



**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**  
**UNIVERSIDADE AUTÓNOMA DE LISBOA**  
**“LUÍS DE CAMÕES”**

**Estimação de Canal para Comunicações subaquáticas**  
**utilizando MIMO Massivo**

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Informática  
e de Telecomunicações

Autor: Stephan Manuel Zacarias Tiago

Orientador: Professor Doutor Mário Pedro Guerreiro Marques da Silva

Número do candidato: 30006128

**Março de 2023**

**Lisboa**

## RESUMO

O propósito desta dissertação de mestrado é demonstrar como a inserção das variáveis de ruído impulsivo e estimação de canal, afetam os sistemas de comunicações acústicos subaquáticos, associado à utilização de técnicas de múltiplas antenas (Multiple Input Multiple Output [MIMO]). Também tem como objetivo ilustrar como os sistemas MIMO tendem a comportar-se quando utilizam diferentes recetores, designadamente dois de baixa complexidade, o *Equal Gain Combiner* (EGC) e o *Maximum Gain Combiner* (MRC), e um de maior complexidade, o Zero Forcing. Cada um destes recetores foi analisado em diferentes cenários de ambiente, vários de níveis de correlação de canal entre antenas, e perante diferente número de antenas de transmissão e receção.

Esta dissertação tende ainda a demonstrar como mitigar os efeitos negativos que os sistemas MIMO apresentam relacionado com os altos níveis de correlação causado pelo insuficiente espaçamento entre as antenas, experimentado em comunicações acústicas subaquáticas.

**Palavra-chave: ruído impulsivo, estimação de canal, MIMO, UAC.**

## ABSTRACT

*The purpose of this master's dissertation is to demonstrate how the insertion of impulsive noise and channel estimation variables affect underwater acoustic communication systems, associated with the use of multiple-antenna techniques (Multiple Input Multiple Output [MIMO]). It also aims to illustrate how MIMO systems tend to behave when using different receivers, namely two of low complexity, the Equal Gain Combiner (EGC) and the Maximum Gain Combiner (MRC), and one of greater complexity, the Zero Forcing. Each of these receivers were analyzed in different environment scenarios, with different levels of channel correlation between antennas, and with different numbers of transmitting and receiving antennas. This dissertation also aims to demonstrate how to mitigate the negative effects that MIMO systems present related to the high levels of correlation caused by insufficient spacing between antennas, experienced in underwater acoustic communications.*

**Keyword: impulsive noise, estimation channel, MIMO, UAC.**

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>10</b>
1.1	Formulação do problema .....	11
1.2	Objetivos.....	11
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>11</b>
1.3	Justificação .....	11
<b>2</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>13</b>
2.1	Comunicações acústicas subaquáticas.....	13
<b>2.1.1</b>	<b>Características dos meio acústico subaquático.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Propagação das ondas acústicas.....</b>	<b>19</b>
2.2	Transmissão por bloco.....	26
<b>2.2.1</b>	<b>OFDM.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2</b>	<b>SC-FDE.....</b>	<b>27</b>
2.3	Estimação de canal .....	28
2.4	Recetores de Sinal .....	30
<b>2.4.1</b>	<b>Zero Forcing.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Recetores de combinação de diversidade (MRC e EGC).....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Representação analítica .....</b>	<b>31</b>
2.5	Sistemas MIMO.....	33
<b>2.5.1</b>	<b>Formatos MIMO .....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Ganhos de diversidade e multiplexagem .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Famílias de técnicas MIMO.....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>42</b>
3.1	Modelo do sinal .....	42
<b>3.1.1</b>	<b>Estimação de canal .....</b>	<b>44</b>
3.2	Elementos essenciais .....	45

3.3	Elementos não essenciais.....	46
<b>4</b>	<b>CRONOGRAMA .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Resultados obtidos .....</b>	<b>48</b>
5.1	Primeiro cenário ( <i>baseline 1</i> ) .....	49
5.2	Segundo cenário ( <i>baseline 2</i> ) .....	51
5.3	Terceiro cenário ( <i>baseline 3</i> ).....	51
5.4	Quarto cenário ( <i>baseline 4</i> ) .....	52
5.5	Quinto cenário ( <i>baseline 5</i> ) .....	53
<b>6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Trabalho futuro.....</b>	<b>55</b>

## LISTA DE QUADROS

Tabela 1: Cenários utilizados para cada simulação.....	49
--	----

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Variação da temperatura, salinidade e pressão com relação a profundidade .....	15
Figura 2: Propagação acústica em profundidade médias .....	17
Figura 3: Múltiplas refrações de ondas acústicas em águas rasas .....	18
Figura 4: Múltiplas refrações de ondas acústicas em águas profundas .....	18
Figura 5: Fenômeno de difração .....	20
Figura 6: Interferência .....	23
Figura 7: Parâmetros temporais do ruído impulsivo. ....	24
Figura 8: Modelo de estado binário do ruído impulsivo. ....	25
Figura 9: Comparação dos sistemas OFDM e SC-FDE. ....	28
Figura 10: SDMA aplicado para uplink. ....	37
Figura 11: Cronograma das tarefas. ....	47
Figura 12: Representação da baseline 1. ....	50
Figura 13: Representação da baseline 2. ....	51
Figura 14: Representação da baseline 3. ....	52
Figura 15: Representação da baseline 4. ....	52
Figura 16: Representação da baseline 5. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS

AAS	Adaptive Arrays Systems
AUV	Autonomous Underwater Vehicles
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BC	Broadcast Channel
BER	Bit Error Rate
CP	Cyclic Prefix
DA	Data-Aided design
DD	Decision-Directed
EGC	Equal Gain Combining
EUA	Estados Unidos da América
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transformer
HSPA	High Speed Packet Access
IAT	Inter-Arrival Time
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformer
ISI	Intersymbol Interference
LDPC	Low-Density Parity-Check
LTE	Long Term Evolution
M-PSK	M-ary Phase-Shift Keying
MAC	Multiple Access Channel
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MU	Multiple User
MRC	Maximal Ratio Combining
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PA	Phased Arrays
PAPR	Peak-To-Average Power Ratio
ROV	Remotely Operated Vehicles
SC-FDE	Single-Carrier Frequency Domain Equalization
SDMA	Space-Division Multiple Access
SFBC	Space-Frequency block code
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output



SNR	Signal Noise Ratio
SONAR	Sound Navigation and Ranging
STC	Space-Time Code
SU	Single User
UAC	Underwater Acoustic Communications
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
ZF	Zero Forcing

# 1 INTRODUÇÃO

O planeta terra é coberto por aproximadamente 70% de oceanos, e o ser humano teve sempre a necessidade de explorar tal meio. Por não ser um meio propício para o habitat humano, várias formas de locomoção foram desenvolvidas para exploração deste, como submarinos e veículos autónomos subaquáticos. Mas para que estes mesmos veículos pudessem se locomover e explorar tais meios, foi necessário a utilização de certos dispositivos para auxiliar no mapeamento e na exploração.

Aristóteles e Leonardo da Vinci, em suas épocas respectivas, já notavam que o som podia ser ouvido por baixo da água. Após vários séculos de pesquisa sobre a acústica e o seu comportamento como onda, por volta de 1687 Isaac Newton publicou a primeira teoria matemática de como o som viaja, em sua grande obra, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Esta mesma obra estava relacionada com propagação do som em ambiente aéreo, mas a mesma teoria matemática também podia ser utilizada para o meio subaquático [1].

Visto que o meio subaquático provoca forte atenuação sobre alguns tipos de ondas (radio e luz), as ondas acústicas começaram a ser utilizadas para localização e exploração dos meios subaquáticos através da Navegação e Determinação da Distância pelo Som (*Sound Navigation and Ranging* [SONAR]). Isto deu-se pelo crescente desenvolvimento investigativo na área de acústica subaquática entre a primeira e segunda guerra mundial [1].

No final da segunda guerra mundial, os Estados Unidos da América (EUA), desenvolveram o primeiro telefone subaquático acústico para comunicação entre seus navios e submarinos, utilizando a Modulação de Amplitude de Banda Lateral Única de Portadora Suprimida [2].

Atualmente, a maior parte das investigações no âmbito das comunicações acústicas subaquáticas (*Underwater Acoustic Communications* [UAC]) utilizam a Multiplexagem Ortogonal por Divisão de Frequência (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* [OFDM]). Mas neste trabalho, foi utilizada a técnica de Equalização no Domínio de Frequência de Portadora Única (*Single-Carrier Frequency Domain Equalization* [SC-FDE]), combinada com a tecnologia de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*Multiple Input Multiple Output* [MIMO]), considerando a estimação de canal, levando ainda em conta o ruído impulsivo, que é uma imparidade que pode afetar as comunicações acústicas subaquáticas. De referir que, a maioria dos sistemas de transmissão são modelados levando apenas em conta o modelo de Ruído Branco Aditivo Gaussiano (*Additive White Gaussian Noise* [AWGN]).

## 1.1 Formulação do problema

Com a grande variação dos meios de comunicação de dados, o meio subaquático tem sido um ambiente de grande pesquisa, principalmente em relação às comunicações subaquáticas. Com o intuito de analisar um ambiente de comunicação mais próximo do real, qual será o desempenho de um sistema de comunicação acústico subaquático, utilizando as diferentes técnicas de estimação de canal e levando em conta um modelo de ruído impulsivo? Como podemos mitigar os efeitos nefastos de se utilizar a tecnologia MIMO massivo em comunicações subaquáticas, pelo insuficiente espaçamento entre as antenas?

## 1.2 Objetivos

Analisar o desempenho da técnica de estimação de canal [3], [4], aplicado às comunicações acústicas subaquáticas, utilizando MIMO Massivo.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Analisar os efeitos do ruído impulsivo sobre o desempenho;
- Identificar as técnicas de estimação de canal MIMO massivo, para comunicações acústicas subaquáticas;
- Verificar o ganho de desempenho com o sistema MIMO Massivo;
- Identificar a perda de desempenho resultante do baixo afastamento entre antenas, que origina perda de correlação de canal;
- Realizar simulações utilizando cada uma destas técnicas;
- Comparar resultados.

## 1.3 Justificação

A comunicação acústica subaquática comparada com os outros tipos de comunicações subaquática (rádio e ótica), possui maior maturidade de pesquisa e desenvolvimento [5]. Mesmo assim, ainda apresenta grandes impasses e complexidades.

Um dos grandes problemas das comunicações acústicas em ambientes subaquáticos, está na baixa largura de banda em que esta opera, devido às atenuações que ela sofre [6]. Desta forma, é muito importante modelar um sistema com um cenário mais próximo do real, que nos permita ter uma comunicação eficiente.

Trabalhos como do Aleixo [2] apresentam uma visão ideal da comunicação acústica subaquática, onde o mesmo tende a estimar o canal de forma ideal, diferente deste trabalho, onde a estimação do canal é analisada, bem como onde se leva consideração o ruído impulsivo.

As estimativas de canal são geralmente obtidas com a ajuda de símbolos piloto e/ou sequências de treino multiplexadas com símbolos de dados, sendo a técnica que vai ser utilizada nesta dissertação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Comunicações acústicas subaquáticas

O ambiente subaquático, é um meio de grande curiosidade e investigação do homem. Desta forma, o crescimento de estudos e tecnologias que dão suporte a trabalhos nesta área têm crescido muito, como a melhoria nos equipamentos de mergulho, Veículo Submarino Operado Remotamente (*Remotely Operated Vehicles* [ROV]), Veículo Submarino Autônomo (*Autonomous Underwater Vehicles* [AUV]), sistemas de comunicações, entre outros [6].

Falando sobre os sistemas de comunicações, que é uma área que dá suporte e melhorias às outras áreas e tecnologias citadas acima, existem diferentes tipos de comunicações em ambientes subaquáticos (ópticas, radiofrequências e acústicas). Com menor desenvolvimento e e com menor nível de investigação até hoje, são os sistemas de comunicação acústicas [7], [8], e a mesma será a base, para esta dissertação.

O termo comunicação é definido por César [9], como a conversa entre um emissor e um recetor, através de um meio. Unindo esta definição com o conceito de propagação acústica, que é o processo de viagem das ondas acústicas, através da vibração das partículas do meio [10], causada pelo processo de rarefação e compressão das mesmas [11], pode-se definir comunicação acústica, como a forma de enviar informações de um emissor, para um recetor, através de ondas acústicas. Igualmente, entende-se por comunicação acústica, como sendo uma forma de propagação do som num meio, a fim de gerar comunicação entre dois ou mais pontos [12]. Nesta dissertação, estuda-se a comunicação subaquática, e o tipo de onda portadora é a acústica.

As ondas acústicas tendem a trabalhar em frequências muito baixas comparadas as utilizadas nas comunicações sem fios atuais. Elas trabalham num intervalo de 16Hz à 16KHz ou 20Hz à 20KHz, em que, ondas acústicas acima destes intervalos, são consideradas ultrassónicas e abaixo infra sónicas [13]. Estas baixas frequências permitem que as mesmas possam ultrapassar algumas adversidades que o meio subaquático apresenta [7].

As ondas acústicas, tendem a propagar-se de forma mais rápida consoante a densidade do meio, isto é, quanto maior for a densidade do meio, mais rápido o som se propaga [14]. Desta forma, num meio subaquático, o som tende a propagar-se mais rápido que num meio aéreo [13]. Mesmo assim, as ondas acústicas sofrerem fortemente com as adversidades que o meio subaquático apresenta [2]. Tais adversidades, serão apresentadas nos tópicos abaixo.

### 2.1.1 Características dos meio acústico subaquático

Apesar das ondas acústicas trabalharem em comprimentos de ondas altos, que lhes permite ultrapassar algumas das adversidades do meio subaquático, o canal subaquático ainda é um meio de grande desafio para estas ondas, somado à baixa propagação das mesmas [2].

A complexidade dos meios subaquáticos, dá-se pela não homogeneidade do mesmo, onde os principais causadores deste fenómeno são: salinidade, pressão e temperatura. Quando um desses três componentes varia, a velocidade de propagação das ondas acústicas também varia [15], [11]. De forma a analisar tais fenómenos, descreve-se abaixo, a forma como cada um deles pode causar mudanças na velocidade de propagação do som:

- Salinidade: salinidade em mar aberto, é razoavelmente constante. Uma alteração na salinidade, altera a densidade do meio subaquático, que resulta numa mudança de elasticidade do meio, causando assim, uma mudança de velocidade na propagação do som em ambientes subaquáticos [11]. As mais frequentes mudanças deste componente, dá-se em frentes oceânicas, e em lugares onde existe uma substituição de água doce por salgada [11]. Também é um dos principais causadores da baixa efetividade dos outros tipos de ondas (radio frequência e ótica) [10];
- Pressão: Sendo um valor mais relevante que a salinidade, a mudança de pressão causa também uma alteração na densidade do meio, desta forma, podendo aumentar a velocidade cerca de 0.017 m/s, para cada metro de profundidade, no caso de termos uma temperatura constante [11], [14];
- Temperatura: é um dos fatores mais significantes para a variação da velocidade do som em ambientes subaquáticos. Ela varia de forma negativa quanto maior for a profundidade do meio em causa. Isto cria uma diminuição significativa na velocidade de propagação das ondas acústicas. A temperatura decresce até um certo ponto, onde a mesma se torna aproximadamente constante, a partir do qual o fator principal a atuar sobre as ondas acústicas é a pressão [11].

A partir dos fatores citados acima, foram desenvolvidas várias equações de forma empírica para calcular a velocidade de propagação do som nos meios subaquáticos [16]. Algumas destas, como apresentada por Mackenzie [17], representa maior complexidade comparadas a de Wilson em 1960, apresentada pelas forças navais americanas em [11]. Desta forma, abaixo é apresentada a equação de Wilson.

$$c = 1449 + 4.6T + 0.055T^2 + 0.003T^3 + (1.39 - 0.012T)(S - 35) + 0.17d \quad (2.1)$$

Onde:

$c$ : velocidade de propagação da onda;

$T$ : temperatura medida em graus Celsius;

$S$ : salinidade em partes por mil;

$d$ : profundidade em metros.

É possível verificar que as variações de temperatura, pressão e salinidade, dão-se principalmente pelo aumento da profundidade do ambiente, como ilustra a Figura 1.

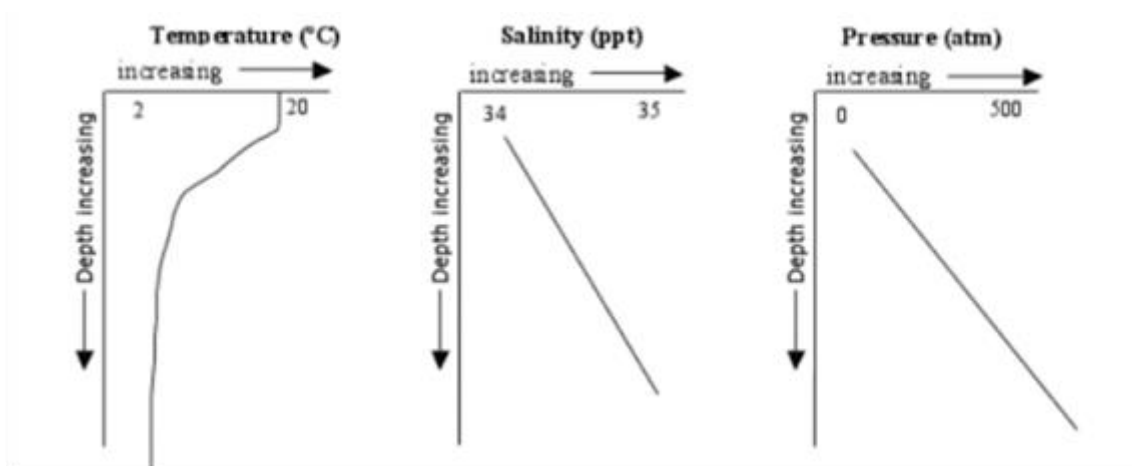


Figura 1: Variação da temperatura, salinidade e pressão com relação a profundidade [15].

Os fatores citados acima (com foco principal na temperatura), influenciam diretamente a variação da velocidade do som, de forma que permite classificar o meio subaquático em três camadas:

- Camada de mistura: abaixo da superfície do mar, encontramos esta camada. Por ela estar próximo da superfície, a mesma tende a sofrer variações de aquecimento, arrefecimento e ações do vento sobre ela. Todo este processo dá origem a um ambiente aproximadamente isotérmico [6], onde a velocidade do som tende a manter-se constante por existir poucas variações de temperatura [2], [6]. Em determinadas estações, como em épocas chuvosas, pode existir uma variação de outro componente, que é a salinidade, pela mistura de água doce e salgada, criando assim um mínimo de variação da velocidade [6].

- Camada termoclina: abaixo da camada de mistura, está a camada termoclina. Como o nome diz, é a camada que possui uma variação de temperatura, devido ao aumento da profundidade. Esta camada sofre um gradiente negativo de temperatura, que consoante o que já foi explicado acima, resulta numa redução da velocidade de propagação do som [6], em que os efeitos de salinidade e pressão não compensam a baixa de temperatura. Esta mesma camada é dividida em duas partes [15], termoclina sazonal e termoclina permanente, como mostra a Figura 2, em que a sazonal, sofre variações de temperatura consoante a mudança das estações, diferente da termoclina permanente, onde a variação das estações não possui um grande efeito sobre ela, onde também é encontrado o maior gradiente negativo relacionado a propagação das ondas acústicas [15].
- Camada isotérmica profunda: nesta camada, a variação de temperatura é mínima e aproxima-se de um valor constante, de forma a não impactar a velocidade do som. Diferente da temperatura, a pressão e a salinidade crescem bastante, permitindo assim um acréscimo na velocidade de propagação do som [2], [6], [15].

A propagação do som, como já foi apresentada anteriormente, está relacionada com a transferência de energia entre as partículas do meio. Ao ligar essas partículas, pegando algum ponto na frente de onda, e desenhar uma linha em direção à propagação da mesma onda, ter-se-á uma linha chamada raio [11]. Este raio, ao passar de uma camada para outra, principalmente pelas alterações da composição de cada uma delas, o mesmo tende a mudar de velocidade, tal como de direção [6], [11].

Em lugares que há uma brusca alteração de gradiente de velocidade som, como na fronteira entre a camada termoclina permanente e a camada isotérmica profunda, ao passar pela fronteira, uma parte da onda é refratada, criando uma curva na mesma. Tais conceitos apresentados acima são classificados como teoria dos raios [6], [11].

Segundo a lei de Snell, que tem um dos resultados mais importante para a teoria dos raios, diz que o som tende a curvar-se para onde a velocidade propagação do mesmo é menor



[2], [6], [11]. Como é ilustrado na Figura 2, um sinal sonoro que se propaga numa profundidade de 1000 metros, a sua velocidade é menor. Desta forma, o sinal sonoro tende a apresentar uma curvatura para baixo, quando é propagado para a camada termoclina permanente, e para cima quando é para a camada isoterma profunda [2].

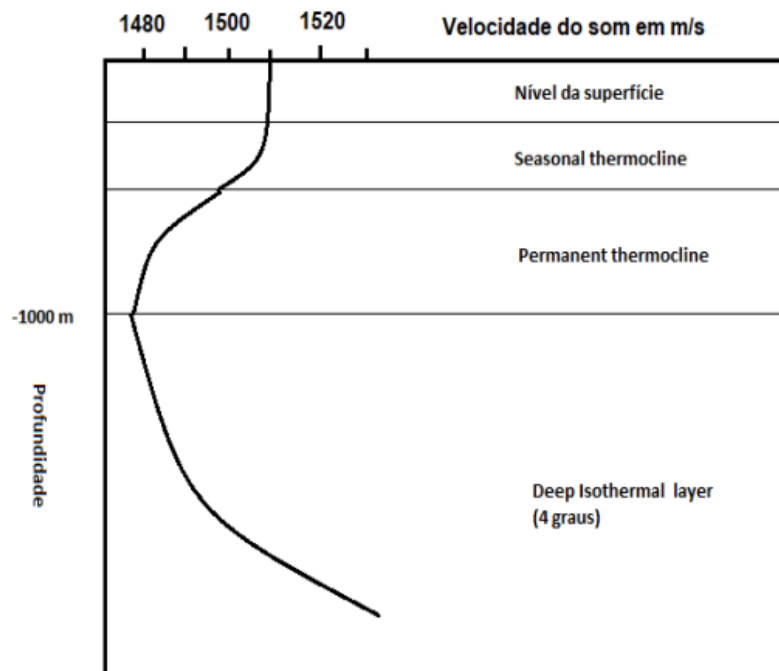


Figura 2: Propagação acústica em profundidade medias [2]

O aumento de profundidade do meio subaquático, como já foi visto, apresenta diferentes características. Desta forma, o som tende a apresentar formas diferentes de propagação. As ondas acústicas em águas rasas, apresenta um comportamento similar às ondas rádio, com sucessivas refrações [2], tal como ilustrado na Figura 3, diferente dos ambientes mais profundos onde os raios acústicos apresentam um comportamento mais curvilíneo [2], [15], como é apresentado na Figura 4 .

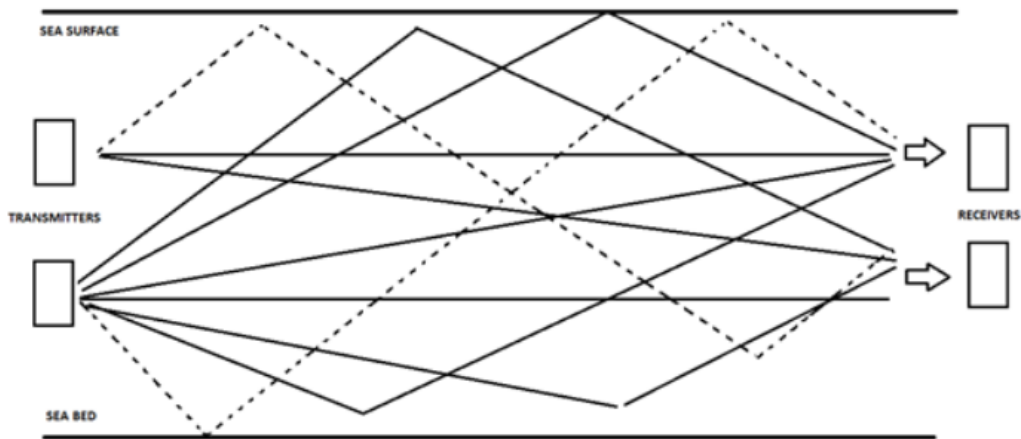


Figura 3: Múltiplas refrações de ondas acústicas em águas rasas [2].

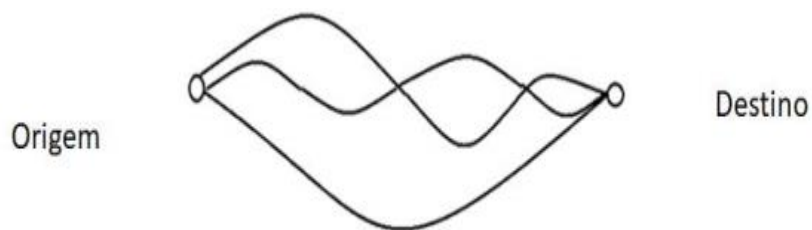


Figura 4: Múltiplas refrações de ondas acústicas em águas profundas [2].

Dependendo do ambiente onde será colocado o canal acústico subaquático, normalmente o meio subaquático não é um ambiente vazio, e a sua superfície do fundo oceânico é irregular. A partir destas situações, quando uma onda acústica embate num objeto ou superfície, esta mesma onda pode sofrer alguns fenômenos, como: reflexão, refração, difração ou dispersão.

No próximo subtópico, serão apresentados como tais fenômenos fazem parte da propagação acústica subaquática, e em que meios têm mais incidência.

## 2.1.2 Propagação das ondas acústicas

Este subtópico descreve, a forma como o ambiente subaquático, sendo um meio não vazio e não homogêneo, pode afetar a propagação acústica.

Visto que as características de não homogeneidade que influenciam a velocidade de propagação já foram apresentadas, dar-se-á ênfase as outras características de propagação das ondas acústicas, levando em conta as adversidades do meio subaquático.

### 2.1.2.1 Refração

O fenômeno de refração de modo geral, consiste na passagem das ondas de um meio para outro, mudando assim a sua velocidade de propagação, mas mantendo sempre a mesma frequência [2], [18].

Falando de refração de ondas acústicas em meios subaquáticos, a mesma dá-se, pelas diferentes características que cada uma camada apresenta, onde as variações de velocidade podem ser positivas ou negativas, dependendo da camada a qual o sinal acústico se propaga [2], [9]. Este mesmo fenômeno tende a ser mais visível em meios de grande profundidade.

### 2.1.2.2 Reflexão

No ambiente subaquático, as ondas acústicas podem ser refletidas através da superfície dos oceanos, fundo do mar, ou qualquer objeto que pode ser encontrado na sua frente [2], [11]. Tal fenômeno é mais frequente em águas rasas, de forma que a superfície e o fundo não se encontrem muito distantes um do outro.

Difícilmente tais superfícies são planas, de forma, que o ângulo de reflexão seja igual ao ângulo de incidência da onda [11].

Num processo de refração, na passagem das ondas acústicas de uma camada para outra, parte desta mesma onda é refletida [6].

O fenômeno de reflexão é muito utilizado por equipamentos acoplado por SONAR. A fim de verificar a localização de certos objetos, o equipamento emite um som, sendo que, quando este mesmo som embate sobre um objeto, o mesmo é refletido para o equipamento que o emitiu.

### 2.1.2.3 Difração

A capacidade que uma onda tem de se desviar ou contornar os obstáculos, dá-se o nome de difração, como pode ser visto na Figura 5. Nas ondas acústicas, este desvio é possível principalmente pelos altos valores de comprimento de onda, de forma que se torna possível desviar dos obstáculos [2].

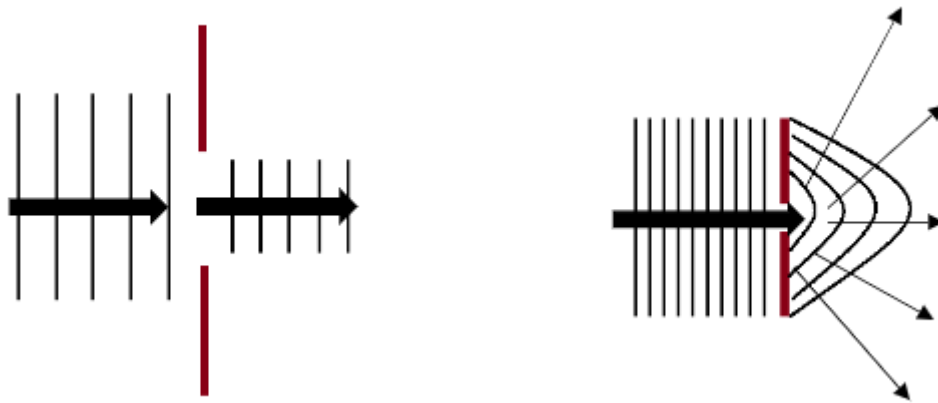


Figura 5: Fenómeno de difração [2]

Os ambientes subaquáticos são constituídos por vários elementos, como animais, corais, entre outros, que não permitem uma comunicação por linha de vista. Desta forma, poder realizar o desvio ou contorno destes obstáculos, permite que o sinal alcance o recetor [2].

### 2.1.2.4 Efeito multi-percurso

Os fenómenos de reflexão, refração e difração, são componentes necessários para as comunicações subaquáticas.

Relativamente a um sistema de comunicação acústico subaquático, uma onda acústica tende a viajar de um emissor até a um recetor. Neste processo a onda acústica sofre uma absorção por parte do ambiente, podendo não chegar ao seu destino. Desta forma, o efeito multi-percurso, vem permitir que o sinal acústico chegue do emissor ao recetor, por meios dos fenómenos descritos acima [19].

O efeito multi-percurso, é o resultado de várias reflexões e difrações, sobre o canal de comunicação, permitindo assim que o sinal chegue ao recetor, principalmente quando não existe linha de vista na transmissão do sinal [12].

Mesmo sendo crucial para as comunicações acústicas subaquáticas, o efeito multi-percurso é muito destrutivo para este tipo de comunicações. Porque, para além dos sinais dos diferentes percursos terem velocidades diferentes, os sinais podem chegar com diferentes frequências [20], aumentando assim o processamento do sinal por parte do recetor, e produzindo assim desvanecimento do sinal [12].

O sinal em comunicações acústicas subaquáticas, como já foi descrito, sofre um efeito de multi-percurso que pode ser construtivo (reforçando o sinal no recetor), ou destrutivo (enfraquecendo o sinal). Pelos diferentes percursos que o sinal percorre, vários fenómenos enfraquecem o sinal; a isto chama-se desvanecimento. O desvanecimento pode ser descrito de duas formas: em grande escala ou em pequena escala [21].

Desvanecimento de pequena escala: ocorre quando existem mudanças muito pequenas no transmissor ou no recetor, afetando assim muito o sinal, causado pelo efeito doppler. O desvanecimento de pequena escala usa um modelo *Rice*. Tal modelo tende a melhorar as anomalias do sinal, quando um dos diferentes sinais transmitidos, é mais forte do que os outros (sinal de linha de vista) [2], [21].

Desvanecimento de grande escala: sendo diferente do anterior descrito, este desvanecimento é caracterizado pelas longas distâncias, ocorrendo no caso do movimento do transmissor ou do recetor. Tal desvanecimento é melhorado, utilizando o modelo *Rayleigh*, onde o mesmo é mais utilizado, quando não existe a transmissão por linha de vista entre o emissor e o recetor [2], [21].

Para as comunicações acústicas subaquáticas, é utilizado o modelo desvanecimento *Rayleigh*, por dificilmente existir um sinal mais predominante (sinal linha de visão) na comunicação [21].

Pelas comunicações acústicas subaquáticas serem muito afetadas pelo efeito multi-percurso, em [22] é desenvolvido um método capaz de diminuir este efeito na comunicação, recolhendo assim no sinal recebido, processando este (através do método de filtragem de *Cepstrum*), a fim de reproduzir o sinal original, de forma a diminuir o efeito de multi-percurso que existe sobre o sinal.

Em estudos de estimação de canal, em relação ao processamento de sinais no que se refere ao efeito de multi-percurso, este efeito traz um grande problema no processamento do sinal recebido, proporcionando assim interferência intersimbólicas (*Intersymbol Interference* [ISI]). Desta forma, são propostos métodos de estimação de canal para amenizar tal problema. Mesmo assim, alguns destes métodos tendem a ser muito lentos e exaustivo em seus cálculos, podendo até diminuir a performance do sistema de comunicação [23].

### *2.1.2.5 Atenuação*

Quando existe uma perda no fluxo de um sinal, estamos perante um fenómeno de atenuação [12].

Em ambientes subaquáticos, ao transmitir o sinal, este vai perdendo a sua intensidade ao longo do tempo, até a um ponto que o sinal passa de energia acústica para térmica. A absorção do sinal acústico, tende a aumentar consoante a frequência. Isto é, quanto maior for a frequência de um sinal, maior será a atenuação neste mesmo [12].

Uma superfície, dificilmente consegue refletir uma onda na sua totalidade. Deste modo, no processo de reflexões consecutivas, parte desta onda em cada reflexão é absorvida pela superfície, de forma que o sinal originalmente produzido, chegue com várias atenuações até ao recetor [22].

### *2.1.2.6 Efeito Doppler*

A movimentação do recetor ou do emissor, causa uma mudança na frequência do sinal transmitido. Este fenómeno de mudança na frequência é chamado de efeito Doppler [12]. Num canal acústico subaquático, é difícil não existir a movimentação do emissor ou do recetor, quer seja por serem veículos autónomos, ou pela movimentação das marés. Em ambientes subaquáticos, mesmo que o recetor ou o emissor sejam fixos, eles são afetados pela movimentação do ambiente (movimentação das marés) [9], [24].

As comunicações acústicas, tendem a sofrer com o efeito doppler, podendo até distorcer a comunicação na sua totalidade. Deste modo, ao montar um sistema de comunicação acústico subaquático, é necessário levar em linha conta esta situação (mobilidade do emissor ou recetor) [24].

O efeito doppler é mais visível em recetores ou em emissores moveis, em que sua movimentação cria alterações nos sinais, degradando-o na receção.

### *2.1.2.7 Interferência*

Quando um sinal é sobreposto por um outro, estamos perante a um fenómeno de interferência. As interferências dos sinais acontecem principalmente com a adição de um sinal externo sobre o sinal transmitido, como mostra a Figura 6 [25].

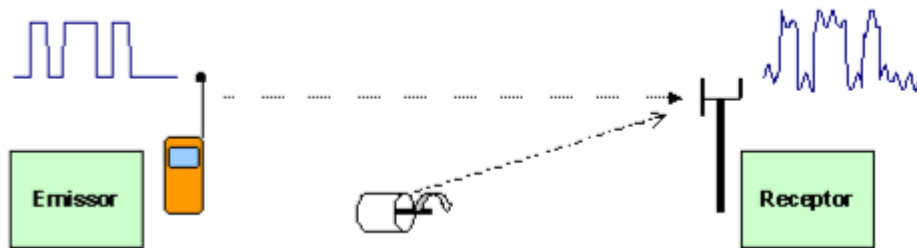


Figura 6: Interferência [25].

Os próprios componentes dos sistemas de transmissão podem interferir com o próprio sinal transmitido, ou até mesmo sistemas de transmissão semelhantes que trabalhem em bandas de frequências próximas às do sinal em causa, são capazes de criar interferência [2], [25].

As interferências podem ser mitigadas pela filtragem do sinal, ou através das técnicas de cancelamento [25].

#### 2.1.2.8 Ruído

O Ruído pode ser definido como a interferência que um sinal sofre, por parte de um sinal externo, ou interno ao sistema de transmissão. Falando de ruídos internos ao sistema de transmissão, podemos associar aos ruídos produzidos pelos ativos deste mesmo sistema, como amplificadores, repetidores, entre outros. Esses ativos tendem a produzir ruídos de origem térmica, assim interferindo com o sinal transmitido [2].

O ruído, diferente da interferência anteriormente falada, possui uma natureza aleatória. Desta forma, o ruído sendo um processo aleatório, este pode ser tratado ou descrito por métodos estatísticos [25].

Quanto a sua fonte, os ruídos podem ser diferenciados como naturais, proveniente de ondas oceânicas, correntes marítimas, agitações sísmicas, sons produzidos por seres marinhos, entre outros. Diferente do citado anteriormente, as fontes antropogénicas, são ruídos de fontes não naturais como os SONAR, explosivos, perfurações, ou qualquer som produzido por máquinas ou dispositivos com influência humana. Tais ruídos, tendem a estar em diferente segmento do espectro de frequência em que a acústica opera. Desta forma, ao criar um sistema de comunicação, tem de se ter em conta todos estes parâmetros, como que ruídos podem afetar mais sistema de comunicação, e qual gama de frequência será utilizada.

Quando a densidade espectral da potência média de um ruído é constante, estamos perante a um ruído branco. O contrário deste tipo de ruído, é designado de ruído colorido [25], [26]. O ruído, quando adicionado ao sinal é considerado aditivo, e quando multiplicado ao mesmo é chamado multiplicativo [2].

Os sistemas de transmissão, na sua maioria são modelados levando em conta o AWGN, onde o mesmo tende a apresentar uma densidade espectral de potência, independente da frequência de transmissão [25], [27]. Mas sendo o ambiente subaquático, a comunicação é simultaneamente afetada por ruído AWGN, bem como por ruído impulsivo.

#### 2.1.2.8.1 Ruído impulsivo

O ruído impulsivo é caracterizado por ser de curta duração, mas de maior potência, comparado com o AWGN [28], [29], como é ilustrado na Figura 7, onde o intervalo de tempo é representado por IAT (*Inter-Arrival Time*). Desta forma, é possível localizar os mesmos a partir de testes de limite, ou por métodos baseados em supressão ou recorte para eliminar o ruído impulsivo. No entanto, tais métodos podem degradar o sinal [28].

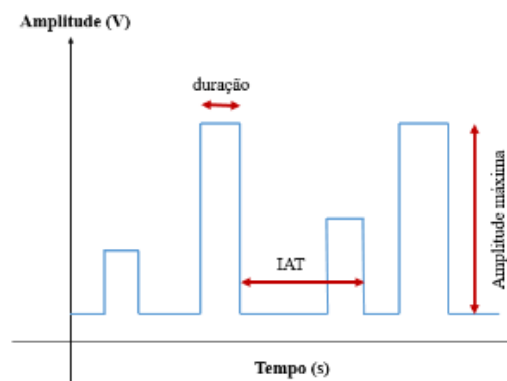


Figura 7: Parâmetros temporais do ruído impulsivo [29].

O ruído impulsivo em sinais analógicos (como em transmissões de voz), não possuem muita importância, porque o corrompimento de alguns cliques, não torna intangível a informação. No entanto, na transmissão de dados digitais pode gerar erros de bits em surto, eliminando assim uma sequência de bits transmitidos [28].

Como foi descrito em cima, o modelo meramente AWGN não é correto para representar um meio caracterizado por ruídos impulsivos, existindo outros modelos desenvolvidos para tal ruído. Alguns destes diferentes modelos de ruído impulsivo são: modelo de mistura de dois



termos, modelo *Bernoulli-Gaussian*, modelo *Poisson-Gaussian*, modelo *Poisson- $\alpha$ -stable* e modelo da Cadeia de *Markov*. Para este trabalho, foi utilizado o modelo da Cadeia de *Markov*, por ser um dos que se aproxima mais de um ambiente real [30].

O modelo da cadeia de *Markov*, é considerado por usar memória. Isto quer dizer, que o estado atual do canal, influenciará o próximo estado do mesmo [26], [28], [30]. Existem vários tipos de modelos da cadeia de *Markov* (como apresentados na literatura). Estes mesmos modelos podem ser classificados como: *Binary state model*, *Markov-Middleton model*, *Partitioned Markov chain* e *Second level Markov chain* [30]. Consoante os modelos apresentados acima, o que se encaixa neste trabalho é o modelo binário, que possui dois estados (0,1), que representam a situação do canal. Onde o estado 1, representa o canal livre de ruído impulso (canal bom), e o 0 o inverso (canal mau), como é ilustrado na Figura 8.

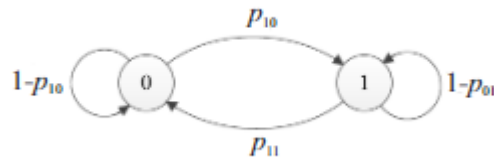


Figura 8: Modelo de estado binário do ruído impulsivo [30].

Na Figura 8, a variável  $p_{ij}$ , tende a representar a probabilidade de transição de um estado para outro. Com vista a calcular a memória do ruído, tem-se a seguinte equação:

$$n = \frac{1}{p_{01} + p_{10}} \quad (2.2)$$

Quando  $n=1$ , isto quer dizer que o ruído em causa não tem memória, sendo assim possível utilizar modelos de ruído como o *Bernoulli-Gaussian* (modelo sem memória). Enquanto que, quando  $n > 1$ , diz-se que o ruído é persistente, e que a permanência média num estado é maior que quando o ruído é sem memória [30].

O ruído deteriora a qualidade do sinal a ser transmitido, e seus efeitos nos sistemas de transmissão podem ser minimizados pela construção de circuitos de transmissão mais cuidadosos, ou por filtragem. O próximo subtítulo retrata técnicas de transmissão e tecnologias que permitem mitigar as várias interferências no sinal.

## 2.2 Transmissão por bloco

Em sistemas de comunicações moveis, a maior parte de seus dispositivos digitais sofre de desvanecimento, tal como ISI. Para mitigação deste tipo de fenómeno, são utilizadas técnicas de equalização, com intuito de restaurar a informação enviada pelo transmissor para o recetor [2].

Seguindo esta ideia, as técnicas de transmissão em bloco baseadas no uso de modelos cíclicos, mais conhecidas como prefixos cíclicos (*Cyclic Prefix* [CP]), têm sido muito utilizadas, principalmente porque permitem o cancelamento de ISI eficiente e por serem computacionalmente eficientes [2].

Um sistema de transmissão em bloco, é caracterizado por representar os símbolos de informação em forma de bloco e separados por símbolos conhecidos. Este tipo de transmissão é mais utilizado em canais dispersivos no tempo, onde existe variações rápidas do canal no tempo [31], [32].

A técnica de transmissão em bloco OFDM, tem sido muito utilizada para sistemas de UAC. Mas tem-se notado que o ruído impulsivo gerado por fontes naturais ou atividades humanas, tendem a degradar o desempenho dos sistemas acústicos subaquáticos, que utilizam OFDM [28]. Deste modo, empregar uma técnica de transmissão de portadora única, obtém-se um melhor ganho.

Para este trabalho, foi utilizada a técnica de transmissão SC-FDE, mesmo sendo uma técnica de portadora única, possui algumas grandes vantagens que o sistema OFDM apresenta. Abaixo será apresentado de forma mais sucinta a técnica de transmissão SC-FDE.

Antes de descrever a técnica SC-FDE, será retratado sobre os sistemas OFDM, de maneira mais detalhada.

### 2.2.1 OFDM

O OFDM, é um esquema de multiplexagem por divisão de frequência, onde a banda de transmissão é dividida em múltiplas portadoras ortogonais entre si, permitindo assim a transmissão paralela de dados. A mesma é utilizada como método de modulação digital [2].

Um sistema OFDM, permite que os espectros de diferentes subportadoras sejam sobrepostos, de modo a fornecerem melhor eficiência espectral, descartando assim as bandas

seguras que a sua antecessora tinha (*Frequency Division Multiplexing* [FDM]). A técnica OFDM é muito eficaz em sistemas de alta largura de banda [33].

Um sistema de alta largura de banda que utiliza técnicas de portadora única, para transmissão dos dados, tende a estar propenso a sofrer interferências, pela duração diminuída dos símbolos transmitidos, que podem sofrer com facilidade distorção através de ruídos impulsivos, ou por reflexões [33].

Os ambientes que trabalham com multi-portadoras (como o OFDM), tendem a possuir certa imunidade adicional contra distorção por ruído impulsivo e pelas reflexões consecutivas, por causa da maior duração que seus símbolos apresentam nas diferentes subportadoras [33].

Um sistema de comunicação acústico subaquático sofre bastante com os efeitos multi-percurso na transmissão, podendo degradar bastante a comunicação. Analisando neste contexto, um sistema como o OFDM, para as comunicações acústicas subaquáticas, sofre bastante com tais efeitos, principalmente pelo mesmo trabalhar com muti portadoras, que não é aconselhável para comunicações de baixa largura de banda, o que causa uma elevada Relação Potência Média de Pico (*Peak-To-Average Power Ratio* [PAPR]) [34].

Ao verificar tais problemas, foi necessário procurar outras técnicas de transmissão, que pudessem mitigar melhor os efeitos multi-percurso.

### 2.2.2 SC-FDE

SC-FDE é uma técnica de transmissão que considera portadora única, a qual tende a auxiliar na eliminação do efeito ISI [2], [35].

Existem muitas comparações entre o OFDM e o SC-FDE. Comparado ao OFDM, o SC-FDE é computacionalmente mais simples, por utilizar equalização no domínio do tempo para canais com atraso de propagação e que as operações de Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformer* [FFT]) e a Transformada Inversa Rápida de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transformer* [IFFT]), encontram-se alojadas no recetor, como mostra a Figura 9, que efetua uma comparativa entre o OFDM e SC-FDE.

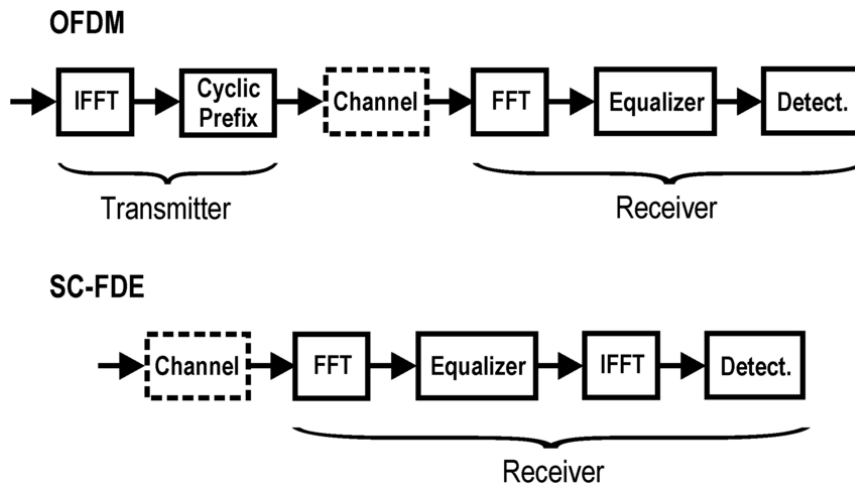


Figura 9: Comparação dos sistemas OFDM e SC-FDE [36].

O SC-FDE apresenta o mesmo desempenho e complexidade que o OFDM, tendo a vantagem de apresentar menor PAPR que o OFDM, principalmente para as comunicações acústicas subaquáticas, pelo facto utilizar a técnica de transmissão de portadora única [35].

O SC-FDE, é capaz de compensar a distorção de sinal, quando o atraso gerado pelo multi-percurso do sinal é menor que o CP, sendo que o CP, é uma banda de guarda, para prevenir um bloco, da contaminação por ISI. É ideal que sejam utilizados CP curtos. Caso o atraso gerado pelo multi-percurso seja muito longo, opta-se por CP longos, mas os mesmos tendem a introduzir um grande atraso na comunicação [34].

A técnica de transmissão SC-FDE, é uma das mais utilizadas quando se trata de transmissão em bloco. Mas tal técnica, precisa de estimações de canal mais precisa.

Outra forma de mitigar o ISI, nas comunicações acústicas subaquáticas, é aplicando um sistema com combinação de diversidade de matriz de antenas, que será visto com mais clareza no capítulo sobre tecnologias MIMO.

### 2.3 Estimação de canal

As técnicas de modulação do chaveamento de deslocamento de fase (*M-ary Phase-Shift Keying* [M-PSK]), podem ser classificadas de duas formas, diferencial e coerente. A técnica diferencial, é aquela que os dados são configurados na diferença de fase entre dois símbolos consecutivos, e não precisa de estimação de canal, de forma a diminuir a complexidade dos recetores, mas ao mesmo tempo adiciona uma perda na relação sinal ruído (*Signal Noise Ratio* [SNR]), o que o lhe faz possuir um desempenho inferior que a modulação coerente, que ao

poder utilizar constelações de multi-amplitude, permite maiores taxas de transmissão. Quando um sistema de comunicação utiliza a modulação coerente, é necessário um estimador de canal, que torna os recetores de tal sistema mais complexos [37], [38].

As técnicas estimação de canal, são técnicas que permitem estimar o estado do canal. Desta forma, esta estimação pode ser realizada de duas formas: através do método de Decisão-Direta (*Decision-Directed*- [DD]), que tende a basear-se nas decisões anteriores para realizar a estimação, ou pelo método baseado em piloto, também conhecido como método *Data-Aided design* (DA) [37], [39]. Estes símbolos pilotos, são símbolos conhecidos pelo recetor, que serão transmitidos para o mesmo, a fim de mapear melhor o estado do canal de comunicação.

A estimação de canal, é um processo muito importante no pós-processamento, isto é, na equalização do sinal. Mas alguns destes métodos de estimação de canal podem degradar a eficiência dos sistemas de comunicação [3]. O método que utiliza símbolos pilotos, é o escolhido para este trabalho.

Falando de métodos que utilizam pilotos, existem várias formas de o implementar, mas nesta dissertação, serão descritos os dois mais utilizados, que são [3], [39]:

- Pilotos multiplexados (pilotos convencionais): os símbolos pilotos são multiplexados com os dados, que tende a gerar uma baixa eficiência espectral, porque parte do espectro é dedicado à estimativa;
- Pilotos sobrepostos: faz o uso de pilotos sobrepostos, ou também conhecido como pilotos implícitos, onde tais símbolos pilotos são adicionados nos dados. Mas tal procedimento tende a gerar uma certa interferência entre os dados e os pilotos, onde existe uma degradação na detetação dos dados pelos pilotos sobrepostos, e para a estimação, a uma certa degradação também pelos dados sobrepostos [3].

O problema descrito acima sobre os pilotos implícitos, pode ser mitigado, fazendo o uso de recetores iterativos, onde o detetar dos dados e dos pilotos, ocorrem em diferentes iterações, permitindo subtrair o sinal não desejado a cada iteração [3]. Mesmo assim, de forma a implementar uma técnica de estimação de canal simples, optou-se por utilizar os pilotos convencionais.

## 2.4 Recetores de Sinal

A estimação de canal, é uma técnica fundamental para o auxílio de uma boa equalização. Descrevendo um pouco sobre equalização, a mesma pode ser realizada de diferentes formas, podendo proporcionar mais complexidade aos recetores, caso se adote o pós-processamento. Falando de recetores, existem vários tipos do mesmo, mas para este trabalho, serão retratados três deles, dois consideradas de complexidade baixa e um mais complexo. Estes recetores são: Combinação de Ganho Igual (*Equal Gain Combining* [EGC]), Combinação de Razão Máxima (*Maximal Ratio Combining* [MRC]) e Força Zero (*Zero Forcing* [ZF]) [40]. Antes de falar sobre os recetores, é necessário salientar que o sinal antes de ser processado pelo recetor, tende a ser convolvido com o canal [2].

Ao utilizar uma inversão da pseudo-matriz da resposta do canal, o recetor ZF, tende a ser mais complexo que os outros dois recetores. O EGC e o MRC, possuindo menor complexidade, de certa forma, tendem a introduzir um certo nível de interferência em suas comunicações. Deste modo, para minimizar tal problema, são utilizadas iterações de cancelamento, tornando-se assim em recetores iterativos [40].

### 2.4.1 Zero Forcing

O zero forcing, é um equalizador proposto por Robert Lucky, que permite a minimizar o ISI nas comunicações. Faz o uso do inverso da resposta de frequência do canal para restaurar o sinal. O nome ZF, corresponde à potencialidade que o mesmo recetor tem de eliminar a ISI totalmente, caso não exista ruído [2].

Os recetores ZF, são bons para a recuperação de fluxos de dados transmitidos, mas os mesmos, para obterem melhor desempenho necessitam da informação do estado do canal. Esta informação do estado do canal é adquirida com uma técnica de estimação (falada no subtópico passado), que no mundo real nem sempre estará disponível [41].

Este recetor também foi designado para a remoção do ISI que é inserido pelo canal de transmissão, para situações sem ruído ou em casos que não existe o aprimoramento do ruído [42].

## 2.4.2 Recetores de combinação de diversidade (MRC e EGC)

A técnica de combinar vários sinais, através da utilização de várias antenas de receção, tende a restaurar o sinal original, através de pequenas partes dele. Os recetores de combinação de diversidade são muito bons para melhorar as impurezas causadas pelas adversidades do canal [43]. Na literatura [44], existem quatro técnicas de combinação do sinal, mas para esta dissertação foram retratadas simplesmente duas, que são: MRC e EGC.

O MRC é um recetor que tende a utilizar a técnica de combinação de diversidade, multiplicando o sinal recebido com desvanecimento independente pelo respetivo conjugado de ganhos do canal [2], [45]. Como resultado, o mesmo tende a amplificar os sinais com maior potência, e atenuar os de menor potencia. Isso permite que o MRC maximize o SNR, o que torna também difícil a sua implementação, por realizar esta atribuição de pesos nos sinais [2], [44].

O EGC, possui o mesmo objetivo em relação à combinação de diversidade do sinal, mas tende a diferenciar-se no ponto que cada sinal de uma antena recetora é ponderado com um único fator independente da amplitude do sinal, isto é, todos os sinais tendem a receber o mesmo peso, permitindo assim que o mesmo não necessite de uma estimação do canal. Tais características do EGC, o tornam mais simples de ser implementado que o MRC [2].

O EGC, tende a ser mais simples que o MRC, mas tal simplicidade, na maioria dos casos faz com que o mesmo possua menor desempenho que o MRC [2], [44], [45].

## 2.4.3 Representação analítica

Os três recetores falados acima serão retratados agora neste subtópico, e serão descritos de forma analítica.

Considera-se um cenário MIMO com T antenas de transmissão e R antenas de receção, onde  $R \gg T$  num esquema SC-FDE. Neste cenário a t-ésima antena, tem de enviar um bloco de símbolo de dados  $\{x_n; n = 0, 1, \dots, N - 1\}$ , com um bloco de domínio de frequência  $\{B_k; k = 0, 1, \dots, N - 1\}$ , e um bloco recetor  $\{y_n; n = 0, 1, \dots, N - 1\}$ , que satisfaça

$$B_k = [B_k^{(1)}, \dots, B_k^{(R)}]^T = H_k X_k + N_k \quad (2.3)$$

Onde o  $H_k$  representa a matriz do canal de dimensão  $R \times T$  para a frequência  $k$ , com  $(r, t)$ -ésimo elementos  $H_k(r, t)$ , com símbolos transmitidos  $X_k = [X_k^{(1)}, \dots, X_k^{(r)}]^T$ .

Considerando que o recetor não é iterativo, os símbolos estimados no domínio da frequência são  $\tilde{X}_k = [\tilde{X}_k^{(1)}, \dots, \tilde{X}_k^{(R)}]^T$ , obtendo:

$$\tilde{X}_k = A_k B_k \quad (2.4)$$

Onde o  $A_k$ , dependendo do algoritmo pode assumir diferentes expressões como:

Recetor ZF:

$$A_k = (H_k^H H_k)^{-1} H_k^H \quad (2.5)$$

Recetor MRC:

$$A_k = H_k^H \quad (2.6)$$

Recetor EGC:

$$A_k = \exp\{j \arg(H_k^H)\} \quad (2.7)$$

Como foi visto na equação que o define, o ZF requer a inversão da matriz do canal para cada componente da frequência do canal, diferente do MRC e EGC. Isto torna os dois recetores mais simples em comparação ao ZF, mas os mesmos tendem a sofrer muito com a interferência gerada, que degrada bastante os seus desempenhos. Uma forma de mitigar tal problema do EGC e o MRC, é adotando a iteratividade por parte do recetor, que pode ser implementada pela seguinte expressão:

$$\tilde{X} = A_k^H B_k - C_k \bar{X}_k \quad (2.8)$$

Onde o  $C_k$ , representa a matriz de cancelamento de interferência, que pode ser representada por:

$$C_k = D_k^H H_k - I \quad (2.9)$$



Onde  $I$  é a matriz identidade com dimensão  $R \times R$ , e o  $(i, i')$ , representam os elementos da matriz  $D$ , que é expressa por  $D_{ii'} = H_{ii'}^H$  para o MRC, e  $D_{ii'} = \exp\{j \arg(H_{ii'}^H)\}$  para o EGC.

No subtópico seguinte, é retratado os conceitos dos sistemas MIMO, e como eles podem variar.

## 2.5 Sistemas MIMO

Os sistemas de comunicação sem fio são utilizados pela sociedade de forma massiva. Desta forma, aumentar a capacidade e confiabilidade destes sistemas foi necessário para que o mesmo pudesse suportar estas massas.

Com o intuito de proporcionar maiores taxas de débito binário e resiliência dos sistemas de comunicação, foi desenvolvida a técnica de transmissão MIMO. Permitindo assim, que um emissor possa ter várias antenas de transmissão, enviando o sinal para várias antenas de recepção [2], [46].

Os sistemas MIMO, são utilizados para melhorar a taxa de bits errados (*Bit Error Rate* [BER]), mitigando a ISI nos sistemas de comunicações. Neste contexto, são amplamente utilizados para melhorar a eficiência espectral e energética. Por outro lado, pelo número maior de antenas, tendem a proporcionar maior complexidade no processamento do sinal, isso dependendo do formato utilizado [47].

### 2.5.1 Formatos MIMO

Existem diferentes formatos MIMO, e cada um deles está relacionado com o número de antenas que o transmissor ou o recetor possui. Desta forma, a entrada em MIMO, está relacionada com as antenas transmissão, e a saída, está relacionada com as antenas de recepção [44], [48].

Consoante a descrição acima, os formatos MIMO são classificados em [2], [48]:

- *Single Input Single Output* (SISO);
- *Single Input Multiple Output* (SIMO);
- *Multiple Input Single Output* (MISO);
- *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

A forma mais simples de MIMO, é o SISO. Onde o transmissor e o recetor possuem apenas uma única antena cada. A cada alteração de formato, há uma variação de antenas no transmissor e no recetor. Considerando que a utilização de mais de uma antena, já é considerado um sistema de múltipla entrada ou/e saída [48]. Ao aumentar drasticamente o número de antenas de transmissão e recepção, estar-se-á presente a um sistema MIMO massivo.

#### *2.5.1.1 MIMO massivo*

O MIMO massivo (m-MIMO), é a utilização do MIMO, com dezenas ou centenas de antenas em seus terminais, de forma a acrescer o nível de liberdade e diversidade espacial, comparado aos sistemas MIMO iniciais que variavam de 2 a 8 antenas em seus terminais [48].

A utilização de m-MIMO, tende a aumentar as taxas de dados, aumentar a relação sinal-ruído do link básico, entre outras. Mas o mesmo sistema MIMO tende se tornar mais complexo em seu desenvolvimento, isso comparado aos sistemas MIMO normais.

Outra desvantagem do m-MIMO, está na colocação das antenas. Onde as mesmas necessitam de ter um espaçamento adequado entre elas, a fim de não possuírem altos níveis de correlação. Dependendo da frequência portadora do sinal transmitido, quanto mais antenas forem introduzidas, maior tende a ser a dimensão dos terminais (recetor e transmissor). O afastamento entre elementos de antenas, para que os canais sejam incorrelacionados, é função do comprimento de onda, tipicamente 3 a 5 comprimentos de onda. Uma forma de superar este problema, é a utilização frequências mais altas para transmitir o sinal, algo que para os sistemas acústicos subaquáticos é difícil, pela natureza das ondas acústicas [48].

A utilização de mais de uma antena, fornece certos ganhos ao sistema de comunicação. Estes mesmos ganhos, podem ser classificados de duas formas: ganho de diversidade e ganho de multiplexagem.

## 2.5.2 Ganhos de diversidade e multiplexagem

Os sistemas MIMO, tendem a fornecer diversidade e maiores taxas de símbolos, sem ser necessário aumentar a largura de banda, isto através do ganho de multiplexagem (também conhecido como ganho de capacidade) e/ou diversidade.

A técnica de multiplexagem espacial é muito importante para os sistemas MIMO, pois elas permitem a criação de múltiplos canais de transmissão virtuais, através da exploração do ambiente de propagação [44].

Um recetor, tem uma certa quantidade de sinais diferentes que ele pode receber. A isto é chamado de dimensão espacial do sinal recebido. Isto define o grau de liberdade de um sistema de comunicação. A multiplexagem espacial no sistema de transmissão, o fluxo de dados é dividido em múltiplos blocos de dados independentes, de formas que o recetor possa entender os diferentes sinais transmitidos na mesma largura de banda de frequência. Neste método, a capacidade do canal cresce linearmente [46], fornecendo assim um ganho de capacidade ao sistema de transmissão.

Na utilização da multiplexagem espacial, são obtidos diferentes ganhos, como o aumento da taxa de transmissão com é referido, sem a necessidade de aumentar a faixa de frequência utilizada ou a potência total atribuída ao sistema [2].

Já para o ganho de diversidade, diferentes antenas de transmissão tendem a enviar replicas do mesmo sinal, para o recetor, a fim de que o recetor possa ser capaz de obter um sinal semelhante ao enviado, ou aumentar a probabilidade de detetar o mesmo [46]. Existem diferentes formas de se obter diversidade. Esta mesma pode ser alcançada pelo aumento de antenas recetoras e/ou pelo aumento de antenas emisoras.

Um sistema de comunicação pode aumentar a relação sinal/ruído e diminuir o custo energético de uma antena de transmissão, permitindo assim atingir uma determinada taxa de erro, isto é, com o ganho de diversidade [2].

Em [44], é feita uma relação entre o ganho de diversidade e o ganho de multiplexagem (ganho de capacidade) num sistema MIMO. O ganho derivado da multiplexagem espacial,  $r$ , é relacionado com o ganho de diversidade  $d(t)$ . Onde o seu valor máximo é igual a  $\min(N_T, N_R)$ , e a sua relação é dado por:

$$d(t) = (N_T - r)(N_R - r) \quad (2.10)$$

Através da fórmula acima, na ausência do ganho de capacidade, o ganho de diversidade máxima é dado por  $N_T N_R$ , e o ganho de capacidade máximo é dado por  $\min(N_T, N_R)$ . A partir disto, se pode concluir que quanto maior for o ganho de diversidade, menor o ganho de multiplexagem, e vice e versa [2], [44], [47].

A tecnologia MIMO supera a deficiência dos métodos tradicionais através da diversidade espacial. Onde os dados podem ser transmitidos por T antenas de transmissão, e R antenas de recepção, permitindo assim o baixo nível da taxa de bits errados (*Bit Error Rate*-BER) [2].

Atualmente a tecnologia MIMO tem sido utilizada em vários padrões de comunicações sem fio, como IEEE 802.11x (Wi-Fi), HSPA + (3G), WiMAX (4G), *Long-Term Evolution* (4G LTE) e 5G [49]. Tais padrões ao utilizarem a tecnologia MIMO, beneficiam de ganho de diversidade e multiplexagem.

### 2.5.3 Famílias de técnicas MIMO

Ao descrever o MIMO, é necessário ressaltar que existem 4 diferentes famílias de técnicas de múltiplas antenas, que são classificadas como: codificação espaço-tempo, transmissão multicamadas, acesso múltiplo por divisão de espaço e *beamforming*.

#### 2.5.3.1 Codificação espaço-tempo

A codificação espaço-tempo (*Space-Time Code* [STC]), é utilizada nos sistemas MIMO, para permitir a transmissão de replicas de fluxos dados pelas antenas, onde a recepção de tais replicas, permite aumentar a confiabilidade na transferência dos dados. Estes fluxos de dados ao chegar no recetor são combinados, de forma a extrair melhor, a informação de cada uma delas [50].

Utilizando da diversidade espacial e temporal, a codificação espaço-tempo, permite ganhos significativos, onde a utilização de replicas do fluxo de dados, permite combater o desvanecimento do sinal recebido, causado pelo canal. Ao empregar a transmissão em bloco no STC, o fluxo de dados é codificado em bloco antes da transmissão, onde esses blocos são distribuídos nas múltiplas antenas. Os códigos de blocos de espaço-tempo, são representados por matrizes, onde as linhas representam o intervalo de tempo, e cada coluna, representa a antena de transmissão [2], [50].

Os códigos no sistema de comunicação são gerados por codificadores STC, de modo que com o processamento adequado do sinal e o processo de decodificação no recetor, seja obtido o máximo de ganho de diversidade e codificação [44].

Um esquema simples de codificação de blocos de espaço-tempo muito conhecido, é a codificação MIMO Alamouti, desenvolvida por Alamouti em 1998. Onde o mesmo utiliza da diversidade de duas antenas de transmissão, descartando a necessidade do conhecimento do canal de transmissão. Este esquema requer um processamento por parte do transmissor, que pode ser feito no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Este último, é denominado codificação de bloco de frequência espacial (*Space-Frequency block code* [SFBC]).

### 2.5.3.2 Acesso múltiplo por divisão espacial

O acesso múltiplo por divisão espacial (*Space-Division Multiple Access* [SDMA]), é uma técnica que permite explorar a diversidade espacial, a fim de proporcionar múltiplos acessos, compartilhando um espectro comum. O SDMA, assume que o transmissor possui uma única antena e o recetor várias como ilustra a Figura 10, permitindo assim que o recetor obtenha sinal de diferentes usuários. É comum que esta técnica seja utilizada mais para *uplink*, e que o recetor (BS, para comunicações moveis), tenha uma quantidade de antenas iguais ou maior que o número de usuários que compartilham o mesmo espectro [35].

Para que seja possível o recetor decodificar o sinal dos diferentes usuários, sem que os mesmos interfiram um com os outros, ele tem de ter um algoritmo de anulação [35].

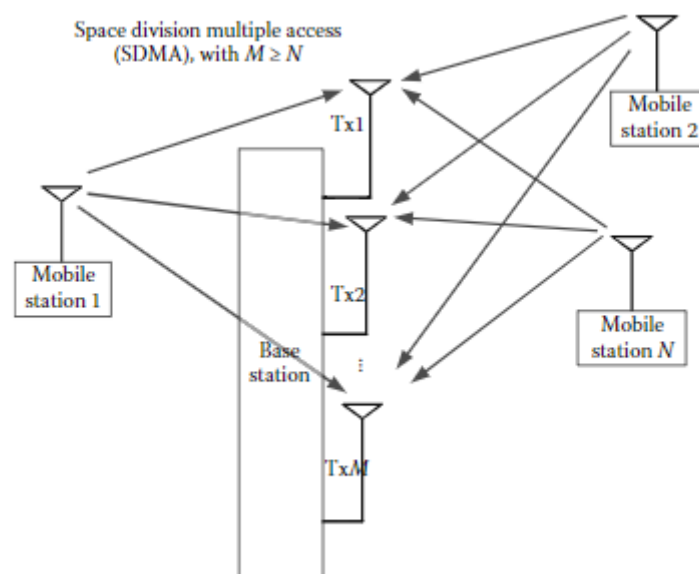


Figura 10: SDMA aplicado para uplink [35].

O SDMA, tende a utilizar feixes estreitos, a fim de melhorar a capacidade e qualidade dos sistemas de transmissão, através de antenas inteligentes, onde os feixes são direcionados para a estação móvel [2]. Arquitetura SDMA, economiza recursos de rede, evitando o envio de sinais para lugares onde se encontram dispositivos móveis inativos [2].

Uma das grandes vantagens dos sistemas SDMA, se encontra na reutilização de frequência, as interferências podem ser aproximadamente nulas, desde que se respeite a distância de reutilização de frequência.

### 2.5.3.3 *Transmissão multicamadas*

O MIMO baseado na transmissão multicamadas, tem como objetivo obter maiores taxas de dados numa determinada largura de banda. A transmissão multicamadas, tende a melhorar a eficiência espectral, aumentando as taxas de transferências transmitidas por uma determinada largura de banda. Diferente do STC, que tende a melhorar o desempenho através da exploração da diversidade [35], com a condição que o número de antenas de recepção tem de ser superior ou igual ao número de antenas de transmissão.

O aumento das taxas de transferências só é possível se cada antena receptora for direcionada (separadamente) para cada antena transmissora. Com um certo número de antenas de recepção elevado, é possível resolver todos os fluxos de dados, desde que as mesmas estejam devidamente espaçadas [35].

### 2.5.3.4 *Beamforming*

Tradicionalmente os sistemas MIMO, utilizam a mesma potência para as diferentes antenas de transmissão. Num cenário onde transmissor, possua diferentes antenas, tradicionalmente o mesmo tende a criar um campo de cobertura. Os receptores que estão fora deste limite de cobertura de atuação do sinal, tendem a possuir uma baixa taxa de dados, causada pela baixa intensidade do sinal recebido, e outros fatores [2].

Analisando o cenário acima, uma forma de minimizar tal situação, é possuir uma transmissão de sinal mais inteligente, podendo assim direcionar maior potência de sinal aos receptores que se encontram mais distantes do transmissor, de modo a proporcionar melhor qualidade de sinal. Esta técnica de transmissão de sinal é chamada de *beamforming* [2], [35].

O *beamforming*, pode ser definido como uma técnica de filtragem espacial, onde o processamento do sinal é feito através de sensores (antenas inteligentes), de forma que a transmissão ou a recepção do sinal seja direcionada, proporcionando assim uma seletividade espacial, ganhando vantagem em comparação a transmissão/ recepção omnidirecional [2]. O *beamforming* para poder utilizar o direcionamento do sinal, o mesmo faz o uso de antenas inteligentes, e estas mesmas antenas, dividem-se em dois grupos, as matrizes em fase (*Phased Arrays* [PA]) e os sistemas de matrizes adaptáveis (*Adaptive Arrays Systems* [AAS]).

Os sistemas que utilizam PA, são comutados, e possuem um conjunto de padrões pré-definidos, onde a utilização dos mesmos depende do processamento do sistema geral. Podendo assim alternar de um padrão para o outro, de modo a se aproximar da necessidade exigida. Já os AAS, tendem a se adaptar de forma mais precisa, direcionando assim os feixes com maior exatidão, para onde se necessita [51].

As antenas inteligentes não são somente utilizadas em sistemas MIMO, mas fornecem maior benefícios para tais sistemas, podendo até diminuir a potência de outras antenas, a fim de fornecer maior potência para a antena que mais precisa (de modo a alcançar recetores mais afastados) [51].

O *beamforming* pode ser utilizado em diferentes tipos de onda, como em ondas rádio ou sonoras, sendo assim, importante de referir neste trabalho.

#### 2.5.3.5 MIMO multiutilizador

As técnicas retratadas anteriormente, são utilizadas em MIMO de utilizador único (*Single User MIMO* – [SU-MIMO]), onde os dados são transmitidos para um único utilizador individual. uma alternativa para este cenário, é a utilização de MIMO para múltiplos utilizadores (*Multiple User MIMO* – [MU-MIMO]), onde os múltiplos dados são transmitidos em simultâneo para múltiplos utilizadores [52].

Existem dois tipos de cenários para MU-MIMO, que são:

- *Uplink* - canal de acesso múltiplo (*Multiple Access Channel* [MAC]): foca-se nos conceitos de MIMO convencional (único utilizador), mas ampliando para múltiplos utilizadores. O maior processamento é realizado pelo recetor, onde o mesmo precisa saber o estado do canal.

- *Downlink* - Canal Broadcast (*Broadcast Channel* [BC]): este é um cenário mais desafiador, onde são aplicadas técnicas de cancelamento de pré-interferência, é complementado pelo agendamento implícito do utilizador e um algoritmo de carregamento energético.

Quando é retratado sobre alcance de altas taxas de dados num certo espectro fechado, existem duas opções: *downlink*, normalmente é empregue o MU-MIMO, e o *uplink*, utilizando a transmissão multicamada.

A técnica MU-MIMO, é uma extensão do SDMA [35]. O SDMA é utilizado amplamente para *uplink*, já o MU-MIMO é empregue para *downlink*, permitindo assim o envio de diferentes fluxos de dados para diferentes utilizadores.

Outra diferença que é encontrada no MU-MIMO, comparado ao SDMA, está no empregar do algoritmo de anulação. Enquanto o SDMA, aplica tal algoritmo no lado do recetor, o MU-MIMO, aplica o mesmo no lado do transmissor [35].

Após a descrição da tecnologia MIMO, e as diferentes técnicas que a podem constituir, é interessante retratar principalmente como empregar ou calcular o espaçamento entre as diferentes antenas, para os sistemas de comunicação acústico subaquático. Sabendo que o comprimento das ondas acústicas é maior que as ondas radio, que são utilizadas nas comunicações convencionais.

#### 2.5.3.6 Cenário de espaçamento de onda (MIMO-UAC)

Um sistema MIMO convencional, tem um comprimento de onda  $\lambda$  entre as antenas. Este mesmo  $\lambda$ , deve situar-se num intervalo entre  $3\lambda$  à  $5\lambda$ . Tendo em conta a expressão das ondas eletromagnéticas, onde a velocidade da luz ( $v$ ), é substituída pela velocidade das ondas acústicas, para representar o sistema acústico subaquático, temos a seguinte formula:

$$c = \lambda f \quad (2.11)$$

Ao realizar os cálculos apresentado por [2], levando em conta a velocidade do som na água de  $1520m/s$ , e uma frequência de  $15kHz$ , temos o seguinte:

$$\lambda = \frac{1450ms}{15kHz} = 0,096m$$



Ao aproximar o valor encontrado acima para 10 centímetros, e levando em conta o maior valor do intervalo de comprimento de onda entre antenas de  $5\lambda$ , ter-se-á um espaçamento de 50 centímetros. Tal valor, comparado com os valores utilizados nas ondas eletromagnéticas é muito alto [2], sendo este uma das grandes limitações da implementação de técnicas MIMO em comunicações acústicas subaquáticas. Neste cenário o espaçamento entre antenas, exigirá um maior tamanho dos recetores e emissores [34].

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Modelo do sinal

O meio subaquático, como já foi retratado, é um ambiente de grande desafio para as comunicações acústicas subaquáticas. Desta forma, de modo a apresentar um ambiente de simulação próximo do real, foi adicionado ao algoritmo deste trabalho, as adversidades que o meio acústico apresenta. Este algoritmo segue os passos desenvolvidos em [2], [40], [53], para emular o canal de propagação.

Ao utilizar o SC-FDE para este trabalho, é melhorado o PAPR (por utilizar portadora única), em comparação ao convencional OFDM, que normalmente é utilizado para implementar as comunicações acústicas subaquáticas. O mesmo OFDM, tende a ter um PAPR muito alto em comparação ao SC-FDE, e normalmente possui maior eficiência para sistemas de comunicação que utilizam maior potência e que são mais complexos, ao contrário dos sistemas de UAC.

A simulação de forma mais clara, representa um sistema de comunicação acústico subaquático com um emissor e um recetor determinístico. Cada um dos dispositivos (emissor e recetor), foi configurado com uma certa quantidade de antenas (levando em conta os sistemas MIMO), com uma certa correlação entre elas. Foi utilizada a técnica de transmissão SC-FDE e a técnica de modulação QPSK. Também foram simulados diferentes tipos recetores de baixa complexidade (MRC e EGC), e um mais complexo (ZF).

No SC-FDE, maior parte do processamento é encontrado no recetor, onde, antes de ser realizada a operação IFFT, os símbolos são pré-codificados por uma Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* [DFT]), afim que, após a IFFT, cada subportadora conterá parte do símbolo.

O bloco transmitido pode ser considerado como:

$$x(t) = \sum_{n=N_G}^{N-1} x_n h_T(t - nT_s) \quad (3.1)$$

Onde  $T_s$ , descreve a duração do símbolo,  $N_G$  o número de amostras no prefixo cíclico, enquanto o  $h_T(t)$  é o filtro que é adotado para modelar o pulso. Num canal dispersivo no tempo, o sinal  $x(t)$  é transmitido, e na entrada do recetor, o mesmo é condensado e amostrado. O CP

é removido, e transformando assim num bloco no domínio do tempo  $\{y_n; n = 0, 1, \dots, N - 1\}$  [2].

No esquema SC-FDE, o bloco no domínio do tempo a ser transmitido é  $\{x_n; n = 0, 1, \dots, N - 1\}$ , denotando o bloco de dados com comprimento  $N$ , onde  $x_n$  é o  $n$ -ésimo símbolo de dados, escolhido duma certa constelação, utilizando uma regra de mapeamento próprio (acreditando que  $x_{-n} = x_{N-n}$ ,  $n = -N_G, N_G+1, \dots, -1$ ). O bloco transmitido no domínio da frequência é  $\{X_k; k = 0, 1, \dots, N - 1\} = DFT\{x_n; n = 0, 1, \dots, N - 1\}$ .

Ao considerar que a resposta geral ao impulso do canal de cada canal, seja mais curta que o prefixo cíclico, o bloco no domínio da frequência após o FDE (ou seja, a DFT do bloco recebido no domínio do tempo, já sem o CP) é  $\{Y_n; n = 0, 1, \dots, N - 1\} = DFT\{Y_k; k = 0, 1, \dots, N - 1\}$ , com

$$Y_k = H_k X_k + N_k \quad (3.2)$$

Onde  $\{H_k; k = 0, 1, \dots, N - 1\} = DFT\{h_n; n = 0, 1, \dots, N - 1\}$ , mostra a frequência de resposta do canal para a  $k$ -ésima subportadora (o canal é invariante no quadro), e  $N_k$  é o ruído do canal do bloco no domínio da frequência para esta subportadora.

Assumindo a estrutura do quadro com  $N$  subportadoras por bloco  $N_T$  no domínio do tempo, cada um corresponde a um bloco DFT. Os esquemas convencionais FDE, linear para SC dão-se por [53],

$$X_k = [Y_k H_k^*] \beta_k^2 \quad (3.3),$$

onde  $\beta_k^{(2)} = (\alpha + (|H_k|^2))^{-1}$ . Desta forma,

$$X_k = X_k |H_k|^2 \beta_k^{(2)} + N_k^{eq} \quad (3.4).$$

De modo a finalizar,

$$\alpha = E[|N_2|^2] / E[|H_k|^2] \quad (3.5),$$

em que  $N_{eq}$  expressa o ruído equivalente para fins de detecção, com

$$\left[ |N_{eq}|^2 \right] = \left[ 2\sigma_N^2 |H_k|^2 \right] \beta_k^{(2)} \quad (3.6)$$

E com

$$\sigma_N^2 = E \left[ |N_k|^2 \right] / 2 \quad (3.7)$$

### 3.1.1 Estimação de canal

O modelo de sinal utilizado neste trabalho, assemelha-se ao desenvolvido por Aleixo em [2], diferenciando-se na utilização de um estimador de canal.

Neste trabalho foi utilizado a sequência de treinos por pilotos convencionais para estimar o estado do canal, se consideramos que  $X_k = 0$ , que indica a ausência de sobreposição dos dados com o bloco de treino. Esta mesma pode ser definida como:

$$H_2^{(t,r)} = Y_k^{(r)} X_k^{(t)TS*} / 2\sigma_{TS}^2 \quad (3.8)$$

Onde  $X_k$ , representa a sequência de treino transmitida pela t-ésima antena de transmissão  $\{t = 1, 2, \dots, T\}$ ,  $\sigma_{TS}^2$  representa a potência da sequência de treinamento, isso assumindo que a sequência de treino está associada à diferentes antenas de transmissão ortogonais, onde o produto escalar das sequências de treino de antenas diferentes for igual a 0 (isto é,  $X_k^a X_k^b = 0$ ,  $b \neq a$ ), representado assim, a falta de interferência entre as antenas. Isto leva a  $H_k = H_k + \varepsilon_k$ , onde  $\varepsilon_k$ , que representa uma distribuição gaussiana, com media zero, definida como,

$$E \left\{ |\varepsilon|^2 \right\} = \frac{\sigma_N^2}{\sigma_{TS}^2} \quad (3.9),$$

com  $\sigma_N^2 = \frac{E\{|N_k|^2\}}{2}$  e com  $\sigma_{TS}^2 = \frac{E\{|X_k^{TS}|^2\}}{2}$ , como está definido em [40], [53].

De forma a melhorar a estimação do canal ao empregar blocos de estimação mais curtos, tal melhoria pode ser implementada como:

$$H_k^{(t,r)} = DFT \left\{ h_n^{(t,r)} w_n \right\} \quad (3.10)$$

Onde  $w_n = 1$ , se a  $n$ -ésima amostra no domínio do tempo estiver dentro do prefixo cíclico, caso contrário o valor será 0.

### 3.2 Elementos essenciais

No intuito de representar os tipos de pesquisas e métodos que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, abaixo são representadas para cada elemento da metodologia um tipo de pesquisa ou método essencial.

- **Finalidade:** quanto à finalidade, seguir-se-á uma pesquisa aplicada, onde será analisado a partir dos resultados de uma simulação de Monte Carlo, como a utilização de técnicas de estimação de canal e a utilização de um modelo de ruído impulsivo, em comunicação acústica subaquática. Este método tem uma melhor representação de um ambiente real [54] do que a utilização de uma estimação ideal do canal.
- **Objetivo:** este trabalho tende a seguir o objetivo de explicar, como a utilização de um ambiente mais próximo do real pode afetar o sistema de comunicação acústica subaquática, analisando a quantidade de bits errados no recetor.
- **Abordagem:** quanto a abordagem, o trabalho tende a seguir uma pesquisa quantitativa, onde será simulado o envio de dados entre um emissor e um recetor, com base na utilização de blocos de bits. Medir-se-á a quantidade de bits errados, em relação aos enviados, para determinar a taxa de ocorrência de erros, para cada nível de sinal ruído.
- **Métodos:** quanto ao método a ser seguido, é utilizado o método hipotético-dedutivo, onde a hipótese a ser apresentada, é a de que a utilização de modelos de ruído impulsivo, e de estimação de canal tendem a modelar de forma mais real um sistema de comunicação acústico subaquático.

- Procedimento: como procedimento, foi utilizado um procedimento experimental, onde como já foi apresentado acima, será criada uma simulação Monte Carlo, que descreve o envio de blocos de bits de um emissor para um recetor, através de um canal de propagação. Esta simulação tem como variáveis principais, a estimação de canal, o ruído impulsivo, desvanecimento e o AWGN. Foi determinada a degradação de sinal que ocorre quando se tem uma estimação de canal ideal, efetuando uma comparação com os resultados com a estimação de canal (utilizando a sequência de treino de pilotos multiplexados), levando em conta todas as imparidades retratadas acima. Todo o processamento do transmissor e do recetor são simulados no MatLab (simulação de Monte Carlo). Esse ruído impulsivo, é levado em conta através da utilização do modelo estatístico de ruído impulsivo da Cadeia de Markov (Modelo Binário).

### 3.3 Elementos não essenciais

A simulação deste trabalho será feita na aplicação MatLab, sendo uma plataforma matemática e IDE de desenvolvimento, criada para trabalhar com programação de alto nível através do *Simulink* e linguagens derivadas do C/C++ [55].

## 4 CRONOGRAMA

Abaixo na Figura 11, é apresentado o cronograma a ser seguido para desenvolvimento deste trabalho.

Nome da Tarefa	Duração	Início	Conclusão
1 Dissertação	179 dias	Seg 01/11/21	Qui 07/07/22
1.1 Fundamentação Teórica	110 dias	Seg 01/11/21	Sex 01/04/22
1.1.1 Propagação acústica	30 dias	Seg 01/11/21	Sex 10/12/21
1.1.2 Estimação do canal	30 dias	Seg 21/02/22	Sex 01/04/22
1.1.3 Tecnologia MIMO	50 dias	Seg 13/12/21	Sex 18/02/22
1.2 Desenvolvimento da simulação	30 dias	Seg 04/04/22	Sex 13/05/22
1.3 Recolha e análise dos resultados	20 dias	Seg 16/05/22	Sex 10/06/22
1.4 Conclusão	15 dias	Seg 13/06/22	Sex 01/07/22
1.5 Verificação do documento no geral	4 dias	Seg 04/07/22	Qui 07/07/22

Figura 11: Cronograma das tarefas.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

A simulação de forma mais clara, representa um sistema de comunicação acústico subaquático com um emissor e um recetor determinístico. Cada um dos dispositivos (emissor e recetor), será configurado com uma certa quantidade de antenas (levando em conta os sistemas MIMO) como descrito Tabela 1, com uma certa correlação entre elas dependendo do cenário.

A avaliação de desempenho do sistema de comunicação UWA, é realizada através de uma simulação de Monte Carlo, onde o cenário, é implementado aplicando a técnica de transmissão SC-FDE e m-MIMO. Esta avaliação, é em função do BER. De forma que, é enviado uma quantidade de  $N = 256$  símbolos QPSK, através dum canal que é representado de forma estatística. No canal é aplicado um desvanecimento *Rayleigh* severo de 20 caminhos de potência não correlacionadas, que corresponde ao pior cenário para a comunicação acústica subaquática, tendo cada um deles a mesma potência média.

O canal foi estimado através de uma sequência de treino multiplexadas com símbolos de dados. O MIMO multicamadas também é assumido, focando na multiplexagem espacial.

A nível de recetores, com exceção do ZF, todos são iterativos, levando em conta  $L=4$  iterações de cancelamento. Visto que este mesmo valor tende a representar o melhor cenário. Ao aumentar este número de iterações, é visto que não é atribuído melhorias significativas no desempenho do sistema de comunicação, como referido em [2].

No canal implementado, foi atribuído como já referido acima, um desvanecimento. Para além do desvanecimento, também foi adicionado o ruído AWGN e o ruído impulsivo, que estão presentes nas comunicações UWA.

Para simular o ruído impulsivo, foi utilizado o Modelo de Estados Binários da cadeia de Markov, como foi descrito no tópico 2.1.2.8.1. Onde as probabilidades são representadas da seguinte forma:

- Prob (Good->Bad) =0,1;
- Prob (Good->Good) =0,9;
- Prob (Bad->Bad) =0,2;
- Prob (Bad->Good) =0,8.

Ressalta-se que a probabilidade de alteração de um estado para o outro, varia de símbolo para símbolo. Assumiu-se também que a variação de ruído impulsivo (quando num estado mau), é 20dB maior que a variação de ruído AWGN.



Os cenários foram desenvolvidos com base as *baselines* descritas na tabela abaixo:

*Tabela 1: Cenários utilizados para cada simulação.*

	Diversidade	Estimação de canal	Ruído impulsivo	Correlação
<b>Baseline 1</b>	MIMO 4X32	Estimação de canal ideal	Sem ruído/ Com ruído	0
<b>Baseline 2</b>	MIMO 4X32	Estimação de canal ideal vs Estimação de canal com pilotos	Com ruído	0
<b>Baseline 3</b>	MIMO 4X32	Estimação de canal ideal vs Estimação de canal com pilotos	Com ruído	0,0.3
<b>Baseline 4</b>	MIMO 4X32	Estimação de canal	Com ruído	0.3, 0.5, 0.7
<b>Baseline 5</b>	MIMO 4X32 vs 4X256	Estimação de canal	Com ruído	0.3

Na baseline 5, a correlação levada em conta foi a 0.3, pela mesma estar mais próximo de um valor ideal, visto que um sistema de comunicação, contém um certo nível de correlação, e quanto mais baixo for este nível melhor.

### 5.1 Primeiro cenário (*baseline 1*)

Na apresentação dos dados coletados, é necessário salientar que os mesmos, a nível de números de iterações de cancelamentos, o L recebeu o valor de 4. Visto que o acréscimo de tal número de iterações, não proporciona alterações significativas no desempenho do sistema de comunicação, como referido no trabalho [2].

A Figura 12, representa a *baseline 1*, relativamente com as configurações apresentadas na Tabela 1. Onde é verificado o desempenho do sistema de comunicação, quando é levado em conta o ruído impulsivo, comparado com a ausência do mesmo. Desta forma podemos afirmar que o ruído impulsivo degrada de forma drástica as comunicações acústicas subaquáticas. Mas é necessário ressaltar, que o ruído impulsivo é essencial para a representação de um sistema de UAC, pois o sistema está mais aproximado dum ambiente real. Também podemos verificar, comparando os recetores, que o MRC possui um desempenho

aproximadamente igual ao ZF (sabendo que o mesmo possui maior complexidade). Já o EGC, possui um pior desempenho em comparação com os outros.

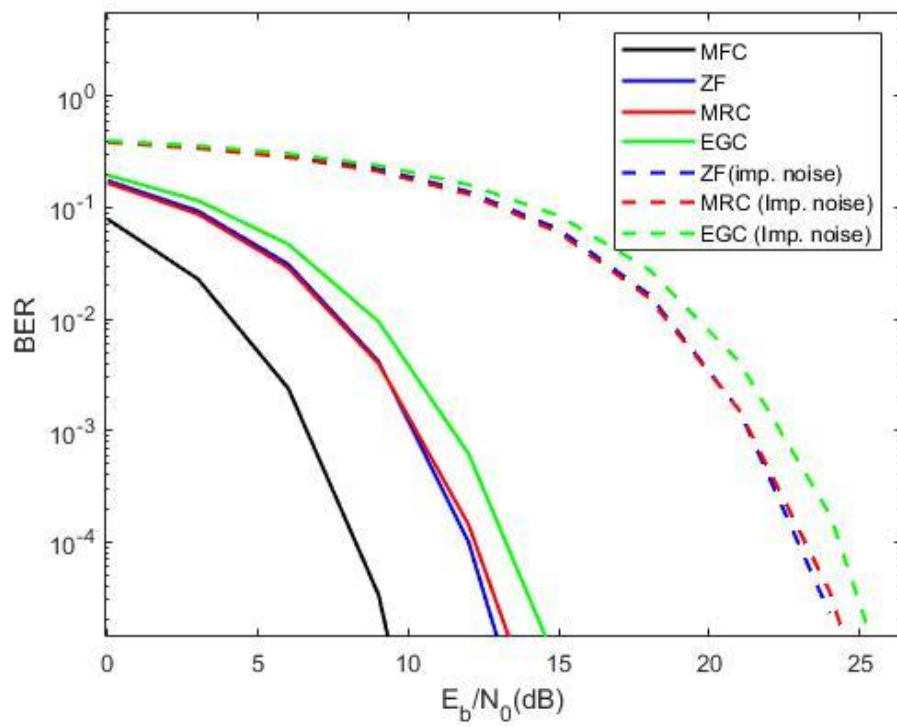


Figura 12: Representação da baseline 1 "autor".

## 5.2 Segundo cenário (*baseline 2*)

Ao analisar a Figura 13 (*baseline 2*), pode notar-se que a utilização da estimação de canal através de símbolos pilotos (sequência de treinos multiplexados), oferece uma certa degradação de desempenho, e esta mesma degradação é mais notória no MRC, que se torna o recetor com pior desempenho. Consoante as descrições acima, visto que o EGC não necessariamente precisa de estimação de canal, uma opção clara é a não utilização de um estimador de canal para o mesmo. A estimação de canal para certos recetores como o ZF e o MRC, é necessária, mas a mesma tende a degradar o desempenho do MRC, principalmente com a utilização dos pilotos multiplexados, que criam uma baixa eficiência espectral.

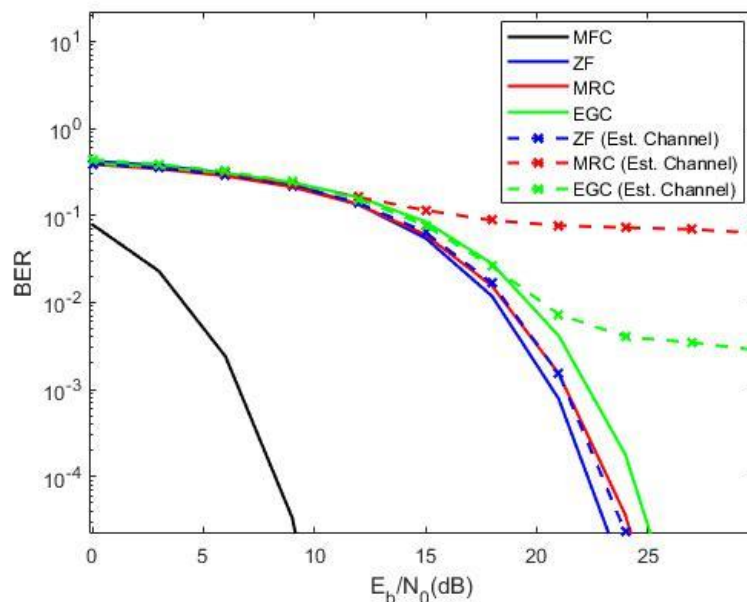


Figura 13: Representação da *baseline 2* "autor".

## 5.3 Terceiro cenário (*baseline 3*)

Para a Figura 14, respetivamente relacionada com *baseline 3*, pode notar-se que ao acrescentar a variável de correlação entre as antenas, com um valor de 0.3, a mesma tende a degradar o sinal de forma ínfima, isto para os três tipos de recetores. Os recetores de baixa complexidade estão a possuir um desempenho pior que o ZF até agora. Mesmo com o aumento da degradação ao inserir o ruído impulsivo e a estimação de canal.

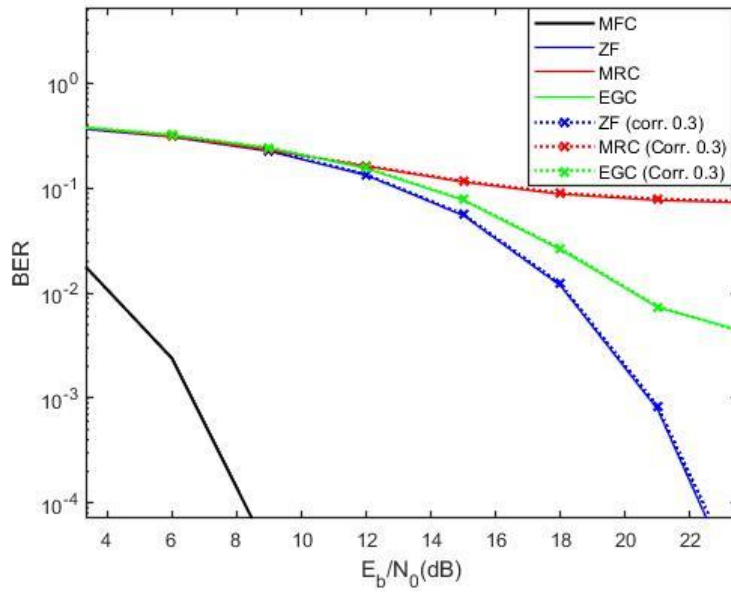


Figura 14: Representação da baseline 3 “autor”.

#### 5.4 Quarto cenário (baseline 4)

A Figura 14 e Figura 15, onde a principal variável a ser analisada é a correlação entre as antenas, e como ela pode degradar o desempenho o sistema de UAC, nota-se que, quanto maior for a correlação entre as antenas, maior será a degradação no desempenho da comunicação. É possível analisar que na Figura 15, com os valores de 0.3 é 0.5, a degradação não é tão notável quando a correlação é de 0.7. Isto permite-nos entender que, quanto menor for a correlação entre as antenas, melhor será o desempenho do sistema de comunicação.

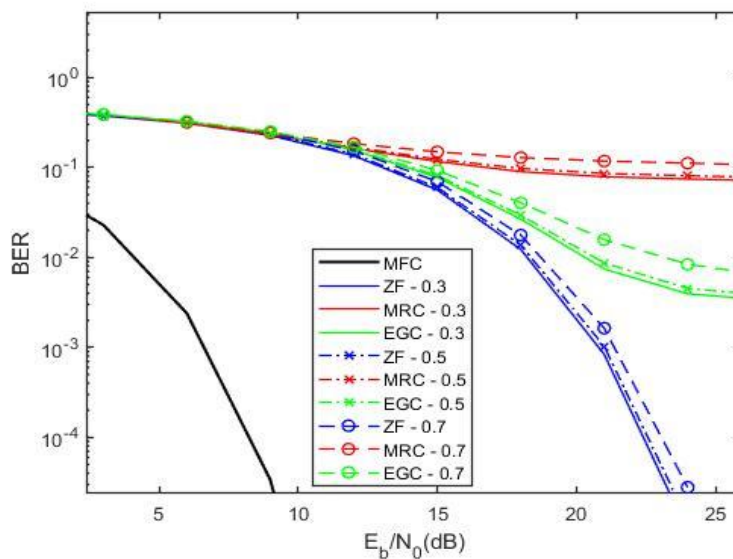


Figura 15: Representação da baseline 4 “autor”.

## 5.5 Quinto cenário (baseline 5)

A Figura 16 está diretamente relacionada com a variável de diversidade. Isto é, com o aumento das antenas recetoras, é possível verificar um aumento visível no desempenho do sistema. Podemos ver também que o aumento de antenas recetoras, tem maior impacto nos recetores MRC e EGC, aumentando bastante o desempenho dos mesmos. Onde o recetor MRC, até a um certo ponto possui maior desempenho que o EGC. Mesmo com um aumento mínimo de desempenho, o ZF ainda é o recetor com melhor desempenho comparado aos outros.

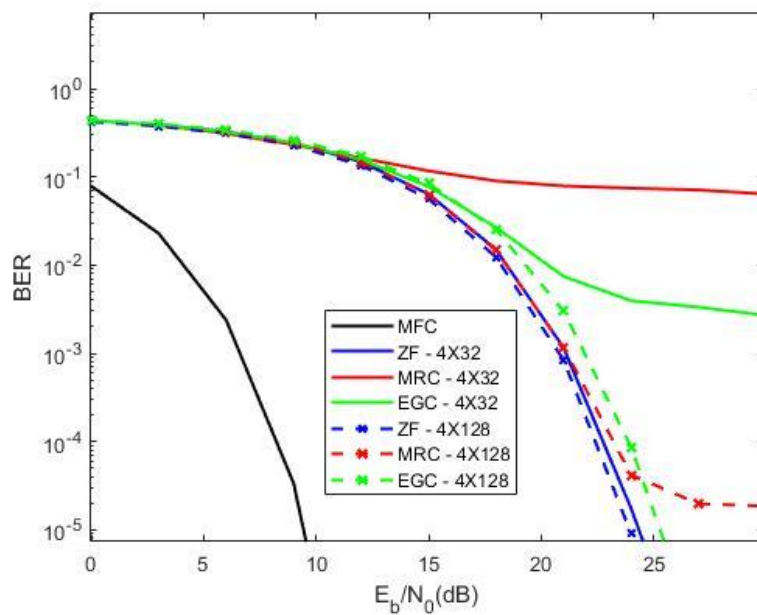


Figura 16: Representação da baseline 5 "autor".

## 6 CONCLUSÕES

No analisar dos resultados obtidos, podemos afirmar que ao modelar o canal, de forma a ter uma representação mais próxima dum ambiente real, o ruído impulsivo, nos sistemas de comunicação acústico subaquático, insere uma certa degradação significativa. Recetores como o ZF, que possuem maior complexidade, apresentam um melhor desempenho.

A partir da análise dos resultados, foi possível verificar também que a variável de estimação de canal, tende a aumentar a degradação de desempenho do sistema, isto para todos os recetores, principalmente para recetores que necessitam de estimadores, como o MRC e o ZF. Isto é causado pela deficiência espectral que a técnica de pilotos multiplexados provoca, e pelo aumento de processamento que os recetores têm de ter, para processar os pilotos.

Sobre os níveis de correlação, foi possível verificar que mesmo aumentando a correlação até 0.5, o desempenho ainda continua a ser considerável, onde não tende a diferir muito do cenário sem a correlação.

Diferente dos sistemas de comunicações rádio que atualmente tendem a utilizar comprimentos de ondas a níveis milimétricos, de forma a permitir um aumento considerável da quantidade de antenas nos seus terminais, a comunicação acústica subaquática é muito diferente. As ondas acústicas possuem um comprimento de onda nos níveis dos centímetros. Este comprimento de onda maior, dificulta na disposição ou utilização da técnica m-MIMO, que utilizando um número maior de antenas, o sistema sofrerá com altos níveis de correlação, ou caso tenha o espaçamento devido, os terminais necessitarão de ter dimensões maiores para dar suporte ao número de antenas e o espaçamento entre elas.

Por último, o aumento do número de antenas de receção, de forma geral, provou a obtenção de um alto ganho de diversidade, melhorando o desempenho principalmente do recetor MRC, que até certo ponto obteve melhor desempenho que o EGC.

O recetor que possuiu melhor desempenho nos cenários de teste foi o ZF. Mesmo sendo o mais complexo em seu desenvolvimento e processamento, ele em todos os cenários conseguiu destacar-se. Mas se a opção for um recetor de baixa complexidade, a escolha mais viável é a utilização do recetor EGC, que demonstrou melhor performance em comparação ao MRC.

## 7 TRABALHO FUTURO

Para trabalhos futuros, aconselha-se o desenvolvimento de ambientes comparativos. Como a comparação dum sistema que utiliza pilotos implícitos e os pilotos multiplexados, de modo a verificar, qual técnica de estimação de canal provê melhor desempenho. Visto que a deficiência dos pilotos multiplexados com os dados, está na baixa eficiência espectral. É também necessário verificar como os diferentes modelos de ruído impulsivo podem afetar o sistema de comunicação. De modo a criar um cenário mais viável e mais próximo da realidade.

No intuito da melhoria dos sistemas comunicação acústicos subaquáticos, é necessário utilizar de técnicas que estão desenvolvidas nas comunicações convencionais (como 5G), para esta comunicação. Uma destas técnicas, é a que faz a utilização de códigos de verificação de paridade de baixa densidade (*Low-Density Parity-Check* [LDPC]), que podem ser inseridos nas UAC, a fim de verificar se existe melhoria de desempenho nas mesmas comunicações.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] University of Rhode Island, “History of Underwater Acoustics.” <https://dosits.org/people-and-sound/history-of-underwater-acoustics/> (accessed Jan. 10, 2022).
- [2] J. Aleixo, “Análise de desempenho de recetores de baixa complexidade para MIMO massivo em canais subaquáticos entre antenas,” Dissertação, Universidade Autónoma de Lisboa, Lisboa, 2020.
- [3] M. Marques da Silva, R. Dinis, and J. Guerreiro, “A Low Complexity Channel Estimation and Detection for Massive MIMO Using SC-FDE,” *Telecom*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, Mar. 2020, doi: 10.3390/telecom1010002.
- [4] M. Marques da Silva and R. Dinis, “Iterative frequency-domain detection and channel estimation for space–time block codes,” *European Transactions on Telecommunications*, vol. 22, no. 7, pp. 339–351, 2011.
- [5] D. J. P. L. Matos, “Comunicações Óticas de Alto Débito para Estação de Acostagem Submarina,” 2016.
- [6] T. Calonda, “Operacionalização de um array de hidrofonesno âmbito do projecto Deepfloate Sidenav,” Alfeite, 2018.
- [7] E. Machado, “Modem Acústico Subaquático a 1 Mbit/s,” Braga, 2016.
- [8] S. Inácio, “Projeto de Antenas para Comunicações RF Subaquáticas,” Porto, 2016.
- [9] C. Oliveira, “Modem de Ultrassons para Comunicação Subaquática a 1 Mbit/s,” 2013.
- [10] R. F. W. Coates, *Underwater Acoustic Systems*. London: Macmillan Education UK, 1990. doi: 10.1007/978-1-349-20508-0.
- [11] United States Naval Academy, “Principles of underwater sound,” in *Fundamentals of Naval Weapons Systems*, Accessed: Nov. 15, 2021. [Online]. Available: <https://man.fas.org/dod-101/navy/docs/fun/part08.htm>
- [12] M. Stojanovic, “Underwater Acoustic communication,” *IEEE Electro International*, pp. 435–440, 1995.
- [13] V. Rossbach, “Influência de ondas acústicas sobre a dispersão de partículas em um leito fluidizado circulante gás-sólido,” Florianópolis, 2020.
- [14] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, and J. Sanders, *Fundamentals of Acustics*, 4th ed., vol. 4. New york: John Wiley & Sons, Inc, 2000. [Online]. Available: [www.SolutionManual.info](http://www.SolutionManual.info)



- [15] M. I. Freitas Valério, “Propagação e influência do ruído em ambientes aquáticos,” Coimbra, 2017.
- [16] E. S. Costa and E. B. Medeiros, “ESTUDO SOBRE A PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM ÁGUAS RASAS,” *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, Lisboa, Jun. 29, 2015.
- [17] K. v Mackenzie, “Nine-term equation for sound speed in the oceans,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70, no. 3, pp. 807-807–812, 1981, doi: 10.1121/1.386920.
- [18] Marques Nelson, “Tópicos de Física II.” Accessed: Dec. 11, 2021. [Online]. Available: [https://nelsonreyes.com.br/T%C3%B3picos%20de%20F%C3%ADsica%20II\\_Apostila.pdf](https://nelsonreyes.com.br/T%C3%B3picos%20de%20F%C3%ADsica%20II_Apostila.pdf)
- [19] S. S. Panchal, V. V. Dwivedi, and J. P. Pabari, “Design of Attenuation loss and Multipath propagation Model for Underwater Acoustic Communication in Tank”.
- [20] F. John, M. Cimdins, and H. Hellbrück, “Underwater Ultrasonic Multipath Diffraction Model for Short Range Communication and Sensing Applications,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 20, pp. 22934–22943, 2021.
- [21] Xueyi Geng and Adam Zielinski, “An eigenpath underwater acoustic communication channel model,” Nov. 2002, pp. 1189–1196. doi: 10.1109/oceans.1995.528591.
- [22] A. Czapiewska, A. Luksza, R. Studanski, and A. Zak, “Reduction of the multipath propagation effect in a hydroacoustic channel using filtration in cepstrum,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 3, Feb. 2020, doi: 10.3390/s20030751.
- [23] Y. Su, X. Liu, Z. Jin, and X. Fu, “Fast Estimation of Underwater Acoustic Multipath Channel Based on LFM Signal,” Oct. 2020. doi: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9388991.
- [24] M. Stojanovic and J. Preisig, “Underwater acoustic communication channels Propagation models and statistical characterization,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 84–89, Jan. 2009.
- [25] A. Moreira, “Tecnologias de Transmissão,” Jan. 1999. <http://www3.dsi.uminho.pt/adriano/Teaching/Comum/FactDegrad.html> (accessed Dec. 22, 2021).
- [26] M. Figueredo, “Análise comparativa do desempenho dealgoritmos para localização de sinais sonorossujeitos a ruído AWGN e impulsivo,” Rio Grande do Norte, 2019.
- [27] S. Banerjee and M. Agrawal, “Underwater acoustic communication in the presence of heavy-tailed impulsive noise with bi-parameter cauchy-Gaussian mixture model,” in

- International Symposium on Ocean Electronics, SYMPOL*, 2013, pp. 349–354. doi: 10.1109/sympol.2013.6701903.
- [28] S. Wu, S. Wang, Z. He, K. Niu, and Y. Rong, “An Approximate Message Passing Algorithm for Channel and Impulsive Noise Estimation in Underwater Acoustic OFDM Systems,” in *OCEANS 2019 - Marseille*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867369.
- [29] I. Borges and S. Borges, “Análise do ruído impulsivo nas modulações digitais,” Patos de Minas, 2017.
- [30] J. Torres and J. Torres Gómez, “A survey on impulsive noise modeling. A SURVEY ON IMPULSIVE NOISE MODELING,” *Revista Telemática*, vol. 16, no. 1, pp. 101–113, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/321137839>
- [31] G. K. Kaleb, “Channel equalization for block transmission systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 110–121, 1995, doi: 10.1109/49.363140.
- [32] M. Khatib, “Block Transmission Systems in Wireless Communications,” 2011, pp. 160–186. [Online]. Available: [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
- [33] L. Litwin and M. Pugel, “The principles of OFDM,” *RF signal processing*, vol. 2, pp. 30–48, 2001.
- [34] S. Yoshizawa, H. Tanimoto, and T. Saito, “SC-FDE vs OFDM: Performance comparison in shallow-sea underwater acoustic communication,” in *2016 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISPACS.2016.7824682.
- [35] M. M. da Silva and F. A. Monteiro, *MIMO processing for 4G and beyond : fundamentals and evolution*. Accessed: May 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/multiuser-mu-mimo.php>
- [36] M. Kuschnerov *et al.*, “Data-Aided Versus Blind Single-Carrier Coherent Receivers,” *Photonics Journal, IEEE*, vol. 2, pp. 387–403, Jul. 2010, doi: 10.1109/JPHOT.2010.2048308.
- [37] R. P. David, R. Sampaio Neto, and R. E. Musafir, “Técnica de estimação de canal utilizando símbolos pilotos em sistemas OFDM,” 2007.
- [38] Y. Wang and X. Dong, “Frequency-Domain Channel Estimation for SC-FDE in UWB Communications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 54, no. 12, pp. 2155–2163, 2006, doi: 10.1109/TCOMM.2006.885084.

- [39] F. Balseiro, “Robust Channel Estimation for Broadband Satellite Communications,” Dissertação, Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [40] M. M. da Silva, R. Dinis, and J. Guerreiro, “Implicit pilots for an efficient channel estimation in simplified massive MIMO schemes with precoding,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/5051963.
- [41] C. Wang, E. K. S. Au, R. D. Murch, W. H. Mow, R. S. Cheng, and V. Lau, “On the performance of the MIMO zero-forcing receiver in the presence of channel estimation error,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 805–810, Mar. 2007, doi: 10.1109/TWC.2007.05384.
- [42] T. Karp, S. Trautmann, and N. J. Fliege, “Zero-Forcing Frequency-Domain Equalization for Generalized DMT Transceivers with Insufficient Guard Interval,” 2004.
- [43] J. Ali and Ö. Ertug, “Performance of MRC and EGC Antenna Diversity Reception for M-QAM over Ricean Fading Environment with PSAM and LMMSE Channel Estimation.”
- [44] R. Gomes, “Estudo e Comparação de Modelos de Canal Rádio para Sistemas MIMO,” Dissertação, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.
- [45] F. Bouanani and H. Ben-Azza, “Efficient Performance Evaluation for EGC, MRC and SC Receivers over Weibull Multipath Fading Channel,” in *CROWNCOM*, 2015, vol. 156, pp. 346–357. doi: 10.1007/978-3-319-24540-9.
- [46] J. Schmidt, A. Schmidt, and I. Kochanska, “Multiple-Input Multiple-Output Technique for Underwater Acoustic Communication System,” 2018.
- [47] M. M. da Silva, R. Dinis, and J. Guerreiro, “Energy-Efficient and Spectrally-Efficient MIMO,” *Wiley 5G Ref*, 2019.
- [48] Electronics Notes, “MIMO Formats - SISO, SIMO, MISO, MU-MIMO.” <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/iso-simo-miso-mimo.php> (accessed May 26, 2022).
- [49] D. McGrath, “What is 5G Massive MIMO?,” Feb. 19, 2020. [https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2020/02/19/what\\_is\\_5g\\_massive-mimo.html](https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2020/02/19/what_is_5g_massive-mimo.html) (accessed Apr. 11, 2022).
- [50] Electronics Notes, “MIMO Space Time Block Coding and Alamouti Codes.” <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/space-time-block-alamouti-codes-coding.php> (accessed May 20, 2022).

- [51] Electronics Notes, “MIMO Antenna Beamforming.” <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/antenna-beamforming.php> (accessed May 22, 2022).
- [52] Electronics Notes, “MU-MIMO Multi-User MIMO.”
- [53] M. Marques da Silva, R. Dinis, J. Aleixo, and L. M. L. Oliveira, “On the Performance of LDPC-Coded MIMO Schemes for Underwater Communications Using 5G-like Processing,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11, p. 5549, May 2022, doi: 10.3390/app12115549.
- [54] H. Oh, D. Seo, and H. Nam, “Design of a Test for Detecting the Presence of Impulsive Noise,” *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 24, p. 7135, Dec. 2020, doi: 10.3390/s20247135.
- [55] V. Salvador, “O que é o Matlab?,” Aug. 2017.