

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



## **Comunicações Rádio Subaquáticas**

João Paulo Carvalho Ferreira Leão

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

Orientador: Professor Doutor Sérgio Reis Cunha  
Co-Orientadora: Professora Doutora Maria Inês Barbosa de Carvalho

Junho 2012



# Resumo

As comunicações subaquáticas baseadas em ondas eletromagnéticas foram intensamente investigadas nos anos 60. Contudo, apresentam poucas aplicações até à data, devido essencialmente à grande atenuação que a água do mar impõe ao sinal. Existem, no entanto, estudos que mostram que as ondas eletromagnéticas, embora sofram grande atenuação na região do campo próximo, a mesma é menor no campo distante, permitindo comunicar com elevadas larguras de banda localmente.

Por outro lado, pesquisas recentes, feitas à luz de técnicas digitais modernas, mostraram que os sinais eletromagnéticos conjugados com tecnologias digitais e técnicas de compressão de sinal trazem diversas vantagens que podem ser aproveitadas para um nicho de aplicações subaquáticas, com maior interesse em águas com baixa profundidade, onde a transmissão acústica é muito limitada.

O objetivo deste trabalho consistiu em desenvolver um equipamento que permitisse testar, avaliar a viabilidade e caracterizar o desempenho de comunicações rádio dentro de água doce e do mar, a curtas distâncias.



# Abstract

Underwater electromagnetic communication has been intensively investigated in the 60's, but had only few practical applications to date, essentially due to the huge attenuation that sea water imposes to the signal. However, studies have shown that electromagnetic waves, although having large attenuation in the region of near field, the same is smaller in the far field, allowing communication with high bandwidths locally.

Furthermore, recent research on modern digital techniques has shown that electromagnetic signaling, along with digital technology and signal compression techniques has many advantages which can be used for a niche of underwater applications, with higher interest in shallow waters where acoustics transmission is very limited.

The goal of this study was to develop an equipment that would allow testing, evaluating the feasibility, and characterizing the performance of radio communications in the fresh water and sea water, at short distances.



# Agradecimentos

Ao meu orientador e a minha co-orientadora, pela prontidão, dedicação e paciência demonstrada. Sem a sua ajuda teria sido difícil a conclusão deste trabalho.



# Índice

<b>Resumo</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>vii</b>
<b>Abreviaturas e Símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos .....	2
1.2 Estrutura da Dissertação .....	2
<b>2 Revisão da literatura</b>	<b>5</b>
2.1 Propagação de ondas eletromagnéticas em meio subaquático .....	6
2.2 Aplicações das comunicações rádio em meio subaquático .....	12
2.3 Produtos comercializados para comunicações subaquáticas .....	13
2.4 Direções de investigação atuais .....	14
<b>3 Materiais e métodos</b>	<b>16</b>
3.1 Antenas .....	16

---

3.2 Peça de interligação das antenas às caixas estanques .....	18
3.3 Caixas estanques e ligação às antenas .....	19
3.4 Circuito emissor .....	20
3.5 Caracterização dos sinais no sistema de comunicações .....	25
3.6 Cálculo da potência de emissão .....	29
<b>4 Resultados</b>	<b>33</b>
4.1 Resultados obtidos na piscina da FEUP .....	35
4.2 Resultados obtidos no mar junto à costa de Sesimbra .....	39
4.3 Comparação de distâncias teóricas com os resultados obtidos .....	39
<b>5 Conclusões</b>	<b>43</b>
<b>Referências</b>	<b>45</b>



# Lista de figuras

2.1- Velocidade de propagação em função da frequência .....	9
2.2- Comprimento de onda em função da frequência .....	9
2.3- Distância para atenuação de 100 dB em função da frequência .....	10
2.4- Propagação RF debaixo de água usando vários caminhos .....	11
2.5- Exemplo de equipamento comercializado pela WFS Technologies .....	13
3.1- Desenho da antena em anel .....	17
3.2- Desenho da peça de ligação da antena à caixa estanque .....	18
3.3- Antena ligada à caixa estanque .....	19
3.4- Diagrama de blocos do sistema emissor .....	20
3.5- Configuração dos “linear feedback shift registers” para a geração da sequência pseudo-aleatória .....	21
3.6- Segmento da sequência pseudo-aleatória utilizada .....	21
(primeiros 40 dos 4095 ciclos)	
3.7- Circuito usado para gerar a sequência pseudo-aleatória .....	23
3.8- Circuito usado para gerar a portadora, o sinal de relógio para a sequência pseudo-aleatória, a mistura da portadora com a sequência pseudo-aleatória e o filtro passa banda .....	24
3.9- Circuito do amplificador .....	25
3.10- Forma de onda da portadora .....	26
3.11- Forma de onda da sequência pseudo-aleatória .....	26

---

3.12- Forma de onda do sinal de relógio do circuito que gera a sequência pseudo-aleatória .....	27
3.13- Forma de onda do sinal à saída do amplificador .....	27
3.14- Pormenor da modulação de fase da portadora pela sequência pseudo-aleatória .....	28
3.15- Espectro do sinal transmitido .....	28
3.16- Circuito equivalente usado no cálculo da potência de emissão .....	29
4.1- Equipamento usado nas experiências .....	34
4.2- Correlação para distância intermédia a profundidade máxima sem antena no emissor ( $f_{max}=6425$ Hz) .....	35
4.3- Correlação para distância intermédia a profundidade máxima ( $f_{max}=6432$ Hz) .....	36
4.4- Correlação para distância máxima a profundidade máxima ( $f_{max}=6427$ Hz) .....	36
4.5- Correlação para distância curta a profundidade máxima ( $f_{max}=6420$ Hz) .....	37
4.6- Correlação estando a antena recetora a deslocar-se entre a distância intermédia e a distância máxima a profundidade máxima ( $f_{max}=6421$ Hz) .....	37
4.7: Equipamento a operar na piscina da FEUP .....	38
4.8: Equipamento a bordo da embarcação da Marinha Portuguesa .....	39



## Lista de tabelas

2.1- Desempenho das ondas eletromagnéticas debaixo de água .....	8
2.2- Vantagens da tecnologia RF-EM subaquática .....	12
2.3- Exemplos de data rates para potenciais alcances da tecnologia RF-EM subaquática .....	12



# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

BPSK Binary Phase-Shift Keying

FEUP Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GPS Global *Positioning* System

INESC Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores

PCB Printed Circuit Board

SSB Single Side Band

USB Upper Side Band

UUV Unmanned Undersea Vehicles

VNA Vector Network Analyzer

## Lista de símbolos

$\gamma$  constante de propagação

$\epsilon$  permitividade

$\mu$  permeabilidade

$\sigma$  condutividade

$\alpha$  fator de atenuação

$\beta$  fator de fase

$\omega$  frequência angular

$\lambda$  comprimento de onda

f frequência

v velocidade de propagação





# Capítulo 1

## Introdução

As comunicações subaquáticas baseadas em ondas eletromagnéticas foram intensamente investigadas nos anos 60. Uma vez que o alcance das comunicações era afetado essencialmente pela atenuação e o ruído, considerados fatores ambientais inalteráveis, não eram esperados progressos neste tipo de comunicações. Desta forma, as aplicações rádio subaquáticas apresentam poucas aplicações práticas até à data.

No entanto, pesquisas recentes, à luz de técnicas digitais modernas, mostraram que os sinais electromagnéticos conjugados com tecnologias digitais e técnicas de compressão de sinal trazem diversas vantagens que podem ser aproveitadas para um nicho de aplicações subaquáticas, com maior interesse em águas com baixa profundidade onde a transmissão acústica é muito limitada.

Resultados recentes mostram que a comunicação efetiva entre um nó submerso e a costa é possível sem ser necessária a utilização de boias com repetidores à superfície, uma vez que a transmissão pelo ar suporta a maior parte do sinal. No entanto, existem ainda áreas com necessidade de aperfeiçoamento, especificamente, a adequação de protocolos de comunicação para canais com um baixo *data rate*, e modulações mais sofisticadas de forma a tirar vantagem de características específicas das antenas subaquáticas.

Adicionalmente, redes de sensores *wireless* subaquáticos parecem uma abordagem atrativa para um vasto conjunto de organizações incluindo a defesa, extração de petróleo e gás ao largo da costa, bem como, para monitorização do ambiente (erosão da costa).

Uma solução ótima envolve a utilização de técnicas de modulação avançadas, tais como OFDM, e a calibração de parâmetros como o desenho e dimensões da antena, potência

transmitida e largura de banda dos dados, requerendo uma atenção redobrada na escolha da frequência a operar, *bit rate* e a densidade dos sensores.

As comunicações rádio subaquáticas possuem um conjunto de vantagens sobre as comunicações acústicas, nomeadamente ao nível da latência devida à velocidade de propagação. Sendo assim, uma das potenciais aplicações desta tecnologia consiste na sua utilização em sistemas de navegação.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho consistiu em desenvolver um equipamento que permitisse testar, avaliar a viabilidade e caracterizar o desempenho de comunicações rádio dentro de água, a curtas distâncias. Uma condição imperativa foi a de garantir que o equipamento do emissor (antena e circuito emissor) estivesse completamente submerso sem qualquer ligação por cabo com o ambiente fora de água. Experiências anteriores na FEUP, no âmbito das comunicações rádio subaquáticas, mostraram a viabilidade de um sistema de comunicação onde o emissor e o recetor, apesar de estarem submersos, apresentavam uma ligação por cabo com o exterior. Desta forma, não se excluiu a possibilidade de a maior parte do sinal ser transmitido pelo ar através dos cabos à superfície. Com o presente sistema pretendeu-se excluir esta possibilidade submergindo completamente o emissor e eliminando qualquer ligação com a superfície.

## 1.2 Estrutura da dissertação

No Capítulo 2 são apresentados os meios de comunicação subaquáticos procedendo-se a uma análise comparativa em termos de vantagens e inconvenientes. É feita a caracterização da propagação das ondas eletromagnéticas em meio subaquático e apresentado um estudo comparativo, no que respeita à velocidade de propagação, ao comprimento de onda e à distância de comunicação, na propagação de ondas eletromagnéticas, em água do mar, em água doce e no ar e a propagação de ondas acústicas na água. Faz-se referência ao principal tipo de antenas usado nas comunicações eletromagnéticas subaquáticas. São ainda mencionados os benefícios no uso de ondas eletromagnéticas em meio subaquático, as principais aplicações, exemplos de produtos comercializados e direções de investigação atuais.

A descrição pormenorizada dos materiais e métodos usados no desenvolvimento do sistema de comunicações subaquático é feita no Capítulo 3.

O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos num conjunto de experiências efetuadas com o sistema desenvolvido na piscina da FEUP e no mar, junto à costa de Sesimbra, no âmbito de um protocolo estabelecido entre o INESC Porto e a marinha portuguesa.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões decorrentes da análise dos resultados obtidos apontando direções de trabalho que pode ser desenvolvido futuramente.



## Capítulo 2

### Revisão da literatura

As comunicações subaquáticas podem-se dividir em três grupos: acústicas, óticas e eletromagnéticas.

As comunicações acústicas subaquáticas têm sido alvo de extensas pesquisas e de notáveis desenvolvimentos. Embora as comunicações acústicas ofereçam transmissões de longo alcance (até 20 Km), revelam algumas limitações. As ondas acústicas possuem um desempenho fraco a baixas profundidades, sendo afetadas pela turbulência, ruído ambiente, salinidade e gradientes de pressão; adicionalmente esta tecnologia pode possuir efeitos adversos para a vida marinha se forem usadas elevadas potências de emissão.

A capacidade elevada, em termos de largura de banda, da tecnologia ótica conduziu a várias pesquisas nas comunicações óticas subaquáticas. No entanto, as ondas óticas só possuem um bom desempenho em águas muito límpidas e requerem um alinhamento justo entre os nós. O requisito de linha de vista nas comunicações óticas originou constrangimentos significativos em ambiente subaquático, ainda que tenham sido feitos esforços no sentido de ultrapassar esta limitação.

Embora as comunicações eletromagnéticas possam sofrer de interferências eletromagnéticas e possuam um alcance reduzido na transmissão, têm um conjunto de características que as tornam vantajosas para ambientes subaquáticos. Tanto as ondas acústicas como as ondas óticas não conseguem fazer transições suaves na fronteira água/ar. As ondas eletromagnéticas conseguem atravessar as fronteiras água/ar ou água/terra facilmente seguindo o caminho de menor resistência. Desta forma, o leito do mar e o ar constituem caminhos que permitem aumentar o alcance da transmissão. As transmissões eletromagnéticas são tolerantes à turbulência causada pelas marés ou atividades humanas,

em oposição às ondas acústicas e óticas, que não são. As ondas eletromagnéticas podem operar em águas que não estão límpidas, enquanto as ondas óticas são sensíveis a partículas e algas marinhas. Ao contrário da tecnologia acústica, a radiação eletromagnética é imune ao ruído acústico e não tem efeitos nefastos conhecidos para a vida marinha.

## 2.1 Propagação de ondas eletromagnéticas em meio subaquático

A propagação de ondas eletromagnéticas através da água é muito diferente da propagação através do ar devido à elevada permitividade e condutividade elétrica da água. As ondas de propagação transferem ciclicamente energia entre o campo elétrico e o campo magnético; desta forma a condução elevada leva a uma forte atenuação. A atenuação de uma onda plana aumenta rapidamente com a frequência.

As equações de Maxwell podem ser usadas para estudar a propagação de ondas eletromagnéticas na água. Considerando que a água é um meio linear, homogêneo e isotrópico com permitividade dielétrica  $\epsilon$ , permeabilidade magnética  $\mu$  e condutividade  $\sigma$ , estas equações tomam a forma, assumindo que se trata de uma onda sinusoidal com frequência  $f$  e exprimindo as derivadas em ordem ao tempo no domínio das frequências:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + j\omega\epsilon\vec{E} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (4)$$

onde  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  representam os fasores dos campos elétrico e magnético, respetivamente, e  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular da onda eletromagnética. Estas equações podem ser facilmente manipuladas para se obter as equações de onda para os campos elétrico e magnético:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \left( \epsilon\mu - j\frac{\sigma\mu}{\omega} \right) \vec{E} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \left( \epsilon\mu - j\frac{\sigma\mu}{\omega} \right) \vec{H} = 0 \quad (6)$$

Estas equações admitem soluções na forma de ondas planas. No caso de uma onda polarizada linearmente segundo  $x$  e propagando-se segundo  $+z$  onde, os fasores dos campos elétrico e magnético são dados por:

$$\vec{E} = \hat{x}E_0 e^{-\gamma z} \quad (7)$$

$$\vec{H} = \hat{y}H_0 e^{-\gamma z} \quad (8)$$

onde  $E_0$  e  $H_0$  são as amplitudes dos campos elétrico e magnético e a constante de propagação  $\gamma$  é complexa e dada por  $\gamma = j\omega\sqrt{\epsilon\mu - j\sigma\mu}/\omega = \alpha + j\beta$ . As partes real e imaginária de  $\gamma$  são, respetivamente, as constantes de atenuação e de fase, e dependem da frequência da onda eletromagnética. Um meio é considerado bom condutor quando se verifica que  $\sigma \gg \omega\epsilon$ . Deve ser referido que a condição anterior implica que a classificação de um meio depende do valor da frequência que se está a considerar. Caso um meio seja considerado bom condutor, a expressão para a constante de propagação pode ser simplificada, obtendo-se  $\gamma = \sqrt{\pi f \mu \sigma} (1 + j)$ , o que significa que neste caso as constantes de atenuação e de fase são iguais e dadas por  $\alpha = \beta = \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ . Esta expressão permite determinar a profundidade de penetração de uma onda eletromagnética num meio bom condutor, definida como a distância associada a uma atenuação de  $e^{-1}$ , a qual é dada por  $\delta = 1/\alpha = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$ . Por outro lado, atendendo a que a constante de fase está relacionada com o comprimento de onda ( $\beta = 2\pi/\lambda$ ) e com a velocidade de fase da onda eletromagnética ( $v = \omega/\beta$ ), tem-se ainda para um meio bom condutor:

$$\lambda = 2\sqrt{\frac{\pi}{f\mu\sigma}} \quad (9)$$

e

$$v = 2\sqrt{\frac{\pi f}{\mu\sigma}} \quad (10)$$

A tabela 2.1 mostra a variação dos parâmetros fundamentais  $v$  e  $\lambda$  em função da frequência, tendo como ponto de partida as equações 9 e 10 respetivamente. Consideraram-se os valores da condutividade de 0.01 S/m para a água doce e de 4 S/m para a água do mar nas frequências apresentadas. Considerou-se ainda que a permeabilidade magnética era a do espaço livre,  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m. Esta tabela mostra também o valor da distância de propagação que corresponde a uma atenuação de 100 dB. Usando a expressão anterior da constante de atenuação num meio bom condutor, cujas unidades eram Np/m, e atendendo que a atenuação em dB sofrida por uma onda electromagnética ao fim de uma distância de

propagação  $d$  é definida como  $20 \log \left( \left| \frac{\vec{E}(z=0)}{\vec{E}(z=d)} \right| \right)$ , é fácil mostrar-se que a distância correspondente a 100 dB de atenuação é dada pela expressão  $11.513 / \sqrt{\pi f \mu \sigma} = 11.513 / \alpha$ .

Quando não se verifica a situação de meio bom condutor não se podem usar as expressões simplificadas. Nesta altura, a equação geral da constante de propagação  $\gamma$ , dada por  $\gamma = j\omega\sqrt{\epsilon\mu} - j\sigma\mu / \omega$ , pode ser representada na forma polar por:

$$\gamma = \sqrt[4]{(\mu\omega)^2(\omega^2\epsilon^2 + \sigma^2)} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\arctg\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)\right)} \quad (11)$$

Para  $\gamma = \alpha + j\beta$ , facilmente se obtém:

$$\alpha = \sqrt[4]{(\mu\omega)^2(\omega^2\epsilon^2 + \sigma^2)} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\arctg\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)\right) \quad (12)$$

e

$$\beta = \sqrt[4]{(\mu\omega)^2(\omega^2\epsilon^2 + \sigma^2)} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\arctg\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)\right) \quad (13)$$

Nesta altura, com os valores das expressões 12 e 13, podemos calcular o comprimento de onda, a velocidade de propagação e a distância de propagação que corresponde a uma atenuação de 100 dB pelas expressões:  $\lambda = 2\pi / \beta$ ,  $v = \omega / \beta$  e  $d_{100dB} = 11.513 / \alpha$ .

		Frequência					
		100 Hz	1 KHz	10 KHz	100 KHz	1 MHz	10 MHz
Velocidade de propagação (m/s)	Água do mar	$1.58 \times 10^4$	$5.00 \times 10^4$	$1.58 \times 10^5$	$5.00 \times 10^5$	$1.60 \times 10^6$	$4.97 \times 10^6$
	Água doce	$3.16 \times 10^5$	$1.00 \times 10^6$	$3.16 \times 10^6$	$1.00 \times 10^7$	$2.56 \times 10^7$	$3.33 \times 10^7$
	Ar	$3.00 \times 10^8$	$3.00 \times 10^8$	$3.00 \times 10^8$	$3.00 \times 10^8$	$3.00 \times 10^8$	$3.00 \times 10^8$
	Acústica	$1.50 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$
Comprimento de onda (m)	Água do mar	$1.58 \times 10^2$	$5.00 \times 10^1$	$1.58 \times 10^1$	$5.00 \times 10^0$	$1.56 \times 10^0$	$5.00 \times 10^{-1}$
	Água doce	$3.16 \times 10^3$	$1.00 \times 10^3$	$3.16 \times 10^2$	$1.00 \times 10^2$	$2.53 \times 10^1$	$3.37 \times 10^0$
	Ar	$3.00 \times 10^6$	$3.00 \times 10^5$	$3.00 \times 10^4$	$3.00 \times 10^3$	$3.00 \times 10^2$	$3.00 \times 10^1$
Distância de propagação (m) para 100 dB de atenuação	Água do mar	$3.23 \times 10^2$	$8.92 \times 10^1$	$2.79 \times 10^1$	$8.81 \times 10^0$	$2.82 \times 10^0$	$9.40 \times 10^{-1}$
	Água doce	$5.78 \times 10^3$	$1.83 \times 10^3$	$5.78 \times 10^2$	$1.83 \times 10^2$	$7.14 \times 10^1$	$5.50 \times 10^1$

Tabela 2.1: Desempenho das ondas eletromagnéticas debaixo de água

Os valores da tabela 2.1 apresentados a sombreado foram calculados tendo em atenção as equações 12 e 13 uma vez que a condição  $\sigma \gg \omega\epsilon$  deixa-se de verificar para esta gama de frequências. Aplica-se para 10 MHz em água doce e também, marginalmente, para 1 MHz em água doce.

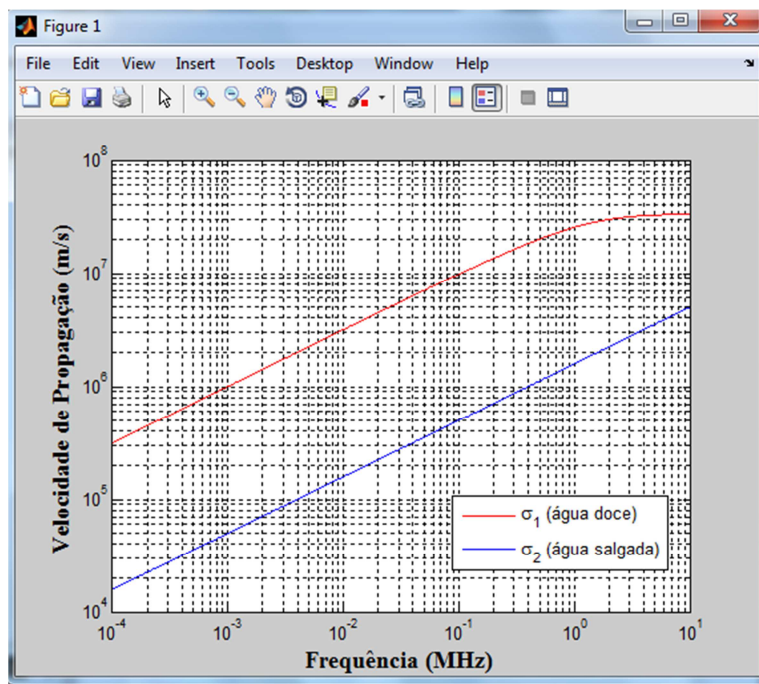


Figura 2.1: Velocidade de propagação em função da frequência

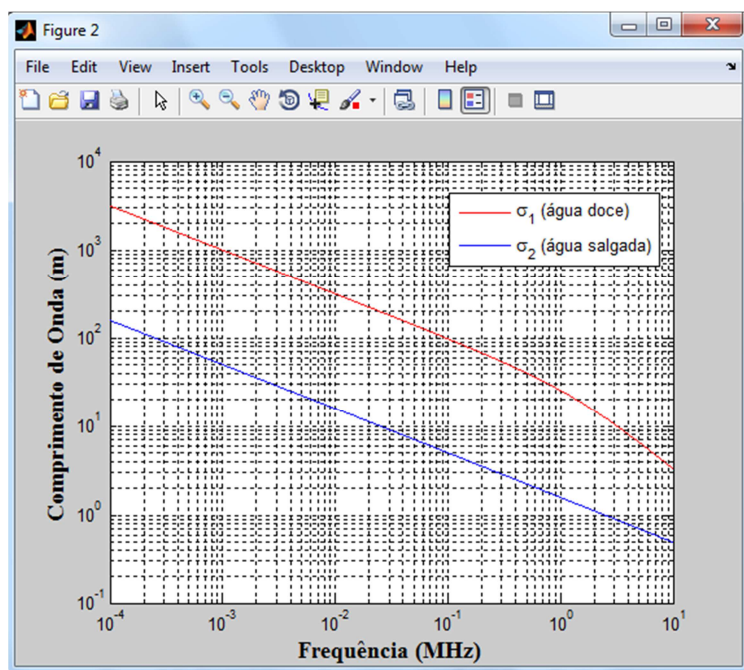


Figura 2.2: Comprimento de onda em função da frequência

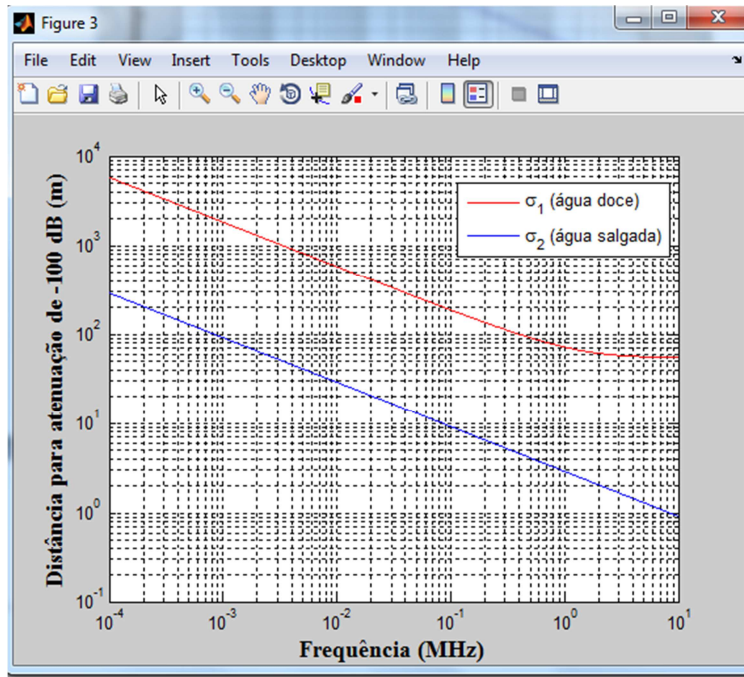


Figura 2.3: Distância para atenuação de 100 dB em função da frequência

Em termos de comparação, a velocidade de propagação das ondas acústicas é constante com a variação da frequência e igual a 1500 m/s. Acima dos 10KHz os sinais eletromagnéticos propagam-se 100 vezes mais depressa do que as ondas acústicas. Esta propriedade traz vantagens importantes para controlar a latência e protocolos de rede onde existe a necessidade da troca de muitos sinais. Outro aspeto tem a ver com o encurtamento do comprimento de onda com o aumento da frequência debaixo de água. Por exemplo, à frequência de 10 Hz o comprimento de onda no espaço é de 3000 Km enquanto que na água do mar é apenas de 176 m. Este efeito tem implicações na navegação e no uso de sensores onde a frequência requerida é menor do que no ar.

O ângulo de refração produzido pela elevada permitividade da água lança o sinal quase de forma paralela com a superfície da água. Este efeito permite a comunicação entre uma estação submersa e a costa ou entre estações submersas a baixa profundidade sem a necessidade de boias com repetidores à superfície. Um efeito semelhante ocorre no leito do mar. Uma vez que a condutividade no leito do mar é inferior à da água, este pode constituir um caminho alternativo com perdas baixas e ruído baixo. A figura 2.4 ilustra os vários caminhos possíveis da propagação das ondas eletromagnéticas debaixo de água. Em muitas aplicações o caminho com menor resistência será dominante. O caminho através do ar ou através do leito do mar podem ser escolhidos para alcançar longas distâncias em detrimento do caminho através da água. Assim, a propagação de ondas eletromagnéticas através de vários caminhos pode ser vantajosa na transmissão de sinais em águas pouco profundas. A

terceira parte da tabela 2.1 mostra a atenuação através do caminho da água, mas para a comunicação entre estações submersas em águas pouco profundas, a maior parte do sinal segue o caminho do ar, desta forma, o conteúdo desta tabela não pode ser interpretado utilizando apenas a medida de alcance horizontal.

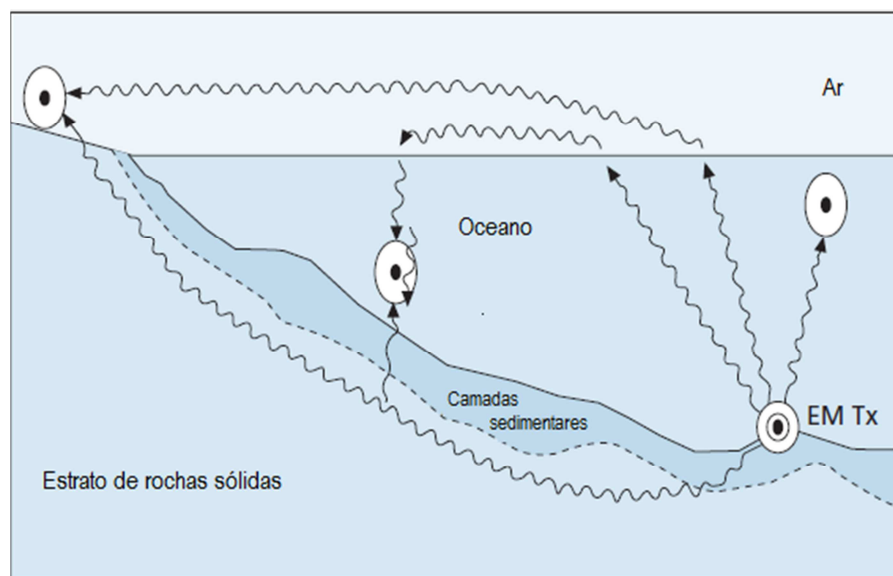


Figura 2.4: Propagação RF debaixo de água usando vários caminhos

Por exemplo, se duas estações estão afastadas pela distância de 1 Km e a uma profundidade de 2 m abaixo da superfície, a atenuação será significativamente mais baixa do que aquela que será de esperar para a distância de 1 Km quando a propagação ocorre essencialmente debaixo de água.

Pares de antenas em anel são a solução mais compacta para sistemas submersos do tipo *duplex*. As antenas em anel são direcionais por natureza, podendo esta propriedade ser explorada para permitir a seleção de um único caminho de propagação. Alternativamente, podem ser usadas antenas omnidirecionais cruzando os dois anéis. Um anel de maior dimensão resultará num ganho maior, no entanto, por uma questão prática, os sistemas são desenhados usando anéis relativamente pequenos.

Os benefícios dos sinais eletromagnéticos quando aplicados a sensores, comunicação e navegação estão mencionados na tabela 2.2. A tabela 2.3 sumariza alcances e exemplos de *bit rates* para sistemas de comunicação compactos a funcionar debaixo de água.

	Características
Desempenho	Atravessa a fronteira água/ar Possibilidade de caminhos múltiplos Eficiência elevada (joules/bit) <i>Data rates</i> elevados para distâncias curtas Velocidade elevada de propagação
Fiabilidade	Não é afetada por gradientes de pressão Imune ao ruído acústico Não é afetada por baixa visibilidade
Implementação	Não necessita de repetidores à superfície Pequenas-a-médias antenas têm um desempenho aceitável Não se conhecem efeitos em animais marinhos

Tabela 2.2: Vantagens da tecnologia RF-EM subaquática

Alcance	<10 m	50 m	200	>1 Km
Água do mar	>8 Kb/s	300 b/s	25 b/s	<1 b/s
Água doce	>3 Mb/s	150 Kb/s	9 Kb/s	<350 b/s

Tabela 2.3: Exemplos de *data rates* para potenciais alcances da tecnologia RF-EM subaquática

## 2.2 Aplicações das comunicações rádio em meio subaquático

A utilização de ondas eletromagnéticas em meios subaquáticos apresenta várias aplicações entre as quais podemos destacar:

- Controlo de UUVs em tempo real a partir da costa, submarinos e embarcações à superfície;
- Transferência de dados a alta velocidade entre UUVs e embarcações à superfície;
- Comunicação entre UUVs e sensores marítimos;
- Sistemas de navegação distribuídos UUV para portos com baixa profundidade;
- Redes marítimas;
- Transmissão de sensores submersos para a costa sem a necessidade de repetidores à superfície;
- Comunicação entre mergulhadores (voz e texto);
- Navegação subaquática;
- Utilização de sensores subaquáticos.

### 2.3 Produtos comercializados para comunicações subaquáticas

Os produtos comercializados pela *WFS Technologies* apresentam *data rates* da ordem dos 100 bit/s para distâncias até 30m, 25-156 Kbps para distâncias entre 2m - 10m e 1,2 Kbps (*full duplex*) para distâncias até 1,5m. Estes produtos apresentam um consumo energético elevado.



Figura 2.5: Exemplo de equipamento comercializado pela WFS Technologies

## 2.4 Direções de investigação atuais

- Simulações em computador para a propagação de ondas eletromagnéticas em águas pouco profundas e implementação de antenas para teste das suas características para funcionamento subaquático;
- Estudo de antenas do tipo dipolo e em anel, em termos de frequência, impedância e eficiência de radiação;
- Desenvolvimento de um transmissor impermeável com ajustamento de frequência;
- Trabalho de campo para avaliar a resposta em frequência do canal subaquático a diferentes profundidades, distâncias e posicionamento relativo da antena;
- Investigação de modulações sofisticadas, baseadas em técnicas de *spread-spectrum*.



# Capítulo 3

## Materiais e métodos

Para alcançar os objetivos pretendidos com este trabalho foi desenvolvido o equipamento composto por duas antenas em anel, duas caixas estanques, duas peças de interligação das antenas às caixas e o circuito emissor.

### 3.1 Antenas

As antenas escolhidas apresentam o formato em anel. As antenas em anel são antenas simples, baratas e muito versáteis. A antena em anel é bastante popular graças à sua simplicidade de construção e análise. As antenas em anel são classificadas normalmente em duas categorias, eletricamente pequenas e eletricamente grandes. As antenas eletricamente pequenas são aquelas onde o comprimento total (número de espiras a multiplicar por o perímetro de cada espira) é usualmente menor do que aproximadamente um décimo do comprimento de onda. Por outro lado, anéis eletricamente grandes são aqueles cujo perímetro é da ordem de grandeza do comprimento de onda.

À frequência de 10 MHz temos um comprimento de onda em água doce igual a 3.3 m e um comprimento de onda em água salgada igual a 0,5 m.

Atendendo que as antenas escolhidas apresentam um perímetro médio de 0.34 m e 10 espiras, para aumentar impedância, podemos considerá-las eletricamente pequenas sendo o perímetro francamente menor em água doce, e sendo apenas um pouco menor em água salgada. Antenas em anel com pequenos perímetros possuem resistências de radiação pequenas sendo estas usualmente menores do que as resistências de perdas. Para o mesmo perímetro do anel, a resistência de radiação pode ser aumentada, aumentando o número de voltas, tendo sido utilizadas 10 voltas, de tamanhos distintos, ainda que próximos.

As antenas com o formato em anel excitam diretamente o campo magnético, conduzindo a dimensões menores a baixas frequências. A utilização de anéis concêntricos de múltiplos raios permite versatilizar a frequência de melhor desempenho. A opção de implementação das antenas em placas PCB facilita o seu processo de fabrico, permite uma fácil replicação e isolamento da água, na sua proximidade.

As antenas em anel foram desenhadas recorrendo ao programa de desenho *Auto-CAD*. O desenho é composto por cinco espiras da espessura de 2,8 mm separadas da distância de 5,2 mm. A origem das espiras contém de cada um dos lados um pequeno quadrado para permitir a soldagem de um conector SMA fêmea. O desenho original possui aproximadamente as dimensões de uma folha A4.

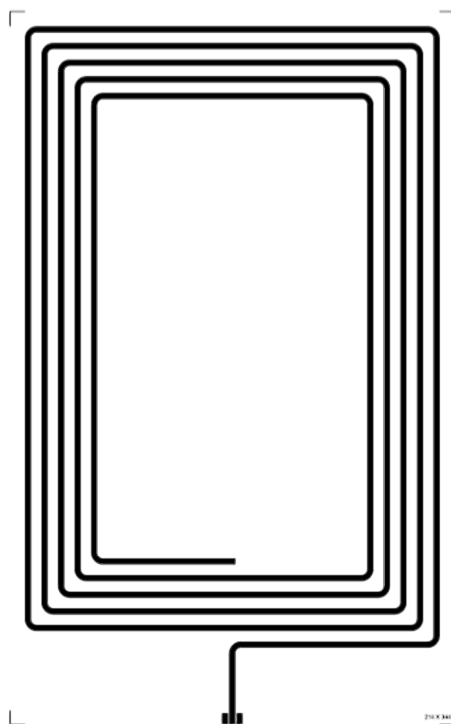


Figura 3.1: Desenho da antena em anel

---

O desenho foi de seguida, guardado num ficheiro imagem de alta resolução (4096x4096).

Tendo como base o desenho referido, as antenas foram implementadas em placas PCB, na oficina de electrónica da FEUP, de forma a poderem ser facilmente replicáveis no caso de as experiências serem bem-sucedidas. As espiras foram gravadas dos dois lados das placas obtendo-se assim uma dupla espiral. Foi realizado um furo na zona terminal das espirais tendo-se de seguida soldado um pequeno fio de cobre com o intuito de as unir. No início das espirais foi soldado um conector SMA fêmea em cada uma das antenas.

### 3.2 Peça de interligação das antenas às caixas estanques

Foi desenhada uma peça, que permitiu a ligação das antenas às caixas estanques, recorrendo ao programa de desenho *SolidWorks*. As peças foram construídas nas oficinas do Departamento de Mecânica da Escola Secundária Infante D. Henrique.

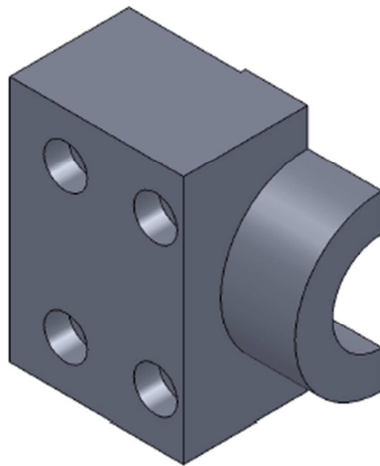


Figura 3.2: Desenho da peça de ligação da antena à caixa estanque

---

As peças possuem uma reentrância para encaixe das placas PCB, um furo para acesso aos conectores das antenas e parafusos de aperto.

### 3.3 Caixas estanques e ligação às antenas

Depois de alguma pesquisa adquiram-se duas caixas em acrílico, de forma cilíndrica, numa superfície comercial.

Tendo sido efetuados testes de estanquidade das caixas, procedeu-se à ligação destas às antenas através das peças referidas anteriormente.

Para esse efeito, começou-se por unir as peças às antenas dando aperto aos parafusos. Seguidamente fez-se um furo na base de cada uma das caixas de forma a encaixar a peça de interligação. Uniram-se as peças às caixas usando cola tendo o cuidado de preencher todas as ranhuras de forma a evitar uma possível entrada de água nas experiências futuras. Depois da cola secar, deram-se quatro demãos de verniz ISOFLEX de forma a impermeabilizar todo o conjunto.



Figura 3.3: Antena ligada à caixa estanque

### 3.4 Circuito emissor

O circuito emissor gera um sinal modulado em fase (BPSK) usando uma sequência pseudo-aleatória. A portadora é obtida através de um oscilador de cristal. A modulação é conseguida misturando a portadora com a sequência pseudo-aleatória através de uma porta lógica XOR. O sinal de relógio do circuito que gera a sequência pseudo-aleatória é obtido fazendo passar o sinal do oscilador por um divisor de frequência ( $\div 64^2$ ).

O sinal modulado obtido é submetido a um filtro passa banda e de seguida é amplificado ficando apto a ser injetado na antena do emissor. O diagrama de blocos do circuito emissor pode ser observado na figura 3.4. A frequência da portadora é da ordem da dezena de MHz, para garantir uma velocidade de propagação suficientemente elevada e uma atenuação aceitável. A sequência pseudo-aleatória escolhida repete-se a cada 4095 ciclos para garantir um ganho bom relativamente ao ruído bastante elevado. A frequência da sequência é da ordem de poucos kHz, para poder ser recebido pelo canal áudio de um computador ligado a um recetor de rádio. O uso da sequência pseudo-aleatória confere uma melhor relação sinal/ruído. Quanto maior for a sequência melhor será essa relação, no entanto, possui a contrapartida do tempo de transmissão aumentar na mesma proporção.

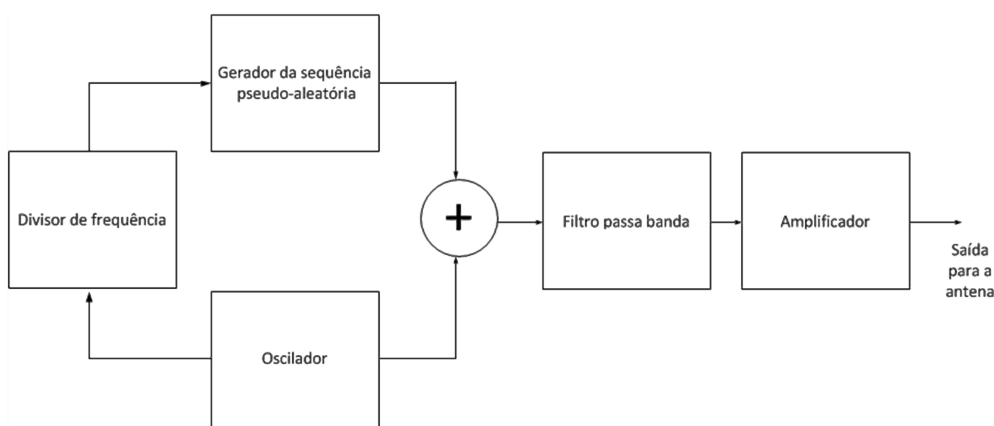


Figura 3.4: Diagrama de blocos do sistema emissor

A sequência pseudo-aleatória usada para modular a portadora é construída com “*linear feedback shift registers*”. A sequência escolhida corresponde ao polinómio  $1+x^6+x^8+x^{11}+x^{12}$ , utilizado na geração do código-P, no sistema de navegação por satélite GPS.

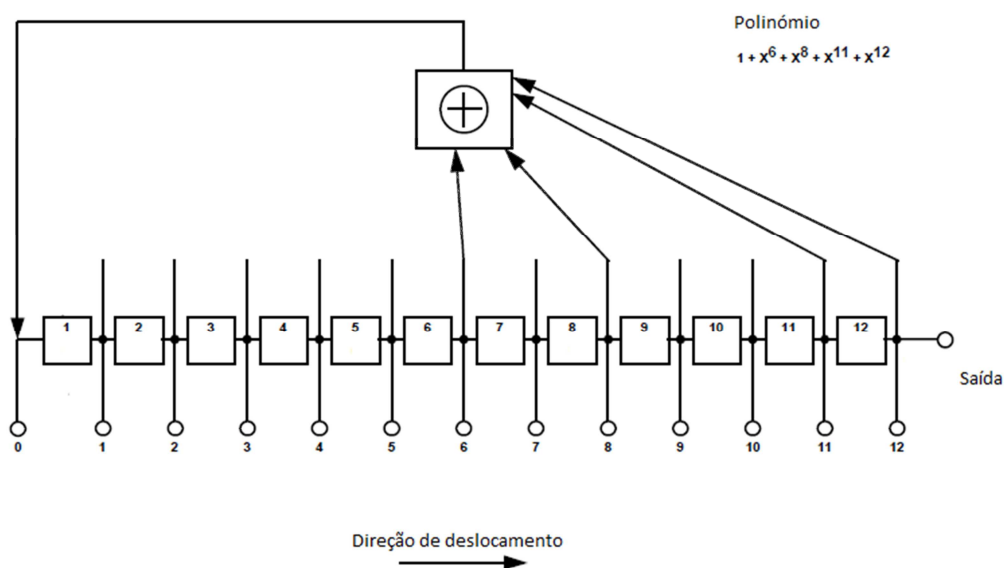


Figura 3.5: Configuração dos “linear feedback shift registers” para a geração da sequência pseudo-aleatória

Na figura 3.6 podemos observar um segmento da sequência pseudo-aleatória usada captada a partir de um computador portátil, usando um cabo e a ferramenta Matlab.

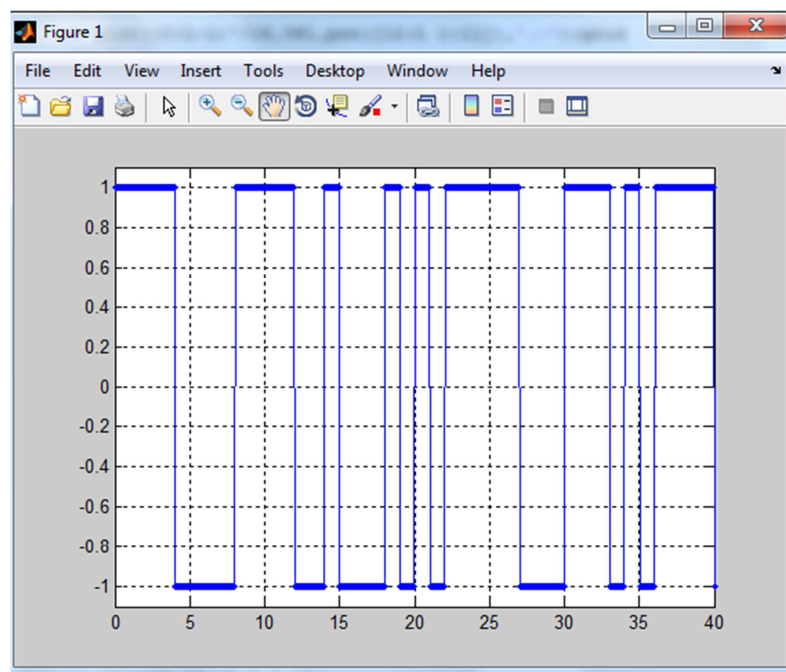


Figura 3.6: Segmento da sequência pseudo-aleatória utilizada (primeiros 40 dos 4095 ciclos)

Nas abcissas, cada unidade representa o tempo referente a um ciclo de relógio no circuito que gera a sequência. Uma vez que a sequência se repete a cada 4095 ciclos e a velocidade de relógio é de  $10 \text{ MHz} / 64^2 = 2,44 \text{ kHz}$ , frequência da portadora depois de passar pelo divisor de frequência, a duração da sequência é de aproximadamente 1,67 s. Atendendo que a placa de som do computador portátil usa uma frequência de amostragem de 44100 Hz são necessárias 73969,45 amostras para representar a sequência. Na realidade foram usadas 73960 amostras devido a pequenas diferenças nas frequências de referência dos sinais de relógio do gerador da sequência e da placa de som.

A energia do sinal depende da sua potência e do tempo. A energia do ruído depende da sua potência, do tempo e da largura de banda. Se optássemos por transmitir apenas a portadora ter-se-ia uma baixa largura de banda e conseqüentemente menos ruído, mas não existiria ganho na deteção do sinal ao fazer a correlação do sinal recebido com a portadora e as hipóteses de detetar uma interferência externa à frequência da portadora seriam não descartáveis. Ao utilizar-se uma sequência pseudo-aleatória a largura banda aumenta e conseqüentemente também o ruído; contudo, ao recorrer à correlação do sinal recebido com a sequência pseudo-aleatória obtém-se um ganho na relação de potência entre o sinal e o ruído igual ao comprimento desta, neste caso de 4095. A vantagem da utilização da sequência reside na garantia que o sinal recebido não provém de qualquer outra fonte.

Com a modulação BPSK pretendeu-se deslocar a sequência pseudo-aleatória em banda base para a frequência de 10 MHz. Esta operação corresponde a fazer a convolução do espectro da sequência pseudo-aleatória com o impulso de Dirac a +10 MHz e -10 MHz. A convolução no domínio das frequências corresponde à multiplicação no domínio dos tempos, ou seja, consiste em multiplicar a portadora por +1 e -1, consoante a sequência. Por outras palavras, é equivalente a manter a portadora quando o valor da sequência é +1 e usar o simétrico da portadora quando o valor da sequência vale -1. Uma forma simples e prática para obter este resultado consiste em fazer a operação XOR entre a portadora e a sequência. De notar que quando a operação XOR é feita o sinal da portadora é essencialmente uma onda quadrada. A posterior passagem do sinal pelo filtro passa banda centrado na frequência de 10 MHz dá origem ao equivalente a uma onda sinusoidal modulada em fase pela sequência pseudo-aleatória.

A figura 3.7 mostra o desenho do circuito que gera a sequência pseudo-aleatória. São utilizados três circuitos integrados, um *shift register* universal de 4 bit (DM74LS194A) em cascata com um *shift register* universal de 8 bit (DM74LS164) e o HD74LS86P que dispõem de quatro portas lógicas XOR para efetuar a realimentação que pode ser observada na figura 3.5. A resistência em conjunto com o condensador despoletam o início da sequência.

O sinal de relógio é obtido a partir do circuito com um cristal de quartzo, usado para gerar a portadora, depois de passar por um divisor de frequência. A figura 3.8 ilustra o desenho do circuito que gera a portadora a partir de um cristal de quartzo, obtém o sinal de relógio para alimentar os *shift registers* usando o divisor de frequência, mistura a sequência pseudo-aleatória com a portadora e faz passar o sinal modulado por um filtro passa banda.

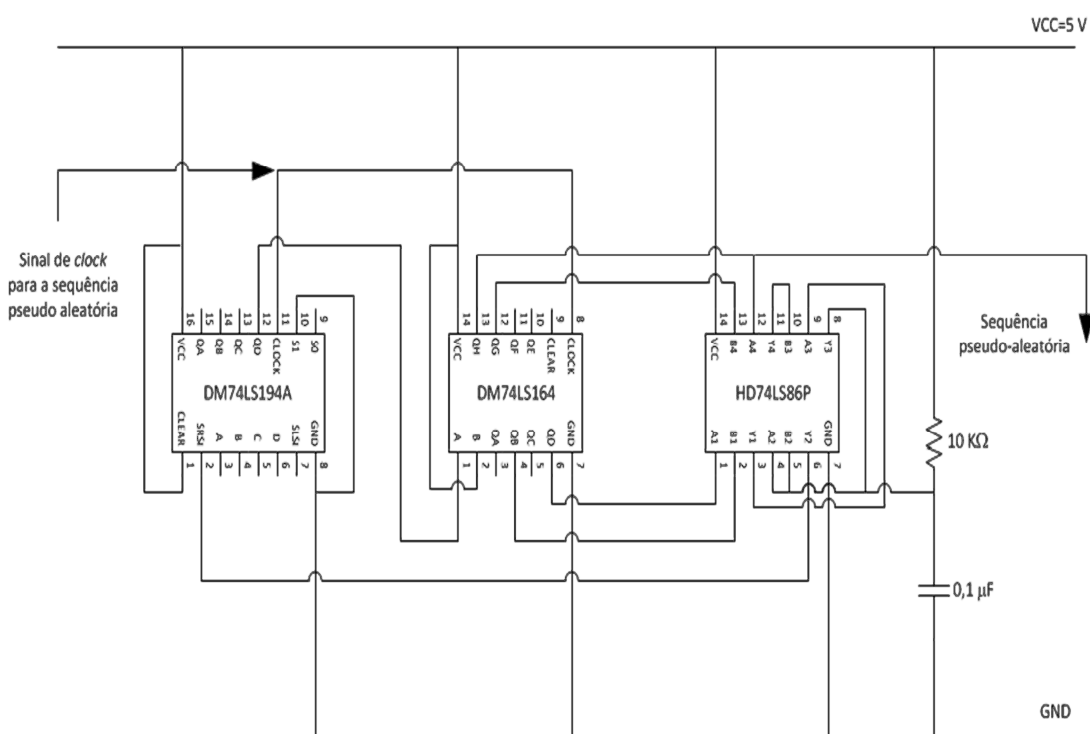


Figura 3.7: Circuito usado para gerar a sequência pseudo-aleatória

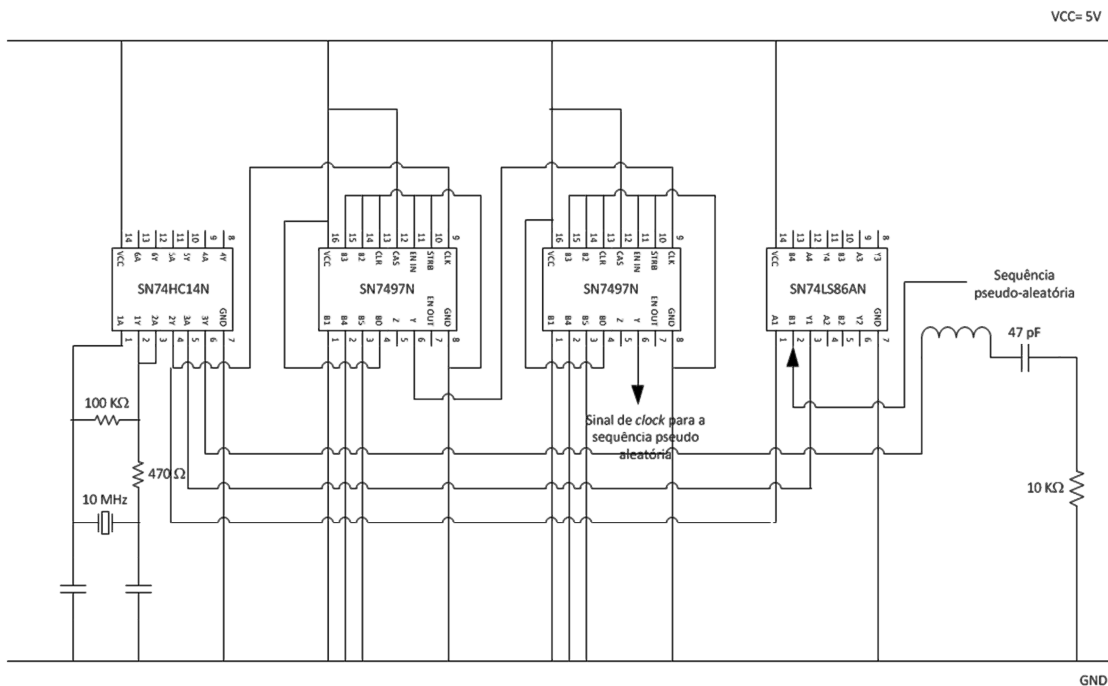


Figura 3.8: Circuito usado para gerar a portadora, o sinal de relógio para a sequência pseudo-aleatória, a mistura da portadora com a sequência pseudo-aleatória e o filtro passa banda

O circuito integrado SN74HC14N possui no total seis *schmitt trigger* dos quais são utilizados três, dois para o circuito que gera a portadora a partir do cristal de quartzo e um para a saída da porta XOR que mistura a portadora com a sequência pseudo-aleatória. Estes componentes servem de *buffer* (isolam as entradas das saídas). Verificou-se que com a sua utilização se geravam ondas com um formato mais perfeito à sua saída.

Os dois circuitos integrados SN7497N implementam um divisor de frequência. Neste caso, o sinal da portadora é dividido por  $64^2$ , ou seja, na saída obtém-se um sinal com aproximadamente 2,4 KHz. Este sinal é usado como sinal de relógio para alimentar os *shift registers*.

O circuito SN74LS86AN dispõem de quatro portas XOR das quais é utilizada uma para misturar a portadora com a sequência pseudo-aleatória. Esta mistura resulta na modulação da portadora em fase.

A saída da porta XOR passa por um *schmitt trigger* e, de seguida, por um filtro passa banda. A utilização do filtro permite obter à saída um sinal aproximadamente sinusoidal. O filtro passa banda é implementado por um circuito RLC. A indutância foi construída de forma a ter um valor aproximado de 5  $\mu$ H para centrar o filtro em torno da frequência de 10 MHz.

O sinal à saída do filtro dá entrada num amplificador e, de seguida, é injetado na antena. O circuito do amplificador pode ser observado na figura 3.9.

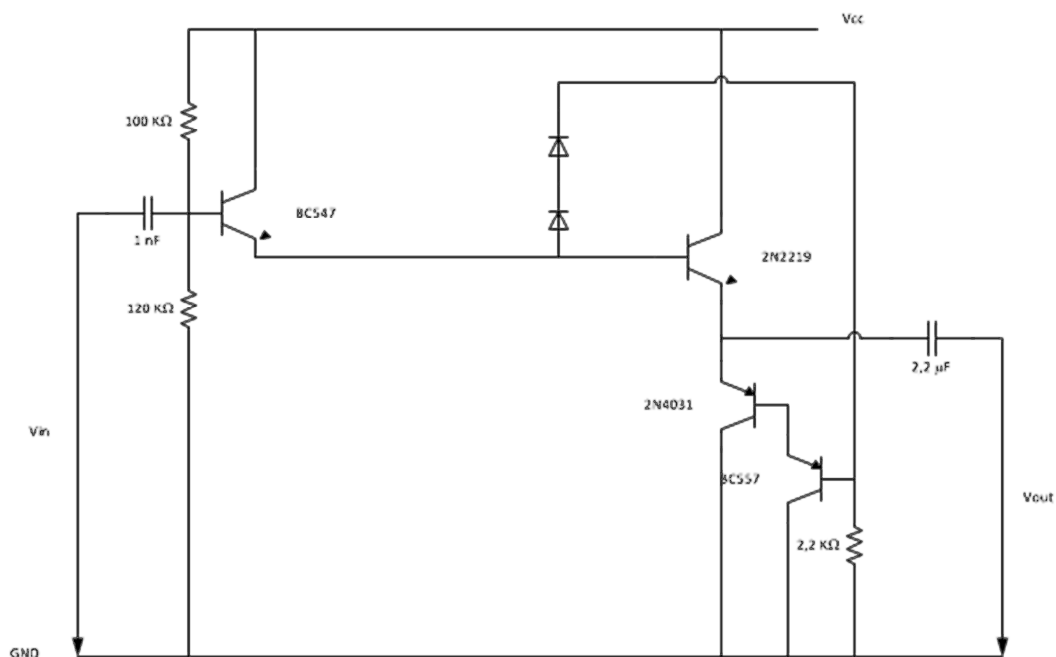


Figura 3.9: Circuito do amplificador

Na montagem do circuito amplificador podemos observar que o primeiro transístor (BC547) está montado em coletor comum apresentando uma elevada impedância de entrada e uma baixa impedância de saída, mas, ainda é inapropriado para injetar sinal na antena. De seguida, aparece no circuito uma montagem *push-pull* com um par de transístores NPN (2N2219) e PNP (2N4031). A base do transístor PNP (2N4031) é atacada por um transístor NPN (BC557) em coletor comum. Este transístor com o transístor 2N4031 forma um par Darlington para aumentar o ganho e para fazer com que a resistência de 2,2 K $\Omega$  seja suficientemente baixa para forçar o transístor 2N4031 a conduzir mediante uma impedância da antena baixa. Não foi necessário usar o par Darlington no transístor 2N2219 porque o transístor BC547 consegue atacar diretamente este transístor.

### 3.5 Caracterização dos sinais no sistema de comunicações

Através do osciloscópio, no domínio dos tempos, observaram-se os vários sinais envolvidos no sistema de comunicações implementado.

A portadora, gerada pelo oscilador de cristal, apresenta um período de 100 ns correspondente a uma frequência de 10 MHz.

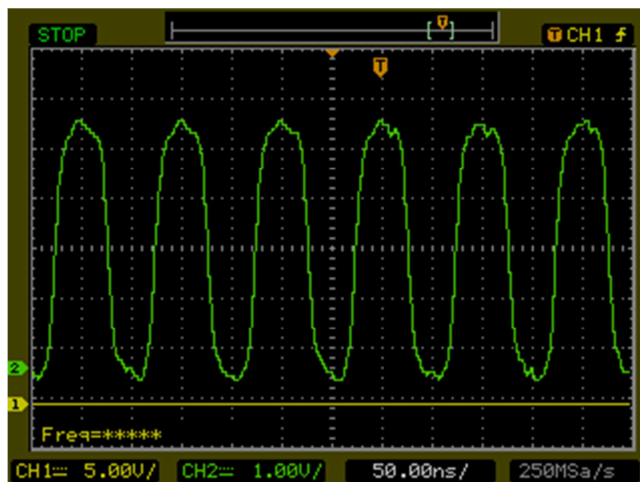


Figura 3.10: Forma de onda da portadora

O comprimento de onda, de acordo com a equação (9), apresenta um valor de 10 m, considerando a condutividade da água doce igual a 0,01 S/m e um valor de 0,5 m considerando a condutividade da água salgada igual a 4 S/m.

A sequência pseudo-aleatória gerada pelos “*linear feedback shift registers*” encontra-se representada na figura 3.11 e o sinal de relógio que alimenta este circuito na figura 3.12.

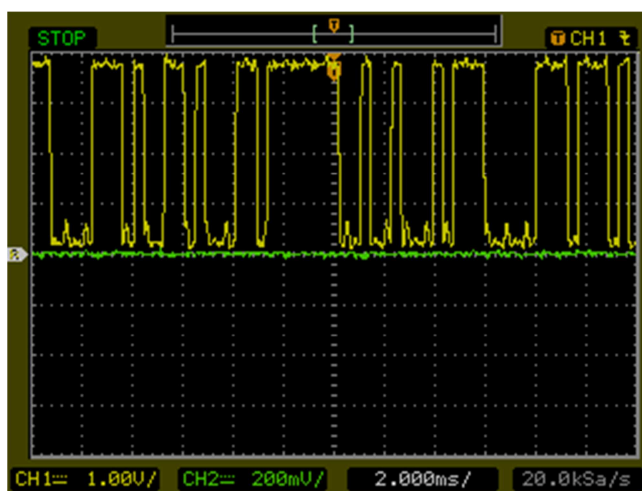


Figura 3.11: Forma de onda da sequência pseudo-aleatória

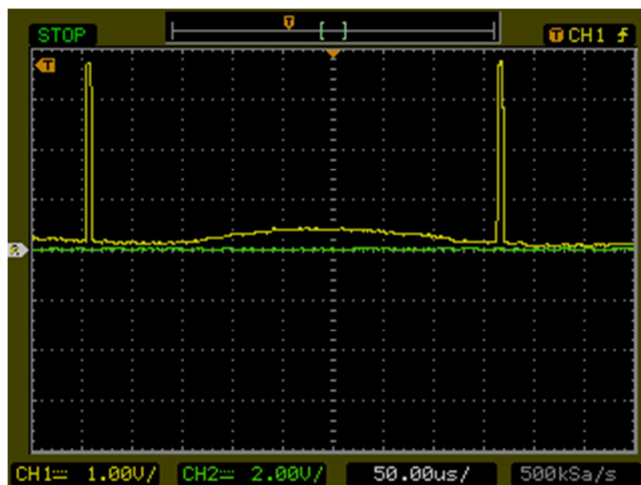


Figura 3.12: Forma de onda do sinal de relógio do circuito que gera a sequência pseudo-aleatória

A figura 3.13 apresenta forma de onda do sinal à saída do amplificador, sinal este, que é injetado na antena.



Figura 3.13: Forma de onda do sinal à saída do amplificador

Na figura 3.14 podemos observar em pormenor a modulação de fase da portadora. Quando ocorre uma transição na sequência pseudo aleatória a fase da portadora é invertida.



Figura 3.14: Pormenor da modulação de fase da portadora pela sequência pseudo-aleatória

No domínio das frequências, foi possível observar, através do VNA, o espectro do sinal transmitido.

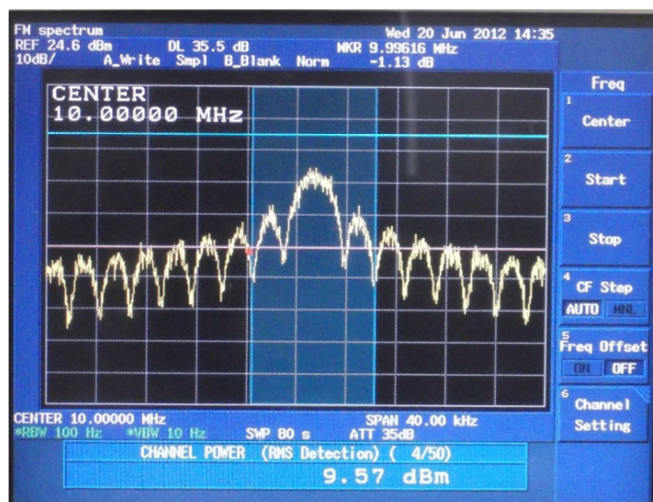


Figura 3.15: Espectro do sinal transmitido

Podemos verificar que o espectro do sinal transmitido apresenta um lóbulo principal e que os demais lóbulos são atenuados pela utilização do filtro passa banda.

### 3.6 Cálculo da potência de emissão

A potência de emissão pode ser calculada a partir da análise do circuito que se segue:

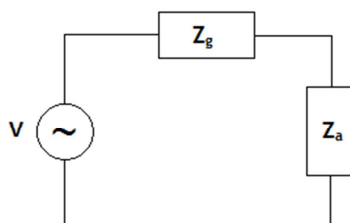


Figura 3.16: Circuito equivalente usado no cálculo da potência de emissão

O par gerador ideal / impedância  $Z_g$  representa as características fundamentais de saída do amplificador de potência construído para injetar o sinal modulado na antena.  $Z_g$  é, portanto, a impedância de saída do amplificador e  $Z_a$  é a impedância da antena.  $Z_g$  foi medido experimentalmente utilizando um VNA tendo-se obtido o valor de  $Z_g = 45 + j12 \Omega$ .  $Z_a$  foi identicamente medido com a antena submersa em água doce e água salgada, tendo-se obtido respectivamente  $Z_{ad0} = 22 - j72 \Omega$  e  $Z_{as0} = 25 - j70 \Omega$  para água doce e salgada. Não existindo diferença significativa entre ambos, compensou-se a antena no sentido de aproximar a impedância da mesma do conjugado de  $Z_g$ , conforme justificação mais abaixo. Instalou-se uma bobine em série com a antena, tendo-se obtido  $Z_a = 35 - j20 \Omega$ , já depois de feita a adaptação de impedâncias (a calibração foi feita com água salgada, dado ser um meio com maior condutividade, de onde decorre maior atenuação, pelo que a necessidade de injeção de potência é mais relevante).

A corrente e a tensão na antena são dadas por:

$$I_a = \frac{V}{Z_g + Z_a}$$

$$V_a = Z_a I_a$$

Tendo-se medido o sinal de tensão aos terminais da antena e tendo-se constatado que este apresentava um valor eficaz de 3 V, verifica-se que a potência irradiada pela antena, fora perdas que não é possível quantificar, é dada por:

$$P_a = \operatorname{Re}(V_a I_a^*) = \operatorname{Re}(Z_a I_a I_a^*) = \operatorname{Re}(Z_a) |I_a|^2 = \operatorname{Re}(Z_a) \frac{|V_a|^2}{|Z_a|^2} = 0,19 \text{ W} = -7 \text{ dBW} = 23 \text{ dBmW}$$

Na situação ideal, onde existe uma adaptação de impedâncias ótima, é entregue à antena a potência máxima. Nesta altura podemos observar o seguinte:

$$\operatorname{Im}(Z_a) = -\operatorname{Im}(Z_g)$$

$$P_a = \frac{V^2 \operatorname{Re}(Z_a)}{(\operatorname{Re}(Z_g) + \operatorname{Re}(Z_a))^2}$$

Fazendo,

$$\frac{\partial P_a}{\partial \operatorname{Re}(Z_a)} = 0$$

Obtém-se,

$$\operatorname{Re}(Z_a) = \operatorname{Re}(Z_g)$$

e

$$P_{a \max} = \frac{1}{4} \frac{V^2}{\operatorname{Re}(Z_g)}$$

Uma vez que não se conseguiu realizar uma adaptação de impedâncias ideal, podemos calcular o rendimento entre a potência efetivamente entregue à antena e a potência máxima:

$$\eta = \frac{P_a}{P_{a \max}} = \frac{4 \operatorname{Re}(Z_g) \operatorname{Re}(Z_a)}{|Z_g + Z_a|^2} = 97.5\%$$

---

Note-se que  $P_a$ , relativamente a  $V$ , é dada por:

$$P_a = \operatorname{Re}(Z_a) \frac{V^2}{|Z_g + Z_a|^2}$$

Ainda que não seja ideal, a adaptação de impedâncias obtida é perfeitamente satisfatória perante a impedância de saída obtida para o amplificador de potência que foi construído. Estima-se, como acima referido, que a potência injetada na água é cerca de 200 mW, correspondendo a cerca de  $-7$  dBW.



# Capítulo 4

## Resultados

As primeiras experiências foram realizadas em água doce, na piscina da FEUP. Para o efeito, com a ajuda de uma âncora, submergiu-se o conjunto constituído pela antena e a caixa com o emissor. A outra parte, a antena recetora em conjunto com a caixa contendo o cabo de ligação ao recetor de rádio, foi submersa adicionando na caixa uma massa metálica constituída à base de parafusos. O recetor de rádio foi ligado a um computador portátil para a aquisição e processamento dos sinais transmitidos durante as experiências.

O segundo conjunto de experiências realizou-se no mar, junto à costa de Sesimbra, a bordo de uma embarcação, no âmbito de um protocolo estabelecido entre o INESC - Porto e a Marinha Portuguesa.

A figura 4.1 mostra a disposição do equipamento usado nos dois conjuntos de experiências

As experiências realizadas serviram para o teste do desempenho do sistema de comunicação subaquático explorando várias variáveis, tais como, a distância entre as antenas, a profundidade e o posicionamento relativo das antenas.

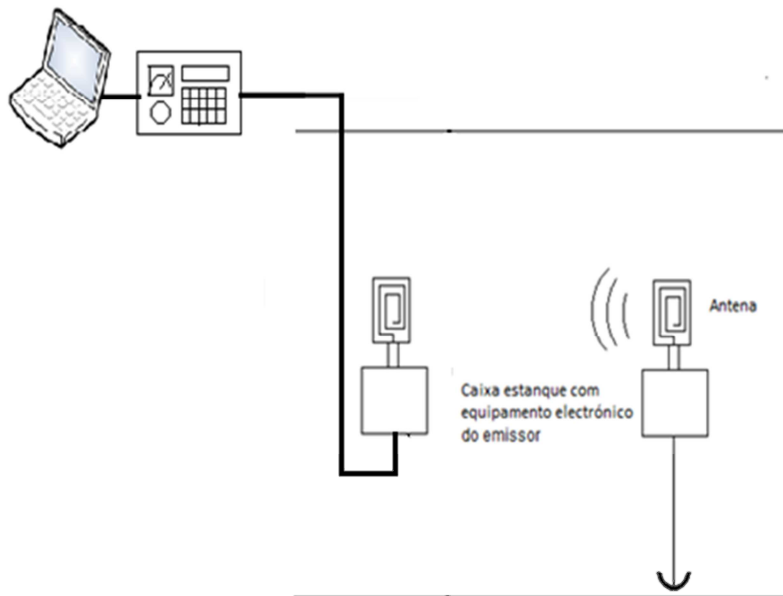


Figura 4.1: Equipamento usado nas experiências

Na realização de cada teste procedeu-se da seguinte forma:

- Sintonizou-se o recetor de rádio para uma frequência aproximadamente a 6 KHz abaixo da frequência da portadora do emissor (10 MHz). O recetor de rádio possui uma desmodulação USB (*Upper Side Band*) apresentando à saída frequências na faixa dos 100 Hz aos 20 KHz;
- Depois da desmodulação USB, obteve-se um sinal referente a uma onda sinusoidal com frequência de 6 KHz modulada pela sequência pseudo-aleatória;
- Capturou-se o sinal recebido a partir da placa de som do computador portátil usando o comando da ferramenta Matlab  $y = wavrecord(L,fs,2); y = y(:,1);$  Recorreu-se a um ciclo *for* para verificar a que frequência (fmax) a correlação entre o sinal recebido e a sequência pseudo-aleatória era máxima. O ciclo de frequência torna-se necessário devido às flutuações das frequências do gerador do sinal da portadora e da referência do recetor de rádio. Na realidade, bastaria para deteção da frequência usar um intervalo entre frequências igual a um sobre a duração da sequência pseudo-aleatória. Usou-se um intervalo menor para salientar melhor o pico na correlação.

```
prn_f = fft(prn);  
ff = [6370:0.25:6390];  
MX = 0;  
for fk = ff;  
    mx = max(abs(iff(conj(prn_f).*fft(y.*exp(-j*2*pi*(0:L-1)'/fs*fk)))));  
    if mx > MX  
        MX = mx;  
        fmax = fk;  
    end  
end  
fmax
```

- Construiu-se o gráfico da correlação entre o sinal recebido e a sequência pseudo-aleatória.

## 4.1 Resultados obtidos na piscina da FEUP

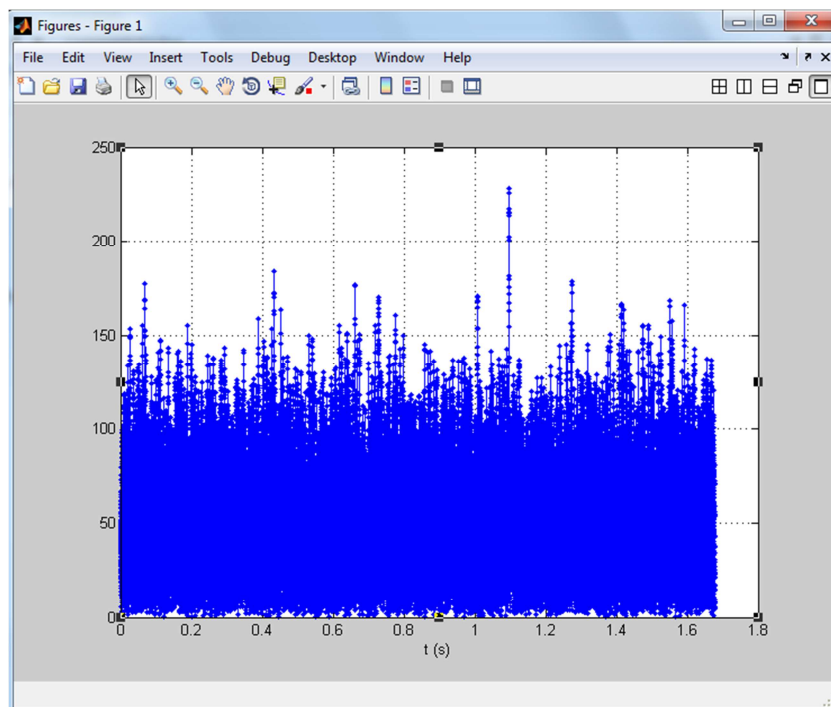


Figura 4.2: Correlação para distância intermédia a profundidade máxima sem antena no emissor (fmax=6425 Hz)

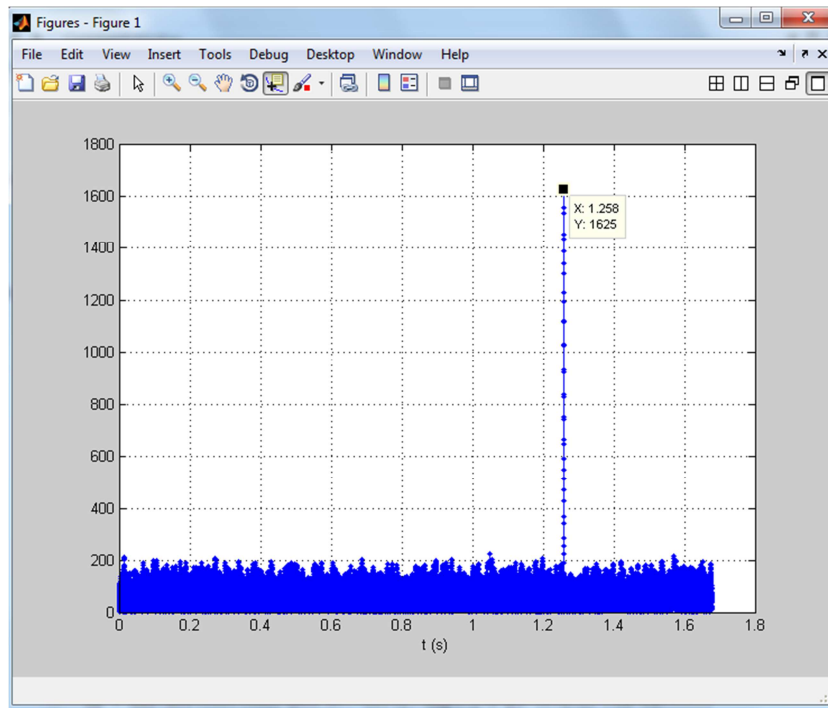


Figura 4.3: Correlação para distância intermédia a profundidade máxima ( $f_{max}=6432$  Hz)

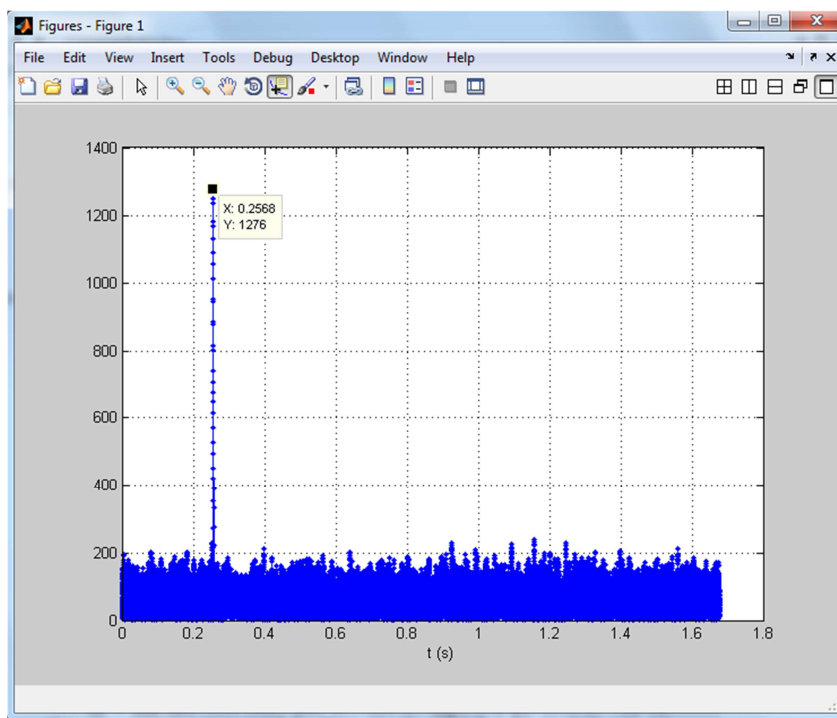


Figura 4.4: Correlação para distância máxima a profundidade máxima ( $f_{max}=6427$  Hz)

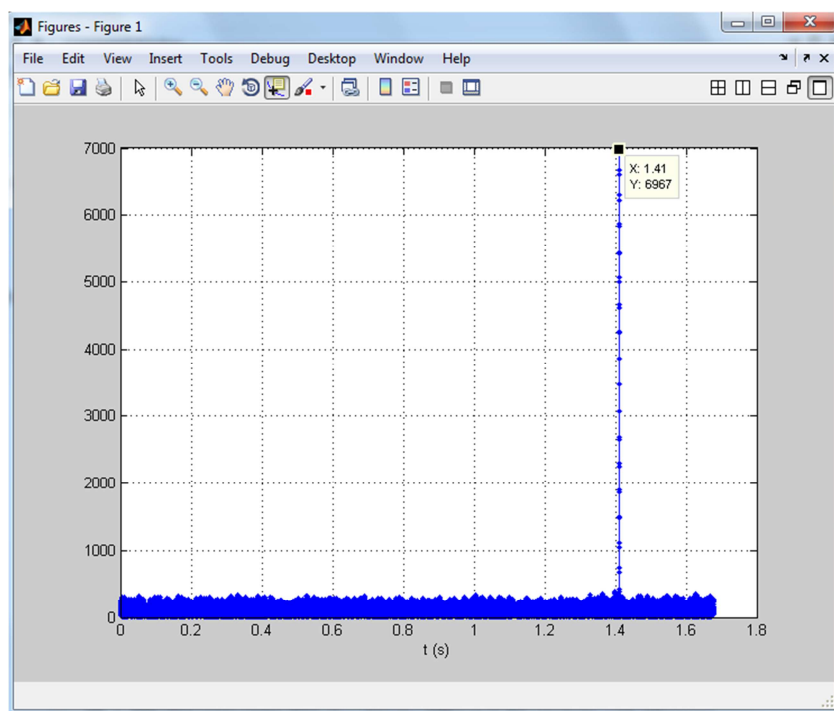


Figura 4.5: Correlação para distância curta a profundidade máxima ( $f_{max}=6420$  Hz)

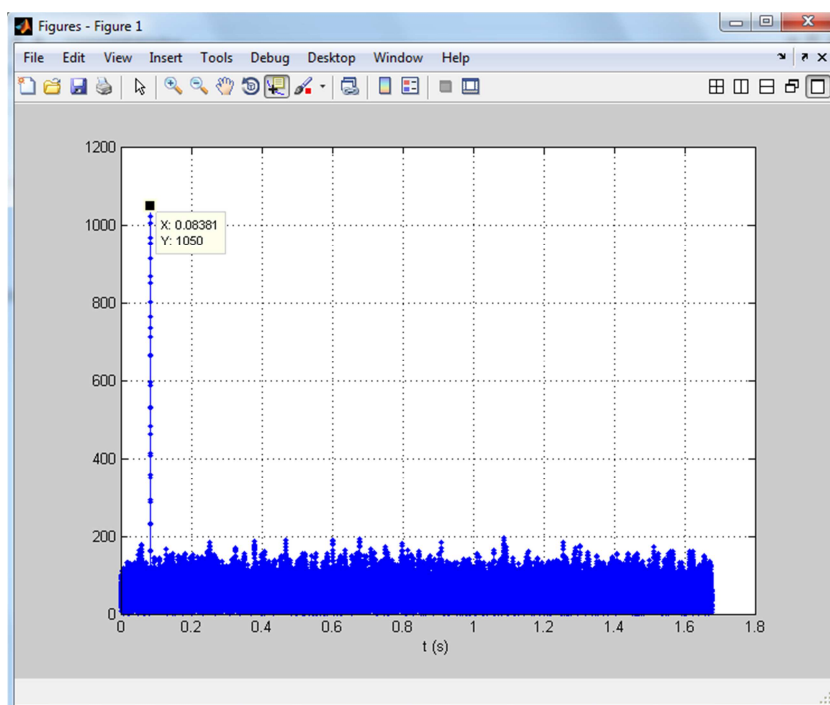


Figura 4.6: Correlação estando a antena recetora a deslocar-se entre a distância intermédia e a distância máxima a profundidade máxima ( $f_{max}=6421$  Hz)

Na sequência destas primeiras experiências pode-se constatar que:

- Aumentando a distância entre o emissor e o recetor a intensidade da detecção do sinal diminui;
- Para a mesma distância entre o emissor e o recetor aumentando a profundidade a intensidade da detecção do sinal diminui;
- Para a mesma distância entre o emissor e o recetor mudando a orientação relativa das antenas nota-se uma diferença significativa na detecção do sinal.

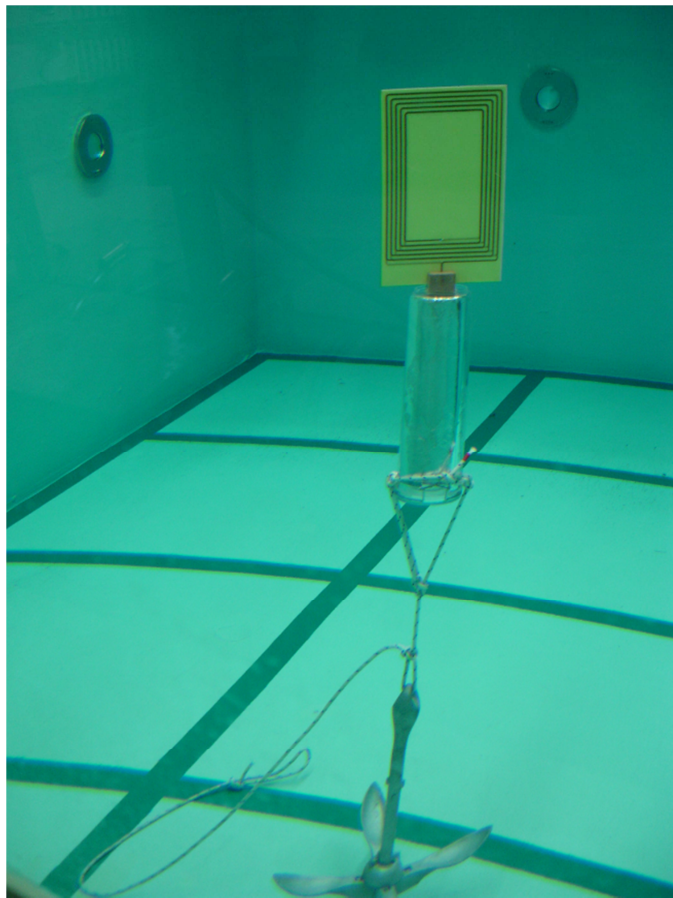


Figura 4.7: Equipamento a operar na piscina da FEUP

## 4.2 Resultados obtidos no mar junto à costa de Sesimbra

Com a operação do equipamento no mar conseguiu-se a deteção de sinal para a distância máxima de 3 m a uma profundidade aproximadamente igual a 2 m.

Constatou-se que as antenas apresentavam uma elevada diretividade. Este facto associado à agitação das ondas e às correntes do mar dificultaram a deteção de sinal durante longos períodos de transmissão.

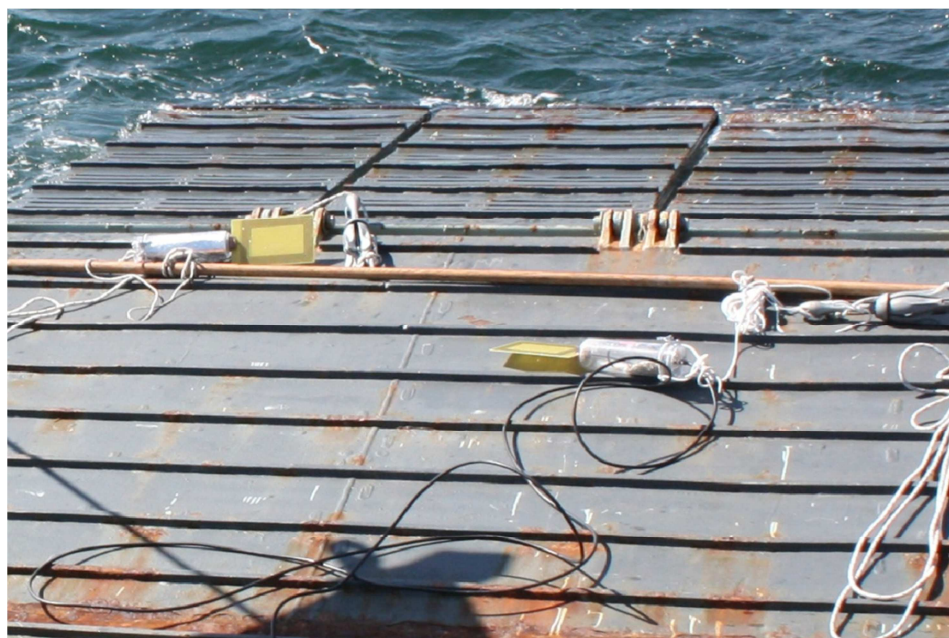


Figura 4.8: Equipamento a bordo da embarcação da Marinha Portuguesa

## 4.3 Comparação de distâncias teóricas com os resultados obtidos

Consultando o manual do recetor de rádio utilizado, verificou-se que na gama de 2 MHz a 20 MHz este apresentava uma sensibilidade de  $0.4 \mu\text{V}$  para 12 dB de relação sinal/ruído numa largura de banda de 3 kHz, usando desmodulação SSB. O valor de 12 dB, correspondente a uma relação linear de 4 vezes entre o sinal e o ruído, é apropriado como limite de deteção para este trabalho.

A potência limite que pode ser detetada na receção, de acordo com a sensibilidade do recetor, é determinada da seguinte forma:

$$P_{\text{limite receção}} = 10 \log_{10} \left( \frac{(0.4 * 10^{-6})^2}{50} \right) = -145 \text{ dBW}$$

A potência transmitida pela antena,  $P_a$ , calculada no capítulo anterior, apresenta o valor de  $-7$  dBW.

O valor de  $-145$  dBW diz respeito à receção de um sinal com uma relação sinal/ruído de  $12$  dB numa largura de banda de  $3$  kHz, conforme acima referido. Uma vez que se está a usar uma largura de banda do sinal rececionado de  $2 * 2.44 \text{ kHz}$ , valor superior a  $3$  kHz, este limiar de potência terá que ser superior. Tal pode ser descrito como uma perda associada ao aumento da largura de banda relativamente a  $3$  kHz, determinada por (o limiar de potência é proporcional à largura de banda):

$$P_{\text{largura de banda}} = 10 \log_{10} \left( \frac{2 * 2.44}{3} \right) = 2 \text{ dB}$$

Por outro lado, o ganho obtido pelo uso da sequência pseudo-aleatória pode ser obtido por (o ganho em potência relativamente ao ruído é igual ao comprimento da sequência):

$$G_{\text{sequência}} = 10 \log_{10}(4095) = 36 \text{ dB}$$

Nestas condições, considerando  $P_{\text{água}}$  as perdas admissíveis na água, dever-se-á verificar a seguinte equação:

$$P_{\text{limite receção}} = P_a + G_{\text{sequência}} - P_{\text{largura de banda}} - P_{\text{água}}$$

Substituindo os valores conhecidos obtém-se  $P_{\text{água}} = -7 + 36 - 2 - (-145) = 172 \text{ dB}$

A equação da distância é dada por:

$$d = \frac{1}{\alpha} \frac{\ln(10)}{20} P_{\text{água}}$$

Observando o gráfico da figura 2.3, à frequência de 10 MHz, obtemos, para a atenuação de 100 dB, a distância de 55 m para água doce e a distância de 0,9 m para água salgada.

Atendendo à linearidade relativamente às perdas admissíveis na água, as distâncias máximas estimadas para água doce e água salgada são de 94.6 m e 1.5 m, respetivamente.

Estes valores estão de acordo com os resultados obtidos em água doce. De fato, os testes efetuados na piscina da FEUP, com cerca de 5 m de lado, permitiram o estabelecimento de comunicações entre quaisquer dois pontos da mesma.

Na água do mar os resultados obtidos apresentam uma distância de comunicação estável na ordem do metro, tendo-se ainda conseguido comunicar algumas vezes a 2 metros e esporadicamente a 3 m, o que é consistente em ordem de grandeza com os previsto teoricamente. A elevada diretividade das antenas utilizadas permitiu fazer com que as perdas dominantes estejam relacionadas com a condutividade da água.



# Capítulo 5

## Conclusões

Os resultados obtidos nas experiências efetuadas atestam a viabilidade do sistema de comunicações subaquático implementado em água doce, a baixa profundidade, e a curtas distâncias.

Poder-se-á pensar na continuidade do trabalho desenvolvido no futuro. Algumas áreas de investigação poderão passar por: testar o equipamento desenvolvido no rio, explorar uma modulação que permita a transmissão de dados, efectuar medições de diferenças de fase entre o emissor e o recetor para fins de localização, avaliar a influência do caminho de comunicação pelo ar e pelo leito nas comunicações subaquáticas e explorar a possibilidade de utilizar esta tecnologia para fazer o levantamento da morfologia do fundo de rios e mares.



# Referências

- [1] Balanis, Constantine A., *Antenna Theory: Analysis and Design*, Second Edition, 1997
- [2] Rhodes, Mark. *Electromagnetic Propagation in Sea Water and its value in Military Systems: Wireless Fibre Systems Ltd.* Disponível em: <http://www.docstoc.com/docs/2867858/RF-Communications-under-water> Acesso em: 14 fev. 2012
- [3] Abdou, A. A., A. Shaw, et al. (2011). Electromagnetic (EM) wave propagation for the development of an underwater Wireless Sensor Network (WSN). *Sensors*, 2011 IEEE.
- [4] Zhang, H., D. Geng, et al. (2011). The impact of antenna design and frequency on underwater wireless communications. *Communications, Computers and Signal Processing (PacRim)*, 2011 IEEE Pacific Rim Conference on.
- [5] Che, X., I. Wells, et al. (2010). "Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks." *Communications Magazine*, IEEE 48(12): 143-151.
- [6] Chakraborty, U., T. Tewary, et al. (2009). Exploiting the loss-frequency relationship using RF communication in Underwater communication networks. *Computers and Devices for Communication, 2009. CODEC 2009. 4th International Conference on.*
- [7] Uribe, C. and W. Grote (2009). *Radio Communication Model for Underwater WSN. New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, 2009 3rd International Conference on.
- [8] Yoshida, H., T. Aoki, et al. (2007). *Newly-developed Devices for The Two Types of Underwater Vehicles. OCEANS 2007 - Europe.*
- [9] Al-Shamma'a, A. I., A. Shaw, et al. (2004). "Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater." *Antennas and Propagation*, IEEE Transactions on 52(11): 2843-2849.
- [10] Boulanger, C., G. Loubet, et al. (1998). *Spreading sequences for underwater multiple-access communications. OCEANS '98 Conference Proceedings.*