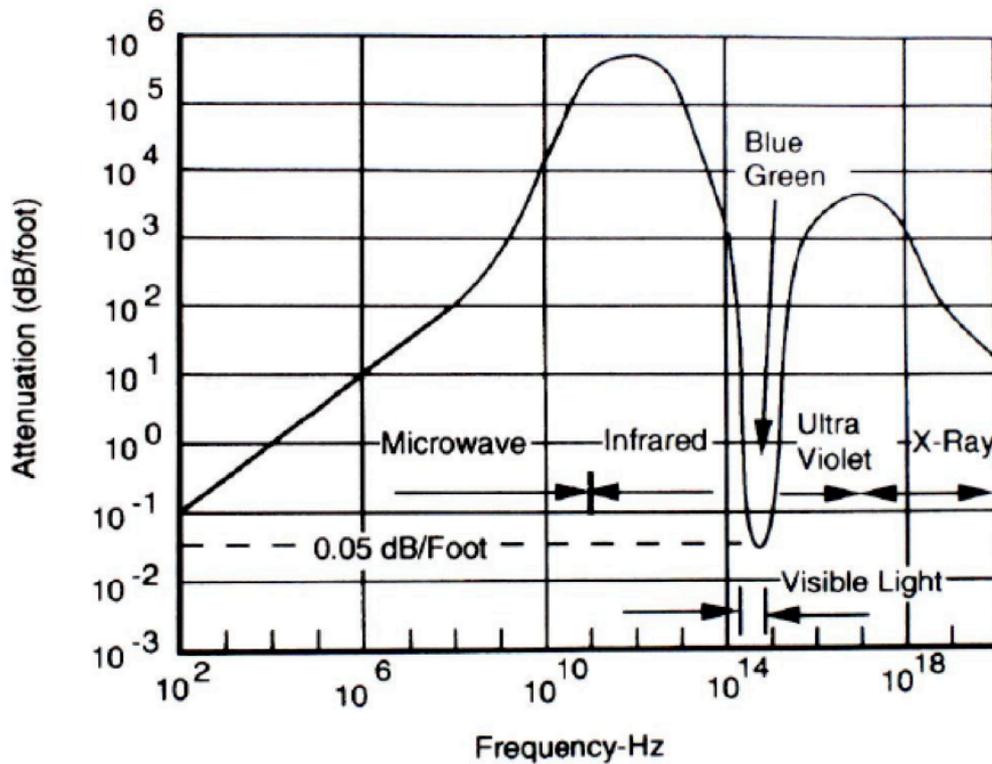


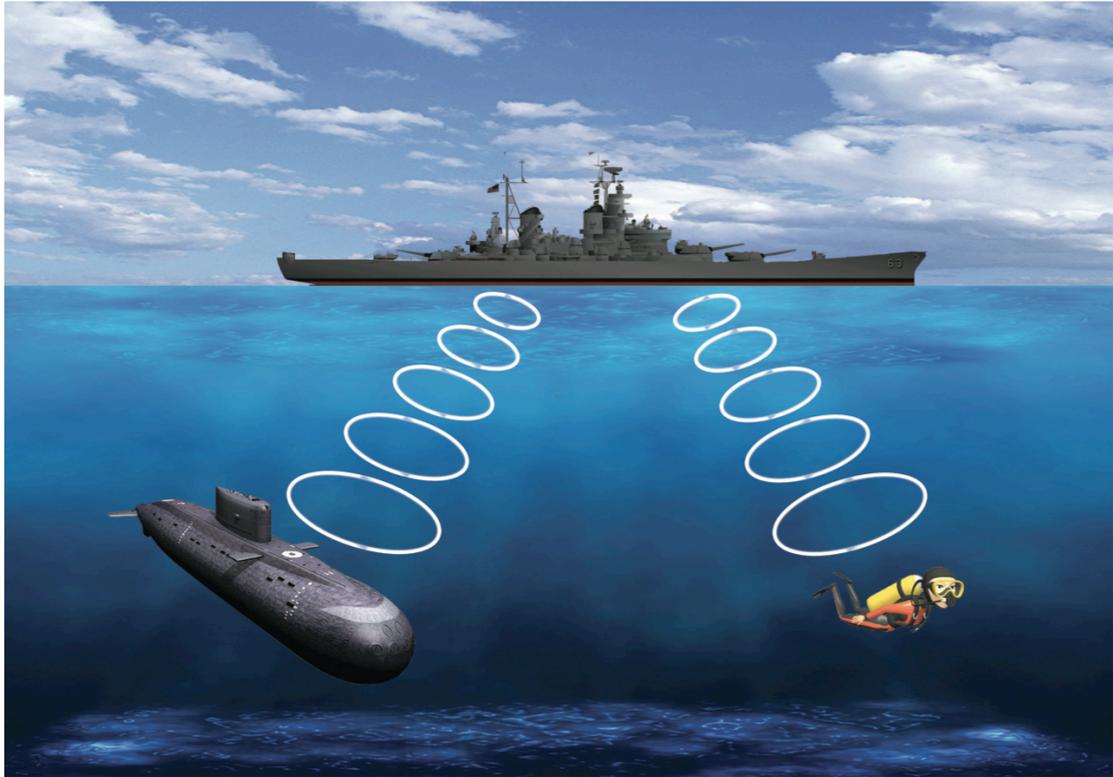
Figura 2.5 - Atenuação da radiação eletromagnética na água (Cox, 2007).

## 2.2.2- Sistema de Comunicação Eletromagnética

Nos dias que correm, os sistemas de comunicação sem fio que usam ondas eletromagnéticas, em particular sistemas de Rádio Frequência (RF), são a base das telecomunicações sem fio através do ar. No entanto, a sua implementação no ambiente aquático é muito limitada devido a certos fatores inerentes a este meio (Love, 2006).

Contudo a figura 2.6 mostra a única aplicação subaquática que usa a tecnologia de ondas EM. Esta aplicação é de frequências extremamente baixas e consiste num sino que chama um submarino ou um mergulhador à superfície (Rhodes, 2007).

O sistema não permite a realização da troca de dados, apenas serve para chamar o submarino à superfície. Uma vez na superfície, o submarino usa ondas de rádio terrestres para proceder à troca de dados. Um dos pioneiros em comunicações de rádio para submarinos subaquáticas foi a Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial, com a construção de "Golias" em 1941 (Shelley, 2005).



**Figura 2.6 - Barco a chamar um submarino e um mergulhador através de ondas eletromagnéticas (Gonçalves, 2012).**

A alta permissividade e condutividade elétrica são alguns dos fatores inerentes ao ambiente subaquático. Devido a estas propriedades, um sinal EM propaga-se de forma diferente, na água do mar e na água doce. A Tabela 2.1 mostra que, apesar de ambos serem um ambiente aquático o comportamento das ondas EM é diferente. Esta tabela faz um resumo das taxas de transmissão de dados esperadas para sistemas de comunicações EM com baixo consumo de energia em função das distâncias.

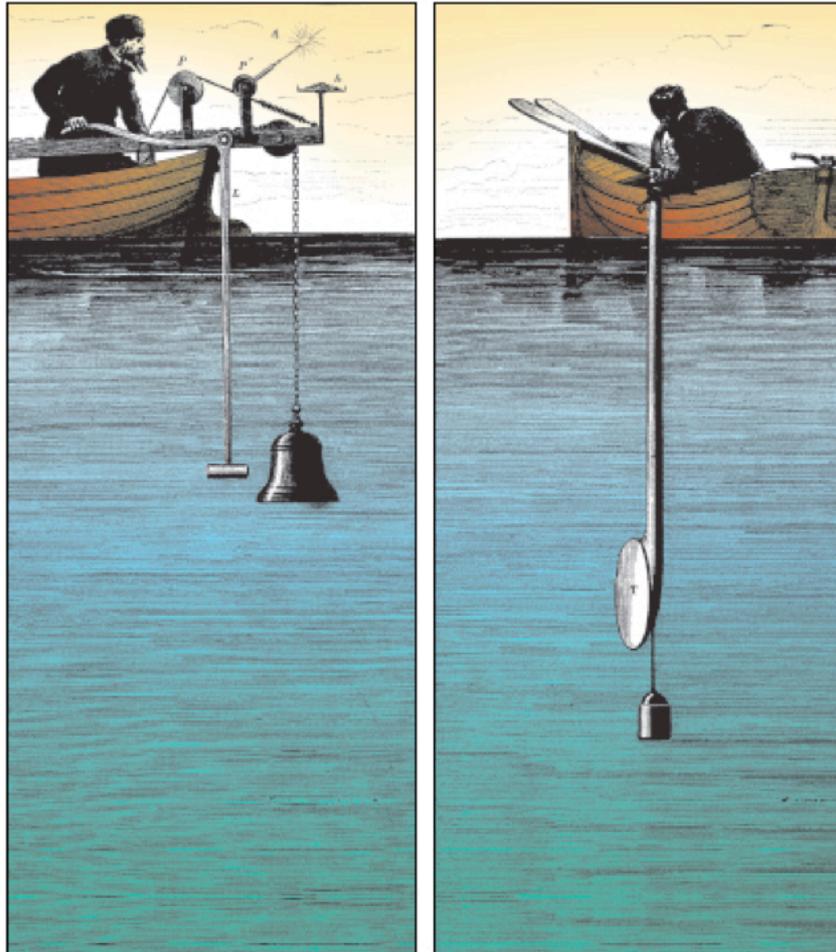
Tabela 2.1 - Taxas de transmissão de dados esperadas para sistemas de comunicações EM (Rhodes, 2007)

<b>Distância</b>	<b>&lt;1 m</b>	<b>10 m</b>	<b>50 m</b>	<b>200 m</b>	<b>2 km</b>	<b>10 km</b>
<b>RF em Água Salgada</b>	Mais de 100 Mbps	100 kbps	5 kbps	100 bps	10 bps	1 bps
<b>RF em Água Doce</b>	Mais de 100 Mbps	1 Mbps	100 kbps	1 kbps	10 bps	1 bps

### 2.2.3- Sistema de Comunicação Acústica

As comunicações acústicas evoluíram de forma bastante significativa nas últimas décadas, o que levou a um grande progresso nesta área. No entanto, o estudo neste campo de comunicação já começou há muitos anos. A figura 2.7 mostra uma experiência realizada em 1826 por *Jean Daniel Colladon*, um físico/engenheiro, e *Charles-François Sturm*, um matemático, no Lago de Genebra, na Suíça, para medir a velocidade do som na água (Vosbein, 2010).

Para esta experiência, foi usado um sino de igreja de modo a provar que o som viajava mais rápido através da água que no ar. Um bateu no sino de igreja e simultaneamente acendeu a pólvora. O outro iniciou o relógio quando viu o *flash* de pólvora, e só parou o relógio, quando ouviu o barulho feito pelo sino da igreja (para ouvir o som ele usou uma trombeta). A distância entre os dois barcos era de 10 milhas. Através desta experiência obtiveram uma velocidade do som na água de 1435 m/s. Este valor não é muito diferente dos valores atualmente conhecidos, o que torna esta medida extremamente precisa.



**Figura 2.7 - Experiência para medir a velocidade do som na água (Vosbein, 2010)**

Este tipo de comunicação tem sido a tecnologia mais usada para sistemas de comunicações subaquáticas (especialmente em comunicações de longa distância). Na verdade, hoje em dia os sistemas de comunicação acústica são a primeira forma de comunicações subaquáticas sem fios. Isso acontece devido a vários fatores, tais como: a baixa atenuação sofrida pelo som quando o canal de comunicação é a água, especialmente em águas profundas, com um fator térmico estável (Lanbo Liu, 2008) (Mendes, 2011).

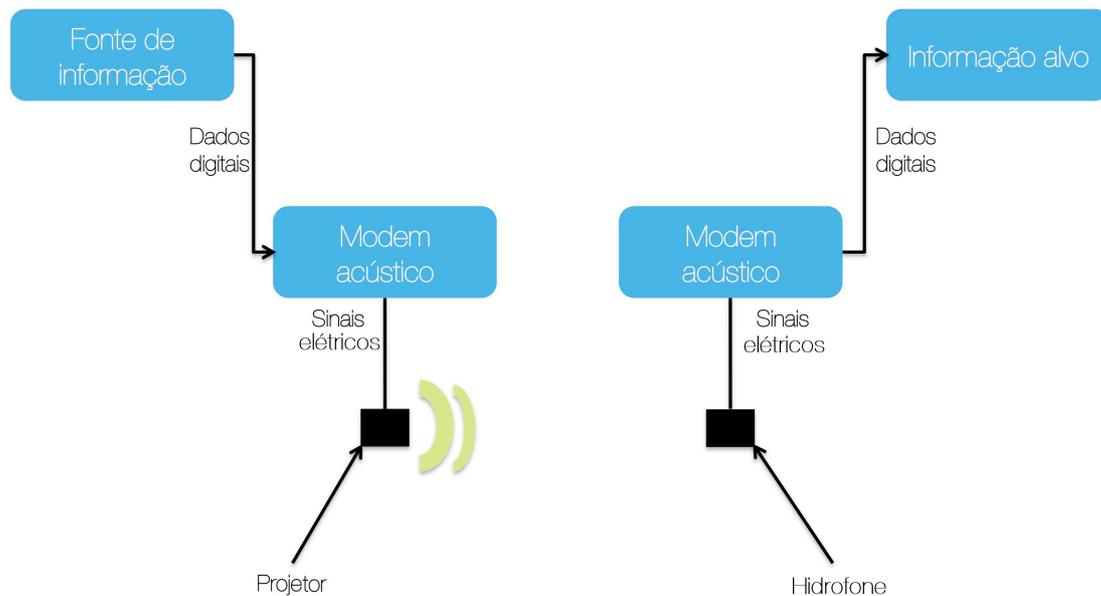
A propagação de ondas acústicas (ondas sonoras)<sup>1</sup> no canal aquático é bastante diferente da sua propagação no canal aéreo. Para comprovar este fato, basta ter em mente que a velocidade do som na água é aproximadamente cinco

---

<sup>1</sup> “As ondas sonoras são definidas como ondas de compressão, que têm uma frequência que está dentro do espectro audível. Os sons fora da gama de audição humana é muitas vezes referido como infrassons, abaixo de 20 Hz, e ultrassons, acima de 20 kHz. Ondas de compressão são ondas mecânicas que se propagam através do interior do material como flutuações de pressão. A taxa de variação destas flutuações de pressão determina a frequência da onda” (Contractors, 2008).

vezes maior do que no ar. A velocidade do som na água é de cerca de 1500 m/s, enquanto que no ar é de cerca de 340 m/s. Pode-se dizer que o ambiente aquático é "transparente" para as ondas sonoras, enquanto para um outro tipo de ondas, por exemplo ondas EM, o ambiente aquático é praticamente "opaco" (Barrio, 2009).

Os sistemas COMA subaquáticos são estabelecidos pela transmissão de ondas acústicas. Este sistema é composto por vários componentes (Figura 2.8).



**Figura 2.8 - Visão geral de um sistema de comunicação acústica**

A fonte de informação envia os dados digitais para o modem acústico. O modem acústico converte os dados em sinais elétricos. Em seguida, estes sinais serão convertidos pelo transdutor elétrico, em vibrações mecânicas (ondas sonoras). Depois disso, estas ondas acústicas irão ser propagadas através do meio aquático. Quando estas ondas acústicas são recebidas por o outro transdutor, são convertidas novamente num sinal elétrico. Este sinal é então enviado para o modem acústico, que converte o sinal em dados digitais para serem então interpretados na informação alvo (M. Dermond, 2007).

O transdutor que faz parte do dispositivo de transmissão, ou seja, que converte o sinal elétrico num sinal acústico, é geralmente chamado de projetor. O transdutor que faz parte do dispositivo de recepção, ou seja, que converte o

sinal acústico num sinal elétrico, é muitas vezes chamado de hidrofone (Godden, 2002).

De acordo com a distância que pode alcançar, e verificando a tabela 2.2, as ligações COMA subaquáticas podem ser classificadas como: muito longa, longa, média, curta e muito curta (Ian Akyildiz, 2007)

**Tabela 2.2 - Largura de banda acústica subaquática para diferentes distâncias.**

<b>Distância</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>Largura de Banda (kHz)</b>
<b>Muito Longa</b>	1000	<1
<b>Longa</b>	10-100	2-5
<b>Média</b>	1-10	≈ 10
<b>Curta</b>	0.1-1	20 - 50
<b>Muito Curta</b>	<0.1	>100

Como em outros canais de comunicação, os canais subaquáticos também têm algumas propriedades/características que influenciam o desenvolvimento dos sistemas COMA subaquáticos. Estas propriedades serão discutidas mais à frente em maior detalhe.

## **2.2.4- Sumário dos Sistemas de Comunicação Subaquáticos**

A leitura das secções anteriores (2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3) permite compreender que os vários tipos de sistemas de comunicação sem fios subaquáticos são bastante diferentes. Cada um tem características próprias que os distingue uns dos outros. Dadas as suas diferenças, todos os sistemas têm suas vantagens e desvantagens em relação ao seu desempenho no meio subaquático. Pode-se dizer que existem situações em que um sistema é mais adequado do que o outro para executar determinadas tarefas.

A Tabela 2.3 apresenta uma comparação entre os sistemas de comunicação acústica, EM e ótica, em ambientes subaquáticos (principalmente no mar). Os parâmetros escolhidos para comparação são: velocidade nominal, perda de energia, largura de banda, banda de frequência, tamanho da antena e alcance efetivo.

**Tabela 2.3 - Comparação entre as ondas acústicas, EM e óticas no mar (Lanbo Liu, 2008).**

	<b>Acústico</b>	<b>Eletromagnético</b>	<b>Ótico</b>
<b>Velocidade (m/s)</b>	≈ 1500	≈ 300×10 <sup>6</sup>	≈ 300×10 <sup>6</sup>
<b>Perda de Energia</b>	>0.1 dB/m/Hz	≈ 28dB/km/100MHz	<i>turbidity</i>
<b>Largura de Banda</b>	≈ kHz	≈ MHz	≈ 10 – 150 MHz
<b>Banda de Frequência</b>	≈ kHz	≈ MHz	≈ 10 <sup>14</sup> – 10 <sup>15</sup> Hz
<b>Tamanho Antena</b>	≈ 0.1 m	≈ 0.5m	≈ 0.1 m
<b>Alcance Efetivo</b>	≈ km	≈ 10m	≈ 10 – 100m

Deve notar-se que existem muitos mais fatores de comparação, e o fato de os tópicos acima mencionados constarem na Tabela 2.3, não significa que eles sejam os mais importantes. Já foi dito que o peso de cada um dos fatores depende do cenário de aplicação.

## **2.3- Características do Canal Subaquático**

O canal subaquático é um dos maiores desafios na área das telecomunicações. Quando se lida com comunicações subaquáticas, é-se confrontado com bastantes problemas precisamente devido ao uso da água como um canal de comunicação. Estes problemas irão sempre ocorrer, e na

melhor das hipóteses apenas podem ser minimizados. O impacto causado por um grupo de fatores físicos nos sistemas de comunicação acústica (COMA) subaquáticos e o peso que cada um representa, varia em função das características do meio aquático.

Este tipo de propagação (propagação acústica) é caracterizado, principalmente, pelos seguintes fatores: atenuação (aumenta com a frequência do sinal), ruído ambiente, efeito *Doppler*, atraso, multi-percurso e bolhas. (Stojanovic, 1999).

Estes aspetos serão discutidos, um a um em mais pormenor na presente secção (Mendes, 2011).

### **2.3.1- Atraso de Propagação**

Os atrasos apresentados num sistema COMA subaquático (aproximadamente 0,67 s / km) são muito mais elevados do que os observados na comunicação EM pelo ar (Ian Akyildiz, "State of the art in protocol research for underwater acoustic sensor networks" , 2007). Acontece devido ao facto de a velocidade nominal do som na água ser cerca de 1500 m/s e a velocidade das ondas EM no ar ser de  $3 \cdot 10^8$  m/s. Por outras palavras, a velocidade do som na água é 200.000 vezes inferior à velocidade das ondas eletromagnéticas no ar. Esta comparação dá a completa noção de que a velocidade do som na água é muito baixa. Isto significa que existem grandes atrasos de propagação, o que leva a uma diminuição do desempenho do sistema de comunicação.

A velocidade do som na água é influenciada por determinadas propriedades, tais como: a temperatura, a salinidade e profundidade. Com isto, aumentando o valor de qualquer uma destas propriedades leva a um aumento da velocidade do som. Observando a Figura 2.9 e a Tabela 2.4, é possível obter uma melhor compreensão de como estes parâmetros afetam a velocidade do som na água.

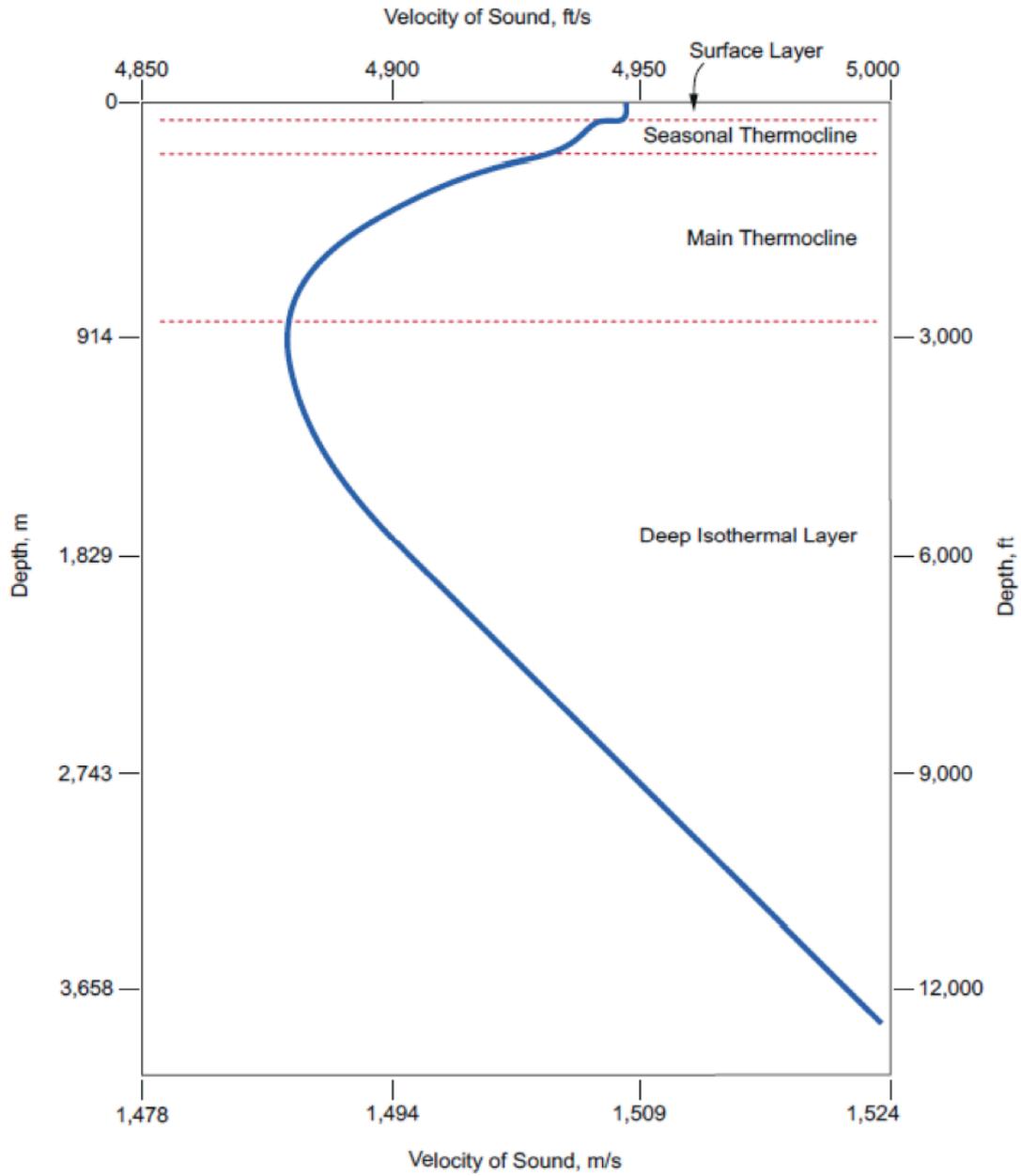


Figura 2.9 - Perfil típico da velocidade do som nas profundezas do oceano (Stern., 2008).

Tabela 2.4 - Variações da velocidade do som (aproximadamente) (Stern., 2008).

Dependência da Velocidade do Som	Coefficiente
<b>Temperatura</b>	+4.6 m/s por Graus Celsius +5 ft/s por Graus Fahrenheit
<b>Salinidade</b>	+1.3 m/s por ppt +4 ft/s por ppt
<b>Profundidade</b>	+0.016 m/s por m +0.016 ft/s por ft

Existem várias equações que permitem o cálculo da velocidade do som na água (N.-S. N. Ismail, 2010), (Mendes, 2011). Uma destas equações é:

$$c = 1448,96 + 4,591T - 5,304 \times 10^{-2}T^2 + 2,374 \times 10^{-4}T^3 + 1,340(S - 35) + 1,63 \times 10^{-2}D + 1,675 \times 10^{-7}D^2 - 1,02 \times 10^{-2}T(S - 35) - 7,139 \times 10^{-13}TD^3 \quad (2.1)$$

Onde que  $c$  é a velocidade do som, e é expressa em m/s (m por segundo),  $T$  representa o valor da temperatura da água em graus Celsius,  $S$  simboliza a salinidade em unidades práticas de salinidade (ppt) e, finalmente,  $D$  é a profundidade, em m. Esta equação é conhecida como a equação de *MacKenzie* e prevê um erro de cerca de 0.070 m/s (A. Sehgal, 2010).

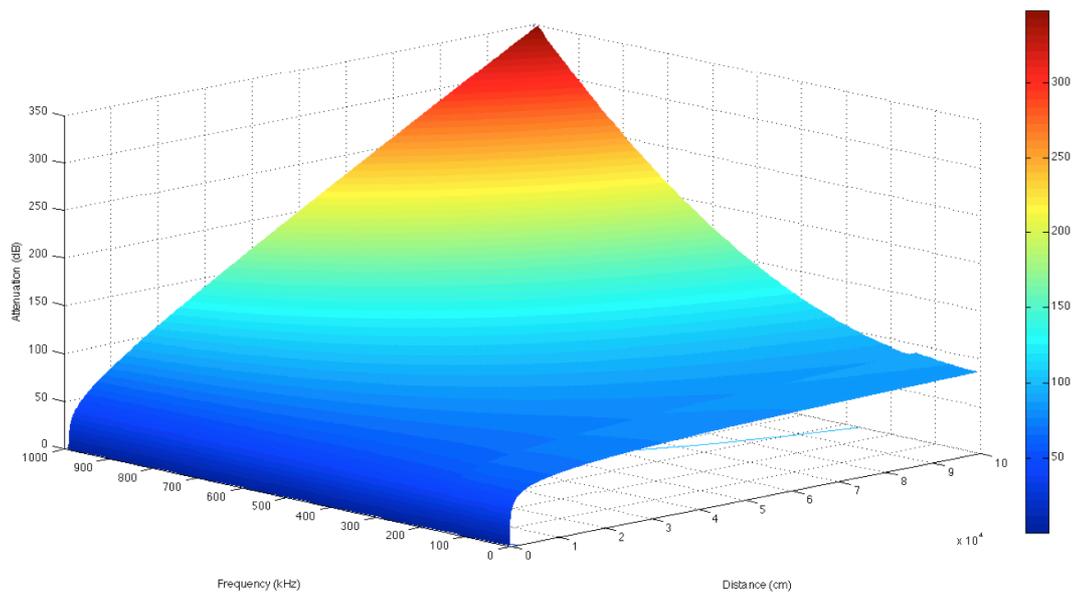
Depois de calcular a velocidade do som na água, usando a equação (2.1), pode-se calcular o atraso de propagação através da seguinte equação (N.-S. N. Ismail, 2010):

$$t = \frac{d}{c} \quad (2.2)$$

Onde que  $t$  representa o atraso de propagação, em segundos (s),  $d$  é a distância entre o emissor e recetor em metros (m) e  $c$  é a velocidade do som em m/s (m por segundo).

### 2.3.2- Atenuação

A atenuação é uma das propriedades mais importantes dos canais acústicos subaquáticos, pois está presente em todos os tipos de meios subaquáticos e o seu valor aumenta com base em dois fatores: a distância e a frequência (observar Figura 2.10) (Mendes, 2011).



**Figura 2.10 - Gráfico da atenuação do som na água (Mendes, 2011).**

Atenuação é composta por três componentes principais: perda na propagação, perda por absorção, e perda por dispersão (Preisig, 2006).

Perda por absorção é a "transformação" de energia acústica em calor. Este é o conceito mais importante na atenuação do sinal, uma vez que o coeficiente de absorção é o principal fator de limitação da frequência máxima que pode ser utilizado num sistema subaquático (Figura 2.11).

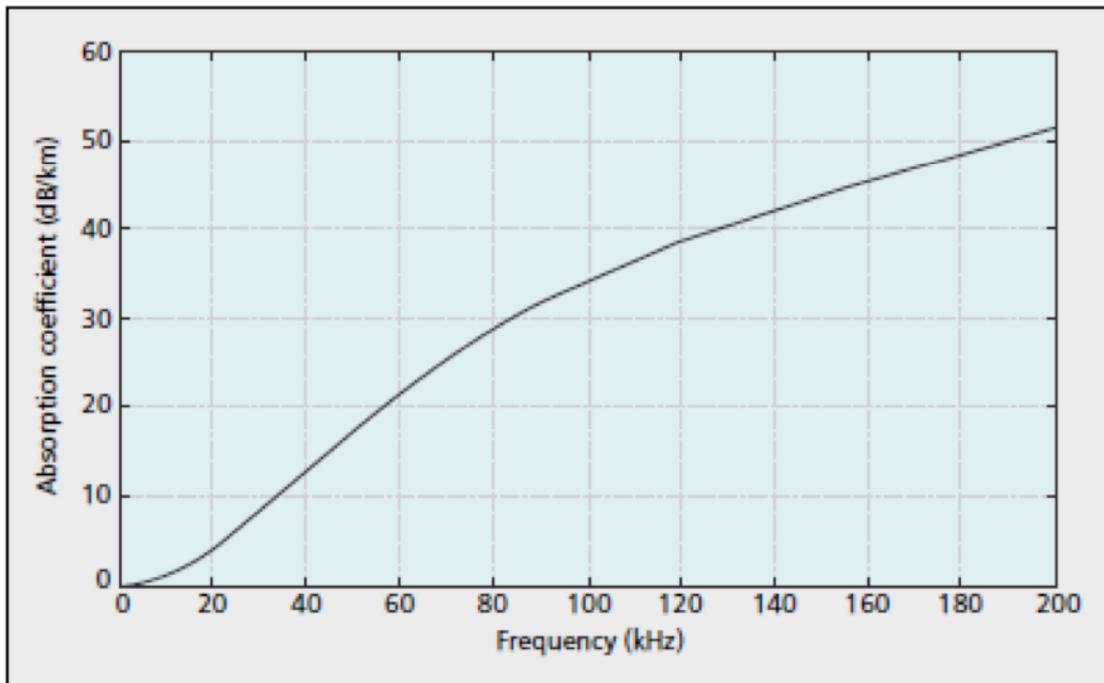


Figura 2.11 - Coeficiente de absorção (Preisig M. S., 2009).

A perda na propagação consiste na perda que a energia emitida sofrerá com o aumento da área da superfície através da qual o sinal se propaga até que chega ao recetor. Existem vários tipos de perda na propagação, em que a propagação esférica e cilíndrica são apenas alguns exemplos (Preisig J., 2006).

A perda por dispersão é a perda de energia que o sinal sofre quando é desviado/redirecionado para uma superfície ou devido à falta de homogeneidade do meio. Esta superfície pode ser o fundo do mar, a superfície da água ou qualquer outro objeto. É ainda relevante dizer que a dispersão é composta por fatores tais como a reflexão, refração e difração.

Em seguida, é introduzida uma equação que dá a atenuação do sinal em dB (decibéis) (A. Sehgal, 2009):

$$10 \log A(l, f) = k10 \log l + 10 \log a(f) \quad (2.3)$$

Onde  $f$  representa a frequência do sinal transmitido (kHz),  $a(f)$  é o coeficiente de absorção,  $l$  simboliza a distância de transmissão e o fator de propagação é representado pelo  $k$ . O fator de propagação descreve a geometria de propagação e os seus valores mais comuns são:  $k = 1$  para propagação

cilíndrica (águas rasas),  $k = 1,5$  para a propagação prática e de  $k = 2$  para a propagação esférica (águas profundas).

### **2.3.3- Ruído Ambiente**

Num ambiente subaquático a presença de ruído é inevitável, e este ruído pode ser caracterizado pelo ruído produzido pelo homem, o ruído específico do local e o ruído ambiente. O ruído produzido pelo homem é criado pelo barulho de máquinas ou pela atividade dos navios, ou seja, é todo o barulho criado pelas atividades humanas, também conhecido como ruído antropogénico. Por outro lado, o ruído específico do local apenas existe em determinados locais, pode ser comparado com o ruído gaussiano que normalmente contém várias componentes não gaussianas. Finalmente, o ruído ambiente consiste na turbulência, chuva, ondas a rebentar, a atividade marítima, ou seja, basicamente é todo o tipo de ruído que está sempre presente num ambiente subaquático (Mendes, 2011).

A Figura 12 apresenta algumas fontes de ruído que existem num ambiente subaquático.

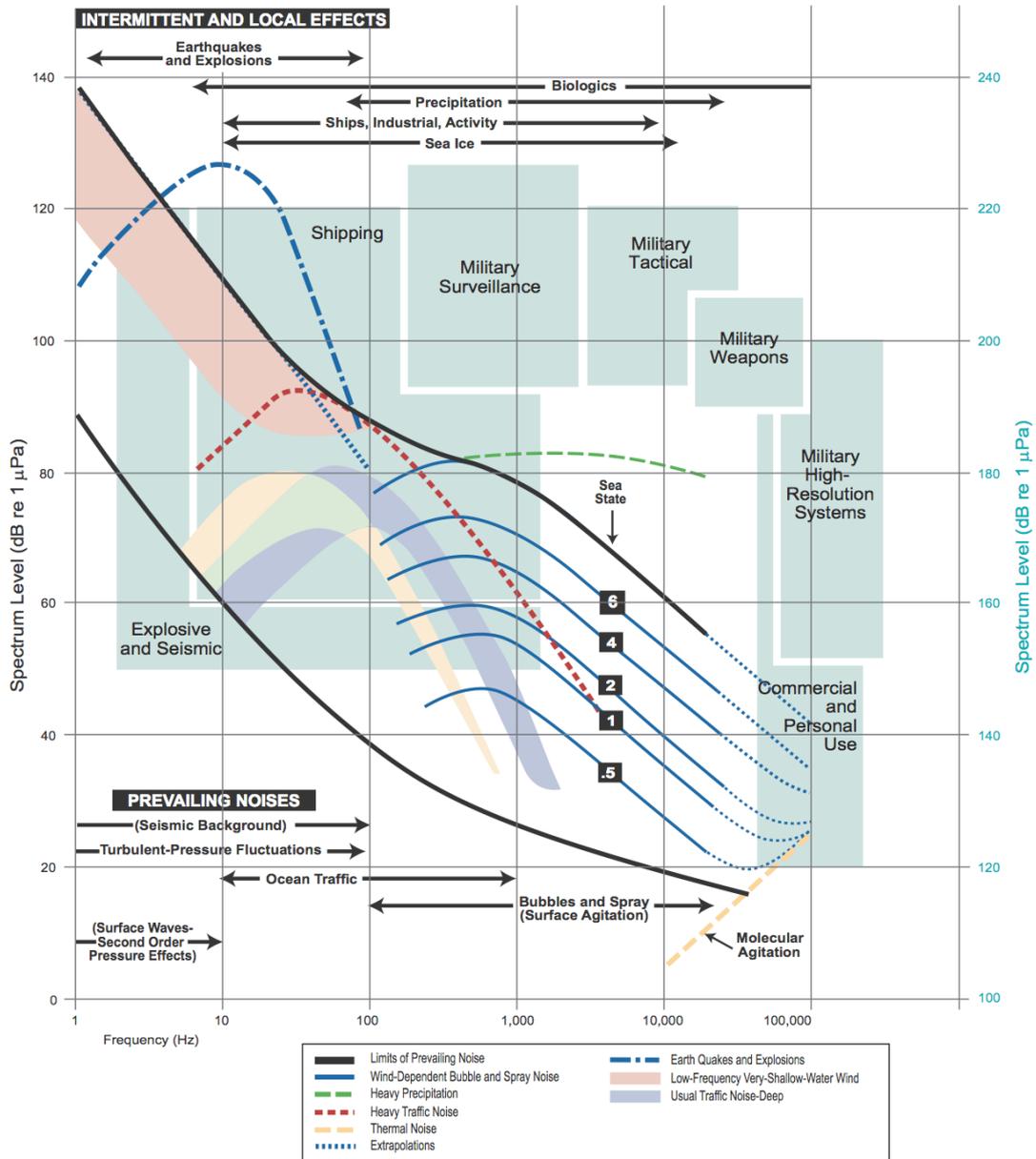


Figura 2.12 - Fontes de ruído (Stern., 2008).

O ruído no oceano pode ser simulado usando as quatro fontes mais importantes de ruído: a turbulência, o transporte, ondas e ruído térmico. Estes tipos de ruídos podem ser descritos pela estatística de Gauss e pela densidade espectral de potência contínua (p.s.d.). A p.s.d. das quatro fontes de ruído acima mencionadas, podem ser encontradas em  $dBr$  e  $\mu Pa$  por Hz, através das seguintes fórmulas (Stojanovic, 2007) (Mendes, 2011):

**Ruído por turbulência:**

$$10 \log N_t(f) = 17 - 30 \log(f) \tag{2.5}$$

O ruído por turbulência apenas influencia uma região muito baixa de frequências,  $f < 10\text{Hz}$ .

**Ruído de transporte:**

$$10 \log N_s(f) = 40 + 20(s - 0,5) + 26 \log(f) - 60 \log(f + 0,03) \quad (2.6)$$

O ruído causado por um transporte distante pode ser encontrado na região de frequências de 10Hz - 100Hz.

**Ruído das ondas:**

$$10 \log N_w(f) = 50 + 7,5w^{(1/2)} + 20 \log(f) - 40(f + 0,4) \quad (2.7)$$

Este tipo de ruído é um dos maiores no meio aquático e atinge uma região de frequência de 100Hz - 100kHz.

**Ruído Térmico:**

$$10 \log N_{th}(f) = -15 + 20 \log(f) \quad (2.8)$$

O ruído térmico torna-se predominante para regiões  $f > 100\text{kHz}$

Nas equações acima mencionadas,  $f$  representa a frequência do sinal em kHz,  $s$  é o fator de transporte (varia entre 0 e 1) e  $w$  simboliza a velocidade do vento em m/s. O ruído total de p.s.d. pode ser calculado em  $\mu\text{Pa}$  pela soma das equações (2.5), (2.6), (2.7), (2.8):

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (2.9)$$

**2.3.4- Efeito Doppler**

Mesmo não sendo móvel, o emissor e o recetor de um sistema de comunicação subaquática estão sujeitos a qualquer movimento causado por correntes, ondas e outros fatores. Este movimento leva a criação do efeito de Doppler, o que implica alterações na frequência (Mendes, 2011).

Na Figura 2.13, um emissor de ondas sonoras desloca-se do ponto A para o ponto B, criando o efeito *Doppler*. A frequência de translação é representada por ondas azuis e a frequência de difusão é representada por ondas negras.

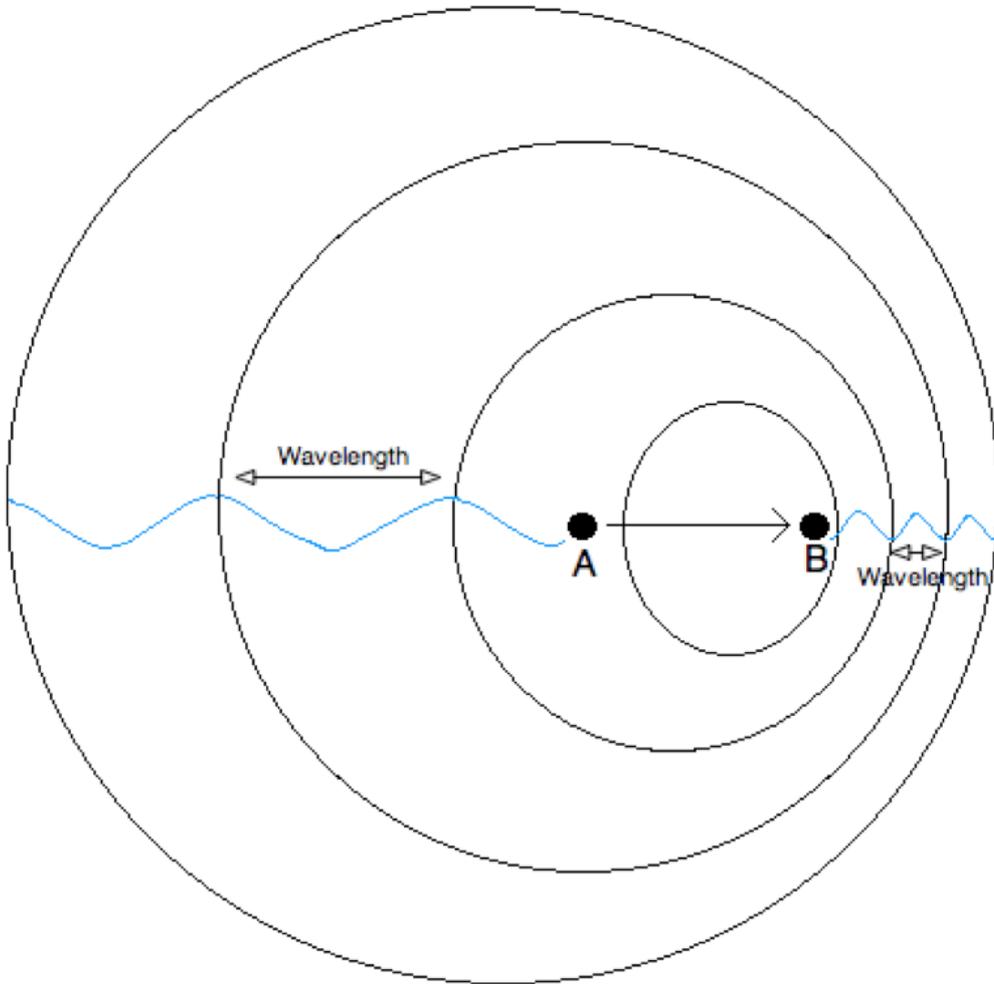


Figura 2.13 - Efeito Doppler (Mendes, 2011).

Sendo assim, é importante ter em conta o efeito *Doppler* na concepção de um sistema de comunicação subaquático porque a velocidade do som (muito baixa) e a derivação (a que o sistema está sempre sujeito) podem afetar drasticamente o sistema.

A magnitude do efeito Doppler é dada por (Stojanovic, 2008):

$$a = \frac{v}{c} \quad (2.10)$$

Onde  $v$  é a velocidade relativa entre o emissor e o recetor e  $c$  é a velocidade do som.

O sinal emitido pode sofrer dois tipos de alterações: uma translação simples de frequência e uma difusão contínua de frequências. O efeito Doppler pode ser calculado pela seguinte equação (Preisig J. , 2006):

$$f_d = f_0 \frac{v}{c} \quad (2.11)$$

Onde  $f_0$  representa a frequência do sinal original,  $v$  a velocidade relativa entre o emissor e o recetor, e  $c$  é a velocidade do som.

### 2.3.5- Multi-percurso

O efeito de multi-percurso é um dos problemas mais comuns nos sistemas de COMA subaquáticos. Este fenómeno de propagação acontece quando os sinais acústicos atingem o transdutor na receção a partir de dois ou mais trajetos, resultando na recolha de mais do que um sinal pelo recetor (ver Figura 2.14). No recetor cada sinal é recebido em diferentes momentos. Assim, o fenómeno multi-percurso causa a criação da interferência intersimbólica (ISI) (Mendes, 2011).

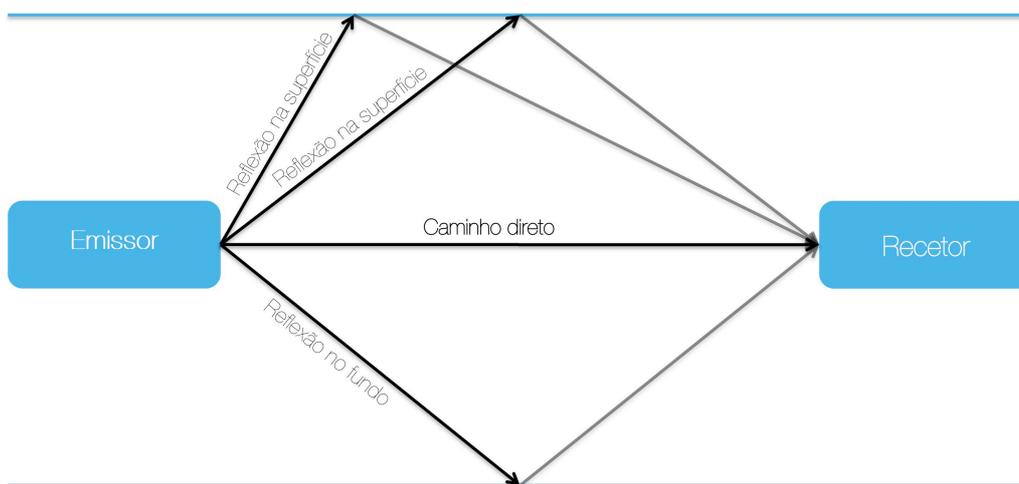


Figura 2.14 - Demonstração do efeito multi-percurso.

Multi-percurso pode ser o resultado da ocorrência de dois efeitos: uma reflexão ou uma refração das ondas acústicas. O primeiro caso ocorre quando o sinal acústico colide com uma superfície do mar, ou mesmo num simples

objeto, e depois chega ao recetor. O segundo caso ocorre geralmente em sistemas COMA subaquáticos que estão presentes em águas profundas, onde a velocidade do som varia de acordo com alguns fatores (temperatura, salinidade, pressão), que se alteram de acordo com a profundidade e localização (Mendes, 2011).

As distorções provocadas no sinal devido a multi-percurso devem ser equalizadas no recetor.

### **2.3.6- Bolhas**

Interferência causada por bolhas é um fenómeno que também influencia a propagação de um sinal sonoro na água. As altas frequências são mais afetadas pelas bolhas que as baixas frequências.

Estas bolhas podem ser criadas por vários fatores, incluindo a vibração dos transdutores ou mesmo pelo rebentamento de ondas. É de ter em consideração que a existência de muitas bolhas juntas pode causar uma atenuação significativa no sinal (Mendes, 2011).

Ao longo do tempo, têm sido feitas algumas pesquisas, com o intuito de saber como as bolhas podem afetar a propagação de um sinal sonoro em diferentes ambientes e em diferentes situações (Preisig J. , 2006). No entanto, durante esta pesquisa, não se encontrou qualquer equação que permita o cálculo da influência total que as bolhas têm na propagação do sinal.

## **2.4- Modulações**

Como é sabido, os sinais não podem ser enviados diretamente através dos canais de transmissão, isto acontece devido à sua forma. Assim, antes da transmissão, todos os sinais sofrem um processo chamado de modulação (Mendes, 2011).

As limitações do canal de transmissão podem ser superadas com a redução dos efeitos do ruído e da interferência.

Modulação é um processo de mudança sistemática de uma onda portadora<sup>2</sup> de acordo com a mensagem que se quer transmitir (sinal de mensagem), ou seja, é uma técnica de sobreposição do sinal que queremos transmitir com uma onda portadora, resultando num sinal modulado (como é mostrado na figura 2.15). Assim, através da utilização de uma onda portadora, obtêm-se as propriedades mais adequadas do sinal, para os canais de transmissão. Pode-se então referir que modulação é um processo que torna o decurso de uma comunicação, que ocorre num determinado canal de transmissão, mais eficaz e robusta.



**Figura 2.15 - Sistema de modulação**

É interessante notar que muitas formas de comunicação envolvem um processo de modulação, como a fala por exemplo. Quando um humano fala, a transmissão da sua voz através do ar (meio de transmissão) é conseguida pela geração de tons (ondas portadoras de alta frequência) nas cordas vocais, modulando estes tons com as ações musculares da cavidade bucal. O que o ouvido interpreta como fala é, portanto, uma onda acústica modulada (Carlson, 1986).

O processo inverso da modulação é chamado de desmodulação. No entanto, a presença de ruído e distorção no sinal recebido (sinal modulado) é inevitável, e faz com que seja praticamente impossível recriar exatamente o sinal original (Haykin, 2001). Desta forma, pode-se concluir que a escolha do tipo de modulação é um aspeto extremamente importante na especificação da

<sup>2</sup> Onda portadora é a onda sobre a qual é transmitido o sinal com a informação

ligação de transmissão, pois afeta o desempenho do sistema de comunicação (Gonçalves, 2012).

De uma forma simplista, pode-se proceder à identificação de dois tipos básicos de modulação: analógica e digital.

Modulação analógica é também conhecida como modulação de onda contínua. Neste tipo de modulação a portadora apresenta a forma de uma onda sinusoidal, e o sinal a ser transmitido é sempre analógico ou contínuo.

Há um número infinito de formas de onda possíveis que podem ser formadas por sinais contínuos. Tratando-se de um processo contínuo, a modulação analógica é conveniente para este tipo de sinal. Em modulação analógica, o parâmetro modulado varia em proporção direta em relação ao sinal que pretendemos transmitir.

Nesta modulação, a portadora apresenta normalmente uma frequência muito mais elevada do que qualquer um dos componentes de frequência contidos no sinal a ser modulado. Por conseguinte, o processo de modulação, é então caracterizado por uma translação em frequência, onde o espectro de frequências da mensagem a ser enviada (mensagem original) é deslocado para uma nova e maior banda de frequências.

Modulação digital é também conhecida como modulação codificada, ou discreta. Neste tipo de modulação é utilizada uma portadora analógica que tem uma ou mais características alteradas de acordo com uma informação digital. Esta modulação permite transformar sinais digitais em formas de onda a ser transmitidas no canal de comunicação. Esta técnica é caracterizada por a transmissão e deteção de uma onda em particular, através de um conjunto finito de formas de onda, que são conhecidos.

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

$$V_c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (2.12)$$

Onde, os três parâmetros  $A$ ,  $f_c$  e  $\theta$  variam com o propósito da informação transmitida obter a amplitude ( $A$ ), frequência ( $f_c$ ) e fase ( $\theta$ ) desejada.

A diferença fundamental entre os sistemas de comunicação de dados digitais e analógicos (dados contínuos) é bastante óbvia. No caso dos dados digitais, envolve a transmissão e detecção de uma de entre um número finito de formas de onda conhecidas, enquanto que, nos sistemas contínuos há um número infinitamente grande de mensagens cujas formas de onda correspondentes não são todas conhecidas.

### **2.4.1- Comunicação Analógica versus Digital**

Ao desenvolver um sistema de comunicação existem muitas opções disponíveis. É então necessário avaliá-las para ver qual se adapta melhor às necessidades do sistema. Por isso, as vantagens e desvantagens de cada tecnologia devem ser enumeradas.

Há muitos anos atrás, todos os sistemas foram construídos utilizando o processamento analógico, mas a indústria evoluiu, e com a expansão dos circuitos integrados digitais, tornou-se possível uma nova abordagem. Devido a isso, hoje em dia é mais fácil construir sistemas de comunicação, mesmo com o aumento da sua complexidade (Fernandes, 2012).

Os sistemas digitais introduziram muitas vantagens na área das telecomunicações. Como resultado, hoje em dia a maioria dos sistemas utilizados são digitais e é da sua importância enumerar porque são eles tão populares.

Abaixo estão descritas algumas vantagens e desvantagens que os sistemas digitais trouxeram ao mundo das telecomunicações, seguindo os tópicos apresentados em (Chitode, 2009) e (J.R. Barry, 2004):

#### **1. 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 apresentando um baixo custo. 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 ou conhecimento técnico específico.

## 2. Mais seguro

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

## 3. Capacidade de multiplexagem

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

## 4. Efeito regenerativo

Uma vez que a transmissão é digital e é usado codificação por canal, o ruído não se acumula na cadeia de repetidores na transmissão a longa distância (Figura 2.16).

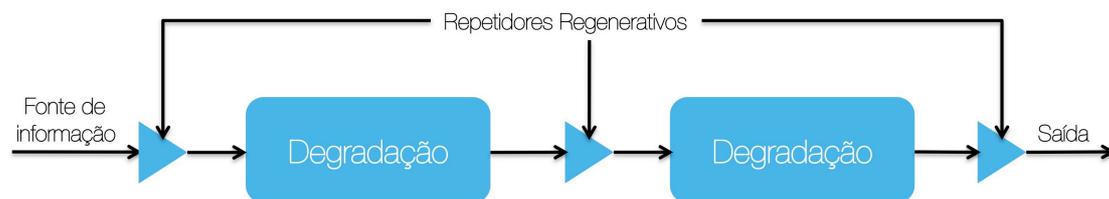


Figura 2.16 - Cadeia de repetidores regenerativos para reduzir o efeito da degradação em cascata.

## 5. Maior tolerância ao ruído

Uma vez que o sinal transmitido é digital, uma grande quantidade de interferência de ruído pode ser tolerada

## 6. Deteção e correção de erros

Desde que é utilizada a codificação do canal, os erros podem ser detetados e corrigidos nos recetores. Há, portanto, uma melhor taxa global de erro de bit a ser alcançada.

No entanto, a comunicação digital também tem as suas desvantagens. Pode-se dizer que as principais desvantagens são:

### 1. Requer maior largura de banda

A taxa de transmissão de dados torna-se por vezes muito elevada devido à conversão analógica para digital. É necessário uma maior largura de banda de transmissão para a comunicação digital. Para lidar com a causa das altas taxas de bits, o sistema de modulação precisa de implementar técnicas complexas, com o objetivo de transmitir mais bits por símbolo. Assim, se melhorar a ocupação da largura de banda e erros sobre a transmissão, os bits por símbolo aumentam.

## 2. Requer sincronização no recetor

No caso de uma modulação síncrona digital, é necessário a sincronização dos dados para o recetor poder recuperar a informação corretamente.

Em resumo, quando se compara modulação analógica com digital, pode-se concluir que a modulação digital proporciona uma maior capacidade de transmissão de informação em grandes quantidades, oferece uma maior compatibilidade com os serviços de dados digitais, aumenta a segurança dos dados a serem transmitidos e proporciona uma melhor qualidade de comunicação. Na figura 2.17 podemos observar um exemplo de um sistema de comunicação digital bastante genérico.

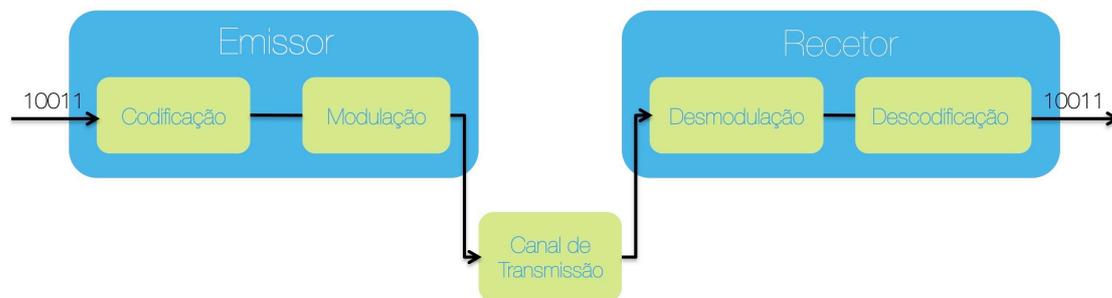


Figura 2.17 - Sistema de comunicação digital genérico.

Tal como se pode verificar nos dias que correm, os sistemas digitais são os mais utilizados na indústria, visto que oferecem mais vantagens do que desvantagens.

## 2.4.2- Técnicas de Modulação Digital

Nos dias que correm, existe cada vez mais técnicas de modulação e a opção de escolha nos tipos de técnicas de modulação a usar. Ao longo desta secção enumeram-se as três principais técnicas de modulação existentes, sendo elas, modulação ASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying) e PSK (Phase Shift Keying), explicando o seu funcionamento.

### 1. Modulação ASK (Amplitude Shift Keying)

Modulação ASK é uma técnica de modulação de sinais digitais que consiste na variação do nível da amplitude da onda portadora de acordo com o sinal que queremos transmitir. Assim, para representar o símbolo binário 1, é transmitido um sinal com uma determinada amplitude e, para representar o símbolo binário 0, muda-se a amplitude mantendo a frequência constante.

O seu princípio de funcionamento pode ser explicado através de dois dos seus tipos particulares de modulações, o *Binary Amplitude Shift Keying* (BASK) e *On - Off Keying* (OOK).

Na modulação BASK, o sinal que se quer modular assume um dos dois níveis discretos possíveis existentes na fonte de informação (nível lógico 0 ou 1). Tipicamente na modulação BASK a menor amplitude corresponde ao nível lógico 0 e a maior amplitude corresponde ao nível lógico 1. Por outro lado, na modulação OOK, a portadora assume um certo valor de tensão para nível lógico 1 e um valor de tensão zero, para o nível lógico 0. Por conseguinte, a amplitude do índice de modulação é unitária (Gonçalves, 2012).

Na Figura 2.18 podemos observar o resultado da modulação OOK.

$$ASK(t) \begin{cases} A_1 \sin(2\pi ft + \theta) & \text{se bit} = 0 \\ A_2 \sin(2\pi ft + \theta) & \text{se bit} = 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

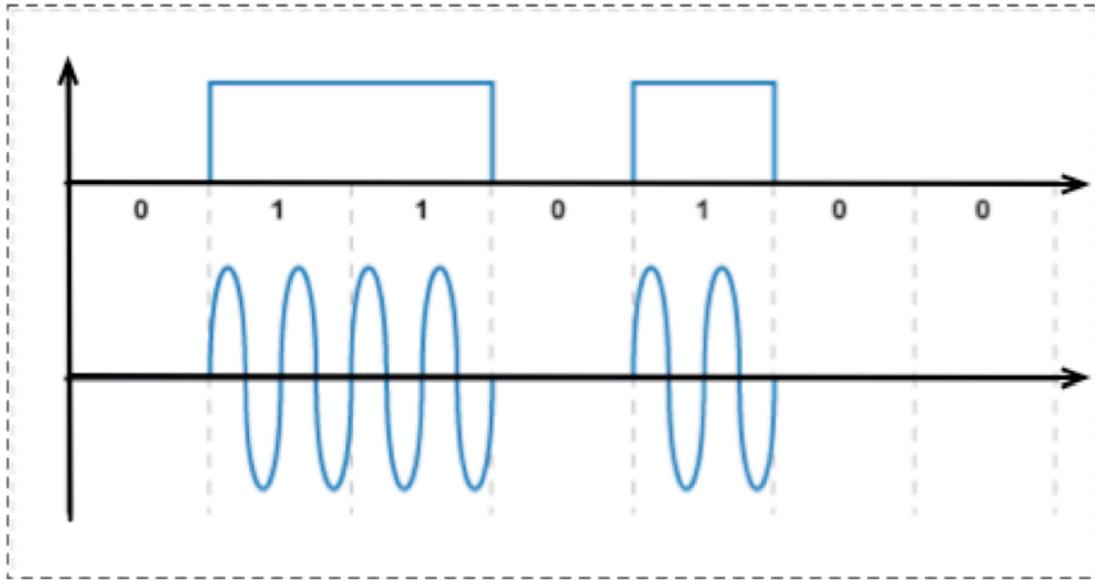


Figura 2.18 - Modulação em amplitude OOK (Gonçalves, 2012)

Usando multi-símbolos é possível aumentar a velocidade das comunicações, codificando desta forma mais do que um bit simultaneamente. Para tal devem ser utilizadas modulações, tais como, 4-ASK e 8-ASK.

## 2. Modulação FSK (Frequency Shift Keying)

Modulação FSK é uma técnica que consiste em variações discretas em frequência da onda portadora de acordo com o sinal que queremos modular. A frequência a ser transmitida será o resultado da frequência da onda portadora.

Na modulação *Binary Frequency Shift Keying* (BFSK) os símbolos 1 e 0 são distinguidos um do outro, através da transmissão de duas ondas sinusoidais que diferem em frequência de valor fixo (Haykin, 2001) (Figura 2.19).

Um modulador FSK é formado por dois moduladores ASK, um dos quais produz impulsos modulados em frequência  $f_1$  para cada bit 1, enquanto o outro produz impulsos modulados em frequência  $f_0$  para cada bit 0. À saída do modulador são combinados e transmitidos (Oscar Szeremeta Gustavo Theodoro Laskoski, 2006)

$$FSK(t) \begin{cases} A \sin(2\pi f_1 t + \theta) & \text{se bit} = 0 \\ A \sin(2\pi f_2 t + \theta) & \text{se bit} = 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

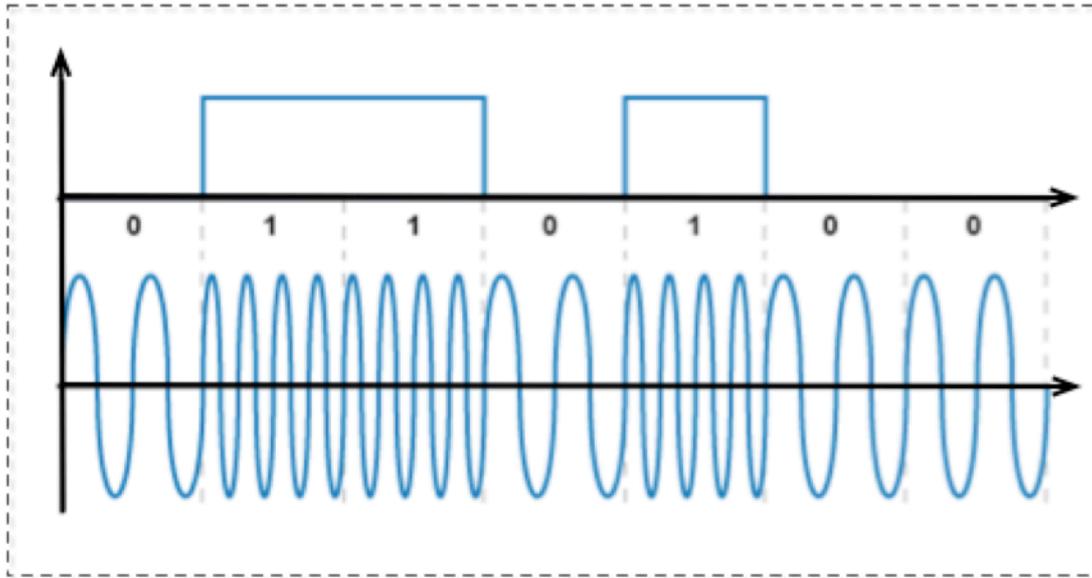


Figura 2.19 - Modulação em frequência (BFSK) (Gonçalves, 2012).

### 3. Modulação PSK (Phase Shift Keying)

A técnica de modulação PSK consiste em transmitir dados alterando a fase do sinal da onda portadora de acordo com o sinal que queremos modular. Esta técnica utiliza um número finito de fases, na qual cada fase assume um padrão único de bits. Assim, cada padrão forma um símbolo que é representado pela fase em questão.

Fase, neste contexto particular, é o ângulo de partida em que se inicia a senoide. Dependendo do início da sequência binária, para transmitir os símbolos binários 0 ou 1, inverte-se a fase 180° (*Binary phase shift keying*). A modulação mais simplista em PSK é a BPSK, onde o par de dois sinais são utilizados para representar os símbolos binários 1 e 0 (Gonçalves, 2012).

O resultado desta modulação pode ser observado na Figura 2.20.

$$PSK(t) \begin{cases} A \sin(2\pi ft + \theta_1) & \text{se bit} = 0 \\ A \sin(2\pi ft + \theta_2) & \text{se bit} = 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

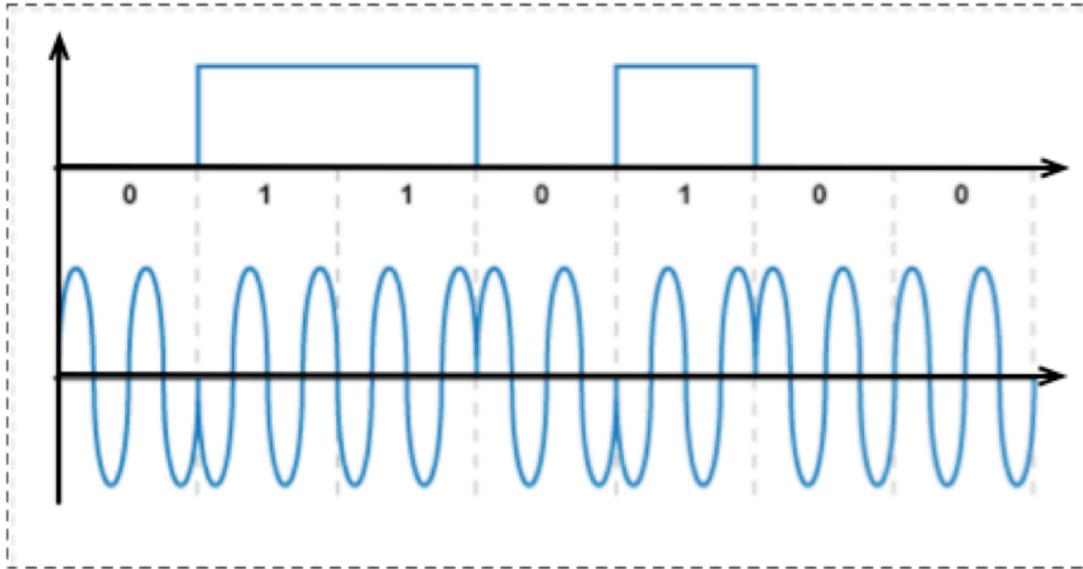


Figura 2.20 - Modulação em fase (BPSK) (Gonçalves, 2012)

Como se pode verificar na figura 2.20, é usado um par de ondas sinusoidais que apenas diferem num deslocamento em fase de  $180^\circ$  para representar os símbolos binários 1 e 0 respetivamente. No entanto, é possível codificar mais do que um bit, dando origem a modulações de multi-símbolos, tais como, *Quadrature phase shift keying* (QPSK).

## 2.5- Visão Geral dos Modems Acústicos Subaquáticos Existentes

Embora a maioria das redes de sensores sem fios terrestres sejam baseadas em ondas de propagação EM, a utilização desta tecnologia não é adequada no ambiente subaquático devido à enorme atenuação das ondas eletromagnéticas e conseqüentemente, a alta energia necessária para atingir taxas de transmissão aceitáveis. Uma opção mais interessante, atendendo a estas situações, é o uso de modems acústicos.

A palavra modem provem da junção das palavras modulador e desmodulador. É um dispositivo eletrónico que modula um sinal digital numa onda analógica, pronta a ser transmitida pelo meio em questão e que desmodula o sinal analógico e reconverte-o para o formato digital original. No entanto,

existem vários tipos de modems dependendo da aplicação que se quer criar, da sua função e do meio físico em questão. O objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um modem acústico subaquático. Logo os modems em questão serão os modems acústicos. Ao longo desta secção referem-se alguns dos modems acústicos subaquáticos existentes, as suas características e ainda a sua finalidade.

### 2.5.1- Modem Acústico (HS-HFAM)

O **HS-HFAM** (Figura 2.21) (J.Beaujean, 2007) é um modem acústico de alta velocidade, unidirecional, projetado para transmitir imagens combinadas e informações de texto num tempo muito curto. Opera entre as frequências 260 kHz a 380 kHz.

O sistema de comunicação do **HS-HFAM** acondiciona múltiplas entradas e saídas, utilizando conexões Ethernet. As entradas e saídas são portas TCP-IP ou UDP (J.Beaujean, 2007).

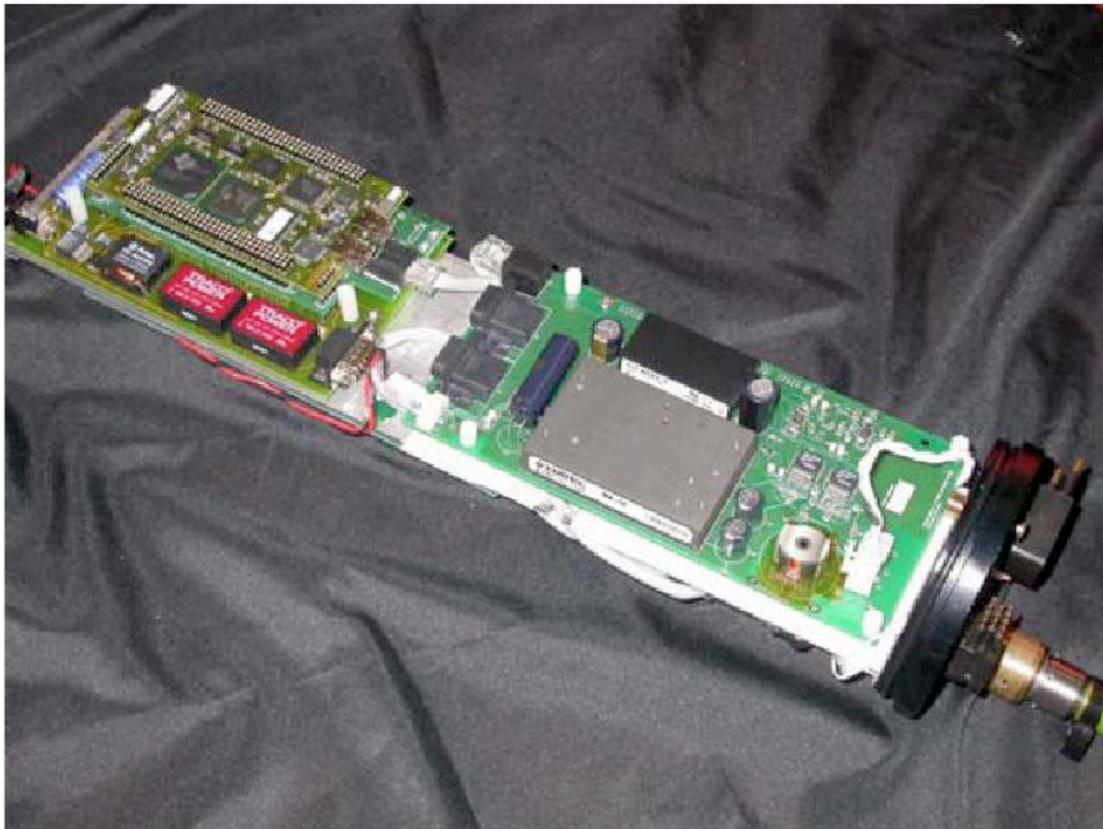


Figura 2.21 - Fonte HS-HFAM (à esquerda) e recetor (à direita) (J.Beaujean, 2007)

A informação binária é transmitida acusticamente e usa a técnica de modulação BPSK. Usando uma fonte muito compactada e com uma potência de saída de 6.6 W (Watts), os resultados experimentais mostram que este modem atinge 13298,2 bits de informação por Joule em 87768 bits de informação por segundo, a uma distância de 88m em portos e águas rasas (J.Beaujean, 2007).

## 2.5.2- Modem Acústico Omnidirecional Baseado no Cortex-M3

Este modem acústico subaquático foi desenhado e implementado utilizando a plataforma de hardware baseado em *Cortex-M3*<sup>3</sup> (Figura 2.22) (Tae-Hee Won, 2011).

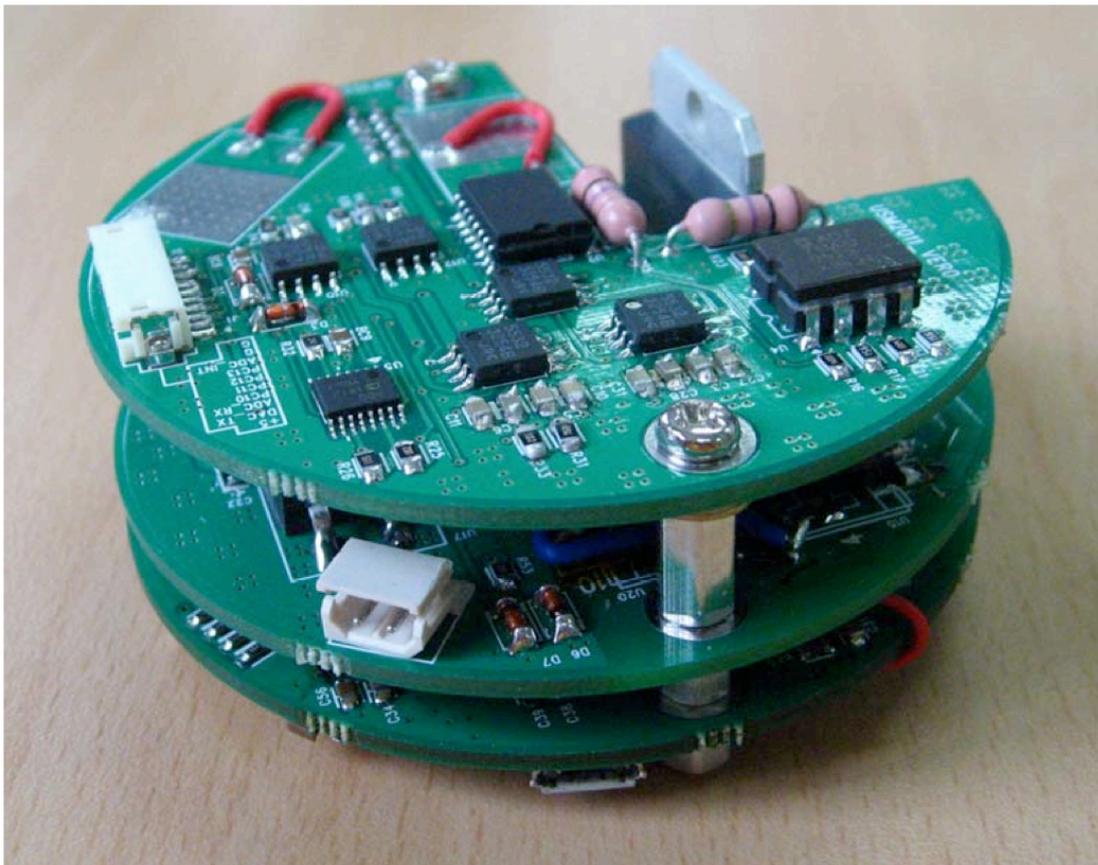


Figura 2.22 - Modem acústico subaquáticos baseado no Cortex-M3 (Tae-Hee Won, 2011)

---

<sup>3</sup> Processadores embutidos podem fornecer uma ótima solução para aplicações computacionais de baixa potência.

Como se pode verificar na figura 2.22 este modem acústico é constituído por 3 camadas. A camada inferior é uma placa digital que é responsável pelo processamento do sinal digital. A camada intermediária é a placa transmissora que envia o sinal para o canal subaquático. A camada superior é o recetor.

O modem é equipado com uma bateria de lítio de 14,8 V, que é convertido para 12 V e 3,3 V através de reguladores, e fornecidos às placas analógica e digital, respetivamente. Este modem é controlado através de um computador pessoal, usando interface RS-232.

Os resultados experimentais foram efetuados num tanque com 2,5 m de comprimento, 80 cm de largura e 70 cm de altura. Além disso, a distância entre os dois modems é de 2 m. Assim, foi conseguido uma taxa de dados de 0,2 kbps a uma distância de 2 m (Tae-Hee Won, 2011).

### **2.5.3- Modem Acústico de Baixo Custo e Alta Eficiência para Redes de Sensores Subaquáticas**

Este modem acústico foi construído com base num microcontrolador com um micro-core e vários periféricos integrados (MCU) (Figura 2.23) (A. Sanchez, 2011). Com esta arquitetura consegue-se um baixo consumo de energia (quando transmite ou recebe apenas consome 75 mA (miliamperes) e ainda um baixo custo, pois, como cada vez mais os microcontroladores são massivamente difundidos, os seus preços podem ser reduzidos até 0.72€.

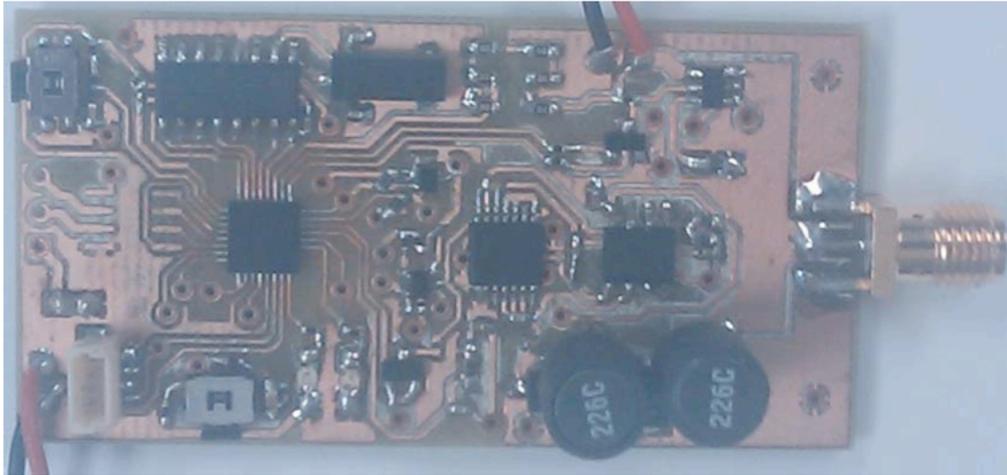


Figura 2.23 - Protótipo do modem (A. Sanchez, 2011)

Foi utilizada a técnica de modulação FSK, com uma largura de banda de 1 kHz.

O consumo do modem em modo de espera é de 3  $\mu$ W e de 24 mW no modo de recepção (dos mais baixos no mercado até ao momento). No modo de transmissão o consumo depende do consumo do MCU (12 mW) e do amplificador de potência.

Os testes foram realizados num tanque de água a 20 m de distância e 8 m de profundidade utilizando 2 modems.

Alimentando o transdutor piezoelétrico com 5 V, com uma potência mínima de saída do amplificador, o modem apresentou uma taxa de transmissão de 1 kbps (A. Sanchez, 2011).

Ao longo desta secção tem-se vindo a referir diferentes tipos de modems acústicos apresentando novas alternativas para um melhoramento na tecnologia subaquática. Cada vez mais esta tecnologia tem vindo a crescer, foram criadas empresas que se dedicaram a esta nova tecnologia e já existe concorrência no mercado dos modems acústicos. Serão então apresentados agora alguns dos modems acústicos com maior influência no mercado atual e mencionadas as suas principais características.

## 2.5.4- Teledyne Benthos

Os modems acústicos da Teledyne Benthos, são usados em aplicações subaquáticas para transmitir sem fios através da água. Os modems acústicos Teledyne Benthos da série ATM-900 são um grande reforço nas linhas de modems oferecidos anteriormente. Esta nova série apresenta modems classificados para diferentes profundidades e podem operar em águas rasas ou profundas, dependendo do modem escolhido.

As aplicações do modem incluem monitorização remota de sensores oceanográficos, o comando de veículos subaquáticos autónomos (VSA), entre outras. Os Benthos modems são projetados, tanto para atender requisitos de altas taxas de transmissão de dados e maior confiabilidade, como requisitos de taxas de transmissão de dados menores. Na Figura 2.24 podemos observar o modem acústico Benthos 903 Series ATM-903. De seguida apresentam-se as principais especificações do mesmo (Benthos, 2013).

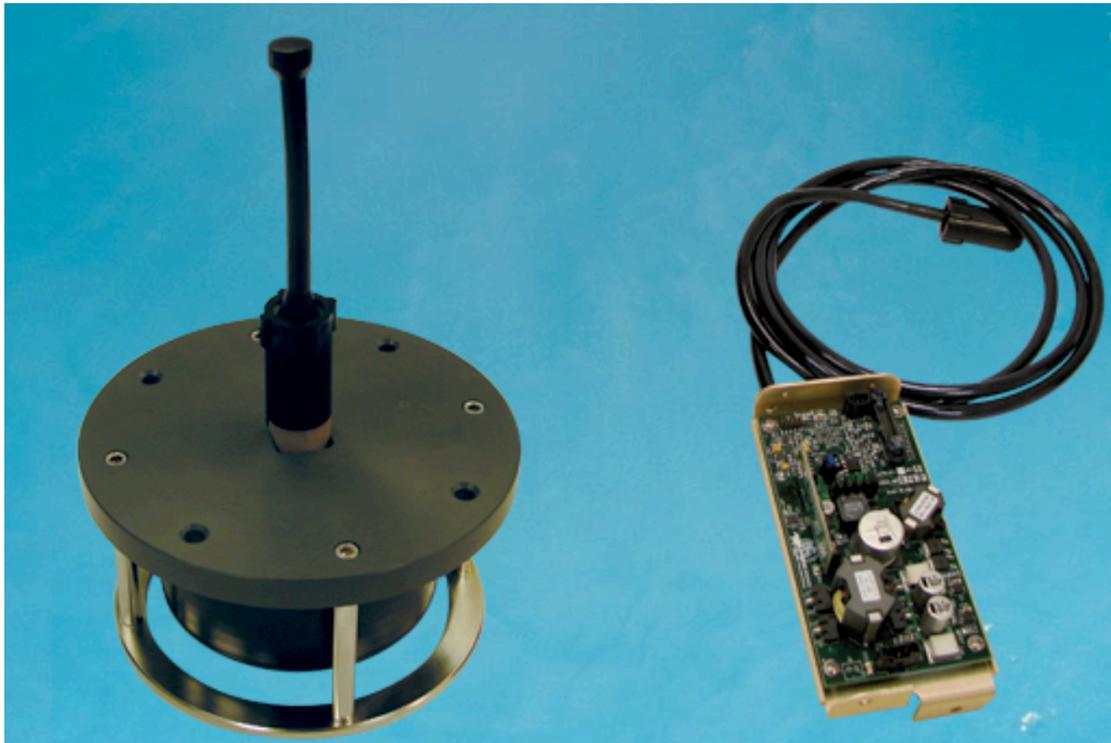


Figura 2.24 - Modem acústico Benthos 903 Series ATM-903 (Benthos, 2013).

Especificações do modem 903 Series ATM-903 (Benthos, 2013):

- **Taxa de transmissão de dados:** 2560 -15,360 bps (bits por segundo)

- **Largura de Banda:** 9 - 14 kHz (frequências baixas)
  - 16 - 21 kHz (frequências médias)
  - 22 - 27 kHz (frequências banda C)
- **Técnicas de modulação:** PSK e MFSK
- **Distância:** 2 - 6 km (Quilómetros)
- **Profundidade:** 200 m (metros), 500 m ou 6 km
- **Potência de transmissão:** 2 a 20W (dependendo do nível de potência)
- **Potência de recepção:** 720 mW (miliWatts)
- **Custo:** 4359 €

### **2.5.5- LinkQuest Inc.**

Os modems acústicos subaquáticos da LinkQuest são projetados para combater três importantes obstáculos nas comunicações subaquáticas: baixa confiabilidade, baixa taxa de transmissão e alto consumo de energia.

Utilizando a sua própria banda larga acústica com a técnica de espalhamento espectral, a empresa desenvolve modems acústicos subaquáticos avançados. Com tecnologias inovadoras, os modems da LinkQuest conseguiram aumentar significativamente a taxa de transmissão (até 38.400 bps), menor consumo de energia e robustez. Todos os modems LinkQuest funcionam com uma taxa de erro de bit menor que  $10^{-9}$ .

Na Figura 2.25 podemos observar o modem acústico LinkQuest UWM 2200. Posteriormente apresenta-se as principais especificações do mesmo (LinkQuest, 2013).



Figura 2.25 - Modem acústico LinkQuest UWM 2200 (LinkQuest, 2013).

Especificações do modem **LinkQuest UWM 2200** (LinkQuest, 2013):

- **Taxa de transmissão de dados:** 19200 - 38400 bps
- **Largura de Banda:** 53.55 - 89.25 kHz
- **Técnicas de modulação:** Não fornecido
- **Distância:** 1 km
- **Profundidade:** 1 km ou 2 km
- **Potência de transmissão:** 6 W
- **Potência de recepção:** 1 W
- **Custo:** 5812 €

## 2.5.6- Woods Hole Oceanographic Institution

O WHOI Micro-Modem (Figura 2.26) (WHOI, 2013) é um pequeno modem acústico com baixo consumo de energia baseado no DSP (*Digital Signal Processor*)<sup>4</sup>Texas Instruments TMS320C5416.

---

<sup>4</sup> DSPs são microprocessadores especializados em processamento digital de sinal usados para processar sinais.

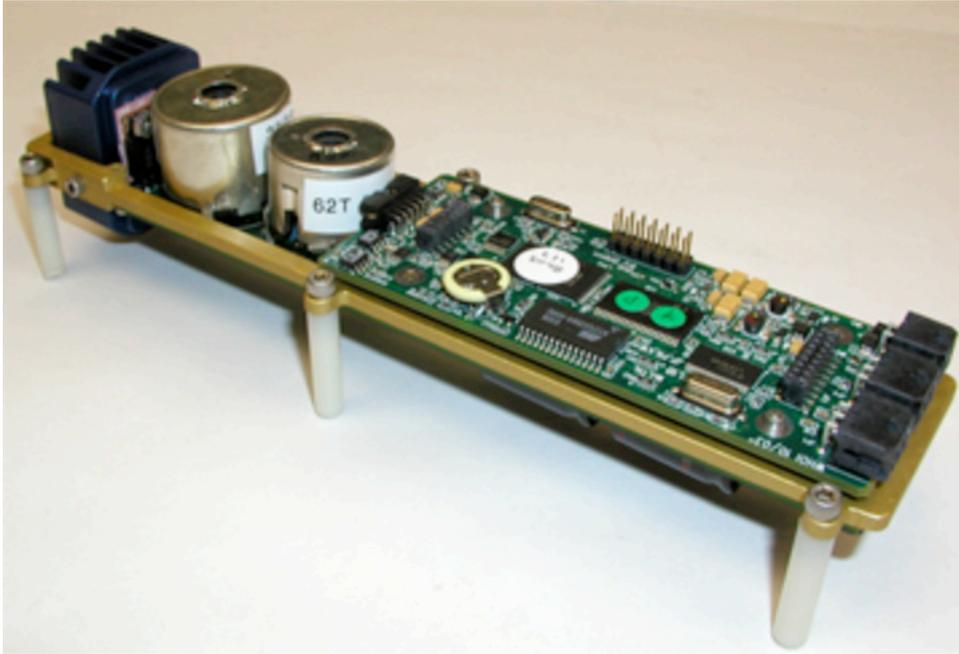


Figura 2.26 - WHOI Micro-Modem (WHOI, 2013)

Este modem já está em desenvolvimento há vários anos. Como resultado, têm sido criados novos equipamentos para o desenvolvimento do mesmo, tais como: transdutores, caixas para águas rasas, caixas para águas profundas, amplificadores de potência. É ainda compatível com muitos dos transdutores comercialmente disponíveis e acessórios eletrônicos.

O micro-modem pode ser utilizado em situações onde exista mais que um veículo subaquático autônomo (VSA), múltiplos sensores situados no fundo, vários navios e boias, todos a operar cooperativamente juntos em uma ou mais bandas de frequência.

Este grupo/empresa apresenta ainda soluções de hardware para a maioria das aplicações. Em baixo é possível verificar as principais especificações do micro-modem (WHOI, 2013).

Especificações do **WHOI Micro-Modem** (WHOI, 2013):

- **Taxa de transmissão de dados:** 300 - 5400 bps
- **Largura de Banda:** 25 kHz
- **Técnicas de modulação:** FSK e PSK
- **Distância:** Até 4 km

- **Profundidade:** 500 m
- **Potência de transmissão:** 10 - 100 W
- **Potência de recepção:** 158 mW – 2 W
- **Custo:** 2905 €

### 2.5.7- Aquatec Group

AQUAmodem é o nome dado a todos os produtos de comunicação subaquáticos da Aquatec, que foram lançados pela primeira vez em 1997. O modem acústico mais recente da Aquatec foi desenvolvido ao longo de 15 anos.

Os projetos mais recentes envolveram comunicações em águas rasas no Báltico com distâncias até 5 km. Para comunicações de maior alcance, o projeto tem sido desenvolvido em parceria com a União Europeia DAMOCLES (*Developing Arctic Modelling and Observing Capabilities for Long-term Environmental Studies*) (DAMOCLES, 2010) e a ACOBAR (*Acoustic Technology for Observing the interior of the Arctic Ocean*) (ACOBAR, 2008), para atingirem comunicações até 20 km. Para tal, a Aquatec implementou o AQUAmodem 1000 (Group, 2013) (Figura 2.27).



Figura 2.27 - AQUAmodem 1000 (Group, 2013)

Este modem basicamente foi criado para aplicações de monitoramento ambiental. No entanto devido às características da propagação acústica a

Aquatec adapta cada modem de acordo com a aplicação requerida. De seguida é possível verificar as principais especificações do AQUAmodem 1000.

Especificações do **AQUAmodem 1000** (Group, 2013):

- **Taxa de transmissão de dados:** 300 - 2000 bps
- **Largura de Banda:** 7.5 - 12 kHz
- **Técnicas de modulação:** FSK e DPSK
- **Distância:** até 20 km
- **Profundidade:** 1 km
- **Potência de transmissão:** 20 W
- **Potência de receção:** 0.6 W
- **Custo:** Não está a ser comercializado de momento.

## **2.5.8- Sumário da Visão Geral dos Modems Acústicos Subaquáticos**

Como é possível verificar na secção anterior existe ainda muito trabalho a desenvolver nesta área. Mesmo as empresas que estão a trabalhar sobre esta área não param de tentar realizar evoluções para aumentar a taxa de transmissão de dados e diminuir a potência de transmissão, potência de receção e o custo.

Se repararmos, na pesquisa elaborada na secção 2.5, um dos maiores e mais difíceis problemas para resolver é taxa de transmissão de dados. É notório que a taxa de transmissão de dados ainda é muito baixa, sendo a maior neste momento de 38400bps do modem acústico da LinkQuest. Apesar de ser uma tecnologia em desenvolvimento é necessário aumentar este parâmetro para um desenvolvimento promissor nesta área. Assim, esta dissertação, consiste na implementação de um modem acústico subaquático dando mais ênfase a taxa de transmissão de dados e ao consumo de energia.

## 2.6- Sumário

Durante este capítulo foi realizada uma breve descrição dos vários temas que estão diretamente relacionados com o tema da dissertação. Em primeiro lugar, o conceito de um sistema de comunicação e de tudo o que está ligado a este foi introduzido, após esta abordagem, foram apresentados os três tipos de sistemas de comunicações sem fios subaquáticas até agora executados: ótico, EM e acústico. Os sistemas COMA são atualmente os mais utilizados e espera-se que esta situação continue durante os próximos anos.

Em seguida, foram introduzidas as características dos canais subaquáticos expondo os parâmetros que influenciam a propagação acústica neste meio de transmissão: o atraso de propagação, atenuação, efeito Doppler, ruído ambiente, multi-percurso e bolhas.

Assuntos, tais como processos de modulação e de desmodulação foram descritos, comparando inicialmente as comunicações digitais com as analógicas e referindo ainda as principais técnicas de modulação digital.

Finalmente apresentaram-se alguns dos mais importantes modems acústicos subaquáticos existentes no mercado.

## **3- Arquitetura do Sistema (Modem Acústico)**

No capítulo anterior (capítulo 2) todo o conhecimento necessário foi introduzido para que o tema desta dissertação possa ser realizado com sucesso. Neste capítulo elabora-se um estudo mais detalhado de todos os componentes do sistema de modo a compreender a importância que cada um tem no desenvolvimento do mesmo. Começa-se então por realizar uma descrição da caracterização do sistema passando por determinadas decisões técnicas e de prototipagem de forma a perceber como os valores e parâmetros do sistema são escolhidos. Posteriormente apresenta-se toda a arquitetura de suporte (Hardware) utilizada na construção do sistema proposto. Por fim, explica-se todo o Software utilizado, passando pela fase da implementação da modulação realizada para atingir os objetivos do sistema.

### **3.1- Caracterização do Sistema**

Quando se fala de um modem acústico não se pode apenas pensar na implementação prática do mesmo. Para tal é necessário conhecer o sistema num todo. Sendo assim, serão abordados alguns conceitos necessários para uma melhor percepção do sistema. Então neste caso particular, será descrito o sistema de comunicação acústico (COMA) subaquático.

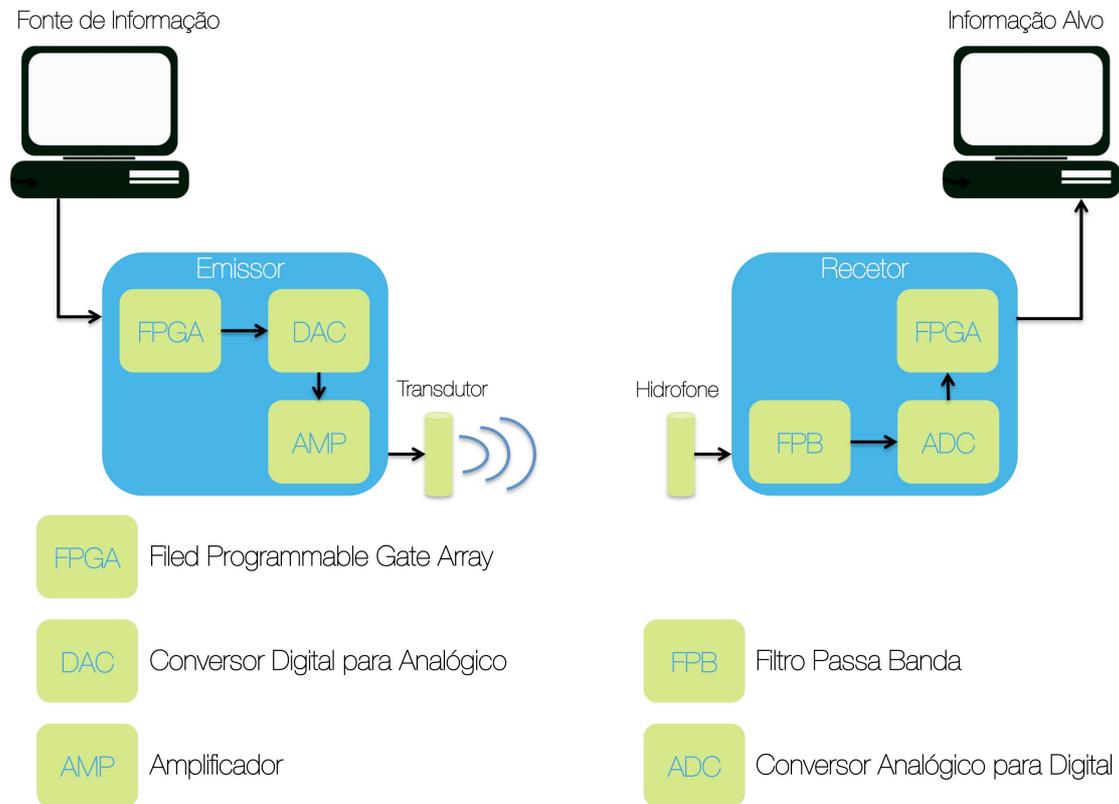
Este sistema é composto por dois componentes principais: um módulo de comunicação e um módulo acústico.

O módulo de comunicação consiste num computador pessoal, que funciona como um emissor de dados (fonte de informação) ou recetor de dados, e em alguns casos podem ser os dois.

O módulo acústico é composto por transdutores específicos e blocos eletrónicos que serão discutidos com mais detalhe na secção “Hardware” deste

capítulo. É necessário um módulo acústico para a transmissão e outro para a recepção dos dados.

Na Figura 3.1 pode-se observar a arquitetura do sistema COMA em questão.



**Figura 3.1 - Arquitetura do sistema COMA subaquático.**

É usado um computador pessoal (PC) para transmitir um sinal elétrico que será posteriormente convertido num sinal acústico por intermédio do módulo acústico. Para o módulo acústico, foi desenvolvido um protótipo que será apresentado com maior detalhe na secção “Hardware” deste capítulo. É utilizada uma *Field-Programmable Gate Array* (FPGA), para a implementação das modulações digitais, um conversor digital para analógico (DAC), que faz a conversão do sinal de digital para analógico e, em seguida, é enviado através do canal aquático. O amplificador de transmissão tem a função de amplificar a potência de saída, para permitir o estabelecimento da comunicação dentro da distância desejada. Devido a vários fatores presentes no meio aquático (mencionados no capítulo 2), é necessário amplificar o sinal na recepção. Então,

é utilizado um filtro passa-banda (BPF) com um ganho associado, que além de filtrar as frequências indesejadas, atua como um amplificador. Em seguida, é realizada a conversão do sinal de analógico para digital através de um ADC para executar o processo de desmodulação usando a FPGA.

Em relação aos transdutores, a escolha é feita de acordo com o trabalho de pesquisa desenvolvido pelo aluno de doutoramento Marcos Martins (M. Martins, 2010), tal como a implementação do mesmo, correspondendo ao transdutor de fluoreto de polivinilideno (PVDF). Estes componentes são fundamentais para o funcionamento do sistema. O emissor (transdutor PVDF) através das suas vibrações transforma o sinal elétrico vindo do amplificador em ondas acústicas. Por outro lado, o recetor (hidrofone) recebe as ondas acústicas criadas pelo transdutor e transforma essas vibrações em sinais elétricos novamente.

A Figura 3.2 mostra dois dos diversos tipos de transdutores existentes.



**Figura 3.2 - Tipos de transdutores existentes a) projetores (emissores) b) hidrofones (recetor) (Gonçalves, 2012).**

Até agora, todos os componentes físicos foram abordados. Neste momento surge a necessidade de apontar outros aspetos importantes para o correto funcionamento do sistema. Estes aspetos são essenciais para compreender a influência que o ambiente aquático tem nas técnicas de modulação digitais. Assim, a pesquisa e o estudo destes aspetos serão abordados em duas secções. Primeiro, serão apresentadas as decisões técnicas relativas ao estudo do ambiente aquático. Serão abordados temas como a frequência e a distância. A segunda secção descreve as decisões económicas tomadas, tendo em conta a construção do protótipo.

### 3.1.1- Decisões Técnicas

As decisões técnicas são um aspeto muito importante no estudo do ambiente aquático. A frequência de operação do sistema e a distância entre o emissor e recetor influenciam a propagação das ondas acústicas na água e é necessário ter em consideração na construção deste tipo de sistemas.

#### 1. Frequência:

Para decidir qual a melhor frequência a usar neste tipo de sistemas, é preciso ter em consideração vários aspetos. Perceber como a escolha da frequência pode afetar a vida marinha, como garantir a maior velocidade de informação possível (taxa de transmissão) e ter em conta as características do hidrofone utilizado.

Os animais que vivem no meio aquático usam sons com diferentes frequências para comunicar entre eles e até mesmo para caçar. Ao ler (M. Dermond, 2007), é possível verificar que os animais aquáticos usam frequências de sons de poucos Hertz (Hz) até cerca de 100 kHz.

Sabe-se que, com o aumento dos valores de frequência torna-se possível alcançar uma maior taxa de bits<sup>5</sup>, conseguindo, deste modo, uma maior taxa de transmissão. Assim, com aumento da frequência, podemos enviar um bit num tempo mais curto.

Com base nos aspetos mencionados anteriormente a frequência escolhida para o sistema é de 1 MHz.

#### 2. Distância:

A decisão da distância, baseou-se em uma de muitas possíveis aplicações que este sistema poderá ser utilizado. Assim, a distância escolhida varia de 1 a 100 m, porque:

- Esta distância satisfaz bastantes requisitos das aplicações abordadas na secção 1.2;
- Este valor situa-se entre os valores aceitáveis para um sistema sem fios subaquático e o valor de frequência escolhida (1 MHz).

---

<sup>5</sup> é a relação entre um certo número de bits e o tempo que estes bits demoram a ser enviados.

No capítulo 2, podemos verificar que, com o aumento da distância obtém-se uma menor largura de banda e um aumento da atenuação sofrida pelo sinal. Assim, é importante alcançar um equilíbrio relativo entre todos os parâmetros analisados.

### **3.1.2- Decisões do Protótipo**

Nesta secção serão referenciados todos os aspetos importantes que influenciam a decisão da escolha dos componentes na construção do protótipo do sistema. Os critérios tidos em conta foram: preço, consumo de energia e cuidados ambientais.

#### **1. Preço:**

É fácil de perceber, que o preço é um dos critérios mais importantes na construção de um protótipo. Devido ao fato deste projeto não ter financiamento externo, ou seja, apenas é financiado por fundos da universidade, faz com que este parâmetro seja ainda mais importante. É necessário projetar e perceber apenas o essencial para a construção deste sistema. Numa fase final, este sistema pode ser comercializado e produzido em larga escala, o que faz com que o preço seja um fator importante a considerar.

#### **2. Consumo de energia:**

Um sistema COMA subaquático tem o consumo de energia inerente ao seu uso, o que torna este parâmetro muito importante na construção do sistema. Devido ao sistema ser implementado em ambientes aquáticos, faz com que o carregamento das baterias seja um processo bastante difícil, por isso, é fundamental que o sistema gaste a energia mínima possível.

Algumas pesquisas nesta área apontam para a possibilidade de que o sistema pode recarregar sua bateria de forma autónoma, aproveitando os movimentos causados pelas correntes. Apesar de ser uma ideia bastante inovadora e eficaz, só pode ser considerada no futuro, pois ainda não está em prática. Contudo, este sistema terá em consideração a poupança máxima de energia possível.

#### **3. Cuidado ambiental:**

Perceber se as características dos componentes utilizados no sistema afetam negativamente o ambiente é um aspeto importante que deve ser tomado em consideração. Assim, depois de analisados estes aspetos, podemos verificar que todos os componentes utilizados neste sistema de comunicação não causam qualquer tipo de poluição e interferência com a vida animal no ambiente onde será implementado.

### **3.2- Hardware**

Após a apresentação das decisões técnicas e de prototipagem, agora é tempo de introduzir os componentes de suporte escolhidos para a construção do sistema. É necessário salientar que o sistema de apoio apresentado e toda a informação presente nesta secção, não foram desenvolvidas no âmbito desta dissertação. No entanto, é indispensável para implementar e compreender o sistema. Assim todo o conteúdo presente nesta secção foi realizado no âmbito da dissertação de mestrado (Fernandes, 2012).

Na Figura 3.3 é possível observar o diagrama de blocos de hardware (componentes de suporte) de todo o sistema de comunicação (modem acústico), onde é possível identificar três blocos principais.

O primeiro bloco representa o módulo de transmissão, o segundo representa o canal de comunicação e, por fim, o terceiro representa o módulo recetor. Cada bloco é constituído por vários componentes, que serão explicados com mais detalhe abaixo.

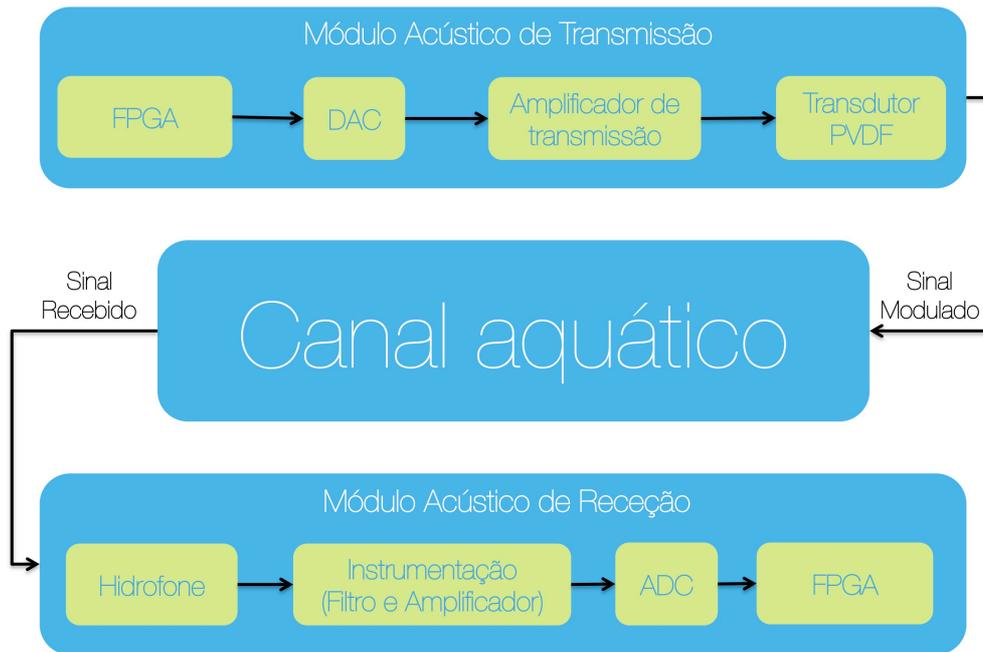


Figura 3.3 - Diagrama de blocos de suporte do sistema.

### 3.2.1- FPGA

A FPGA consiste em arranjos de vários blocos programáveis (blocos lógicos) que são interligados entre si por blocos de entrada/saída por meio de canais de conexão vertical e horizontal, a fim de implementar as funções necessárias (observar Figura 3.4).

A FPGA é composta por três tipos de recursos principais: blocos lógicos, blocos de entrada/saída para a conexão com o "exterior", e fios de interconexão e *switches*. Os blocos lógicos estão dispostos numa matriz de duas dimensões e, por outro lado, os fios de interligação são organizados em canais de encaminhamento horizontal e vertical entre linhas e colunas de blocos lógicos (Gutiérrez, 2009). Estes blocos lógicos podem ser configurados para realizar funções complexas e, na maioria das vezes, incluem elementos de memória que podem ser simples *flip-flops*<sup>6</sup> ou blocos de memória mais complexos. Tipicamente, cada bloco lógico tem um pequeno número de entradas e uma saída.

<sup>6</sup> *Flip-flop* é um circuito pulsado capaz de servir como uma memória de um bit.

Para implementar um circuito numa FPGA, os blocos lógicos mencionados são programados para executar funções específicas e os canais de encaminhamento são programados para fazer as interconexões necessárias entre os blocos lógicos (Gutiérrez, 2009).

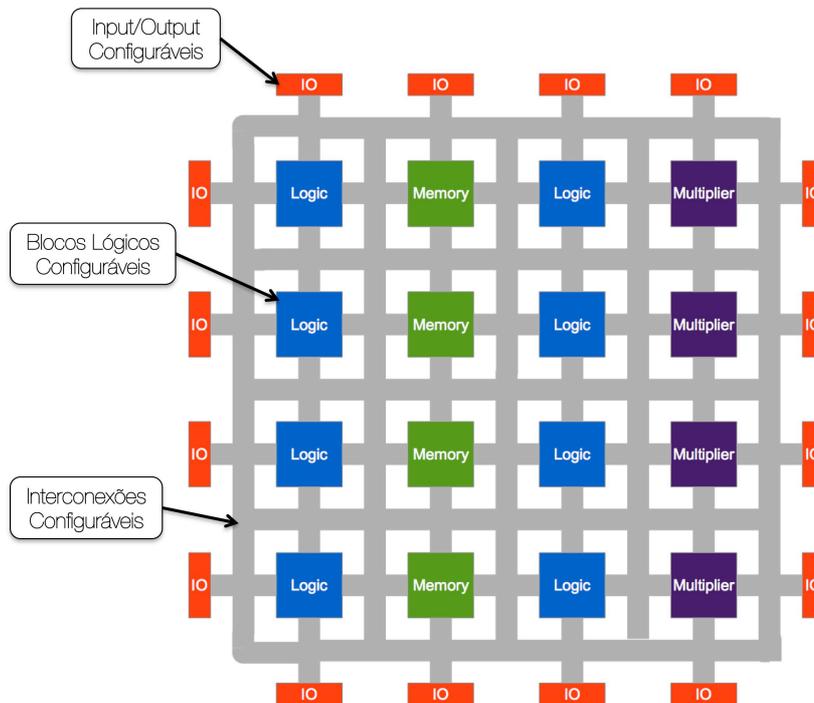


Figura 3.4 - Estrutura básica da FPGA.

A FPGA utilizada neste sistema pertence à família da Spartan-3A/3AN (ver Figura 3.5), e as suas principais características podem ser consultadas em (Xilinx, 2013).



Figura 3.5 - FPGA usada no sistema (Fernandes, 2012).

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 desmodulador. É também responsável pelo controlo dos circuitos eletrónicos do DAC e do ADC.

### 3.2.2- Conversor Digital - Analógico (DAC)

Um DAC é um dispositivo eletrónico que faz a conversão de um código digital para um sinal analógico. Assim, o DAC converte um número de precisão finita numa quantidade física. Tipicamente um DAC utiliza um filtro reconstruído para converter esses números numa sequência concreta de impulsos, e usa o teorema de amostragem de *Nyquist Shannon*<sup>7</sup> para reconstruir o sinal original a partir dos dados amostrados. Como esperado, os erros de quantificação podem ser introduzidos por meio de amostragem digital, que pode ser observado como ruído de baixo nível adicionado ao sinal reconstruído.

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 DAC utilizado no sistema é o DAC904 (Figura 3.6) (Instruments., 2002).

---

<sup>7</sup> De acordo com o teorema de Nyquist, a frequência de amostragem de um sinal analógico, que posteriormente pode ser reconstituído com a perda de informação mínima, deve ser duas vezes maior ou igual que o espectro da frequência do sinal.

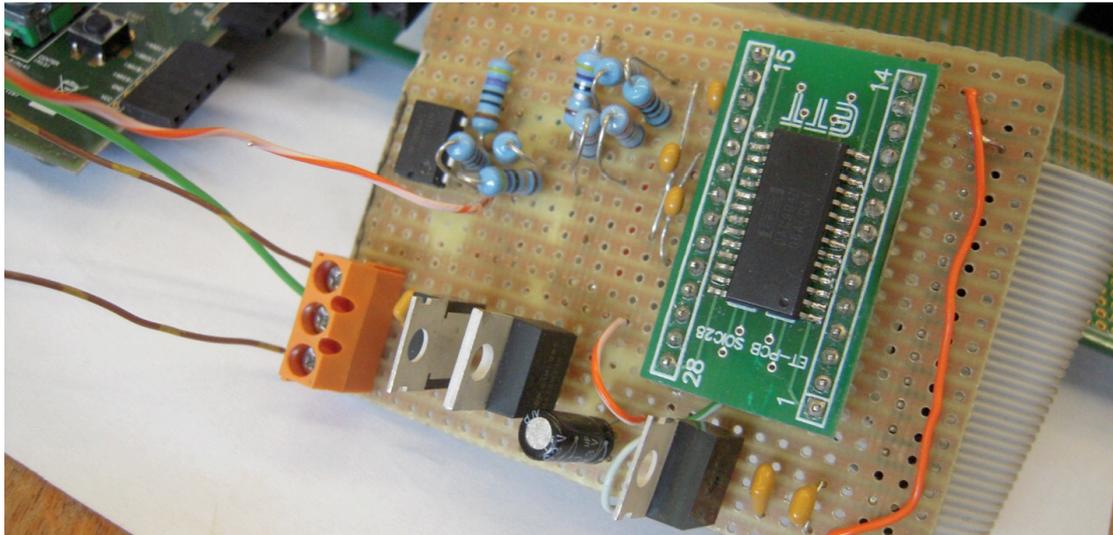


Figura 3.6 - DAC utilizado no sistema (Fernandes, 2012).

### 3.2.3- Amplificador Emissor

Um amplificador é um dispositivo eletrônico que aumenta a potência do sinal. Então, um amplificador emissor recebe um sinal que vai ser amplificado. A relação entre a entrada e a saída de um amplificador pode ser interpretada de duas maneiras. Se esta relação é expressa como uma função de frequência é chamada de função de transferência. Por outro lado, se é expressa em termos de magnitude então é conhecida como ganho do amplificador.

Sabe-se que um amplificador ideal aumenta a potência de um sinal, sem alterar a sua forma. Contudo, no mundo real, pode-se dizer que não existem amplificadores ideais e, como tal, os amplificadores práticos apresentam sempre uma distorção finita e ruído que são invariavelmente adicionados ao sinal.

Hoje existem vários tipos de amplificadores que podem ser diferenciados de acordo com vários parâmetros, tais como: o método de operação, eficiência, linearidade e potência de saída.

O amplificador usado no trabalho proposto é apresentado na Figura 3.7.

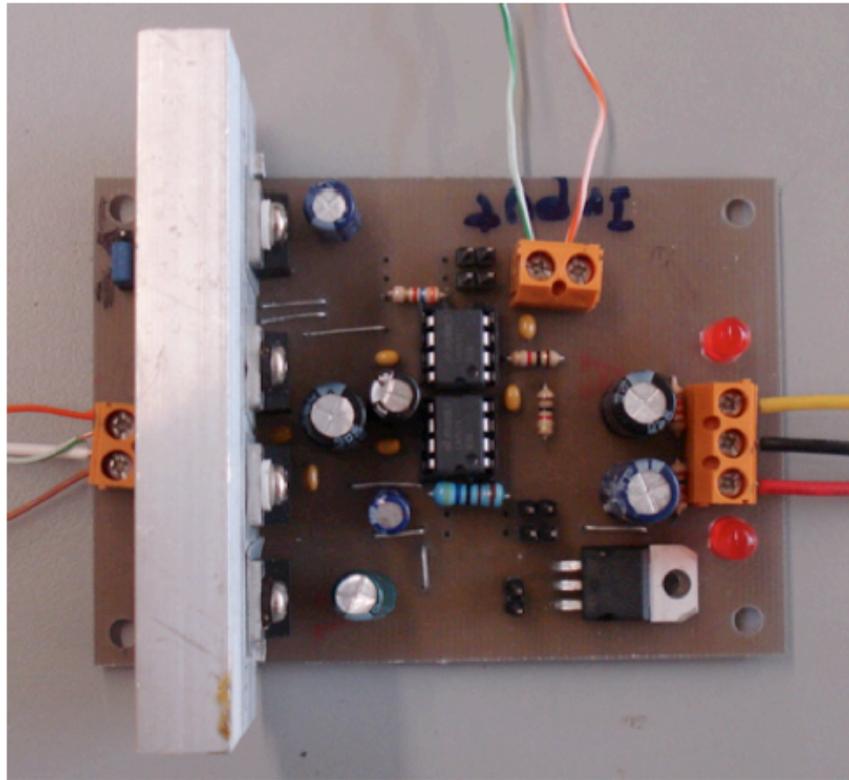


Figura 3.7 - Amplificador emissor usado no sistema (Gonçalves, 2012)

O amplificador presente na Figura 3.7 é chamado amplificador de potência. Ele recebe na entrada um sinal com uma baixa intensidade de corrente elétrica (na ordem dos miliamperes (mA)) e produz, na sua saída, um sinal com uma intensidade de corrente elétrica maior (na ordem dos Amperes (A)). Este processo é fundamental para que os sinais sonoros enviados alcancem maiores distâncias

Este amplificador tem as seguintes características:

- 1000 W de potência;
- Comportamento semi-linear;
- Grande banda de frequências (100 kHz – 2 MHz);
- Ganho 12 dB.

### 3.2.4- Transdutor (Projeto)

Um transdutor consiste num dispositivo que converte uma forma de energia para outra. Assim, o sinal a partir do bloco de amplificação provoca

uma vibração mecânica no transdutor, que leva há criação de ondas sonoras, que serão propagadas através do meio (canal aquático).

No sistema proposto, com base em (M. Martins, 2010), o tipo de transdutor utilizado é o fluoreto de polivinilideno (PDVF), que é uma película de polímero semi-cristalino. O transdutor de ultrassons de PVDF utilizado é ilustrado na Figura 3.8 e tem as seguintes características:

**Transdutor ultrassons PVDF:**

- Pistão (tipo transdutor);
- 1 cm (centímetro) de raio;
- 2 cm (centímetros) de espessura;
- Ângulo de abertura de feixe de som variável de acordo com a frequência.



**Figura 3.8 - Transdutor (Projeter) de ultrassons PVDF usado no sistema (Gonçalves, 2012)**

### 3.2.5- Hidrofone

Este transdutor (hidrofone) tem a função inversa do transdutor emissor, que consiste em receber as ondas sonoras que foram criadas pelo módulo de emissão, e transformar a vibração criada num sinal elétrico novamente. O transdutor utilizado no sistema é o C304XR, que apresenta uma banda de frequência de 0.005 a 2000 kHz, e pode ser observado na Figura 3.9. O seu *datasheet* pode ser consultado em (Technology C. R., 2011).

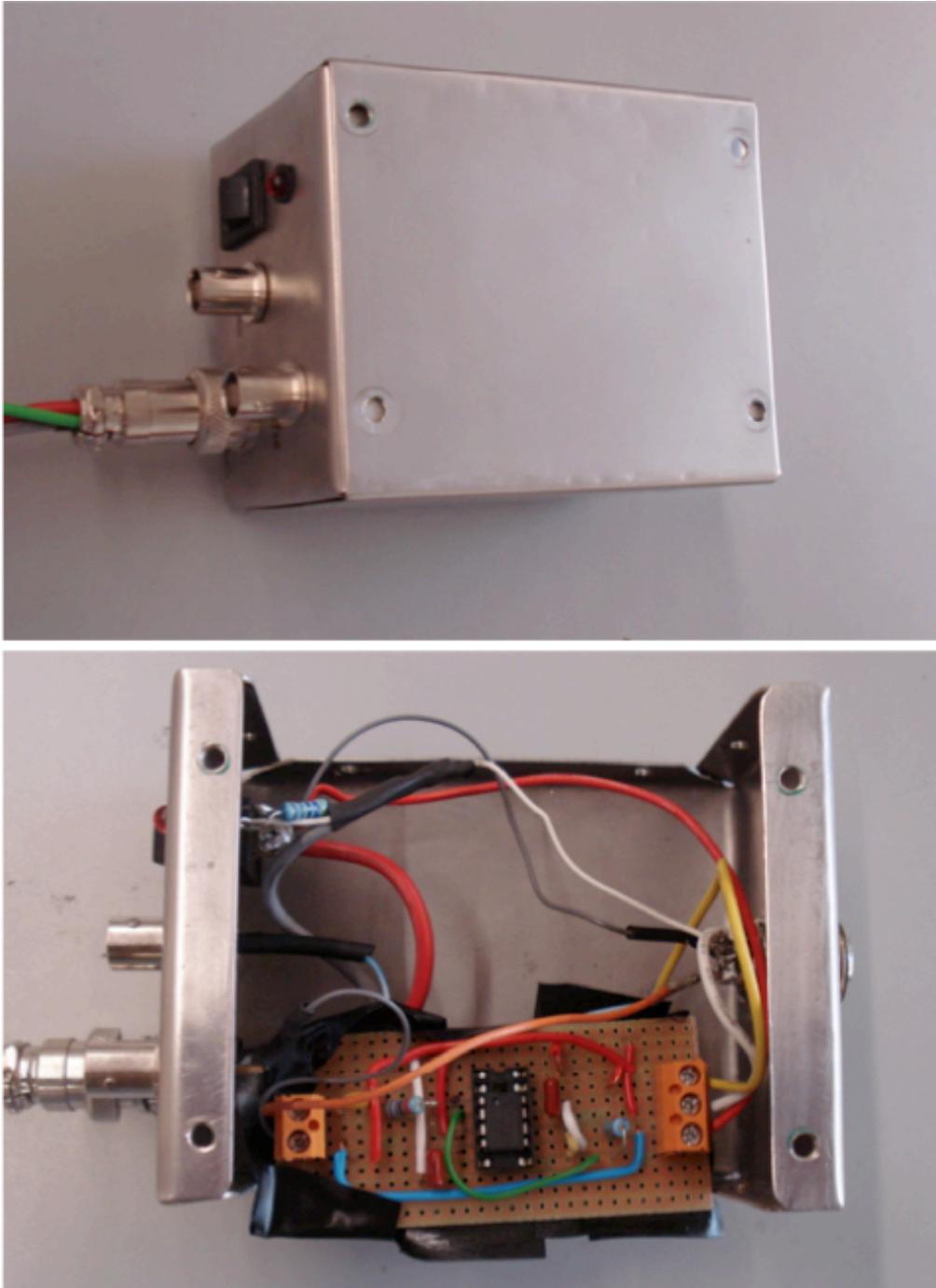


Figura 3.9 - Hidrofone usado no sistema (Gonçalves, 2012)

### 3.2.6- Filtro e Amplificador Recetor

O filtro é um circuito eletrónico que executa o processamento de sinal, onde remove as frequências indesejadas deste sinal. Assim, neste sistema, o filtro recebe o sinal vindo do hidrofone e "corta" todas as frequências indesejadas do sinal. Neste caso específico, utiliza-se um filtro ativo analógico passa banda de segunda ordem, com banda de frequência de 1 kHz a 2 MHz.

Este filtro tem um ganho associado de 12 dB, que atua como um amplificador de recepção<sup>8</sup>. Este filtro pode ser observado na Figura 3.10.



**Figura 3.10 - Filtro passa-banda com ganho associado usado no sistema (Gonçalves, 2012)**

---

<sup>8</sup> Como os testes práticos foram realizados a uma distância reduzida (em aquário) o ganho do filtro não precisa de ser muito elevado. No entanto, para se proceder a testes com longas distâncias será necessário implementar um controlo de ganho automático ganho (AGC).

### 3.2.7- Conversor Analógico - Digital (ADC)

O ADC é um dispositivo eletrônico que converte um sinal contínuo (analógico) para uma representação de tempo discreto em formato digital. Estes dispositivos podem ser descritos como um bloco de construção chave em recetores de comunicação digital, que empregam técnicas de processamento de sinais digitais (Gonçalves, 2012).

Cada ADC pode ser caracterizado por parâmetros essenciais, como velocidade, potência e definição. A resolução associada a um ADC pode ser traduzida no número de valores discretos utilizados para realizar a conversão. Neste sistema em particular, usa-se um ADC (capaz de converter 65 Mega amostras por segundo) de 14 bits para converter a informação analógica (sinal recebido) num sinal digital a ser processado (desmodulado) pela FPGA. O ADC utilizado no sistema é o AD9244 (Devices, 2005) e pode ser observado na Figura 3.11.

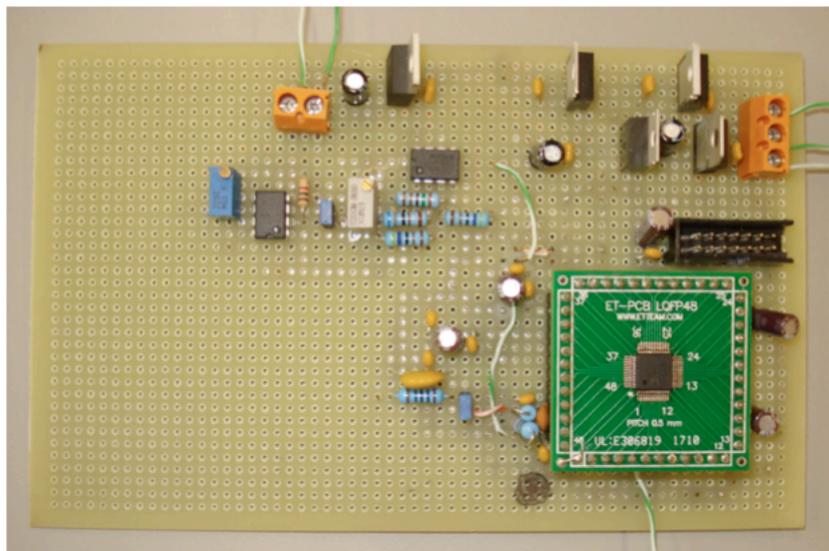


Figura 3.11 - ADC usado no sistema (Gonçalves, 2012)

## 3.3- Software

Após a apresentação dos conceitos contidos nos capítulos anteriores, surge agora a necessidade de apresentar o trabalho desenvolvido com o recurso ao software *MatLab*<sup>9</sup>/*Simulink* com blocos específicos do Xilinx<sup>10</sup>.

Nesta secção são apresentados todos os blocos necessários para simular um sistema de comunicação subaquático. Portanto, cada bloco de modulação simulado é apresentado separadamente para um melhor entendimento do correto funcionamento de cada um.

A especificação de um esquema de modulação de um sistema de comunicação subaquática é uma tarefa difícil e requer um conhecimento detalhado de todos os elementos que influenciam as condições subaquáticas. Este processo pode evitar gastos desnecessários em equipamentos e evitar a necessidade de ir para um lugar onde o sistema em questão possa ser testado. Depois de se observar os resultados dos testes obtidos por meio de simulação do esquema de modulação, o modelo deve ser testado num ambiente subaquático, a fim de avaliar o seu desempenho.

Como mencionado anteriormente no capítulo 2, a propagação de ondas acústicas em ambientes subaquáticos pode ser afetada por vários fatores. De modo que os resultados observados em testes experimentais serão obviamente diferentes daqueles observados no modelo de simulação.

Esta secção começa com uma breve descrição da ferramenta *MatLab/Simulink* e do *System Generator*. De seguida descreve-se detalhadamente a implementação da simulação do sistema.

### 3.3.1- Matlab/Simulink

*MatLab* (MathWorks, 2013) é um ambiente de programação para o desenvolvimento de algoritmos, análise de dados, visualização e computação

---

<sup>9</sup> MatLab (MATrix LABoratory) é um ambiente de programação que usa uma linguagem de alto nível para o desenvolvimento de algoritmos, análise de dados, visualização e computação numérica.

<sup>10</sup> Xilinx é uma ferramenta de software produzida pela empresa Xilinx para a síntese e análise de projetos HDL, o que permite ao utilizador sintetizar os seus projetos, realizar análise de tempo, examinar diagramas RTL e configurar o dispositivo de destino com o programador.

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 *MatLab* contém algumas características-chaves a reter (MathWorks, 2013), (Mendes, 2011):

- Linguagem de computação de alto nível;
- Visualização de dados via 2 dimensões (2D) e funções gráficas de 3 dimensões (3D);
- Projetar Interfaces Gráficas;
- Ferramentas interativas para exploração interativa, *design* e resolução de problemas;
- Computação numérica e análise de dados;
- *Add-on toolboxes*, que permite o uso do *MatLab* numa ampla gama de aplicações;
- Grande compatibilidade com outros tipos de aplicações e linguagens.

O ambiente *MatLab/Simulink* em conjunto com blocos específicos do *Xilinx* foram utilizados como ferramenta fundamental para implementar os blocos de hardware neste sistema. *Simulink* é um software que está fortemente interligado com *MatLab* 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*.

### 3.3.2- System Generator

*System Generator* é uma ferramenta de processamento digital de sinal a partir do *Xilinx* (S.O. Popescu, 2011). Baseia-se no ambiente *MatLab/Simulink* usado para o desenho na FPGA. Esses desenhos são realizados no ambiente

*Simulink* utilizando blocos específicos do *Xilinx*. Todas as etapas de implementação, incluindo a síntese e o encaminhamento são automaticamente executados para gerar um ficheiro executável a ser interpretado pela FPGA (S.O. Popescu, 2011).

Também permite a inclusão de ferramentas DSP para implementar nas FPGAs que gera automaticamente um código HDL a partir de um modelo *Simulink*, e permite ao utilizador criar as suas próprias bibliotecas. Assim, pode-se dizer que o *System Generator* é uma ferramenta de *design* de alto nível para FPGAs *Xilinx* que ampliam as capacidades do *MatLab/Simulink*. Este sistema oferece robustas bibliotecas em *Simulink* para funções lógicas e aritméticas, memórias e funções DSP.

Devido à sua capacidade de suporte de alto nível de modelação e geração de código automático, o *System Generator* permite explorar a interação entre a abstração matemática e considerações de hardware centradas (Ballagh, 2002)

Os blocos *Xilinx* DSP fornecem mais de 90 blocos DSP incluindo blocos somadores, multiplicadores e de registo. Além destes fornece também blocos mais complexos, tais como, correção de erros, FFTs, filtros e memórias. Com estes blocos é possível otimizar os resultados para o dispositivo selecionado (DSP, 2008).

Uma vantagem do *MatLab/Simulink* é a incorporação de algoritmos *Matlab* através *AccelDSP*. O *System Generator* também pode incluir blocos *MCode* para modelar e implementar operações de controlo. Este é um bloco específico para executar funções criadas no *MatLab*.

A plataforma de integração do sistema para projetar DSP, FPGAs são fornecidos pelo *System Generator*, que permite o RTL, *Simulink*, *Matlab* e C/C++, a unirem-se num único ambiente de simulação e implementação (DSP, 2008).

Outra importante vantagem é que o arquivo de especificação executável pode ser criado usando blocos padrão do *Simulink*. Assim, o *System Generator* usa o bloco *Xilinx* DSP do *Simulink* que invoca automaticamente o *Xilinx Core*

*Generator* para gerar *netlists* altamente otimizadas para os blocos de construção.

Sendo assim, é possível executar todas as ferramentas de implementação para obter um arquivo de fluxo de bits (ficheiro.bit) para a programação do dispositivo FPGA. Observando a Figura 3.12 é possível verificar a interação do *Matlab/Simulink* com o *System Generator* e a FPGA.

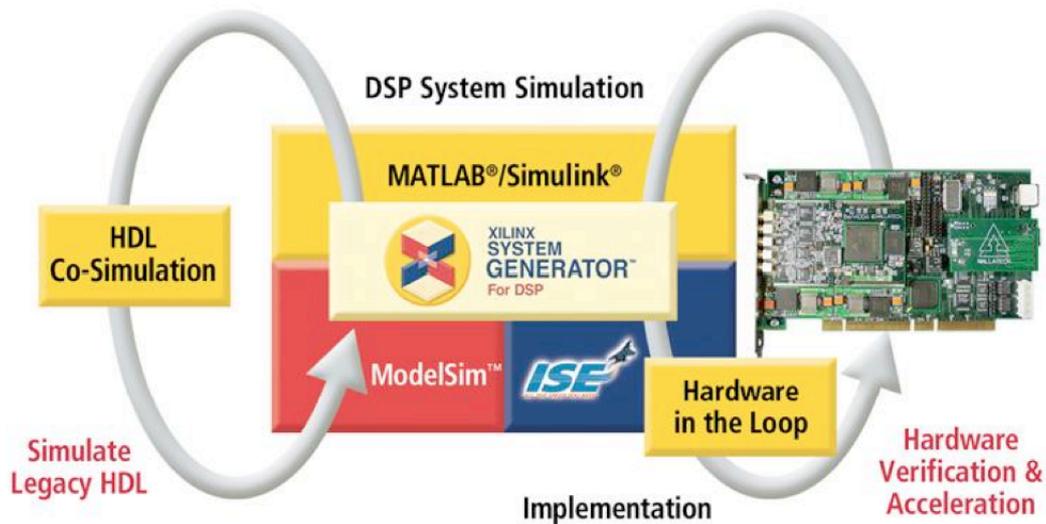


Figura 3.12 - Interação do Matlab/Simulink com o System Generator e a FPGA. (Fernandes, 2012)

### 3.3.3- Implementação

Como mencionado no capítulo 2, um sistema de comunicação subaquático é constituído por três elementos básicos. Estes elementos são o emissor, em que o sinal original é convertido por meio de uma modulação e é transmitido através do meio. O canal aquático, meio por onde o sinal é transmitido e, finalmente, o recetor, que executa a desmodulação do sinal recebido (ver Figura 3.13).

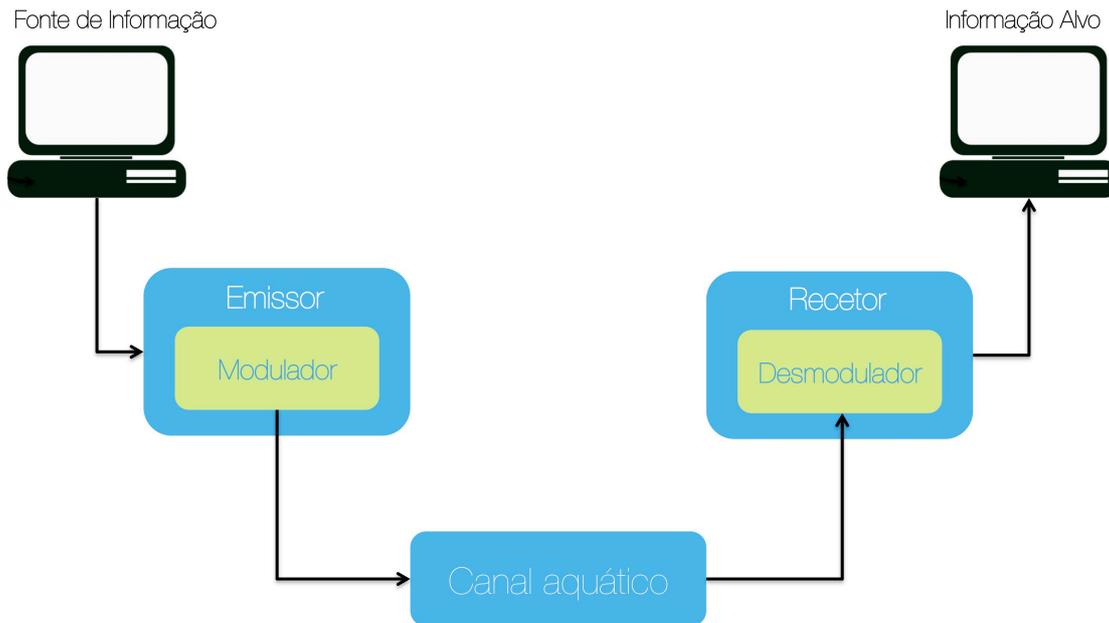


Figura 3.13 - Diagrama de blocos do sistema de comunicação subaquático

Como mencionado anteriormente na secção 1.1 um dos objetivos principais desta dissertação consiste em implementar modulação digital binária de modo a obter uma maior taxa de transmissão dados (1 Mbps) para um modem acústico subaquático. É ainda de salientar que os circuitos lógicos do modulador e desmodulador foram otimizados para reduzir o consumo dos recursos, a fim de ser capaz de incluir mais funções no futuro.

Assim, ao longo deste secção, será explicado detalhadamente toda a implementação da modulação digital binária que proporciona ao modem acústico obter uma taxa de transmissão de dados de 1 Mbps. É necessário salientar que toda a informação presente nesta secção relativa à implementação, é uma simulação (aproximação à realidade) realizada no ambiente *Matlab/Simulink* com recurso aos blocos específicos do *Xilinx*. No capítulo seguinte apresentam-se os testes realizados na água, com esta mesma implementação, onde será possível comparar e observar todas as diferenças da simulação para a realidade.

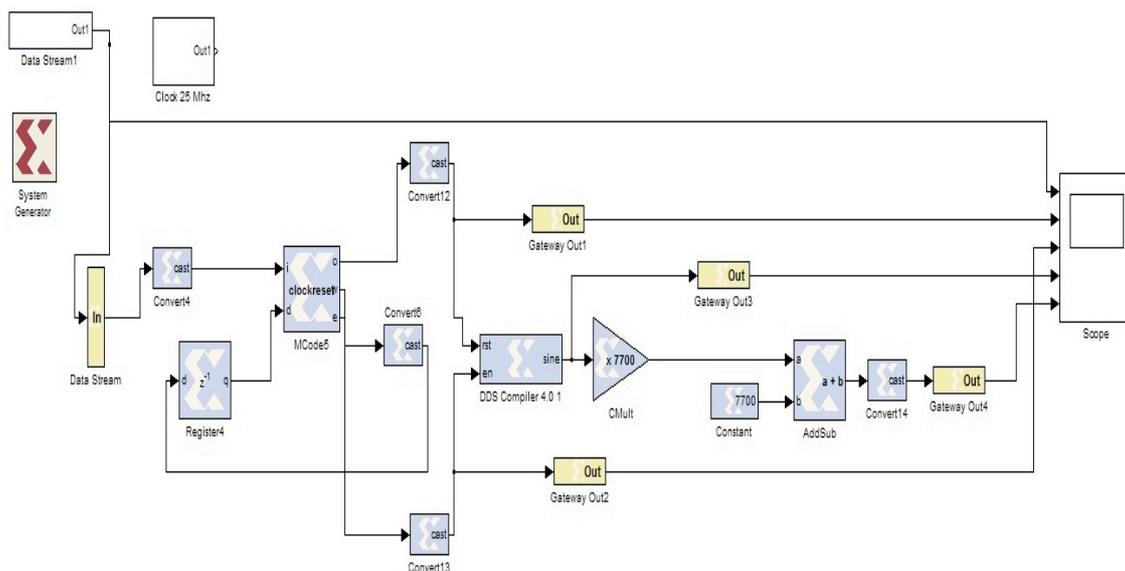
### 1. Modulação

A modulação *On-Off keying* (OOK) é um tipo particular da modulação *Amplitude Shift keying* (ASK), onde o nível de amplitude da onda portadora é

alterado de acordo com o sinal digital transmitido. Então, neste tipo de modulação, a portadora assume um certo nível de tensão para o símbolo binário 1 e um nível tensão zero para o símbolo binário 0. Para simular esta modulação é necessário implementar o modulador do sinal digital e de seguida proceder à desmodulação do mesmo para a reconstrução do sinal original.

Assim, o Modulador OOK realizado no âmbito desta dissertação é constituído por vários componentes. Basicamente é utilizado um fluxo de dados (*Data Stream*), uma onda portadora e um bloco *Mcode* que altera o nível de amplitude da portadora de acordo com o fluxo de dados. Após este processo, o sinal modulado usa a interface do conversor digital para analógico (DAC) para ser transmitido através do canal aquático.

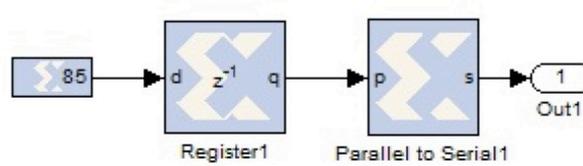
O processo de modulação é ilustrado na Figura 3.14.



**Figura 3.14 - Modulador OOK.**

O Bloco *Data Stream* tem como função simular os dados de entrada a serem transmitidos através do meio, que são gerados no interior da FPGA. Basicamente este bloco torna possível testar o modulador sem a necessidade de uma fonte externa. Então, para gerar esses dados é utilizado um bloco constante com um valor decimal específico e um período de amostragem de  $256 \times 10^{-6}$  s que especifica os dados a transmitir. Em seguida, os dados vão para um registo, e posteriormente são convertidos, de paralelo para série, através do

bloco específico do Xilinx *Parallel to Serial1* (observar Figura 3.15). Através destes blocos o valor decimal contido no bloco constante é enviado em formato binário e seguidamente analisado pelo bloco *Mcode5*.



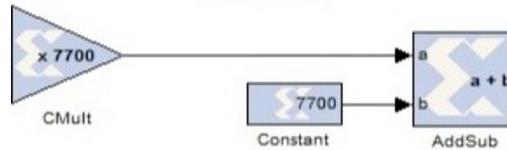
**Figura 3.15 - Data Stream gerado no interior da FPGA.**

É utilizado o bloco *DDS Compiler 4.0* para gerar a onda portadora. Esta onda é um sinal sinusoidal com a função matemática  $A\sin(2\pi ft + \theta)$  onde  $A$  corresponde à amplitude do sinal (1V),  $f$  corresponde à frequência (1 MHz) e  $\theta$  é a fase (0 graus). O sinal vindo do bloco *Mcode5* controla o gerador de onda sinusoidal *DDS Compiler 4.0*, de modo a que este envie uma onda sinusoidal (com uma frequência da portadora de 1 MHz) no caso do nível lógico '1', ou um valor nulo no caso do nível lógico '0'. No início de cada transmissão, é ativado o *reset* do bloco *DDS Compiler 4.0*, restaurando a fase da onda sinusoidal para  $0^\circ$ , a fim de sincronizar o fluxo de dados (*Data Stream*), com a frequência da onda portadora. É importante salientar que a frequência de amostragem utilizada é de 25 MHz e o período correspondente de  $4 \times 10^{-8}$  s que são introduzidos no bloco *System Generator*.

Para ser possível enviar os dados processados para o DAC, os dados digitais devem ser adaptados ao DAC em questão. Neste caso, o DAC utilizado tem 14 bits de resolução, aceitando um intervalo de valores entre 0 e 16.384, em que 0 corresponde ao menor valor negativo, 8192 corresponde a zero e 16.384 corresponde ao maior valor positivo.

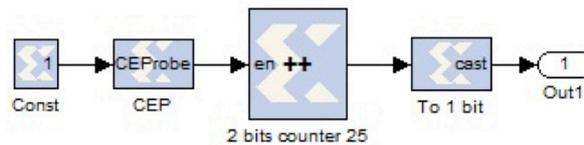
O sinal modulado vindo do *DDS Compiler 4.0* situa-se no intervalo de valores em amplitude entre -1 e 1. No entanto, o DAC não aceita valores negativos. Assim, tem que se definir a sua escala de valores aproximadamente entre 0 e 16000. Este processo começa por multiplicar o sinal modulado por 8192, ficando o sinal entre os valores -8192 e 8192. Depois soma-se 8192

resultando numa escala de 0 a 16384. Devido a problemas de montagem, o ADC mais os amplificadores assumem um pequeno *offset*. De forma a corrigi-lo por software, substitui-se o 8192 por 7700 (observar Figura 3.16).



**Figura 3.16 - Processo de definição da escala de valores para o DAC.**

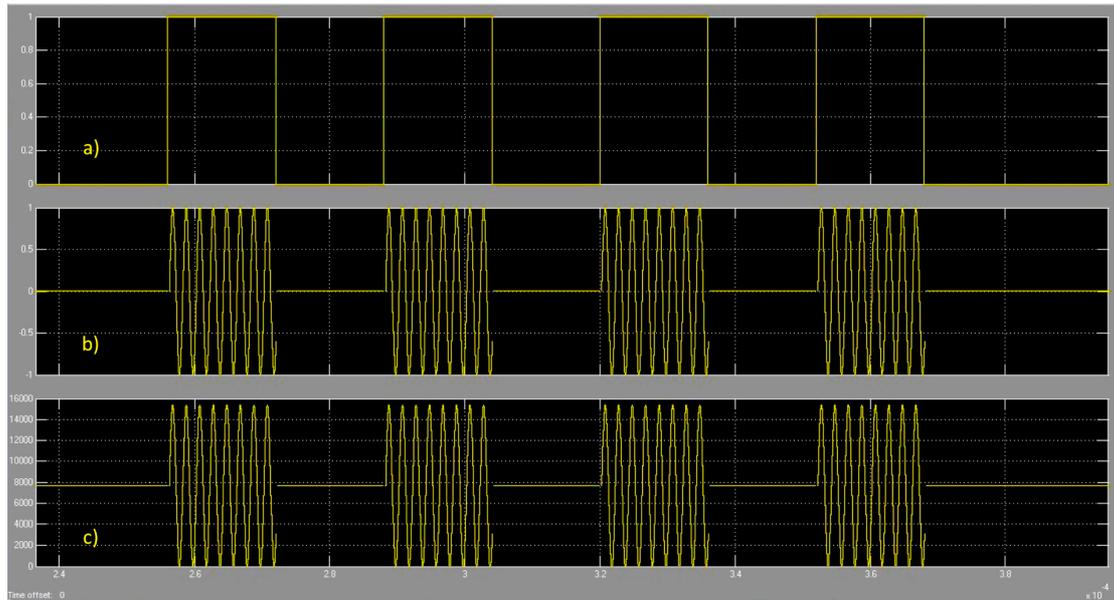
Finalmente é necessário implementar um *clock* para o DAC. Este processo é feito tanto no modulador como no desmodulador a uma frequência de 25 MHz com 25 amostras por período (observar figura 3.17).



**Figura 3.17 - Clock do DAC a 25 MHz**

Esta construção começa a partir de uma constante com uma determinada taxa de amostragem. Depois, usando o bloco *clock enable probe*, o *clock* é extraído a partir da constante e estimula o contador que produz uma contagem de dois bits. Seguidamente, basta apenas fazer o *cast* para um bit.

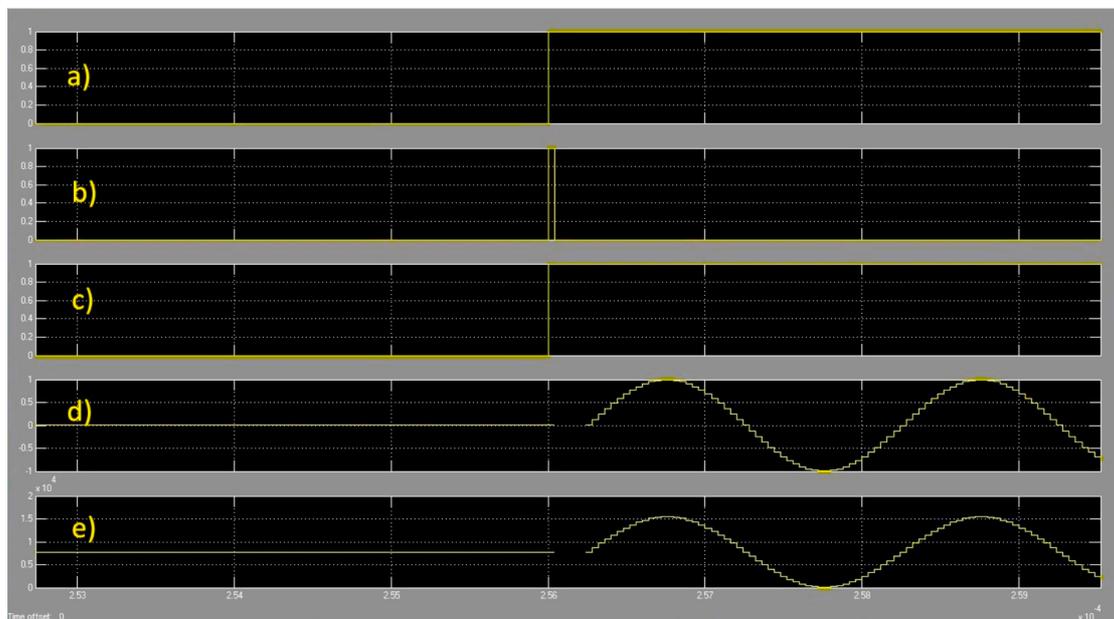
Após a conclusão de todos os processos presentes acima, o resultado da modulação OOK pode ser observado na figura 3.18.



**Figura 3.18 - Resultado da modulação OOK.**

Na Figura 3.18 é possível observar o resultado da modulação OOK, onde a saída do bloco *Data Stream* é representado na figura 3.18 a). Na figura 3.18 b) é possível observar o sinal modulado e por fim a figura 3.18 c) mostra o sinal modulado numa escala de valores suportados pelo DAC (entre 0 e 15400).

A Figura 3.19 apresenta o resultado da modulação OOK ampliada para uma melhor percepção dos sinais, principalmente do pulso de *reset*.



**Figura 3.19 - Ampliação do resultado da modulação OOK**

Reparando na figura 3.19 b) observar-se o pulso de *reset*, e na figura 3.19 c) é possível observar o sinal de *enable*. É de salientar que são estes sinais que fazem o controlo à entrada do bloco *DDS Compiler 4.0*, de modo a este apresentar na saída o sinal modulado.

## 2. Desmodulação

Após o sinal estar modulado é necessário proceder a desmodulação do mesmo. Para tal, é indispensável a realização de um desmodulador OOK. No âmbito desta dissertação elaborou-se um desmodulador OOK, constituído por vários componentes que podem ser observados na Figura 3.20.

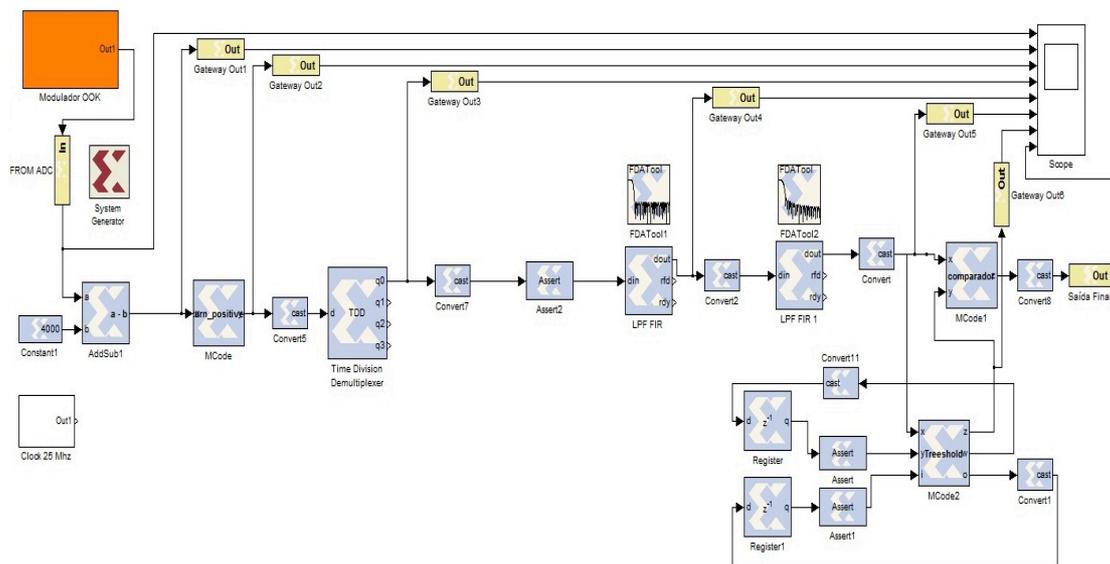


Figura 3.20 - Desmodulador OOK.

Inicialmente o sinal recebido (modulado) pelo hidrofone é convertido para o formato digital pelo conversor analógico para digital (ADC). De seguida faz-se uma subtração para simular de uma certa forma o meio, pois o sinal ao propagar-se pela água perde potência. Desta forma, o sinal está pronto a ser desmodulado.

Começa-se então por utilizar o bloco *Mcode* que contém uma função *Matlab* incorporada. Através desta função é possível retificar o sinal, convertendo a parte negativa em positiva.

Posteriormente é necessário filtrar o sinal. No entanto, devido aos filtros digitais requererem muitos recursos é proveitoso reduzir a frequência de amostragem. Para tal, utiliza-se o bloco *Time Division Demultiplexer* que tem

como função reduzir a frequência de amostragem do sistema em 4 vezes, isto é, o sistema passa a ter uma frequência de amostragem de 6,25 MHz.

De seguida, ocorre o processo de filtragem do sinal que faz com que as frequências indesejadas sejam eliminadas. Para isso, usam-se os blocos *LPF FIR* e *LPF FIR1*, com a ajuda das ferramentas *FDATool1* e *FDATool2*. Esta ferramenta fornece uma interface ao utilizador, que especifica os parâmetros desejados para a construção do filtro em causa. Então, o bloco *LPF FIR* consiste num filtro passa baixo do tipo *FIR Equiripple*, com uma ordem de 49 e um fator de densidade de 16. O filtro foi configurado para uma frequência de amostragem de 6,25 MHz, uma frequência de passagem de 250 kHz e uma frequência de paragem de 500 kHz. Na Figura 3.21 é possível observar todas estas configurações através da ferramenta *FDATool1*.

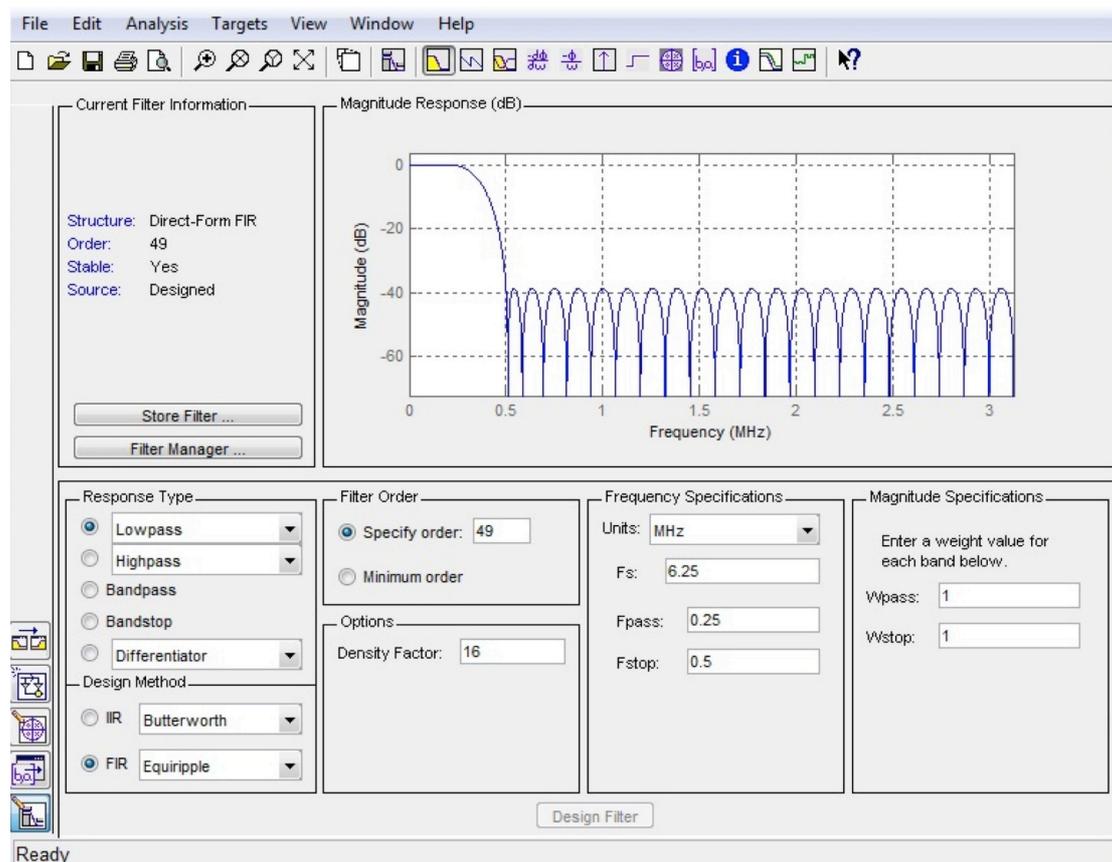


Figura 3.21 - Implementação do filtro LPF FIR através da ferramenta FDATool1.

A implementação do filtro *LPF FIR1* surge devido aos filtros digitais ocuparem muito espaço na placa FPGA, quanto maior a ordem do filtro, maior é o processamento e pior é o funcionamento do sistema. Sendo assim, foi

inevitável realizar os filtros separadamente de modo a obter um melhor funcionamento do sistema. Então, o bloco *LPF FIR1* consiste num filtro passa baixo do tipo FIR *Least-squares*, com uma ordem de 40. O filtro foi configurado para uma frequência de amostragem de 6,25 MHz, uma frequência de passagem de 200 kHz e uma frequência de paragem de 500 kHz. Na Figura 3.22 é possível observar todas estas configurações através da ferramenta *FDATool2*

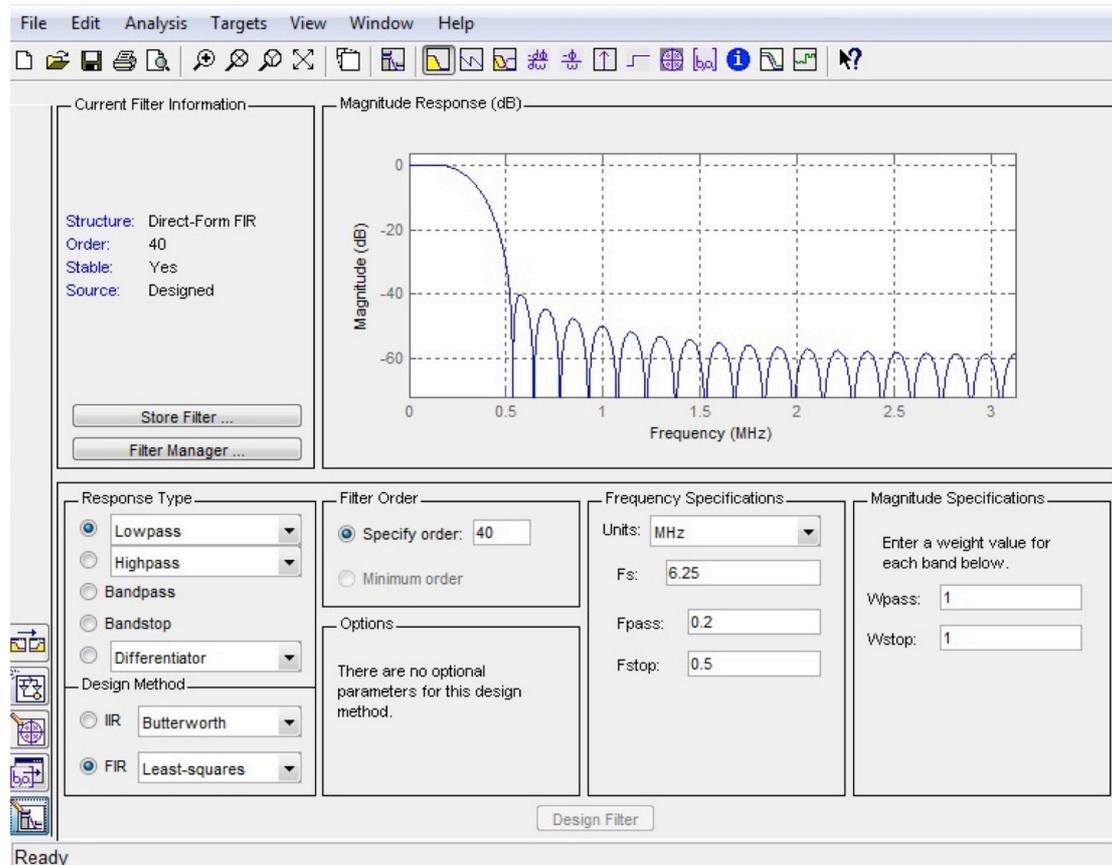
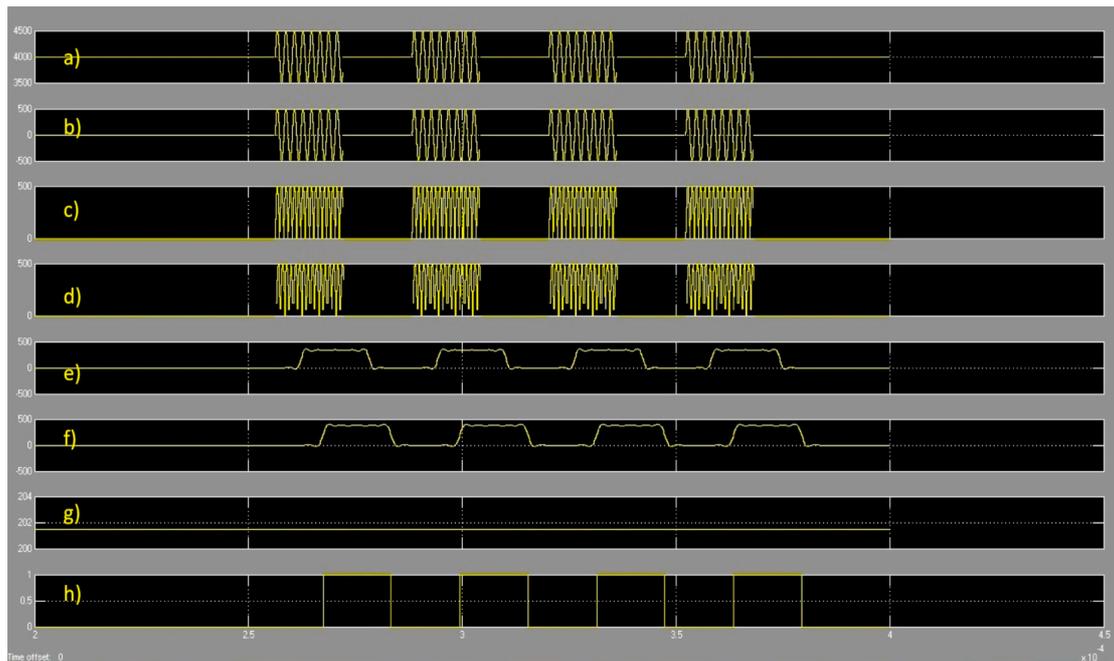


Figura 3.22 - Implementação do filtro LPF FIR1 através da ferramenta *FDATool2*.

Após o processo de filtragem, é necessário analisar o sinal e convertê-lo novamente para um sinal binário para ser interpretado pelo recetor, ou seja, seleccionar o que é um '1' e o que é um '0'. Criou-se o bloco *Mcode2* que contém uma função limiar adaptativa onde a amplitude do sinal é medida a cada 20 milissegundos (ms), ou seja, calcula o valor do limiar de decisão (*threshold*) de forma automática.

Para finalizar é utilizado o bloco *Mcode1* que contém uma função de comparação. Esta é a função que decide se o bit é '1' ou '0' através de uma comparação com o valor do limiar de decisão. Se o sinal proveniente do filtro for maior que o valor do limiar de decisão, o sinal de saída será o símbolo binário '1'; caso contrário será o símbolo binário '0'. Desta forma obtemos o sinal original reconstruído.

Na Figura 3.23 é possível observar o resultado da desmodulação OOK.



**Figura 3.23 - Resultado da desmodulação OOK**

A figura 3.23 a) representa o sinal vindo do modulador à saída do ADC. Na figura 3.23 b) apresenta-se o sinal atenuado, simulando a passagem pelo canal aquático. Na figura 3.23 c) é possível verificar a retificação do sinal, passando todos os valores negativos para positivos. A figura 3.23 d) apresenta o sinal com uma frequência de amostragem reduzida para 6,25 MHz. Na figura 3.23 e) observa-se o sinal à saída do primeiro filtro (*LPF FIR*) e na figura 3.23 f) encontra-se o sinal após a passagem no segundo filtro (*LPF FIR*). Na figura 3.23 g) é possível observar o valor do limiar de decisão e por fim, a figura 3.23 h) representa o sinal original totalmente reconstruído.



## 4- Testes e Resultados

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos do sistema descrito no capítulo 3. Inicialmente, apresenta-se o local e as condições em que o sistema foi testado e, posteriormente, os testes práticos são descritos em detalhe.

Antes de se iniciar qualquer tipo de teste experimental, deve-se definir a arquitetura do sistema e tentar perceber que resultados são possíveis obter através do mesmo. No âmbito desta dissertação para testar experimentalmente o modem acústico usou-se um cabo RS-232 com adaptador USB ligado a um computador (PC) e à FPGA que, por sua vez, está ligada ao módulo emissor que envia o sinal através do meio aquático surgindo depois o módulo recetor (observar Figura 4.1).

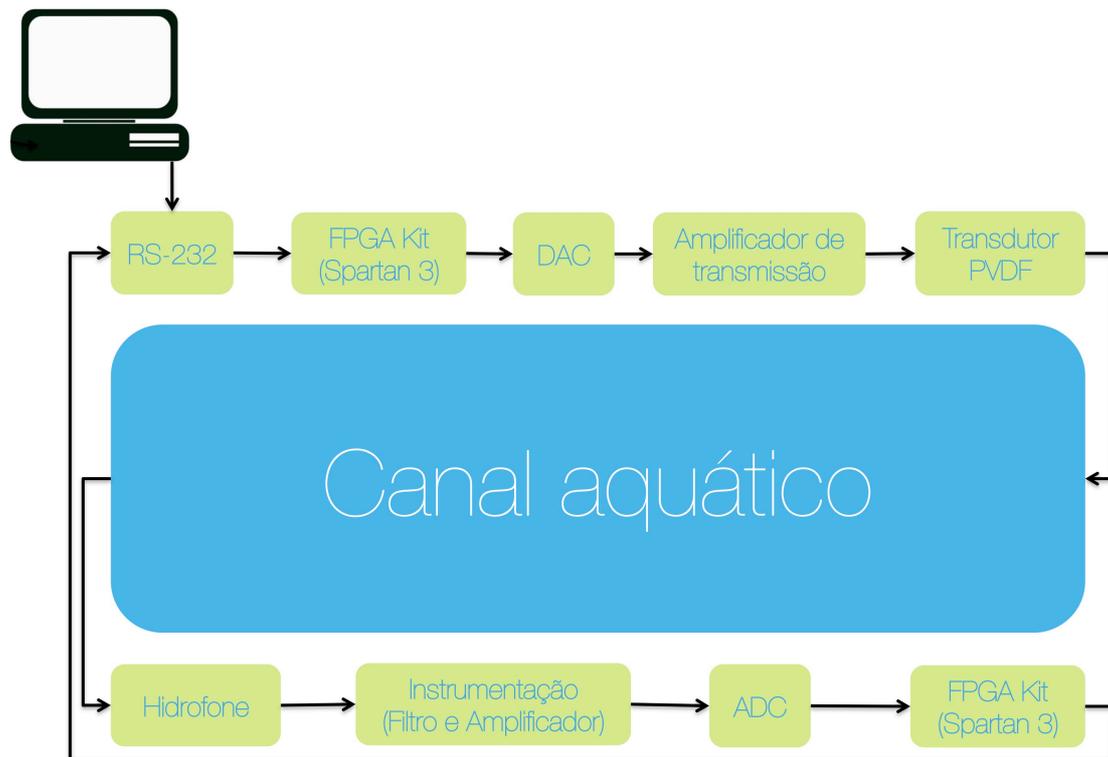


Figura 4.1 - Arquitetura do sistema experimental.

Com esta arquitetura é possível avaliar o desempenho do sistema através da medição dos sinais acústicos a várias taxas de transmissão. Com os dados recolhidos, é possível medir o BER (Taxa de Erro do Bit).

## 4.1- Cenário de Teste

Os testes experimentais foram realizados numa piscina com 11 m de comprimento, 3 m de largura dianteira, 6 m de largura traseira e de 1,5 a 1,8 m de profundidade. Os transdutores emissor e recetor foram colocados na piscina a 6 m de distância um do outro, a 1 m de uma parede lateral, e aproximadamente 4 m da outra (aproximadamente, pois esta parede lateral tem uma distância diferente do emissor (3 m) e recetor (5 m), devido à sua forma), a 3 m da parede traseira, 1 m da parede dianteira e 50 centímetros (cm) de profundidade. Para uma melhor percepção do cenário descrito anteriormente, observar Figura 4.2.



Figura 4.2 - Ambiente de teste.

O teste consiste no envio do caracter ASCII 'U' de um modo contínuo. Os bits de código deste caracter têm a particularidade de alternar entre '1' e '0', resultando numa sequência binária '01010101'. Esta sequência de bits é uma das mais difíceis de desmodular devido à constante mudança de estado. Este teste foi realizado usando uma transmissão OOK (modulação implementada no capítulo anterior) de 1 Mbps com uma onda portadora de 1 MHz. É ainda de salientar que a porta série funciona com lógica invertida, o que implica que o estado lógico alto corresponda ao bit '0' e o estado lógico baixo corresponda ao bit '1'

## 4.2- Resultados

Todos os resultados apresentados nesta secção foram conseguidos utilizando um osciloscópio digital (Pico Scope 4227 (Technology P. )), o hardware descrito na secção 3.2 do capítulo 3, e o software implementado na secção 3.3.3.

Inicialmente envia-se o fluxo de bits (*Data Stream*) '01010101' (correspondentes ao valor decimal 85, ao valor hexadecimal 55 e ao caracter ASCII 'U') pelo PC através da porta série (observar Figura 4.3) que será encaminhado para a FPGA para posteriormente ser modulado.

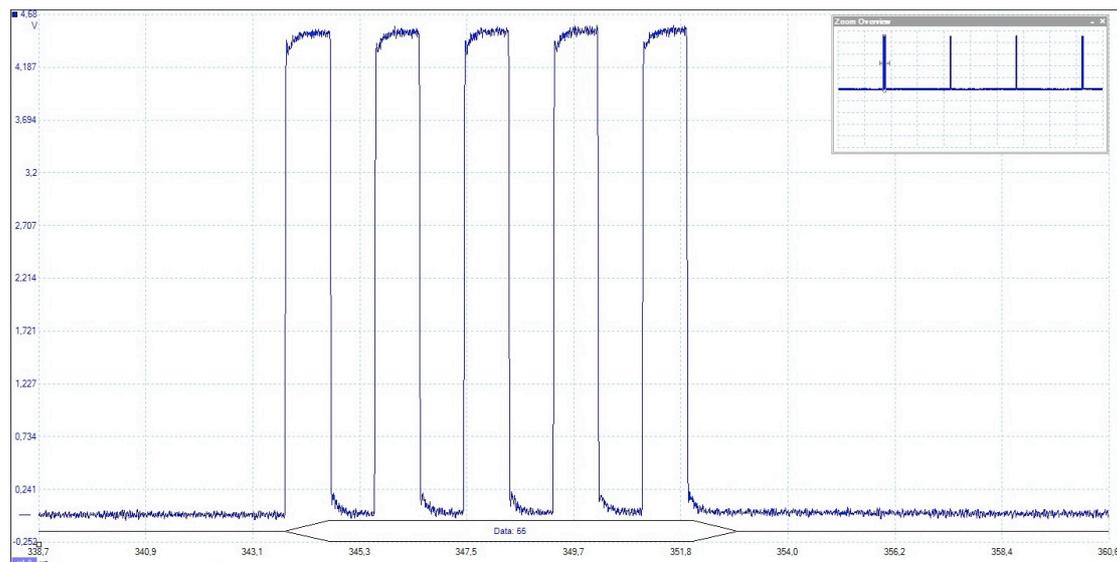
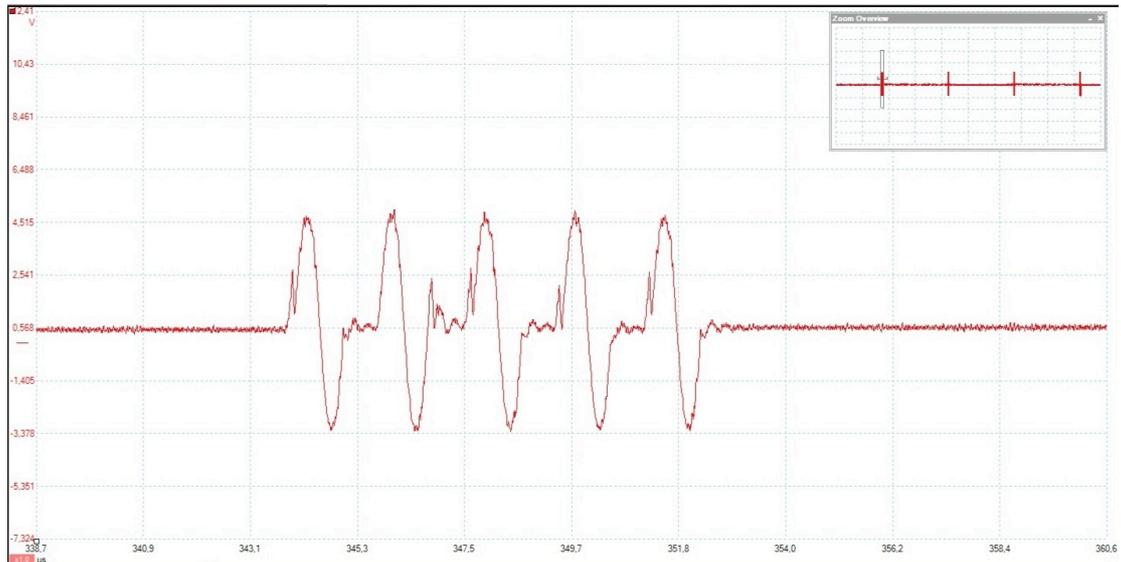


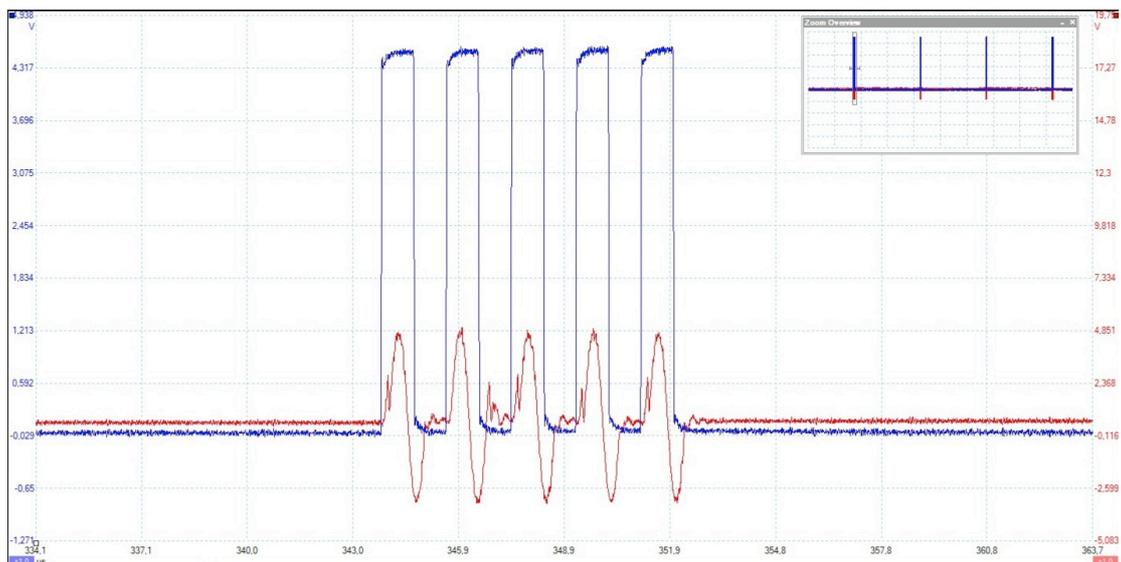
Figura 4.3 - Data Stream enviado através da porta série RS-232.

Após o sinal ser modulado através da FPGA é enviado para o DAC para este proceder à conversão do sinal de digital para analógico. O sinal modulado à saída do DAC pode ser observado na Figura 4.4



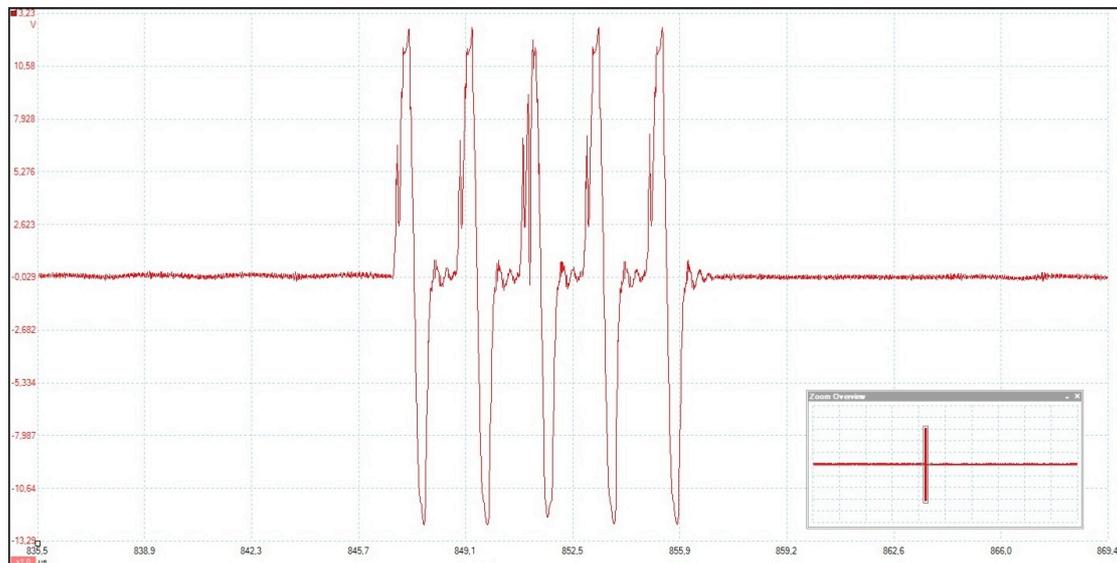
**Figura 4.4 - Saída do DAC.**

Observando os dois sinais em conjunto (Figura 4.5) é possível verificar que cada estado lógico alto é convertido para uma onda sinusoidal de 1 MHz, resultando assim num período do seno para cada comprimento de bit, o que nos dá uma transmissão de 1 Mbps.



**Figura 4.5 - Data Stream e saída do DAC.**

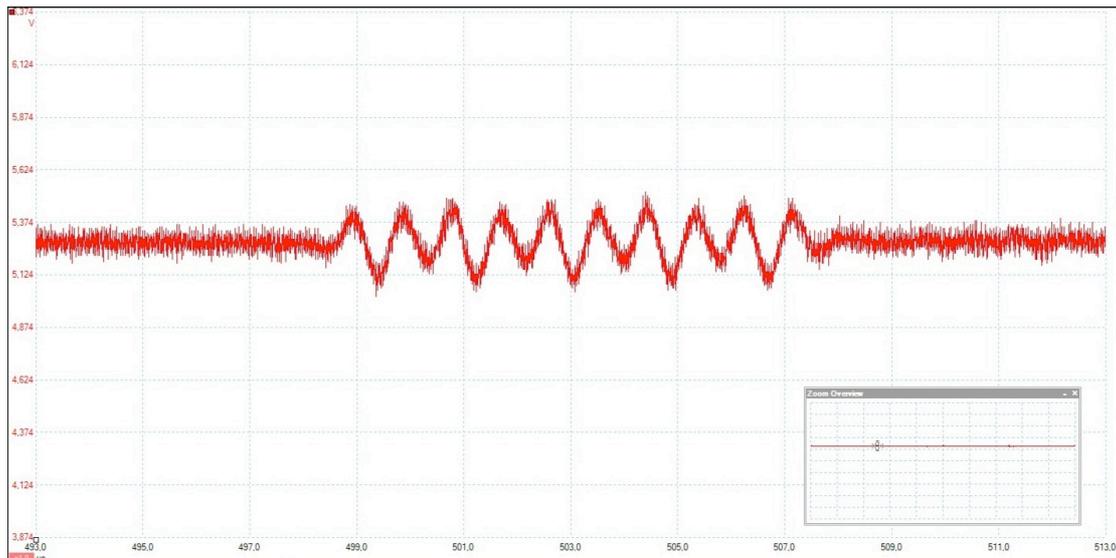
Antes do sinal ser enviado pelo canal aquático (piscina) é necessário amplificá-lo. Assim, o sinal à saída do amplificador pode ser observado na Figura 4.6.



**Figura 4.6 - Saída do amplificador.**

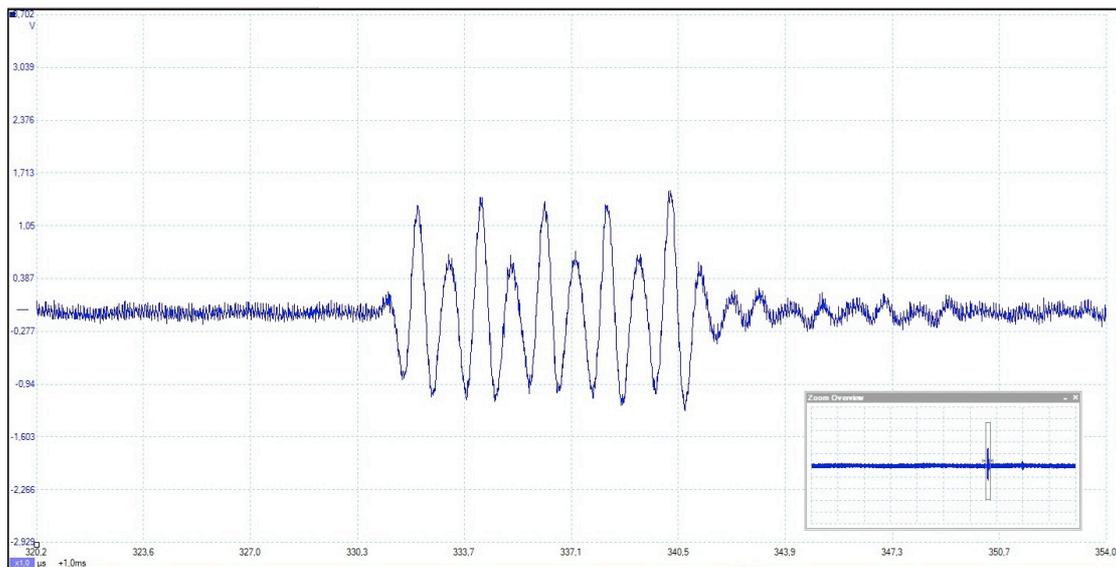
O sinal presente na Figura 4.6 é o sinal modulado que será enviado para o meio aquático, ou seja, é o sinal que será enviado através do transdutor PVDF (emissor) através da piscina, com as características apresentadas na secção 4.1.

Quando o sinal é propagado pelo meio aquático (piscina), devido às características deste meio, o sinal à saída do hidrofone (recetor) aparece muito atenuado e degradado (verificar Figura 4.7).



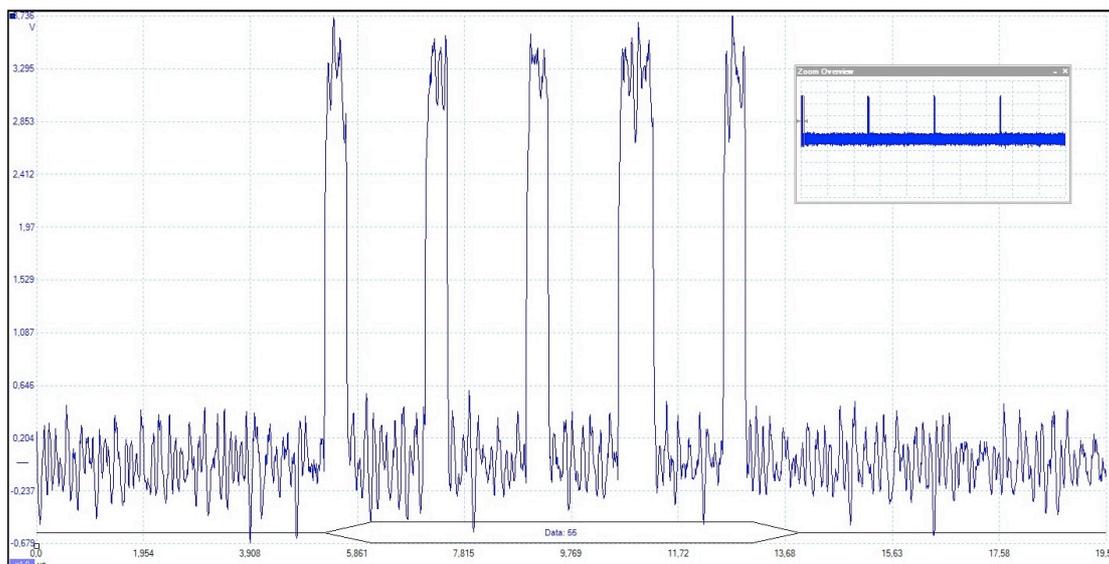
**Figura 4.7 - Saída do hidrofone.**

Então, será necessário filtrar o sinal de modo a remover-lhe as frequências indesejadas e de seguida amplificá-lo para ser interpretado pelo ADC (observar Figura 4.8).



**Figura 4.8 - Saída do filtro com ganho associado.**

O sinal está agora em condições de ser enviado para o ADC, que converte o sinal de analógico para digital, para ser interpretado pela FPGA e esta proceder à desmodulação do sinal. Na Figura 4.9 é possível observar o sinal na saída final.



**Figura 4.9 - Saída final.**

No final deste processo, mediu-se a taxa de erros do bit BER<sup>11</sup> (geralmente calcula-se o BER através da divisão dos Bits Errados com os Bits Enviados) para as taxas de transmissão de 1 Mbps, 512 kbps e 256 kbps. As medidas foram realizadas com duas portas RS232, permitindo enviar e receber o arquivo no mesmo computador para a comparação. O tamanho do arquivo é de 2 Mb e nenhum tipo de deteção de erros ou mecanismos de correção foram usados ou implementados. Os resultados registados foram  $BER = 3 \times 10^{-3}$  para 1 Mbps,  $BER = 2.3 \times 10^{-5}$  para 512 kbps e  $1 \times 10^{-8}$  para 256 kbps.

A maioria dos erros foi causada por um falso bit de partida (*start bit*) que inicializou o processo de desmodulação. Estes falsos bits de partida são causados devido aos picos de ruído. Isto verificou-se porque quando a taxa de transmissão é reduzida os picos de ruído não eram mais detetados pelo modem recetor. No entanto, existem várias maneiras de reduzir esta ocorrência, como por exemplo, melhorar a qualidade de filtro. Subsequentemente, também pode ser implementado um mecanismo de controlo de erros que possa reduzir o BER. É ainda de salientar que nesta transmissão é usado apenas 1.4 W de consumo de energia, cumprindo assim, os requisitos propostos de baixo consumo.

<sup>11</sup> O BER é a taxa de erro de bit ou razão de erros binários, um valor que serve para indicar a taxa de bits errados durante uma transmissão electrónica.

## 4.3- Comparação e Análise dos Resultados Obtidos

Comparando os resultados obtidos nos testes experimentais, com os resultados obtidos na simulação (secção 3.3.3) alguns sinais apresentam formas bastantes diferentes, mas no entanto, pode-se afirmar que os resultados estão em conformidade.

Observando o sinal modulado na Figura 3.18 c) e o sinal modulado na Figura 4.4 pode-se dizer que são de similares. No entanto, observando o sinal recebido na simulação (Figura 3.23 a)) e o sinal recebido no teste experimental (Figura 4.7) os sinais já apresentam um aspeto totalmente diferente, isto porque nos testes experimentais o sinal propagou no meio aquático, logo, o sinal recebido aparece atenuado, com ruído, bastantes “ecos”(sinais refletidos) e com um atraso significativo. Podemos verificar bem estes processos comparando o sinal enviado (Figura 4.6) com o sinal recebido (Figura 4.7) dos testes experimentais. Analisando a Figura 4.8, podemos observar que o sinal filtrado e amplificado ainda apresenta alguns “ecos” (sinais refletidos) e ruído. Este ruído deve-se não só ao meio aquático, mas também a ruído incorporado nos componentes eletrónicos usados no sistema. Analisando a Figura 4.9 é possível verificar que a desmodulação do sinal é realizada de forma eficaz, apesar de apresentar algum ruído. Finalmente comparando o sinal desmodulado nos testes experimentais (Figura 4.9) com sinal desmodulado na simulação (Figura 3.23 h)) é possível verificar que estão em concordância.

## 5- Conclusão

Um crescente interesse no desenvolvimento de sistemas de comunicações subaquáticas levou à pesquisa intensa sobre os métodos que permitem a transmissão sem fios subaquática.

O ambiente subaquático é considerado um meio instável para as comunicações devido a inúmeros fatores. Assim, inicialmente, foi necessário realizar uma pesquisa a fim de entender como estes fatores podem afetar a comunicação em ambientes subaquáticos,

Hoje em dia, os sistemas de comunicação subaquáticos envolvem três tipos de transmissão: eletromagnética, ótica e acústica. Os sistemas de comunicação acústica são a principal forma de comunicação sem fios subaquática, uma vez que há uma menor atenuação do som. Posto isto, foi realizada uma visão geral dos modems acústicos subaquáticos em prototipagem e presentes no mercado. Esta pesquisa foi um pouco complicada devido há escassa existência deste tipo de modems.

Uma das maiores limitações neste tipo de modems é a baixa taxa de transmissão de dados.

Ao longo desta dissertação foi apresentado um modem de ultrassons de baixo consumo para comunicações subaquáticas capaz de atingir 1 Mbps.

Para além da pesquisa efetuada, um dos objetivos principais desta dissertação era simular um modem acústico subaquático utilizando modulações digitais através do *Matlab*, *Simulink* e *Xilinx*. Esta fase foi um pouco complicada e demorada porque existe muita pouca informação de modelos de comunicações em *Xilinx*.

Outro dos grandes objetivos era desenvolver um modem acústico subaquático usando uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Uma das dificuldades mais relevantes nesta fase foi o facto da FPGA apresentar algumas limitações a nível de processamento das modulações digitais.

Através dos resultados dos testes experimentais é possível verificar que o modem apresenta uma taxa de transmissão de 1 Mbps, atingindo uma taxa de erro de bit (BER) de  $3 \times 10^{-3}$ .

Comparado com o estado da arte, este modem atinge uma taxa de transmissão bastante superior a qualquer um no mercado, ou mesmo em protótipo. Até agora, a maior taxa de transmissão dos modems acústicos subaquáticos presentes no mercado é de 38,4 kbps. Em protótipo já existe um modem que atinge os 100 kbps.

No entanto, há sempre alguns aspectos que podem ser melhorados e acrescentados num futuro próximo, tais como:

- Aumentar a potência de saída do transdutor emissor para atingir longas distâncias;
- Implementar outras modulações digitais com maior taxa de bits por símbolo;
- Otimizar os circuitos eletrónicos e os filtros digitais;
- Implementar um método de correção de erros, de modo a anular todos os erros presentes na comunicação;
- Implementar um controlo automático de ganho (AGC) no receptor, o que automaticamente ajusta o ganho do sinal na recepção.

Em conclusão, podemos afirmar que os objetivos propostos para o sistema foram alcançados.

# Referências

1. A. Sanchez, S. P. (2011). "*A low cost and high efficient acoustic modem for underwater sensor networks*". Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, SPAIN.
2. A. Sehgal, I. T. (2010). "Aquatools: An underwater acoustic networking simulation toolkit". *IEEE Oceans*, May 2010.
3. A. Sehgal, I. T. (2009). "Variability of available capacity due to the effects of depth and temperature in the underwater acoustic communication channels". *OCEANS 2009 - EUROPE*, (pp. 1–6 ), 11-14 May 2009.
4. ACOBAR. Obtido de <http://acobar.nersc.no>, Last access in September 2013.
5. Arnon, S. (2010). "Underwater optical wireless communication network". *Optical Engineering*, vol 49 (1): (pp.1-6), January 2010.
6. Ballagh, J. H. "Building custom fir filters using system generator". *International Conference on Field-Programmable Logic and Applications, FPL '02*, 2002.
7. Barrio, A. (2009). "*modelling underwater acoustic noise as a tool for coastal management*". Tese Mestrado, University of Algarve , Faculty of Sciences and Technology , August 2009.
8. Benthos, T. Obtido [http://www.benthos.com/index.php/product\\_dashboard/acoustic\\_modems](http://www.benthos.com/index.php/product_dashboard/acoustic_modems).
9. Borowski, B. (2010). "*Application of channel estimation to underwater acoustic communication*". Tese Mestrado, Stevens Institute of Technology, 2010.
10. Brundage, H. (2010). "*Designing a wireless underwater optical communication system*". Tese Mestrado, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2010.

11. Carlson, A. (1986). *Communication Systems: "An introduction to signals and noise in electrical communication"*, 1986.
12. Chitode, J. (2009). "Analog And Digital Communication Engineering". *Technical Publications*, 2009.
13. Contractors, I. A. (2008). "*Fundamentals of underwater sound*". Relatório Técnico, International Association of Oil & Gas Producers (OGP), May 2008.
14. Cox, C. (2007). "*a 1 mbps underwater communication system using a 405 nm laser diode and photomultiplier tube*". Tese Mestrado, Graduate Faculty of North Carolina State University, Department of Electrical Engineering, 2007.
15. DAMOCLES. Obtido de [http://ec.europa.eu/research/research-for-europe/environment-damocles\\_en.html](http://ec.europa.eu/research/research-for-europe/environment-damocles_en.html), Last access, September 2013.
16. Devices, A. Obtido <http://www.wvshare.com/datasheet/ADPDF/AD9244.PDF>, 2005, Last access in June 2013.
17. DSP, S. G. (2008). *Getting Started Guide*.
18. Fernandes, R. (2012). "*DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN UNDERWATER COMMUNICATION SYSTEM*". Tese Mestrado, Universidade do Minho. Novembro 2012.
19. Ge., Y. L. (2006). "Underwater laser sensor network: A new approach for broad-band communication in the underwater". *5th WSEAS International Conference on Telecommunications and Informatics*, (pp. 421–425 ), 27-29 May 2006.
20. Godden, L. (2002). "*Underwater ultrasonic communication*". Tese Mestrado, University of Queensland, Department of information technology and electrical engineering, 2002.
21. Gonçalves, L. (2012). "*Underwater Acoustic Communication System: Performance evaluation of digital modulation techniques*". Tese Mestrado, Universidade do Minho, Outubro 2012.
22. Group, A. <http://www.aquatecgroup.com/index.php/products/aqua-modem>, Last access, june 2013.

23. Gutierrez, F. M. (2009). *"Implementation of a tx/rx ofdm system in a fpga"*. Tese Mestrado, Escola Politecnica Superior de Castelldefels, April 2009.
24. Haug, O. T. (2009). *"Acoustic communication for use in underwater sensor networks"*, 2009.
25. Haykin, S. (2001). *"Communication Systems, 4th Edition"* . (I. John Wiley & Sons, Ed.), 2001.
26. Ian Akyildiz, D. P. (2005). "Underwater acoustic sensor networks: Research challenges". *AD HOC NETWORKS (ELSEVIER)* (3), (pp. 257–279), 2005.
27. Ian Akyildiz, D. P. (2007). "State of the art in protocol research for underwater acoustic sensor networks". *ACM Mobile Computing and Communication Review*. vol. 11, no 4:pp. 11-22 October 2007.
28. Instruments. T. Obtido TexasInstruments. <http://www.ti.com/lit/ds/sbas095c/sbas095c.pdf>, 2002, Last access in June 2013.
29. J. Beaujean, P.-P. (2007). *"High-Speed High-Frequency Acoustic Modem for Image Transmission in Very Shallow Waters"*. Member, IEEE, 2007.
30. J.R. Barry, E. L. (2004). Digital communication. *Kluwer Academic Publishers*, 2004.
31. Lanbo Liu, S. Z.-H. (2008). *"Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks"*. *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*, (pp. 977–944), 2008.
32. LinkQuest. Obtido de <http://www.link-quest.com/html/intro1.htm>.
33. Love, G. (2006). *"the undersea world of wfs"*. Technical Report. WFS technologies, 2006.
34. M. Chitre, S. S. (2008). "Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges". *Marine Technology Society Journal*, 42 (1), (pp.103–116), 2008.

35. M. Dermond, T. K. (2007). "Underwater communication technology". *The journal of rowan engineering/mechanical*, page 6, 2007.
36. M. Martins, V. C.-M. (2010). "comparative finite element analyses of piezoelectric ceramics and polymers at high frequency for underwater wireless communications". *Elsevier, Proc. Eurosensors XXIV, Linz, Austria*, 5:99-102, September, 5-8, 2010.
37. MathWorks. <http://www.mathworks.com/products/matlab/description1.html>, Last access in June 2013.
38. MathWorks. Obtido de <http://www.mathworks.com/products/simulink/> Last accesse in June 2013.
39. Mendes, D. (2011). "*A matlab/simulink model to evaluate underwater acoustic communication systems*". Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Dezembro 2011.
40. N.-S. N. Ismail, L. A. (2010). "Analyzing the performance of acoustic channel in underwater wireless sensor network (uwsn)". *Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation (AMS) ,2010 Fourth Asia International Conference*, (pp. 550–555 ), 26-28 May 2010.
41. Oscar Szeremeta Gustavo Theodoro Laskoski, M. M. (2006). "*Modulação digital: tópicos de comunicações*". Relatório Técnico, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, September 2006.
42. Preisig, J. (2006). "Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development". *Underwater Networks (WUWNet'06)*, (pp. 1–5).
43. Preisig, M. S. (2009). "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization". *IEEE Communications Magazine*, 84–89 .
44. Rhodes, M. (2007). "Electromagnetic propagation in sea water and its value in military systems". *SEAS DTC Technical Conference*, (p. 6).
45. S.O. Popescu, A. G. (2011). "Simulation and implementation of a bpsk modulator on fpga" . *IEEE International Symposium*.

46. Shelley, T. (2005). "Radio waves transmit information underwater". *Eureka Magazine*.
47. Stern., D. B. (2008). *Underwater Sound AND THE MARINE MAMMAL ACOUSTIC ENVIRONMENT A Guide to Fundamental Principles*". U.S. Marine Mammal Commission.
48. Stojanovic, M. (2007). "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel". *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, 11 (4), 34–43.
49. Stojanovic, M. (1999). "Underwater acoustic communication". *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*.
50. Stojanovic, M. (2008). "Underwater acoustic communications: Design considerations on the physical layer". *IEEE / IFIP Fifth Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2008)*.
51. Tae-Hee Won, H. C.-J. (2011). "An Omni-directional Underwater Acoustic Modem Based on Cortex-M3". Gangneung-Wonju National University , Department of Electronic Engineering.
52. Technology, C. R. Obtido <http://www.cetaceanresearch.com/documents/hydrophonspecs.pdf> , 2011, Last access in September 2013.
53. Technology, P. Obtido <http://www.picotech.com/document/datasheets/PicoScope4000Series>, Last access in September 2013.
54. Vosbein, H. (2010). "Introduction to Ocean Acoustics". University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), COMET Program.
55. WHOI. Obtido de <http://acomms.whoi.edu/umodem/>
56. Wong, S. K. (2005). "Underwater acoustic simulator for communications" . Honours Programme of the School of Computer Science and Software Engineering .
57. Xilinx. Obtido de <http://www.xilinx.com/s3astarter>, Last access in September 2013