

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE DEFESA**

**DENIS BACKER DE SOUZA**

**CONFORMAÇÃO DE FEIXE OTIMIZADA PARA TRANSMISSÃO DE  
SINAIS SUBAQUÁTICOS**

**RIO DE JANEIRO  
2020**

**DENIS BACKER DE SOUZA**

**CONFORMAÇÃO DE FEIXE OTIMIZADA PARA TRANSMISSÃO  
DE SINAIS SUBAQUÁTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência em Engenharia de Defesa.

Orientador: José Antonio Apolinário Jr. - D.Sc.

Coorientador: Marcello Luiz Rodrigues de Campos - Ph.D.

Rio de Janeiro

2020

©2020

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Backer de Souza, Denis

Conformação de Feixe Otimizada para Transmissão de Sinais Subaquáticos  
/ Denis Backer de Souza. – Rio de Janeiro, 2020.

70 f.

Orientador: José Antonio Apolinário Jr..

Coorientador: Marcello Luiz Rodrigues de Campos.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia de Defesa,  
2020.

1. Beamforming de Transmissão. 2. Arranjos de Transmissores. 3. Processamento de Sinais. 4. Hidrofones e Projetores. 5. Acústica Submarina. I. Jr., José Antonio Apolinário, orient. II. de Campos, Marcello Luiz Rodrigues, coorient. III. Título

**DENIS BACKER DE SOUZA**

**Conformação de Feixe Otimizada para Transmissão de  
Sinais Subaquáticos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência em Engenharia de Defesa.

Orientador: José Antonio Apolinário Jr.

Coorientador: Marcello Luiz Rodrigues de Campos

Aprovado em Rio de Janeiro, 14 de maio de 2020, pela seguinte banca examinadora:

---

Prof. **Vitor Gouvêa Andrezo Carneiro** - D. Sc. do IME - Presidente

---

Prof. **José Antonio Apolinário Jr.** - D.Sc. do IME

---

Prof. **Marcello Luiz Rodrigues de Campos** - Ph.D. da UFRJ

---

Prof. **Renato Peres Vio** - Ph.D. do IEAPM

Rio de Janeiro  
2020

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,  
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

# AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados a Deus, minha família, professor Apolinário, professor Marcello Campos, Departamento de Engenharia de Defesa (SE/10), Departamento Engenharia Elétrica (SE/3) do Instituto Militar de Engenharia, e todos os funcionários do Departamento de Acústica Submarina do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), principalmente, meu orientador na Marinha, CC(EN) Renato Vio.

*“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso.”*  
*(Albert Einstein)*

## RESUMO

Este trabalho apresenta um esquema de conformação de feixe (*beamforming*) para a transmissão de sinais subaquáticos utilizando um arranjo linear de projetores. Observa-se no exemplo estudado que, ao usar um arranjo de projetores, tem-se um ganho de desempenho no sinal recebido por um hidrofone com respeito a uma fonte singular. Através de variações nos retardos dos sinais para cada projetor, é possível direcionar a transmissão e obter melhor rendimento na recepção. Este trabalho investiga, a partir do conhecimento do cenário subaquático, uma maneira de escolher retardos adequados.

**Palavras-chave:** Beamforming de Transmissão. Arranjos de Transmissores. Processamento de Sinais. Hidrofones e Projetores. Acústica Submarina.



# ABSTRACT

This work presents an underwater transmit beamforming scheme using a linear array of projectors. It is observed in the example investigated herein that, when using an array of projectors, there is a performance gain in the signal received by a hydrophone with respect to a singular source. By varying the signal delays for each source, it is possible to steer the transmission and obtain better efficiency in the reception. This work investigates, from the knowledge of the underwater scenario, a way to choose suitable delays.

**Keywords:** Beamforming Transmit. Transmitters Arrays. Signal Processing. Hydrophones and Projectors Underwater Acoustics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação entre a temperatura e os perfis de velocidade do som pela profundidade. . . . .	23
Figura 2 – Sinal transmitido e recebido por múltiplos percursos. . . . .	24
Figura 3 – Diagrama de modelos matemáticos para a propagação do som no mar. . . . .	26
Figura 4 – Raios representando a propagação de sinais transmitidos a partir de fonte singular a 5 m de profundidade para um hidrofone (transdutor de pressão sonora na água para sinal elétrico) a 250 m de profundidade e 10 km de distância. . . . .	28
Figura 5 – Diagrama de raios em águas profundas. . . . .	28
Figura 6 – Tempo ( <i>delays</i> ) de chegada de cada raio e suas respectivas amplitudes (em módulo). . . . .	29
Figura 7 – Diagrama de raios para águas rasas. . . . .	30
Figura 8 – Tempo ( <i>delays</i> ) de chegada de cada raio e suas respectivas amplitudes (em módulo). . . . .	30
Figura 9 – Conformação de feixe de transmissão na direção $\theta$ . $r_m$ representa o retardo imposto a cada transmissor para conformar o feixe na direção de $\theta$ . . . . .	32
Figura 10 – Transmissão com arranjo de $M$ projetores para um hidrofone. Note que $H_m(j\omega)$ não é conhecido, mas uma mera representação do canal (subaquático) da Equação (2.8). . . . .	32
Figura 11 – Modulação BPSK. . . . .	34
Figura 12 – Largura da banda ( $B_s$ ) definida nos pontos de meia potência. . . . .	36
Figura 13 – Sinal transmitido no domínio da frequência para diferentes taxas de transmissão. . . . .	36
Figura 14 – Modelo da simulação simplificado ( <i>farfield</i> ) de acordo com a Equação (3.1). . . . .	40
Figura 15 – Detecção do sinal BPSK recebido. . . . .	41
Figura 16 – Gráfico da taxa de erros (BER) pela conformação de feixe em um canal com ruído gaussiano branco (RGB). . . . .	42
Figura 17 – Detecção do sinal BPSK recebido. Note nessa figura o sincronismo indicado pelo retardo $\tau_{ref}$ . . . . .	42
Figura 18 – Ilustração do cenário e a velocidade do som da região Baía dos Anjos (fornecida pelo IEAPM). . . . .	43
Figura 19 – Gráfico da variação da taxa de erro de <i>bit</i> (BER) em função de $\theta$ . O ângulo de apontamento = $93^\circ$ foi definido pela menor BER com SNR de -4 dB. . . . .	44

Figura 20 – <i>Bit Error Rate</i> (BER) de uma fonte singular e de um arranjo com SNR variando de -30 dB a 10 dB. . . . .	45
Figura 21 – Histograma dos valores dos <i>bits</i> demodulados (antes do decisor) por um receptor a 5 m de profundidade, SNR = -10 dB, para os casos de uma fonte singular e de um arranjo com o ângulo de apontamento igual a 93°. . . . .	46
Figura 22 – Gráfico da variação da taxa de erro de <i>bit</i> (BER) em função de $\theta$ . O ângulo de apontamento (91°) foi definido pela menor BER com SNR de -4 dB. . . . .	46
Figura 23 – Mapa com a batimetria e distância entre o transmissor e receptor do cenário experimental. . . . .	47
Figura 24 – Gráfico $BER \times \theta$ simulado com batimetria do local e com fundo liso. . . . .	48
Figura 25 – Ilustração do cenário do experimento na região Baía dos Anjos com a variação da maré. . . . .	49
Figura 26 – Gráfico $BER \times \theta$ simulado com batimetria de fundo liso. Observa-se uma variação máxima de 18°, dos ângulos ( $\theta$ ) de apontamento de 85° a 103°, quando a maré aumenta de 0,6 m para 0,8 m. . . . .	49
Figura 27 – Cenário de comunicação entre o navio e submarino para grandes profundidades. . . . .	50
Figura 28 – Gráfico $BER \times \theta$ para a transmissão do submarino para o navio a 2 km de distância. . . . .	51
Figura 29 – Gráfico da BER com apontamento em função da distância. . . . .	51
Figura 30 – Gráfico $BER \times \theta$ com o mesmo cenário porém com aumento da distância. . . . .	52
Figura 31 – Diagrama de raios para a transmissão do submarino para o navio a 2 km de distância. . . . .	53
Figura 32 – Gráfico $BER \times \theta$ para a transmissão do navio para o submarino a 20 km de distância. . . . .	53
Figura 33 – Diagrama de raios para a transmissão do navio para o submarino a 20 km de distância. . . . .	54
Figura 34 – Estrutura que fixa o arranjo no fundo do mar. . . . .	55
Figura 35 – Relação entre a temperatura e os perfis de velocidade do som pela profundidade. . . . .	56
Figura 36 – Equipamentos utilizados de acordo com modelo da Figura 35. . . . .	56
Figura 37 – Estimativas da variância do sinal recebido pela transmissão da fonte singular e do arranjo a uma taxa de 200 bps. . . . .	57
Figura 38 – Potência recebida pela transmissão da fonte singular e do arranjo a uma taxa de 400 bps. . . . .	58
Figura 39 – Gráfico $BER \times \theta$ experimental com ruído gaussiano branco inserido para uma SNR de 7 dB. . . . .	60

Figura 40 – Gráfico $BER \times \theta$ experimental com diferentes marés para uma SNR de 7,2 dB. . . . .	61
Figura 41 – Modulação BPSK. . . . .	66
Figura 42 – Detecção do sinal BFSK recebido. . . . .	67
Figura 43 – Sinal modulado no domínio da frequência. . . . .	68
Figura 44 – Gráfico $BER \times \theta$ experimental com menor potência. . . . .	69
Figura 45 – Gráfico $BER \times \theta$ experimental com maior potência. . . . .	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distância em metros para uma atenuação de 100 dB pela frequência . .	19
Tabela 2 – Taxa de transmissão em função da distância . . . . .	20
Tabela 3 – Comparativo de taxa, distância e consumo . . . . .	20
Tabela 4 – Quantidade de <i>bits</i> errados ocorridos para transmissão com arranjo (segundo experimento, caso 2: SNR=18 dB) . . . . .	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico-digital
BER	<i>Bit error rate</i> (taxa de erros de <i>bits</i> )
bps	<i>bits</i> por segundo
BPSK	<i>Binary phase shift keying</i> (modulação binária de mudança de fase)
BFSK	<i>Binary frequency shift keying</i> (modulação binária de mudança de frequência)
D/A	Digital-analógico
DEP	Densidade espectral de potência
EDO-610	Fonte acústica submarina
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i> (Frequência extremamente baixa)
EM	Eletromagnética
EsqHS	Esquadrão de Helicópteros Antissubmarino
FE	<i>Finite element</i> (Elementos finitos)
FFP	<i>Fast field program</i> (programa de campo rápido)
FS	Fonte singular
FSK	<i>Frequency shift keying</i> (modulação com mudança de frequência)
IEAPM	Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> (interferência entre símbolos)
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (diodo emissor de luz)
MB	Marinha do Brasil
MIMO	<i>Multiple-input and multiple-output</i> (múltiplas entradas e múltiplas saídas)
NM	<i>Normal mode</i> (nodo normal)
PE	<i>Parabolic equation</i> (equação parabólica)

RF	Radiofrequência
RGB	Ruído gaussiano branco
RX	Receptor
SNR	<i>Signal-noise rate</i> (relação sinal-ruído)
TX	Transmissor
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (barramento serial universal)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Ângulo da conformação de feixe
$\theta_{ot}$	Ângulo da conformação de feixe ótimo
$\nabla$	Operador laplaciano
$c$	velocidade do som
$\tau$	<i>Delay</i> causado pela propagação do som no canal subaquático
$\Omega$	Frequência angular
$L$	Nível de pressão sonora
$p_{ref}$	Pressão sonora de referência
$p$	Pressão sonora medida
$I$	Intensidade acústica
$\rho$	Densidade do meio
$P$	Potência acústica
$S$	Área
$T$	Temperatura
$s$	Salinidade
$z$	Profundidade



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Comunicações Subaquáticas</b>	<b>19</b>
1.1.1	Transmissão Eletromagnética	19
1.1.2	Transmissão Óptica	20
1.1.3	Transmissão Acústica	20
<b>1.2</b>	<b>Acústica Submarina</b>	<b>21</b>
1.2.1	Ondas Acústicas	21
1.2.2	Velocidade do Som	22
1.2.3	Múltiplos Percursos	23
1.2.4	Ruído Ambiente	24
1.2.5	Perdas na Propagação	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO LITERÁRIA</b>	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelagem do Canal</b>	<b>26</b>
2.1.1	Teoria de Raios	27
2.1.2	Software <i>BELLHOP</i>	29
<b>2.2</b>	<b><i>Beamforming</i> de Transmissão</b>	<b>31</b>
<b>2.3</b>	<b>Modulação Digital</b>	<b>33</b>
2.3.1	Modulação BPSK	33
2.3.2	BER - Taxa de Erro de <i>Bit</i>	34
<b>2.4</b>	<b>Revisão Bibliográfica sobre <i>Beamforming</i> de Transmissão</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>Simulações</b>	<b>40</b>
3.1.1	Cenário da Raia Acústica	43
3.1.2	Cenário do Experimento de Campo	47
<b>3.2</b>	<b>Cenário com Grande Profundidade</b>	<b>50</b>
<b>3.3</b>	<b>Experimentos de Campo</b>	<b>54</b>
3.3.1	Primeiro Experimento	55
3.3.2	Transmissão a 200 bps	57
3.3.3	Transmissão a 400 bps	58
<b>3.4</b>	<b>Segundo Experimento</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>62</b>
<b>4.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>64</b>

	<b>ANEXO A – MODULAÇÃO FSK . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>A.1</b>	<b>Experimentos . . . . .</b>	<b>68</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A comunicação subaquática é um campo do conhecimento científico em crescimento devido à expansão de suas aplicações, incluindo exploração de petróleo e operações militares, que requerem a transmissão de dados subaquáticos sem conexões com fio (ETTER, 2018)(ISTEPANIAN; STOJANOVIC, 2002). Existem basicamente três tipos de tecnologias disponíveis para transmissões subaquáticas sem fio (GUSSEN et al., 2016). Uma delas é a comunicação por radiofrequência (RF), que apresenta alta taxa de transferência de dados a curto alcance e sofre um efeito Doppler moderado (PALMEIRO et al., 2011). Outra tecnologia é a transmissão óptica, preferencialmente em comprimentos de onda azul-verde, que requer posicionamento na linha de visada (SIMPSON; HUGHES; MUTH, 2012). Já a terceira tecnologia, a mais empregada, é a comunicação acústica que utiliza uma onda mecânica e possibilita a transmissão para longas distâncias (CHITRE; SHAHABUDEEN; STOJANOVIC, 2008). A proposta desta dissertação é investigar uma transmissão de sinais acústicos subaquáticos mais eficiente (menor taxa de erros com a mesma potência transmitida).

A modelagem do canal subaquático é um ponto importante a se considerar, pois deve levar em conta os principais fatores que influenciam o sinal: os múltiplos percursos, a alteração da direção e forma da onda sonora e a atenuação da energia. Além disso, o canal é variante no tempo, o que dificulta ainda mais mensurar esses fatores para propor um modelo que seja mais fiel ao mundo real.

O objetivo deste trabalho é realizar um *beamforming* de transmissão, no meio subaquático, através de um arranjo com múltiplos transmissores (projetores Hull Sonar EDO-610) para diferentes cenários. A conformação do feixe será realizada por retardos do sinal para cada projetor. Através de uma transmissão de sinal, inicialmente modulados em BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), é possível obter o melhor ângulo do *beamforming* no arranjo de transmissão que forneça uma menor taxa de erro de *bit* (BER, do inglês *Bit Error Rate*) e, assim, compará-la com a BER de uma transmissão realizada por uma fonte singular, com mesma potência.

Realizando uma pesquisa bibliográfica, no *site* do *IEEEExplore*, para os últimos 10 anos e usando “*transmit beamforming underwater*” como palavra-chave, obtêm-se 2 artigos relacionados ao tema desta dissertação. Um *beamforming* de transmissão para comunicações subaquáticas com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) é investigado em (LIAO; ZAKHAROV; MITCHELL, 2018). Este *beamformer* utiliza uma técnica de precodificação linear de forçar zero, *Zero-Forcing Beamforming* (WIESEL; ELDAR; SHAMAI, 2008), que busca anular as interferências entre os usuários. Por outro lado, (LEE OE-HYUNG LEE, 2001) realiza o *beamforming* de transmissão com um arranjo linear de transmissores

para melhorar o desempenho do sinal recebido, utilizando o sinal modulado em BPSK e um modelo simplificado de transmissão subaquática. Motivado pela dispersão do *bit* no diagrama de constelação, (LEE OE-HYUNG LEE, 2001) escolhe como ângulo de partida do *beamforming* de transmissão o ângulo de visada direta. Tal escolha, como será visto posteriormente, devido às características da propagação de um sinal acústico submarino, usualmente não corresponde ao melhor resultado.

## 1.1 Comunicações Subaquáticas

A comunicação subaquática pode ser realizada por duas formas: com fio (ou cabos), e sem fio. A comunicação através de cabos, principalmente fibra ótica, é bastante utilizada e explorada, devido à sua alta transmissão de dados. Porém, existem limitações físicas, como a distância, profundidade, temperatura e outras que acabam onerando esse tipo de comunicação. Outra característica das redes cabeadas subaquáticas é a pouca mobilidade, pois normalmente são redes fixadas para longos períodos de duração (FARR et al., 2010).

As comunicações sem fio estão crescendo bastante nos últimos anos, devido às diversas aplicações e atividades. A busca para obter maior mobilidade e dinâmica nas comunicações subaquáticas resultou em três tipos de comunicações sem fio: eletromagnética, óptica e acústica (STOJANOVIC; PREISIG, 2009).

### 1.1.1 Transmissão Eletromagnética

A transmissão por ondas eletromagnéticas é bastante difundida e estudada ao ar livre, e apresenta excelentes resultados para esse meio. Entretanto, sua utilização no meio subaquático apresenta poucas aplicações, pois esse tipo de comunicação sofre grande atenuação causada pelas características do ambiente. Os principais fatores que causam essa forte atenuação são a alta permissividade e a condutividade elétrica da água do mar. A atenuação das ondas planas também aumenta rapidamente com a frequência, e as aplicações para comunicações eletromagnéticas ficam limitadas para pequenas distâncias e baixas frequências, conforme apresentada na Tabela 1 (adaptada de (CHE et al., 2011)).

Tabela 1 – Distância em metros para uma atenuação de 100 dB pela frequência

Frequência (Hz)	100	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
Distância (m)	323	89,2	27,9	8,81	2,79

De acordo com a Tabela 2 (adaptada de (CHE et al., 2011)), pode-se perceber que a taxa de transmissão eletromagnética (EM) diminui bastante conforme aumenta a distância do canal de comunicação. Para obter um alcance maior (acima de 1 km) neste tipo de comunicação é utilizando a frequência extremamente baixa (*Extremely Low*

*Frequency - ELF*), e sua principal aplicação, nessa distância, é a telemetria em grande profundidade (RHODES, 2007).

Tabela 2 – Taxa de transmissão em função da distância

Distância (m)	< 10 m	50 m	200 m	> 1 km
Taxa (bps)	8 kbps	300 bps	25 bps	< 1 bps

### 1.1.2 Transmissão Óptica

Apesar da comunicação subaquática ser predominantemente através de ondas acústicas, devido ao seu alcance em longas distâncias, ela não consegue transmitir com alta velocidade. Assim, a comunicação óptica surge como uma proposta de transmissão em alta velocidade (10 Mbps e 1 Gbps). Ela, porém, apresenta diversas limitações que restringem bastante suas aplicações. As ondas ópticas oferecem um bom desempenho apenas em águas muito claras, com pouca turbidez, no espectro azul-verde, em curta distância, e requer um alinhamento estreito, ou seja, uma visada direta bem ajustada (FARR et al., 2010).

A Tabela 3 (adaptada de (FARR et al., 2010)) ilustra que na comunicação óptica, apesar da pouca distância (100m), transmite-se em uma taxa de dados bastante elevada em relação a comunicação acústica. E ainda apresenta um baixo consumo o que proporciona uma menor fonte de alimentação (bateria) para alta transferência de dados. Existem alguns equipamentos comerciais que utilizam esta tecnologia em veículos autônomos submarinos com a fonte óptica de laser e, principalmente, LED.

Tabela 3 – Comparativo de taxa, distância e consumo

Método	Distância	Taxa	Eficiência
Acústica	vários km	1 kbps	100 <i>bits</i> /joule
Óptica	100 m	1 Mbps	30.000 <i>bits</i> /joule

### 1.1.3 Transmissão Acústica

A comunicação acústica é uma tecnologia comprovada para aplicações de transmissores e sensores subaquáticos, pois oferecem um maior alcance na transmissão (milhares de metros) em relação às demais comunicações. Assim, a transmissão acústica surge como a principal forma de comunicação subaquática e, nos últimos anos, vem recebendo muita atenção para suas aplicações, incluindo militares, comerciais e científicas. As ondas sonoras sofrem muito pouca atenuação no canal subaquático. No entanto, devido a problemas de interferência dos múltiplos caminhos e baixa largura de banda, as taxas de transmissão são limitadas. Assim, as comunicações, citadas anteriormente, são complementares à comunicação acústica (FARR et al., 2010).

## 1.2 Acústica Submarina

Conforme visto na seção anterior, a melhor forma de comunicação subaquática é através das ondas acústicas, por sofrerem menor atenuação e com isso poderem percorrer grandes distâncias. Inicialmente, serão apresentadas as noções fundamentais associadas com a natureza física das ondas acústicas e suas ordens de magnitude. Uma característica intrínseca nas comunicações através da acústica submarina é a velocidade de propagação do som, pois ela varia espacialmente no oceano, principalmente em função da profundidade, que possui grandes variações de temperatura e pressão. A velocidade de propagação do som na água é bastante elevada, tipicamente  $1.500 \text{ m/s}$ , bem maior que a velocidade de propagação do som no ar, que é de  $343 \text{ m/s}$ , ambos a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  (KINSLER et al., 2000).

A propagação do som no mar possui aspectos importantes como os múltiplos percursos (*multipath*), que são causados pelas interfaces do canal subaquático, principalmente em águas rasas. Outro efeito da propagação é diminuir a amplitude do sinal, por efeitos espaciais (espalhamento geométrico), por um lado, e por absorção, por outro. Essa última está ligada às propriedades químicas da água do mar e é um fator decisivo na propagação de ondas acústicas subaquáticas, limitando seu alcance em altas frequências (LURTON, 2002).

### 1.2.1 Ondas Acústicas

As ondas acústicas se originam da propagação de uma perturbação mecânica produzida por uma fonte sonora. As compressões e dilatações da onda são passadas de um ponto para os pontos circundantes, por causa das propriedades elásticas do meio. O nível de pressão acústica, ou nível de pressão sonora ( $L$ ), é a razão de uma pressão sonora medida pela pressão sonora de referência ( $p_{ref}$ ), considerada  $1\mu\text{Pa}$ , e é expresso em escala logarítmica, em decibéis ( $dB$ ), como na seguinte equação (LURTON, 2002):

$$L = 10 \log \left( \frac{p}{p_{ref}} \right). \quad (1.1)$$

Quando um sinal se propaga, a energia acústica é transmitida ao longo dos caminhos (LURTON, 2002). A intensidade e a potência são duas características da energia acústica. Intensidade acústica ( $I$ ) é um valor médio da energia por área, em  $W/m^2$ :

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}, \quad (1.2)$$

onde  $p$  é a pressão medida de uma onda plana acústica,  $\rho$  é a densidade do meio e  $c$  é a velocidade do som.

Potência acústica ( $P$ ) é a intensidade acústica imposta a uma superfície ( $S$ ), em Watts. Para uma onda plana, temos:

$$P = IS = \frac{p^2 S}{2\rho c}. \quad (1.3)$$

### 1.2.2 Velocidade do Som

A velocidade de propagação do som na água ( $c$ ) depende de vários fatores. Não existindo uma fórmula exata de cálculo; com o objetivo de descobrir a melhor expressão, foram feitos estudos até a atualidade baseados numa fórmula empírica de Wilson (1960). Há mais de uma equação para determinar a velocidade do som no mar, pois os parâmetros (temperatura, salinidade e pressão) variaram de acordo o local. De acordo com (TALIB et al., 2011), a solução mais simples de modelagem (Medwin) é:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(s - 35) + 0.016z, \quad (1.4)$$

onde os parâmetros são:

$T$  é a temperatura (em graus Celsius) variando de 0 a 35 °C,

$s$  é a salinidade (em partes por mil, com o símbolo ‰) variando de 0 a 45 ‰, e

$z$  é a profundidade da água (em metros) variando de 0 a 1.000 m.

Esses parâmetros são afetados por mudanças sazonais e diurnas, principalmente em regiões de plataforma continental (águas rasas), onde a profundidade da água é na ordem de algumas centenas de metros.

Existem perfis típicos de velocidade do som no mar e todos esses perfis estão associados à temperatura e à profundidade. De acordo com a Figura 1 (adaptada de (ETTER, 2018)), pode-se observar que a camada próxima à superfície sofre ação de vento e aquecimento solar. A superfície do mar é aquecida durante o dia e o vento mistura a água, o que pode provocar o aparecimento de uma camada de água misturada (camada de mistura), chamada de isotérmica, apresentando assim um gradiente de velocidade positivo. Abaixo desta camada de superfície há a termoclina. O termo termoclina denota uma camada onde a temperatura varia com a profundidade. A termoclina apresenta gradientes negativos de temperatura e velocidade (a redução de temperatura predomina sobre a influência do aumento de profundidade, acarretando um gradiente de velocidade negativo) que variam com a estação do ano (LURTON, 2002). A camada isotermal, localizada nas áreas mais profundas do oceano, possui a temperatura da água aproximadamente constante. Assim, a velocidade do som aumenta linearmente com profundidade, devido à pressão hidrostática.

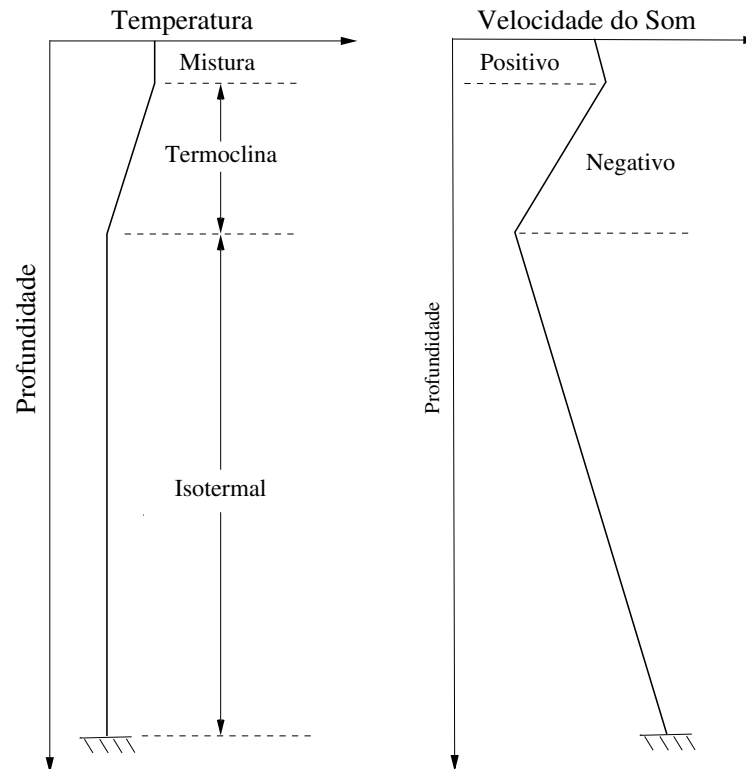


Figura 1 – Relação entre a temperatura e os perfis de velocidade do som pela profundidade.

### 1.2.3 Múltiplos Percursos

Os múltiplos percursos são problemas bem típicos de vários tipos de comunicações. Um dado sinal pode se propagar de uma fonte para um receptor ao longo de vários caminhos distintos, correspondendo a direções e durações distintas (LURTON, 2002), ou seja, com diferentes atenuações e atrasos. Essas múltiplas versões atrasadas e distorcidas do sinal transmitido chegam ao receptor e podem causar interferências entre símbolos (ISI - *intersymbol interference*). Os motivos desses fenômenos são as reflexões e refrações das ondas sonoras no mar. A reflexão ocorre, pois o meio de propagação é limitado pela superfície e o fundo do mar, assim os sinais transmitidos sofrem reflexões sucessivas nessas interfaces. Normalmente, este efeito está associado a ambientes em águas rasas. Águas rasas é definida como poucas centenas de metros de profundidade, conforme (JENSEN; KUPERMAN; PORTER, 2011). Já a refração está relacionada com águas profundas, onde há maiores variações de temperatura e, conseqüentemente, de velocidade do som, que se propaga com maior facilidade e sem muitas interferências.

Uma forma de modelar a propagação da onda no canal acústico submarino é através da teoria de raios, que define a linha na direção perpendicular à frente de onda como raio. A Figura 2 representa uma transmissão no canal subaquático, em águas rasas, com o diagrama de raios. E percebe-se os diversos caminhos que a onda sonora percorre do transmissor até o receptor. O raio pode chegar ao receptor de forma direta, sem reflexões,



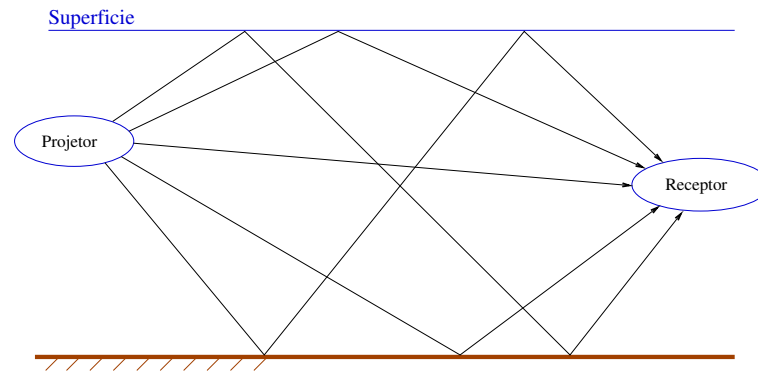


Figura 2 – Sinal transmitido e recebido por múltiplos percursos.

e com uma ou mais reflexões tanto na superfície como no fundo do mar.

Quando um raio percorre um caminho mais longo que o outro, a sua intensidade é mais atenuada e o tempo é maior em relação ao raio de menor percurso. Neste caso, a resposta do canal é chamada de fase mínima (STOJANOVIC; PREISIG, 2009). Entretanto, acontecem casos em que o raio que chega primeiro no receptor, ou seja, com menor tempo de percurso, não é o de maior amplitude. Isto ocorre devido à sua maior atenuação ou perdas sofridas neste percurso. A resposta de um canal com tal característica é dita de fase não mínima (STOJANOVIC; PREISIG, 2009).

#### 1.2.4 Ruído Ambiente

O ruído ambiente é toda perturbação de pressão captada pelo hidrofone (sensor) que não seja desejada (identificada como útil pelo sistema utilizado). O ruído ambiente é um dos parâmetros que mais interfere na detecção e no processamento dos sinais. Ele pode ser gerado por diversas fontes e frequências distintas, além de ser de forma esporádica ou estacionária. Este ruído, é considerado impulsivo, varia a sua amplitude em um determinado instante, interferindo diretamente na amplitude do sinal recebido. A causa destes ruídos pode ser de várias fontes como os ruídos de embarcações, dos ventos, dos seres vivos existentes no mar, das turbulências da água e dos ruídos térmicos.

#### 1.2.5 Perdas na Propagação

Em comunicações utilizando ondas acústicas no meio subaquático, o processo mais visível é a redução da intensidade do sinal transmitido proporcionada por esse meio. Quando o sinal acústico é gerado por uma fonte omnidirecional subaquática, a onda vai perdendo energia conforme se afasta da origem, devido a fatores como os espalhamentos geométricos (efeito de divergência) e as absorções de energia acústica pela própria água (LURTON, 2002).

O espalhamento geométrico (*geometric spreading*) é a perda de energia acústica que o sinal sofre quando se afasta cada vez mais da fonte, ou seja, uma dispersão espacial. De acordo com o meio onde se encontra, essa dispersão pode ter formas geométricas distintas, como esférica (espalhamento esférico), ocorrida em águas profundas, e cilíndrica (espalhamento cilíndrico), em águas rasas. No caso de uma fonte direcional, o espalhamento é dito direcional. Assim, pode-se dizer que esse tipo de atenuação ou perda depende, basicamente, da distância percorrida pelo sinal.

As perdas por absorção dependem de características intrínsecas do meio. A absorção é a conversão da energia acústica em calor devido à viscosidade da água, às reações químicas ocorridas no mar (sulfato de magnésio e ácido bórico) e à temperatura. A frequência do sinal transmitido também influencia na absorção e quanto maior for a frequência do sinal, maior será sua atenuação. Se o período da variação da pressão local for maior que o tempo necessário para a molécula se recompor (tempo de relaxamento), menor será sua frequência de relaxamento (resposta a perturbações) e aumentará sua absorção (LURTON, 2002).

Esta dissertação é dividida em 4 capítulos: 1 - Introdução, 2 - Revisão Literária, 3 - Resultados, e 4 - Conclusões e Trabalhos Futuros, além do Anexo A - Modulação Binary Frequency Shift Keying (BFSK). O Capítulo 2 descreve uma revisão teórica sobre os principais conceitos para realizar uma comunicação, com arranjo de sensores, no meio submarino, tais como: modelagem do canal, *beamforming* de transmissão e modulação digital. No Capítulo 3 são realizadas as simulações para diversos cenários como: em águas rasas, águas profundas, variações de parâmetros importantes (batimetria e maré) e, principalmente, no cenário onde ocorreram os experimentos. Com os resultados reais (experimentais) são feitas análises comparativas com os dados obtidos pelos resultados teóricos (simulados). No Capítulo 4 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e sugestões para trabalhos futuros. No anexo A são realizadas simulações e experimentos reais para a modulação em BFSK e a modulação FSK.

## 2 REVISÃO LITERÁRIA

O método proposto desta dissertação para realizar o *beamforming* de transmissão para sinais subaquáticos possui as seguintes etapas. Primeiramente, deve-se realizar uma modelagem do canal que seja adequada à conformação de feixe para um arranjo de transmissão. Com o modelo matemático do canal, escolhe-se o tipo de sinal que deve ser transmitido e sua modulação. É, então, com o conhecimento do modelo do canal, investigada a melhor direção da conformação de feixe. A eficiência do arranjo será definida na recepção, onde é comparada a transmissão do sinal pelo arranjo e outra transmissão de fonte singular com mesma potência.

### 2.1 Modelagem do Canal

Os modelos matemáticos utilizam as características do canal, citadas anteriormente, para que as simulações sejam o mais próximo possível de um cenário real. Assim, a propagação do som no mar é modelada matematicamente pela equação de onda, cujos parâmetros e condições de contorno são descritas pelo ambiente aquático. De acordo com a Figura 3 (adaptado de (JENSEN; KUPERMAN; PORTER, 2011)), os modelos matemáticos derivam de soluções da equação da onda. E podem ser divididos em cinco tipos de modelos para descrever a propagação do som no mar: espectral ou “programa de campo rápido” (*FFP*), modo normal (*NM*), raio e equação parabólica (*PE*), e soluções diretas de diferenças finitas (*FD*) ou elementos finitos (*FE*) da equação de onda completa.

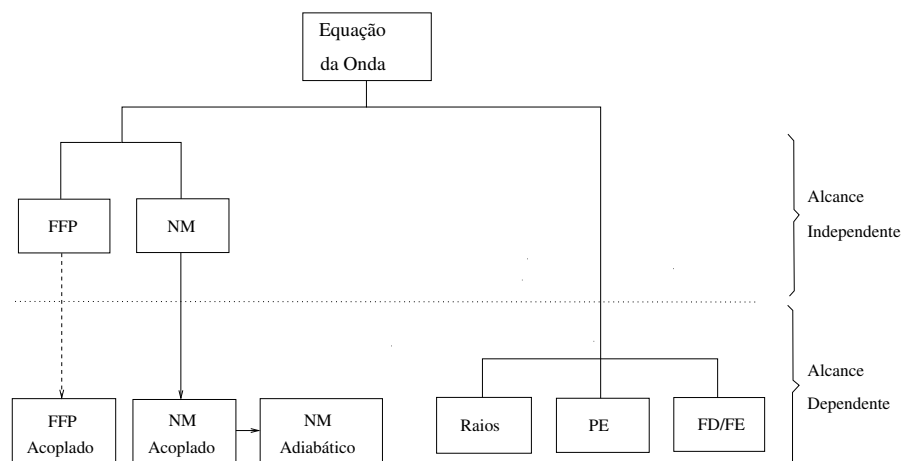


Figura 3 – Diagrama de modelos matemáticos para a propagação do som no mar.

Todos esses modelos permitem que o ambiente oceânico varie com a profundidade. Os modelos que também permitem variações horizontais no ambiente, ou seja, nas características como velocidade do som, fundo inclinado ou oceanografia espacialmente

variável, são denominados dependente do alcance (“*range dependent*”). E os modelos onde os parâmetros do canal não variam com a distância são definidos com independente do alcance (“*range independent*”). Para altas frequências como poucos kHz ou acima, a teoria dos raios é a mais prática, enquanto os outros quatro tipos de modelos se tornam cada vez mais aplicável abaixo da frequência de um kHz (ETTER, 2003).

### 2.1.1 Teoria de Raios

A teoria de raios é um modelo adequado para uma transmissão com conformação de feixe, pois esse método carrega informações angulares da onda sonora. Como todos os modelos matemáticos, que representam a propagação do som no mar, são soluções aproximadas de condições de contorno da equação de Helmholtz, que é derivada da equação da onda

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0. \quad (2.1)$$

Um raio acústico é uma linha que representa a direção de propagação da onda e é perpendicular à frente de onda. O tempo que um raio leva do transmissor até o receptor é obtido através da solução da *equação de Eikonal*

$$(\nabla\tau)^2 = \frac{1}{c^2}, \quad (2.2)$$

e a amplitude é obtida pela solução da *equação de transporte*:

$$2(\nabla A \nabla \tau) + A \nabla^2 \tau = 0. \quad (2.3)$$

O diagrama de raios é um conjunto de raios traçados a partir de uma fonte, em um dado ambiente, para um receptor. O programa *Bellhop* (PORTER, 2011) (RODRIGUEZ, 2008), para uma determinada frequência, utiliza a teoria de raios para, a partir de um conjunto de informações disponíveis (distância e profundidade dos sensores, perfil de velocidade, perdas, superfície, etc.), estimar a atenuação (amplitude e fase) e o tempo que cada raio leva para ir da fonte ao receptor.

A Figura 4 exemplifica um diagrama de raios em águas profundas, retirada do *software BELLHOP* para um transmissor a 5 m de profundidade, um receptor a 250 m de profundidade, com uma distância de 10.000 m entre eles, uma frequência 6250 Hz, com fundo do mar liso, profundidade de 1.000 m e perfil de velocidade do som retirado de (PORTER, 2011). O raio azul representa a propagação com apenas uma reflexão no fundo mar e os raios pretos a propagação com duas ou mais reflexões.

Um outro exemplo é a propagação do som em águas profundas, conforme apresentada na Figura 5. Neste ambiente, a onda sonora sofre influência da variação de velocidade

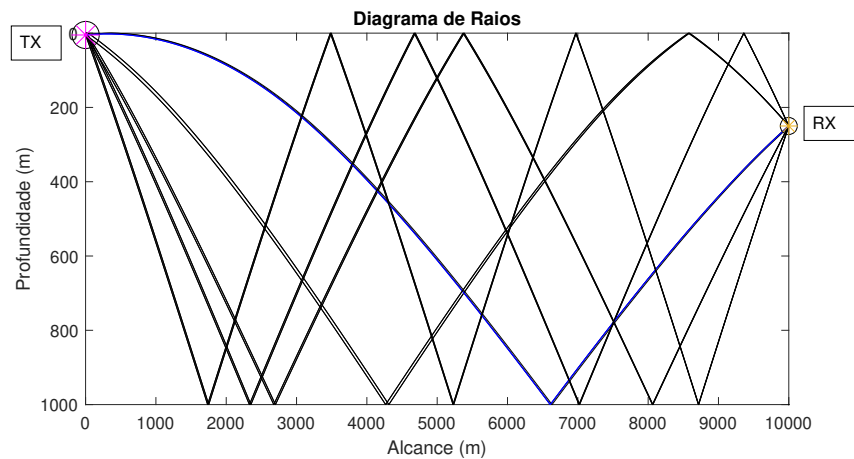


Figura 4 – Raios representando a propagação de sinais transmitidos a partir de fonte singular a 5 m de profundidade para um hidrofone (transdutor de pressão sonora na água para sinal elétrico) a 250 m de profundidade e 10 km de distância.

em função da profundidade, causando refrações e alterando as direções dos raios. Este cenário foi definido com o transmissor e receptor a 1.000 m de profundidade, a distância entre eles de 50 km, e o fundo do mar plano a 5 km de profundidade.

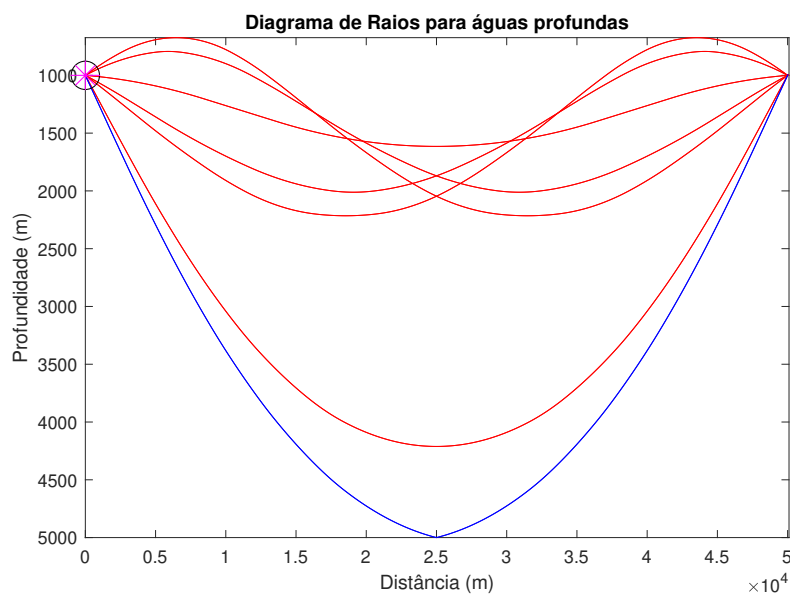


Figura 5 – Diagrama de raios em águas profundas.

As Figuras 4 e 5 ilustram os múltiplos percursos quando o sinal transmitido chega no receptor por diferentes caminhos. Já a Figura 6 mostra em que momento (*delays*) essas cópias (ilustradas na Figura 4), representadas por raios, do sinal transmitido chegam ao receptor, além de informar quais suas respectivas amplitudes (em módulo). A amplitude de cada raio, extraída do *software BELLHOP*, é um valor complexo pois representa todas as variações espaciais (refrações e reflexões na superfície e no fundo do mar) ocorridas

durante o seu percurso.

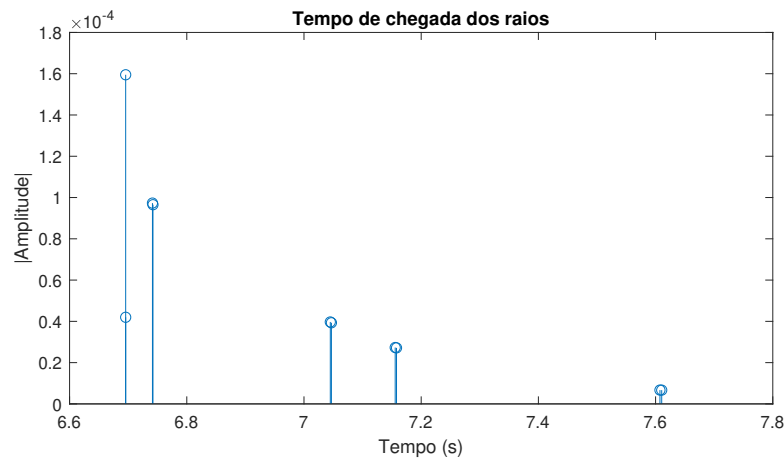


Figura 6 – Tempo (*delays*) de chegada de cada raio e suas respectivas amplitudes (em módulo).

### 2.1.2 Software *BELLHOP*

As simulações realizadas nesse trabalho foram feitas a partir de um modelo computacional de transmissões de ondas sonoras chamado *BELLHOP*. O *BELLHOP* é um modelo (ferramenta) baseado na teoria de traçado de raios, desenvolvido por Porter (PORTER, 2011) em FORTRAN, MATLAB e PYTHON, de código aberto em *Acoustic Toolbox* que está disponível no *site* da *Ocean Acoustic Library*. Esse software utiliza a teoria dos feixes gaussianos para calcular a pressão acústica, e assim simular o traçado de raios, através de um perfil de velocidade do som, com condições de contorno variáveis. As informações de entrada consistem principalmente em locais de uma fonte e um receptor, uma frequência e parâmetros de funcionamento, tais como: batimetria do cenário, perfil de velocidade do som, profundidade e distância dos sensores (projedor - fonte acústica, e hidrofone), características do solo (densidade e velocidade), salinidade, e outros parâmetros. É conhecido como batimetria a medição da profundidade dos mares, oceanos e rios.

Após inseridos os parâmetros, o programa *BELLHOP* simula a propagação das ondas sonoras e fornece diversos tipos de saídas, sendo elas: amplitudes (valor complexo, com informações angulares das reflexões e refrações dos raios), *delay* (tempo percorrido por cada raio), número de raios, pressão acústica e perdas na propagação.

Uma simulação em águas rasas é mostrada na Figura 7. Os dados desta simulação foram: frequência de 6250 Hz, transmissor e receptor a 5 m e a 44 m de profundidade, respectivamente, distância entre eles de 500 m, fundo plano com profundidade de 45 m e velocidade do som obtida experimentalmente na Baía dos Anjos, em Arraial do Cabo. Nesta figura, há raios diretos (vermelhos) representam uma propagação sem reflexão, os raios azuis a propagação com apenas uma reflexão no fundo mar, os raios verdes a

propagação com apenas uma reflexão na superfície da água, e os raios pretos a propagação com duas ou mais reflexões.

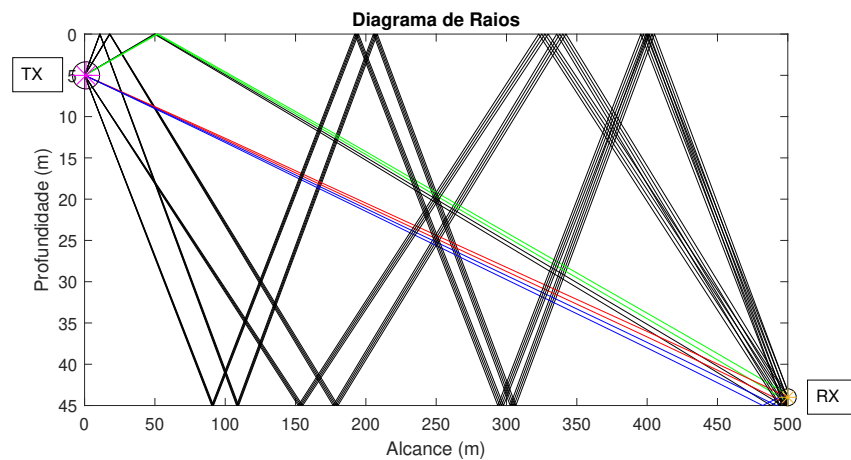


Figura 7 – Diagrama de raios para águas rasas.

Fazendo a representação do tempo de chegada e a atenuação de cada raio, de acordo com a Figura 8, pode-se perceber que o tempo de chegada dos raios está mais concentrado e suas amplitude maiores em módulo.

Um cenário típico, de aplicações militares, é a comunicação entre o navio e o submarino, que normalmente é realizado em grandes profundidades. Porém, realizar experimentos nesses ambientes são muito onerosos e necessitam de equipamentos especiais. Assim, a melhor forma de analisar as simulações e poder comparar com os experimentos reais é no cenário de águas rasas.

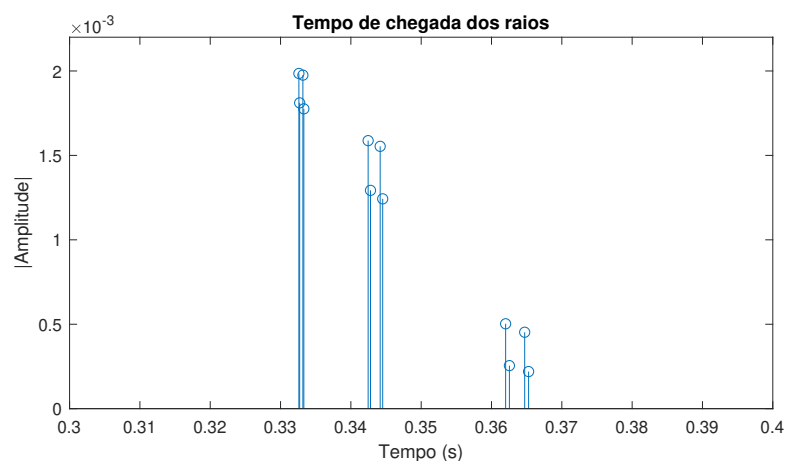


Figura 8 – Tempo (*delays*) de chegada de cada raio e suas respectivas amplitudes (em módulo).

## 2.2 *Beamforming* de Transmissão

Uma aplicação do *Beamforming* de transmissão é quando o submarino ou navio quer aumentar o alcance do sonar e reduzir a zona de sombra, causada pelo gradiente negativo do perfil de velocidade do som. Esse fato ocorre em águas profundas. O foco desta dissertação é utilizar o arranjo para a transmissão em águas rasas. O propósito desta escolha está na facilidade em realizar experimentos reais, além da área costeira possuir uma batimetria do fundo do mar conhecida e um banco de dados abrangente.

Seja um sinal banda estreita  $x(t)$ , com frequência angular  $\Omega_0 = 2\pi f_0$  e que será transmitido por uma fonte de áudio subaquática (projektor), dado por

$$x(t) = e^{j\Omega_0 t}. \quad (2.4)$$

O motivo para este sinal, um tom na frequência  $f_0$  que possui somente o lado positivo do espectro da frequência (sinal analítico de banda estreita), é para que a conformação do feixe tenha resultado desejado. Utilizando informações do cenário (assumido conhecido) de uma fonte (singular) e um receptor, o programa *Bellhop* fornece, para a frequência de operação, o número de raios ( $L$ ) que chegam no receptor, a amplitude e a fase (valor complexo  $A$ ), e o atraso (*delay*  $\tau$ ) de cada raio. Assim, pode-se expressar o sinal recebido por um receptor, de uma única fonte transmissora, com sinal banda estreita  $x(t)$  centrada na frequência  $f_0$  como

$$y_1(t) = \sum_{l=1}^L A_l x(t - \tau_l). \quad (2.5)$$

Considerando um arranjo de projetores transmitindo o mesmo sinal, ao mesmo tempo, para um dado receptor. Então o sinal após a propagação no canal será:

$$\bar{y}(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L A_{m,l} x(t - \tau_{m,l}), \quad (2.6)$$

onde  $m$ , de 1 a  $M$ , corresponde ao índice dos projetores.  $A_{m,l}$  e  $\tau_{m,l}$  são a amplitude e o atraso, respectivamente, de cada raio ( $l$ ) para a fonte  $m$  do arranjo.

A Equação (2.6) representa um sinal (modelo complexo) transmitido por um arranjo de projetores após sua propagação no meio subaquático. Para realizar a conformação do feixe em uma determinada direção ( $\theta$ ), é necessário inserir retardos  $r_m$  para cada fonte de transmissão do arranjo como ilustrado na Figura 9.

O retardo aplicado para cada fonte transmissora, assumindo a primeira fonte como referência, será  $r_m = \frac{d_m \cos(\theta)}{c}$ , onde  $d_m$  é a distância da fonte  $m$  em relação a referência e  $c$  a velocidade do som no meio. Assim, o *steering vector* (TREES, 2004)  $\mathbf{a}(\theta)$  é definido



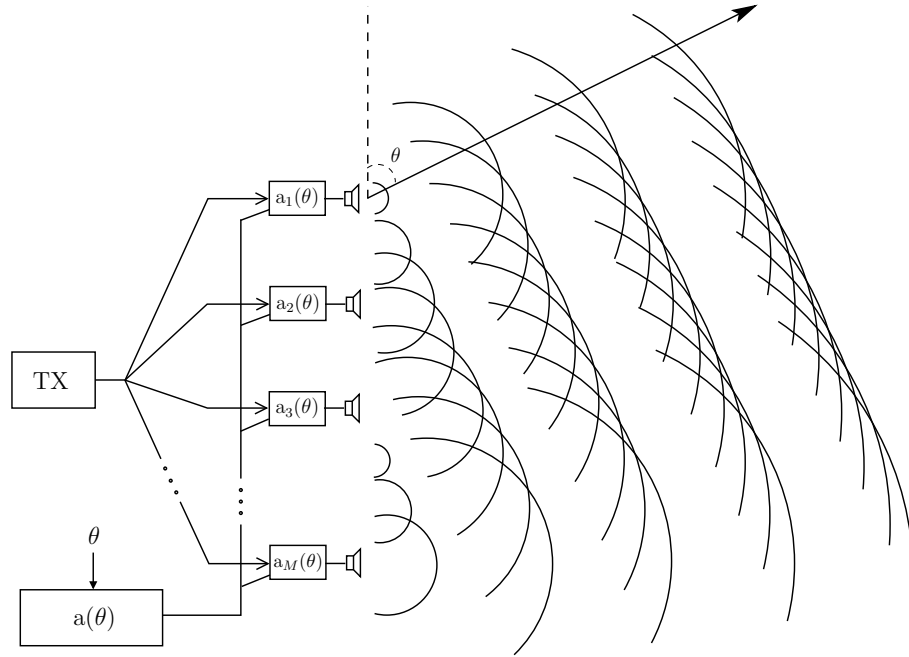


Figura 9 – Conformação de feixe de transmissão na direção  $\theta$ .  $r_m$  representa o retardo imposto a cada transmissor para conformar o feixe na direção de  $\theta$ .

como

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} a_1(\theta) \\ a_2(\theta) \\ \vdots \\ a_M(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\Omega_0 r_2} \\ \vdots \\ e^{j\Omega_0 r_M} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

e o diagrama simplificado da transmissão de um sinal banda estreita de  $M$  projetores para um receptor singular no meio subaquático é apresentado na Figura 10.

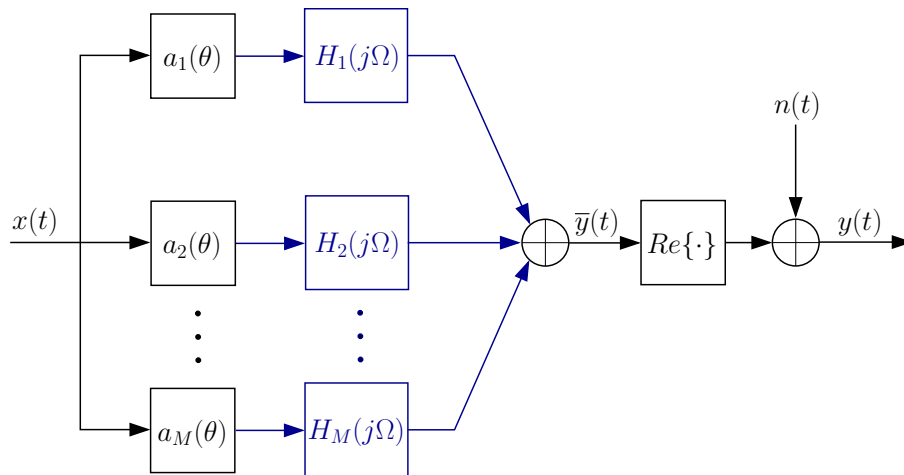


Figura 10 – Transmissão com arranjo de  $M$  projetores para um hidrofone. Note que  $H_m(j\omega)$  não é conhecido, mas uma mera representação do canal (subaquático) da Equação (2.8).

Conforme a Figura 10, o sinal do *beamforming* de transmissão (sinal banda estreita centrado em  $f_0$ ) na direção  $\theta$ , recebido no hidrofone pode ser expresso por

$$y(t) = Re \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L A_{m,l} x(t - \tau_{m,l}) a_m(\theta) \right\} + n(t), \quad (2.8)$$

onde  $n(t)$  é o ruído ambiente.

O sinal recebido pelo hidrofone através de uma transmissão com fonte singular foi definido pela Equação (2.5) e pela transmissão com o arranjo foi definido na Equação (2.8). Para realizar uma análise da eficiência na transmissão com o arranjo (*beamforming*) deve-se compará-la com uma fonte singular de mesma potência. Então, considerando um arranjo com 4 sensores transmitindo com uma potência de  $P_{arr} = 4P_{proj}$ , onde cada projetor possui a mesma potência igual a  $P_{proj}$

$$P_{proj} = \frac{V^2}{R_{in}}, \quad (2.9)$$

onde  $V$  é a amplitude (ganho) do sinal transmitido para cada sensor e  $R$  a resistência interna do amplificador. Logo, a potência transmitida pelo arranjo é

$$P_{arr} = \frac{4V^2}{R_{in}}. \quad (2.10)$$

Como a relação entre a potência e a amplitude é quadrática, pode-se afirmar que a potência transmitida pela fonte singular ( $P_{fs}$ ) é igual a potência transmitida pelo arranjo ( $P_{arr}$ ), quando o ganho da transmissão da fonte singular for o dobro da do arranjo com 4 sensores.

$$P_{fs} = \frac{(2V)^2}{R_{in}} = \frac{4V^2}{R_{in}} = P_{arr}. \quad (2.11)$$

## 2.3 Modulação Digital

A modulação digital de um sinal consiste em um sinal analógico (portadora) modulado por um sinal discreto (binário), ou seja, a informação (digital) possui espectro no entorno de uma frequência portadora. A modulação digital está associada a um determinado parâmetro, como amplitude, frequência ou fase. Este sinal modulado é transmitido por um canal, via cabo ou sem fio, e é recebido pelo sensor que realiza a demodulação do sinal recebido e constrói uma estimativa dos *bits* transmitidos.

### 2.3.1 Modulação BPSK

Nesta dissertação foi desenvolvido um sistema de detecção baseado no envio de ondas moduladas em BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Este tipo de modulação digital

consiste na codificação de informação binária (mensagem), distinguindo 0 de 1 pela variação de fase em  $180^\circ$  de uma onda senoidal, o que corresponde apenas a trocar o sinal da amplitude. Torna-se assim possível distinguir diferentes transmissores com diferentes códigos ou enviar outros tipos de informação para o veículo como comandos.

O sinal a ser transmitido pode então ser expresso por

$$x(t) = s_k e^{j2\pi f_0 t} = \begin{cases} e^{j2\pi f_0 t} & \text{bit 1,} \\ e^{j(2\pi f_0 t + \pi)} & \text{bit 0,} \end{cases} \quad (2.12)$$

onde  $s_k$  é igual a 1 (*bit* 1) ou -1 (*bit* 0).

A modulação BPSK pode ser visualizada na Figura 11 onde a primeira imagem é o sinal portadora, a segunda, o sinal mensagem ( $s_k$ ), e a terceira, o sinal modulado. Pode-se verificar que o sinal modulado inverte a fase portadora em  $180^\circ$  a cada mudança de *bit*.

Uma modulação, que é muito utilizada em comunicações submarinas, é a FSK (*Frequency-shift keying*), e está apresentada com simulações e experimentos no Anexo A. Esta modulação, dada a utilização de duas frequências em um beamforming, poderia eventualmente causar *grating lobes*.

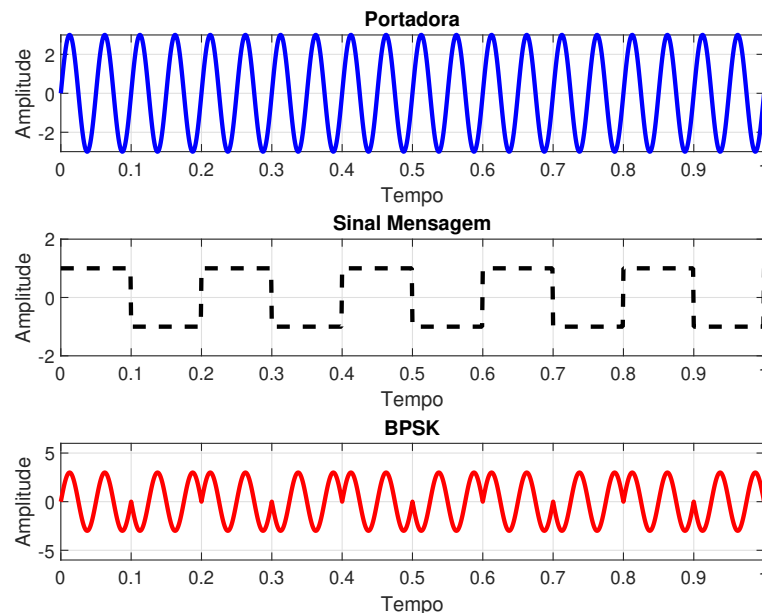


Figura 11 – Modulação BPSK.

### 2.3.2 BER - Taxa de Erro de *Bit*

Em comunicações digitais, onde se tem uma mensagem binária, como no caso do *BPSK*, é comum avaliar o desempenho do sistema através da quantidade de *bits* errados

recebidos e, assim, determinar uma margem de segurança na comunicação. Supondo que um sistema tenha uma determinada relação sinal-ruído ( $SNR$ ) e a mensagem binária transmitida seja  $s_k$  e a recebida seja  $y_k$ , conforme abaixo

$$\begin{aligned} s_k &= \cdots 1010011101 \cdots \\ y_k &= \cdots 1011011001 \cdots, \end{aligned}$$

e percebe-se nesse trecho da mensagem 2 *bits* errados.

A  $BER$  (do inglês, *bit error rate*) é definida como a razão entre a quantidade de *bits* errados (recebidos) pela quantidade total de *bits* transmitidos. Normalmente, a avaliação da comunicação através da  $BER$  é realizada pelo gráfico em escala logarítmica, de base 10, no eixo  $y$ , pela variação da  $SNR$ , em dB. A proposta deste trabalho, para avaliar a eficiência do arranjo, é variar o ângulo ( $\theta$ ) da conformação do feixe de transmissão, para uma determinada  $SNR$ , e verificar a taxa de erro recebida ( $BER$ ) em cada ângulo. E a menor  $BER$  indica qual é a direção ou ângulo ( $\theta$ ) de apontamento.

Primeiramente, será definida a taxa de transmissão do sinal modulado em  $BPSK$ . A taxa de transmissão define o tempo de duração de cada símbolo, ou seja, quanto maior a taxa de transmissão, menor será o tempo de duração do símbolo e maior as transições entre os símbolos. A taxa de transmissão também influencia na largura de banda do sinal que, para um *beamforming* de transmissão, deverá ser um sinal banda estreita. A assunção de um sinal banda estreita pode ser definida como (TREES, 2004)

$$B_s \Delta t_{max} \ll 1, \quad (2.13)$$

onde  $B_s$  é a largura de banda do sinal e  $\Delta t_{max}$  é tempo que o sinal percorre entre os sensores da extremidade do arranjo.

A largura de banda do sinal ( $B_s$ ) é calculada pela metade da potência máxima (“*the half-power beamwidth, HPBW*”). A potência do feixe é dada por  $P = |B|^2$ , e o ponto onde a metade da potência será, na forma normalizada,  $|B_u|^2 = 0,5$  ou  $|B_u| = 0,707$ . A largura do feixe ( $B_s$ ) é definida como o espaçamento entre esses pontos, conforme ilustrado na Figura 12 (TREES, 2004).

A Figura 13 representa a média de 5.000 repetições do sinal modulado em  $BPSK$ , no domínio da frequência, para as taxas de transmissão de 200, 400 e 500 bps. Pode-se verificar que o aumento da taxa de transmissão influencia diretamente na largura de banda do sinal.

Considerando um arranjo de transmissão com 4 sensores (projetores) e um espaça-

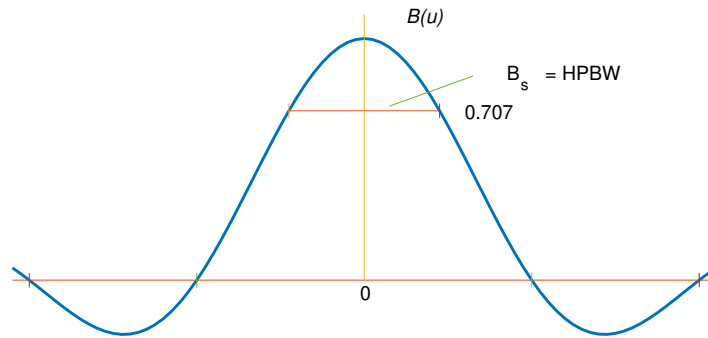


Figura 12 – Largura da banda ( $B_s$ ) definida nos pontos de meia potência.

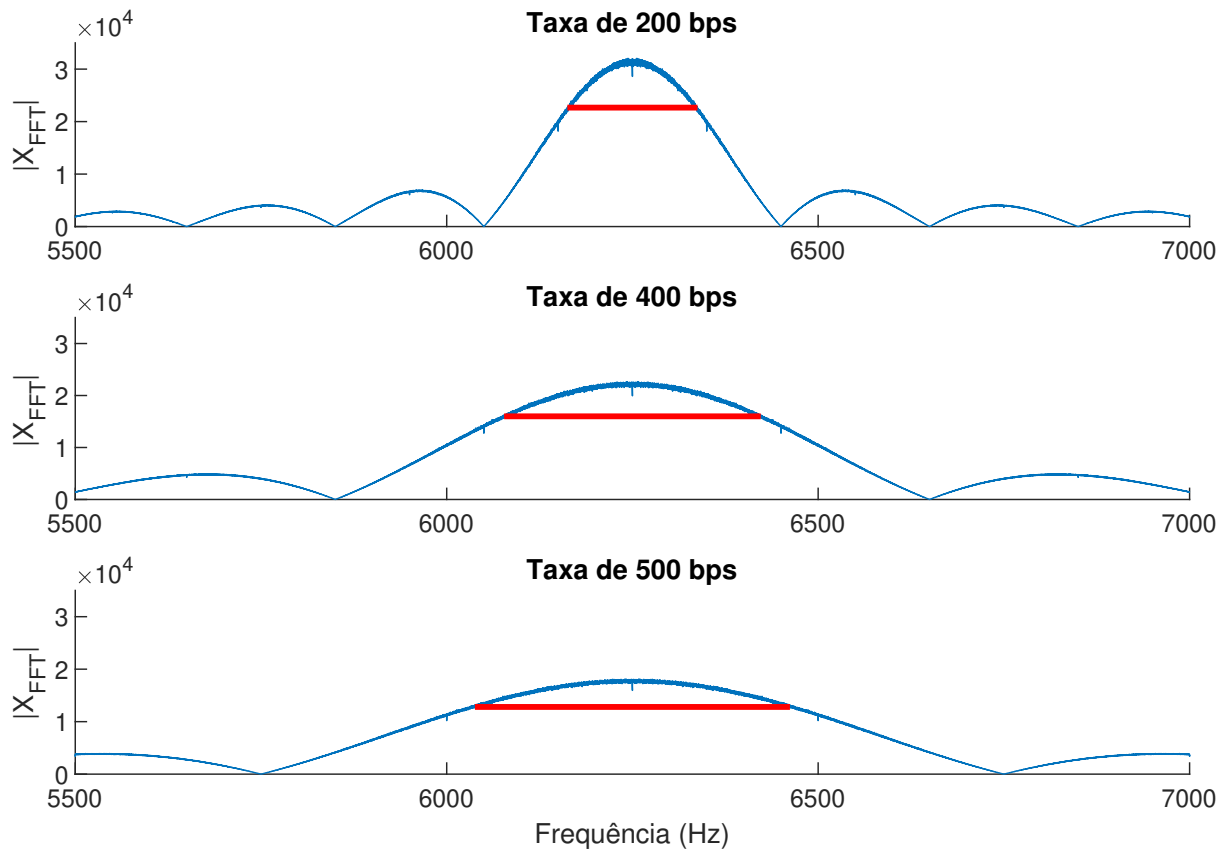


Figura 13 – Sinal transmitido no domínio da frequência para diferentes taxas de transmissão.

mento de 12 centímetros, entre eles, pode-se definir o  $\Delta t_{max}$  como

$$\Delta t_{max} = \frac{\Delta s_{max}}{c} = \frac{0,36}{1500} = 240 \mu s, \quad (2.14)$$

onde  $\Delta s_{max}$  é o espaçamento máximo entre os sensores da extremidade do arranjo e  $c$  a velocidade do som média, que é considerada como 1.500 m/s.

Verificando a assunção do sinal como banda estreita para as diferentes taxas de transmissão:

- Para a taxa de 200 bps, a largura do feixe ( $B_s$ ) é igual 175,16 Hz. Assim,  $175,16 \times 0,00024 = 0,042$  que é muito menor que 1 ( $\ll 1$ ), ou seja, aproximadamente 20 vezes menor que 1;
- Para a taxa de 400 bps, a largura do feixe ( $B_s$ ) é igual 345,44 Hz. Assim,  $345,44 \times 0,00024 = 0,083$  que é aproximadamente 12 vezes menor que 1 e ainda muito menor que 1 ( $\ll 1$ );
- Para a taxa de 500 bps, a largura do feixe ( $B_s$ ) é igual 424,02 Hz. Assim,  $424,02 \times 0,00024 = 0,102$  que ainda é menor que 1 (aproximadamente 9 vezes menor que 1), porém, se aumentar muito a taxa de transmissão, a qualidade da comunicação pode ficar comprometida.

A taxa de transmissão é um parâmetro importante para a comunicação digital pois quanto maior a sua taxa, mais informações (dados) serão transmitidas no mesmo intervalo de tempo. Ao assumir o sinal como banda estreita e analítico, pode-se aproximar os retardos entre os sensores como sendo uma mudança de fase temporal da exponencial complexa, e assim poder implementar o *beamforming* de transmissão (TREES, 2004). Então, define-se, para esse trabalho, as taxas de transmissões de 200 e 400 bps a serem utilizadas nas simulações e experimentos.

## 2.4 Revisão Bibliográfica sobre *Beamforming* de Transmissão

O *beamforming* de transmissão é bastante difundido em comunicações com ondas eletromagnéticas (RF), principalmente com as novas tecnologias na área da informática e telefonia. Na área subaquática está em grande crescimento principalmente nos últimos anos. Foram realizadas pesquisas bibliográficas nos *sites* do *IEEEExplore* e *lens.org* para diferentes palavras-chave.

O artigo (SOUZA; APOLINÁRIO Jr.; CAMPOS, 2019), que foi publicado no Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, serviu de base para esta dissertação. O artigo refere-se a uma proposta de *beamforming* de transmissão para sinais subaquáticos, onde é realizado uma transmissão, com arranjo, em BPSK, para diferentes pontos de recepção, e comparado a taxa de erros de *bits* (BER) com a de uma fonte singular.

Um dos artigos, é o “*Underwater Localization Based on Grid Computation and its Application to Transmit Beamforming in Multiuser UWA Communications*” (LIAO; ZAKHAROV; MITCHELL, 2018) que investiga a localização baseada em valores pré-calculados dos parâmetros do canal acústico entre um par transmissor-receptor em uma

grade de pontos cobrindo a área de interesse. Este artigo busca otimizar essa localização com um arranjo de transmissores e realizando com uma técnica de precodificação linear, *Zero-Forcing Beamforming* (WIESEL; ELDAR; SHAMAI, 2008), que busca anular as interferências entre os usuários. Esse artigo apresenta uma técnica diferente onde se baseia em informações conhecidas do canal que correlaciona com a posição do receptor, enquanto essa dissertação se baseia na conformação de feixe para encontrar a melhor direção para transmissão ao receptor.

Outro artigo pesquisado foi o “*Transmit Array for Acoustic Communications in Multipath Underwater Channe*” (LEE OE-HYUNG LEE, 2001) que realiza o *beamforming* de transmissão com um arranjo linear de transmissores para melhorar o desempenho do sinal recebido, utilizando o sinal modulado em BPSK e um modelo simplificado de transmissão subaquática. Motivado pela dispersão do *bit* no diagrama de constelação, (LEE OE-HYUNG LEE, 2001) escolhe como ângulo de partida do *beamforming* de transmissão o ângulo de visada direta. Tal escolha, como será visto posteriormente, devido às características da propagação de um sinal acústico submarino, usualmente não corresponde ao melhor resultado. Além disso, este artigo utiliza um modelo do canal subaquático mais simples como uma função de transferência, no domínio da frequência, e não investiga todos os ângulos da conformação de feixe. E difere deste trabalho na busca pelo ângulo de apontamento e uma investigação sobre os diversos parâmetros que influenciam na comunicação subaquática.

Em (SHARAGA; TABRIKIAN; MESSER, 2015) é proposto um método de *beamforming* cognitivo, dados estatísticos, para rastreamento de destino em um radar ou sonar com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) e com presença de incertezas ambientais. Esse método é aplicado em ambientes como águas rasas e direciona automaticamente o beampattern para o alvo com uma baixa relação sinal-ruído. Esse método apresenta um melhor desempenho em relação a outros métodos citados no artigo. O algoritmo de *beamforming* cognitivo considera um modelo de estado markoviano linear que representa a dinâmica do destino e as variações do meio ambiente ao longo do tempo. O rastreamento é aplicado usando a filtragem Bayesiana sequencial.

O artigo (RAHMATI; POMPILI, 2017) apresenta um método chamado de signal-space-frequency beamforming para melhorar a transmissão de uma grande quantidade de dados, como vídeos. O método consiste na comunicação entre um arranjo uniformemente linear (ULA), fixado por uma bóia, e outro arranjo uniformemente circular (UCA), fixado em um veículo subaquático não tripulado (autônomo ou controlado). Os arranjos possuem hidrofones especiais, chamados de Sensores de Vetor Acústico (*Acoustic Vector Sensor - AVS*), capazes de capturar a velocidade e a direção da chegada das partículas acústicas, além de medir a pressão escalar. A estimativa da posição do veículo é realizada através desses hidrofones (AVS), e assim calcular o ângulo do beamforming de transmissão para

um determinado período de tempo.

Em (HE; SHI; WU, 2017), há uma investigação para reduzir os lóbulos laterais (*sidelobe*) do beampattern em uma transmissão acústica, com arranjo, utilizando um veículo subaquático não tripulado. Foram utilizados dois métodos, o primeiro método é uma otimização de técnicas de elementos de contorno e o outro uma otimização do *array manifold vector* (*steering vector*). Em ambos métodos, a otimização é realizada impondo restrições para maximizar o lóbulo principal e minimizar os lóbulos laterais.

O artigo (SAJMATH; RAVI, 2019) apresenta uma comunicação óptica subaquática com modulação PSK e as perdas proporcionadas pelo canal, neste tipo de comunicação, como a absorção e a turbulência. Ele realiza simulações onde há comparações, através da taxa de erros (BER), com fontes singulares, modulação digital em amplitude (ASK) e o beamforming em PSK.

O artigo (HAN et al., 2019) realiza um experimento de comunicação subaquática com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) em águas rasas e com a superfície congelada. O experimento foi feito no *Golfo de Bohai*, durante o inverno, e apresenta uma comparação com ambiente em águas abertas.

O artigo (THOMPSON et al., 1996) refere-se a um beamforming de recepção com modulação BPSK para longa distância, 50 km. Os métodos utilizados para melhorar eficiência são a equalização e o beamforming adaptativos. A análise é realizada através da taxa de erros (BER) com uma quantidade de bits na ordem de  $10^4$ .



### 3 RESULTADOS

Este capítulo aborda os resultados realizados através de simulações e experimentos reais. As simulações abrangem os cenários reais em baixa e alta profundidade. O cenário com baixa profundidade, que pode ser considerado aquele de até 100 m de profundidade, é simulado com parâmetros reais e dividido em dois: um local, de profundidade máxima de 45 m, similar ao da raia acústica de Arraial do Cabo, onde os submarinos realizam exercícios para verificar sua assinatura acústica; e outro local, com menor profundidade (em torno de 12 m) na Baía dos Anjos, onde são realizados os experimentos devido ao fácil acesso e a facilidade de logística. O cenário de grande profundidade é de interesse para a atividade militar pois a profundidade máxima do submarino nuclear brasileiro (em construção) é de 350 m.

#### 3.1 Simulações

Antes de realizar a simulação com um canal subaquático, é melhor entender a transmissão com arranjo (*beamforming* de transmissão) em um canal bem simples e assim verificar sua eficiência. Para isso, supomos que o canal tenha somente ruído gaussiano branco (RGB) aditivo, sem interferências ou múltiplos caminhos. Além disso, assumimos uma distância conhecida e frente de ondas planas (*farfield*). Este cenário pode ser visualizado na Figura 14, onde o *beamforming* de transmissão é realizado por 4 transmissores (*TX*), o canal será representado pelo ruído gaussiano branco e o receptor (*RX*) está fixo na posição de  $90^\circ$  (*broadside*).

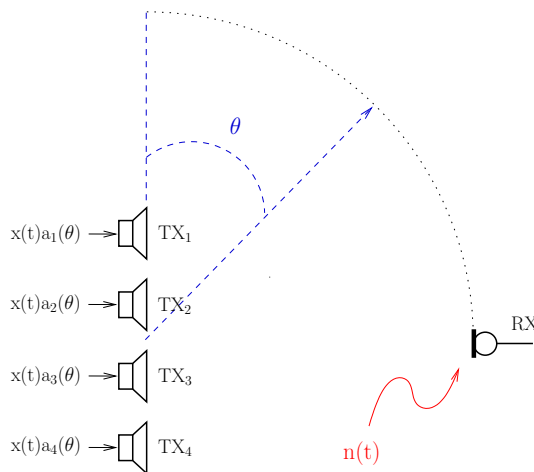


Figura 14 – Modelo da simulação simplificado (*farfield*) de acordo com a Equação (3.1).

Considerando que o sinal mensagem  $x(t)$ , definido pela Equação (2.12), tenha sido transmitido pelo arranjo com o ângulo da conformação de feixe variando de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , o

sinal recebido (receptor a broadside), será dado por

$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=1}^M x_m(t) a_m(\theta) \right\} + n(t), \quad (3.1)$$

onde  $m$  é índice de cada transmissor.

A demodulação é realizada conforme o modelo de detecção coerente apresentado na Figura 15.

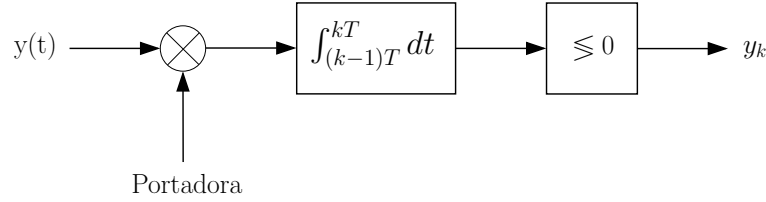


Figura 15 – Detecção do sinal BPSK recebido.

O modelo do canal não é subaquático, mas sim um canal com ruído gaussiano branco adicionado. Então, para realizar o sincronismo na demodulação, a portadora deverá ser um sinal real pois o sinal recebido, pelo sensor, é real. Como o receptor está fixo, a broadside, e não há retardos causados pelo canal nessa simulação, ele recebe os sinais transmitidos pela conformação de feixe ( $0^\circ$  a  $180^\circ$ ) do arranjo com diferentes ganhos e fases. Assim, para se ter um sincronismo ideal, a portadora da demodulação deve ter a mesma fase do sinal recebido pela conformação de feixe

$$\text{Portadora} = \cos(2\pi f_0 t - \angle(a_1(\theta) + \dots + a_m(\theta))). \quad (3.2)$$

Após o sincronismo, a demodulação é realizada integrando seu resultado para cada intervalo de *bit* (símbolo). Uma simulação foi realizada com uma mensagem de 500.000 *bits*, taxa de transmissão de 400 bps,  $\theta$  variando de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  e para um canal com ruído gaussiano branco (RGB).

Em uma transmissão com arranjo, a SNR varia em relação aos ângulos da conformação de feixe, pois o ganho do sinal recebido varia de acordo com direção da conformação. Assim, a SNR é definida através da fonte singular que possui a mesma potência de transmissão do arranjo. A partir da definição da SNR, através da fonte singular, é encontrada a potência do ruído ambiente e fixada para transmissão de todos os ângulos da conformação de feixe com arranjo.

A Figura 16 ilustra a taxa de erros (BER) em cada direção do *beamforming* de transmissão, considerando somente o canal com ruído gaussiano branco (RGB), com uma SNR equivalente à fonte singular de -4 dB. Pode-se perceber que a transmissão com arranjo tem uma melhor eficiência em relação à fonte singular, ou seja, menos erros para algumas

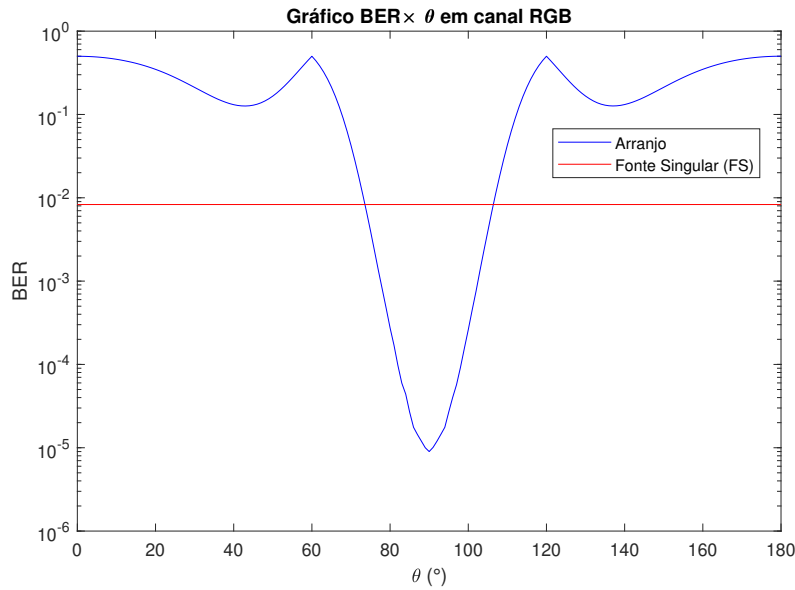


Figura 16 – Gráfico da taxa de erros (BER) pela conformação de feixe em um canal com ruído gaussiano branco (RGB).

direções da conformação do feixe e uma direção ótima (ângulo de apontamento) igual a  $90^\circ$ .

A Figura 17 indica o diagrama de blocos para detecção em um receptor de um sinal modulado em BPSK. O sincronismo no ambiente subaquático é um caso difícil de definir, pois o sinal transmitido chega ao receptor com diversas cópias em tempos distintos e distorcidos pelas reflexões e/ou refrações. Um método comum, e bastante utilizado, é definir um retardo de referência ( $\tau_{ref}$ ) como sendo o *delay* da maior correlação entre o sinal piloto (no preâmbulo da mensagem) transmitido e o sinal recebido (sequência de treinamento). Outro método que pode ser utilizado, e considerado como sincronismo pela amplitude máxima ( $A_{max}$ ), é realizar a demodulação através da portadora definida na Equação (3.2), porém utilizando o retardo do primeiro raio que chega no receptor e, nesses casos, também são todos com a maior amplitude. O próximo passo é realizar a demodulação do sinal em cada intervalo de símbolo ( $T$ ). O sinal demodulado passa por um decisor e é comparado com a mensagem original para se estimar a BER.

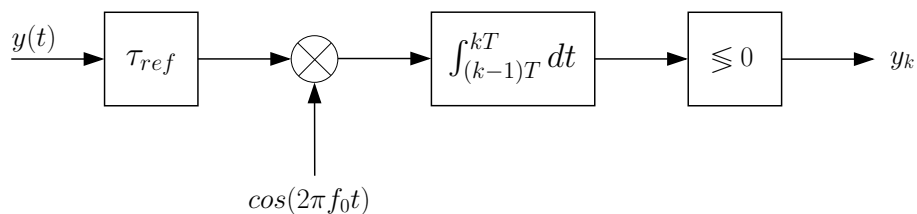


Figura 17 – Detecção do sinal BPSK recebido. Note nessa figura o sincronismo indicado pelo retardo  $\tau_{ref}$ .

### 3.1.1 Cenário da Raia Acústica

Considerando que o canal de transmissão, seja um meio subaquático, e utilizando como base os parâmetros da raia acústica, em Arraial do Cabo, define-se o cenário representado na Figura 18 uma área de interesse com 45 metros de profundidade e 2 quilômetros de distância entre os transmissores e o receptor. O arranjo de transmissão com 4 projetores (TX) está a 30 m (1° elemento) de profundidade, com espaçamento entre eles de  $d=0.12$  m. O hidrofone (RX) está localizado a uma profundidade  $p$  de 5 m (localização média de um sonar no navio). O relevo do fundo do mar (batimetria) é considerado plano ou liso. A velocidade do som neste cenário (baseado na região da Baía dos Anjos, em Arraial do Cabo, RJ) foi obtida com dados fornecidos pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) tal como ilustrado na Figura 18. Tal velocidade se aproxima de uma constante, sendo um perfil de velocidade típico de uma zona de mistura (LURTON, 2002).

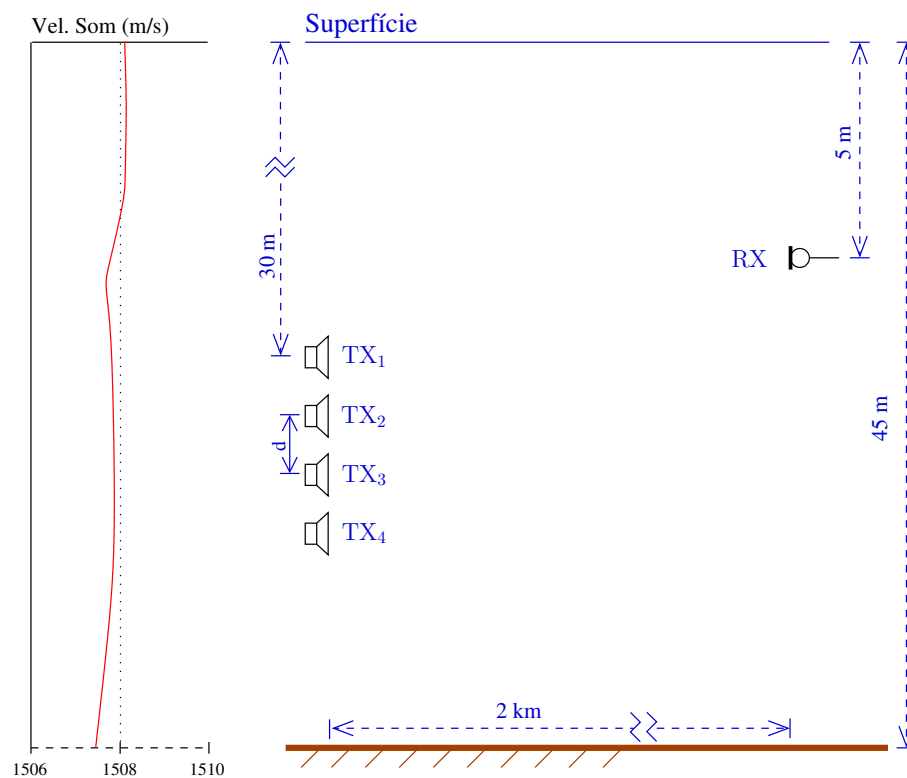


Figura 18 – Ilustração do cenário e a velocidade do som da região Baía dos Anjos (fornecida pelo IEAPM).

Os dados da simulação estão listados a seguir:

- Uma mensagem foi escolhida de forma aleatória com 100.000 símbolos;
- A taxa de transmissão foi ajustada para 400 bps;

- A frequência de amostragem usada na simulação é igual a 50 kHz e a da portadora igual a 6,25 kHz, escolhida de modo que  $d = \lambda/2$ , para  $c=1.500$  m/s;
- O ruído ambiente foi considerado branco gaussiano, com SNR variando de -30 a 10 dB.

De acordo com o cenário, representado pela Figura 18, a primeira simulação será a transmissão pelo arranjo (TX<sub>1</sub> a TX<sub>4</sub>), a 30 m de profundidade, e a recepção por um hidrofone (RX), a 5 m de profundidade. Situação hipotética de uma comunicação entre submarino, o transmissor, e navio, o receptor. Com a finalidade de obter o melhor ângulo ou direção de apontamento, foi realizada uma busca pelo menor valor da BER para os ângulos de  $\theta$  da Equação (2.8), variando de 0° a 180°. Assim, plota-se a variação da BER em função de  $\theta$  para uma determinada razão sinal-ruído (SNR), como visto na Figura 19. O valor -4 dB foi definido como a SNR de uma fonte singular de mesma potência do arranjo e, assim, definido o ruído que será aplicado também no *beamforming* de transmissão para todos os ângulos de  $\theta$ . Neste caso, o ruído ambiente foi gerado como um ruído gaussiano branco.

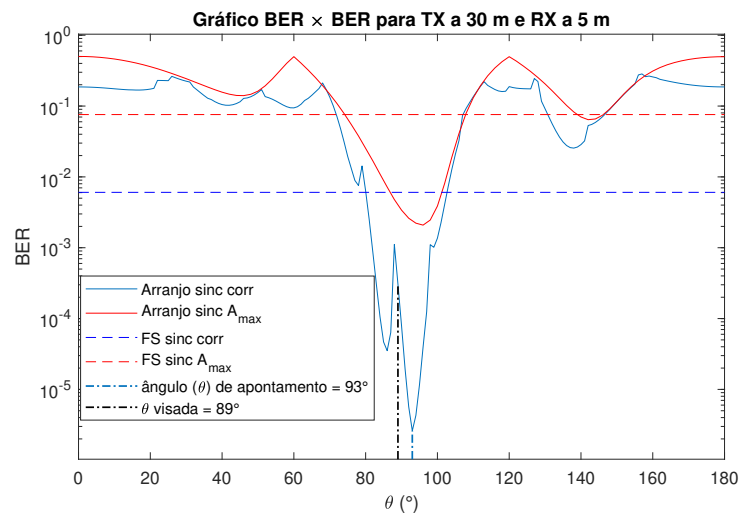


Figura 19 – Gráfico da variação da taxa de erro de *bit* (BER) em função de  $\theta$ . O ângulo de apontamento = 93° foi definido pela menor BER com SNR de -4 dB.

Como forma de comparação foram assinalados os valores da BER de uma fonte singular (FS) com SNR de -4 dB, e o ângulo (89°) de visada direta do centro do arranjo para o receptor como usado em (LEE OE-HYUNG LEE, 2001). As curvas foram obtidas por uma média de 20 realizações independentes com uma mensagem de 500.000 *bits*.

Como pode-se observar na Figura 19, o sincronismo através do método com a amplitude de raio máxima ( $A_{max}$ ) resulta em uma curva sem variações, porém suas taxas de erros são maiores em relação ao sincronismo com correlação de sinais. Verificando na Figura 6 (Capítulo 2), pode-se observar que, instantes depois do raio (sinal) de maior

amplitude, há outros raios com amplitudes razoáveis que contribuem para interferências construtivas e destrutivas do sinal recebido pelo hidrofone. Então, o sincronismo menor está no tempo entre os sinais de maiores amplitudes.

A Figura 20 apresenta o gráfico da taxa de erro de *bits* (BER) para diferentes valores de SNR. Percebe-se nessa figura uma boa redução na BER quando transmitido por um arranjo, usando a direção de apontamento para  $93^\circ$ , em relação a uma fonte singular. Ou seja, um ganho considerável, em dB, foi apresentado na transmissão com arranjo em relação a uma fonte singular. A SNR varia de -30 dB a 10 dB, com intervalo de 2 dB. No caso de fonte singular, um único projetor foi colocado na posição central do arranjo (30,18 m de profundidade).

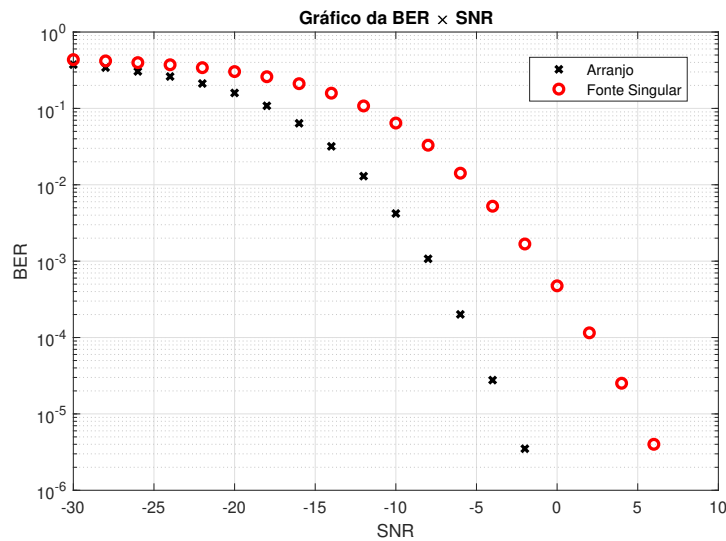


Figura 20 – *Bit Error Rate* (BER) de uma fonte singular e de um arranjo com SNR variando de -30 dB a 10 dB.

Devido à modulação em fase (BPSK), onde o *bit* “0” representa os números negativos e o *bit* “1” os números positivos (defasados de  $180^\circ$ ), pode-se verificar o comportamento da transmissão dos *bits* através da distribuição do sinal demodulado no receptor.

A Figura 21 indica a dispersão dos *bits* (sinal demodulado antes do decisor) para uma transmissão com uma fonte singular e com um arranjo na direção de apontamento igual a  $93^\circ$ . Percebe-se que a transmissão com arranjo na direção do apontamento possui uma melhor separação em relação à fonte singular. Ou seja, aumenta a concentração dos *bits* corretos em relação a fonte singular. Pode-se verificar que os *bits* errados do símbolo “1”, representados em + azul, estão na parte negativa. Enquanto os *bits* errados do símbolo “0”, representados o vermelho, estão na parte positiva. Para a transmissão de uma fonte singular, neste ambiente (SNR igual a -10 dB), ocorreram 31.874 erros de *bits* enquanto que com um arranjo houve 2.174 *bits* errados, de um total de 500.000 *bits*.

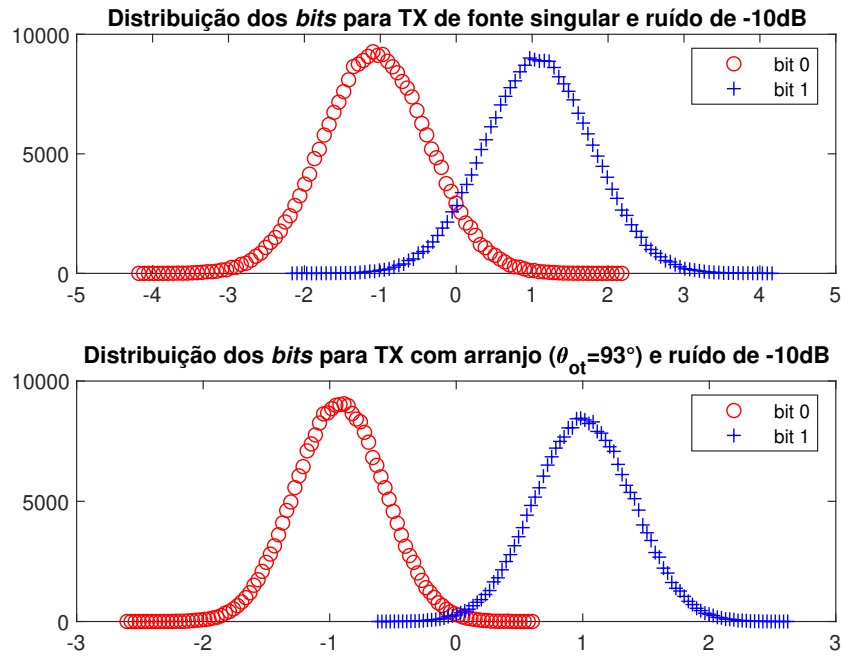


Figura 21 – Histograma dos valores dos bits demodulados (antes do decisor) por um receptor a 5 m de profundidade, SNR = -10 dB, para os casos de uma fonte singular e de um arranjo com o ângulo de apontamento igual a  $93^\circ$ .

Realizando as simulações para o mesmo cenário, mas com o navio transmitindo através de um arranjo para o receptor, que é o submarino, a Figura 22 representa essa comunicação e percebe-se que a curva da BER em função de  $\theta$  teve menos variação e a direção de apontamento  $91^\circ$  está muito próximo do ângulo de visada direta.

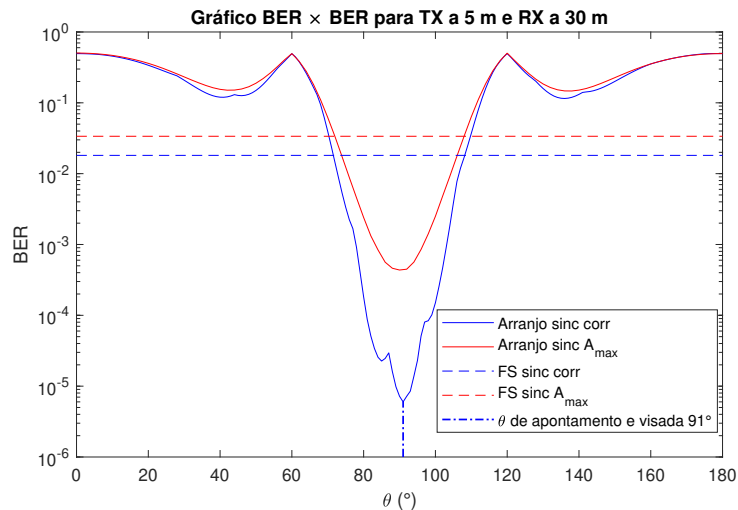


Figura 22 – Gráfico da variação da taxa de erro de bit (BER) em função de  $\theta$ . O ângulo de apontamento ( $91^\circ$ ) foi definido pela menor BER com SNR de -4 dB.

### 3.1.2 Cenário do Experimento de Campo

A carta náutica do local das experiências é antiga e a precisão não é muito adequada para simulações que exigem maior detalhamento. Com o intuito de melhorar a precisão, foram solicitados os dados brutos do fundo do mar da área, a batimetria, e obtidos pelo Centro de Hidrografia da Marinha e pela empresa DATUM Serviços de Engenharia LTDA. Através do *Google Maps*, no *My Maps*, foi definida a região com batimetria, o trajeto do sinal e a distância entre o transmissor e o receptor, conforme ilustra a Figura 23.

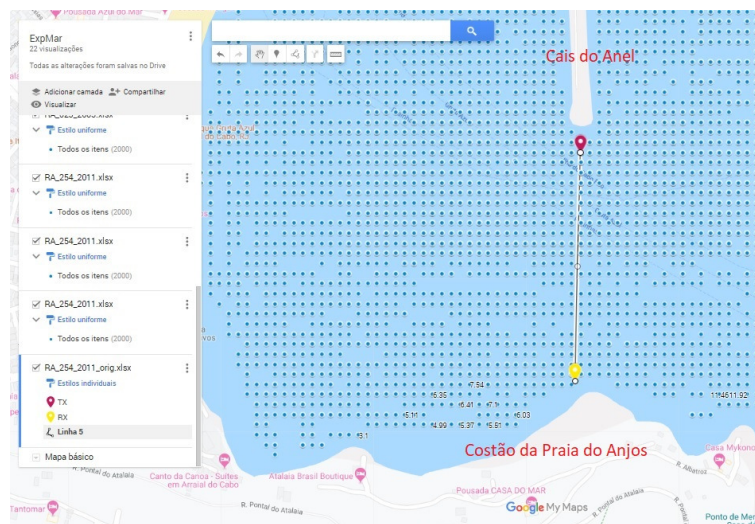


Figura 23 – Mapa com a batimetria e distância entre o transmissor e receptor do cenário experimental.

Os dados da simulação para este cenário são:

- Uma mensagem foi escolhida de forma aleatória com 10.000 símbolos;
- A taxa de transmissão foi ajustada para 400 bps;
- O arranjo de transmissão e o receptor estão a uma profundidade de 11 m e 9,5 m, respectivamente, e a distância entre eles é de 420 m;
- A frequência de amostragem usada na simulação é igual a 50 kHz e a da portadora igual a 6,25 kHz, escolhida de modo que  $d = \lambda/2$ , para  $c=1.500$  m/s;
- O ruído ambiente foi considerado branco gaussiano.

Com os dados da batimetria e adicionando os parâmetros obtidos no dia do experimento (temperatura, salinidade, e velocidade do som), foi plotado o gráfico simulado da taxa de erro (BER) em função de  $\theta$ . O sincronismo utilizado foi através da correlação cruzada do sinal piloto no preâmbulo da mensagem, normalmente utilizado em experimentos práticos.



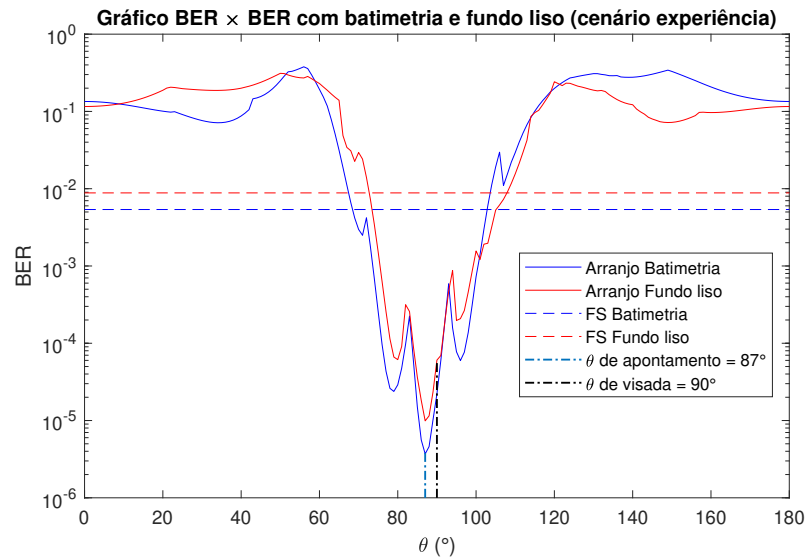


Figura 24 – Gráfico  $BER \times \theta$  simulado com batimetria do local e com fundo liso.

Além do gráfico oriundo dessa simulação com dados da experiência, foi inserido o gráfico de  $BER \times \theta$  considerando o fundo do mar como liso, conforme ilustrado na Figura 24. Pode-se perceber que a batimetria influencia no resultado da comunicação e na conformação do feixe para a busca do ângulo ótimo. O  $\theta$  da visada direta é  $90^\circ$ , enquanto que o ângulo ( $\theta$ ) de apontamento da batimetria local (mapa de batimetria da Figura 23) foi estimado  $87^\circ$ . O resultado obtido da direção para o apontamento, usando a batimetria com fundo liso, foi um valor próximo ao ângulo de visada direta.

Outro parâmetro importante que pode influenciar na comunicação subaquática é a variação da maré. Ela pode alterar os ângulos ótimos para apontamentos nos resultados do *beamforming* de transmissão, pois as interfaces do canal (superfície e fundo do mar) se distanciam e aproximam conforme ocorre essa variação e os ângulos das reflexões de cada raios podem variar, conforme ilustra a Figura 25.

Para verificar esse comportamento, foram plotados gráficos da BER em função de  $\theta$  para diferentes marés no mesmo cenário do experimento, porém com fundo liso, conforme a Figura 26. Verificando no gráfico, percebe-se que há variações consideráveis no gráfico da taxa de erros para este cenário descrito. Então, é de primordial importância medir a maré para uma boa estimativa dos valores dos ângulos de apontamento. A medição desse parâmetro é de fácil acesso e por diversas fontes confiáveis de publicação (tábua de marés). Já a batimetria, que nem sempre está atualizada na carta náutica para fins científicos, requer equipamentos específicos e navios, porém esse parâmetro é mais sensível que a maré.

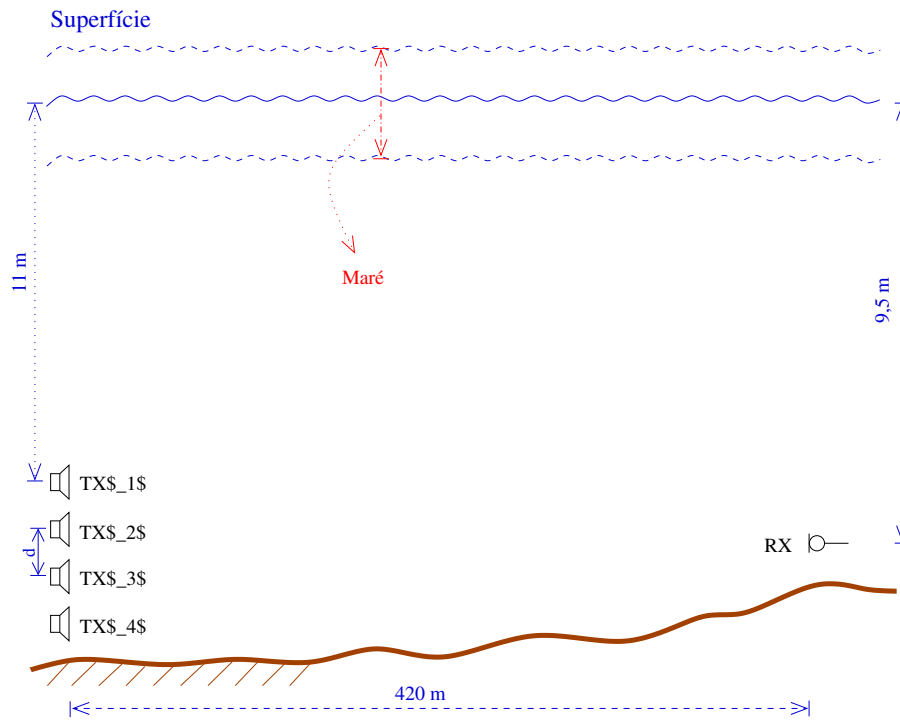


Figura 25 – Ilustração do cenário do experimento na região Baía dos Anjos com a variação da maré.

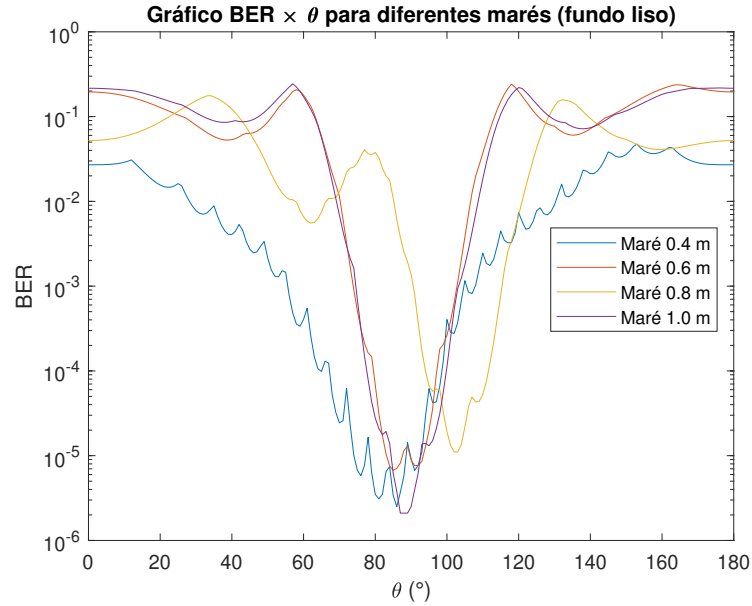


Figura 26 – Gráfico  $BER \times \theta$  simulado com batimetria de fundo liso. Observa-se uma variação máxima de  $18^\circ$ , dos ângulos ( $\theta$ ) de apontamento de  $85^\circ$  a  $103^\circ$ , quando a maré aumenta de 0,6 m para 0,8 m.

## 3.2 Cenário com Grande Profundidade

O cenário em grande profundidade é um cenário típico de comunicações utilizadas por meios militares, principalmente o submarino. O princípio do submarino é a invisibilidade pois este meio naval pode permanecer abaixo do nível do mar por um longo período; então, a sua comunicação com um navio ou um ponto fixo na terra é muito importante para sua estratégia militar. A seguir, foram realizadas simulações de transmissão com a fonte singular e arranjo para outro cenário, com maior profundidade e distância entre os sensores, conforme ilustrado na Figura 27. A comunicação é realizada de um submarino para o navio, e vice-versa. O sonar de um navio da Marinha do Brasil se localiza no fundo do casco do meio naval e em média está a 5 m de profundidade. Esse sonar possui um arranjo de transmissão e de recepção.

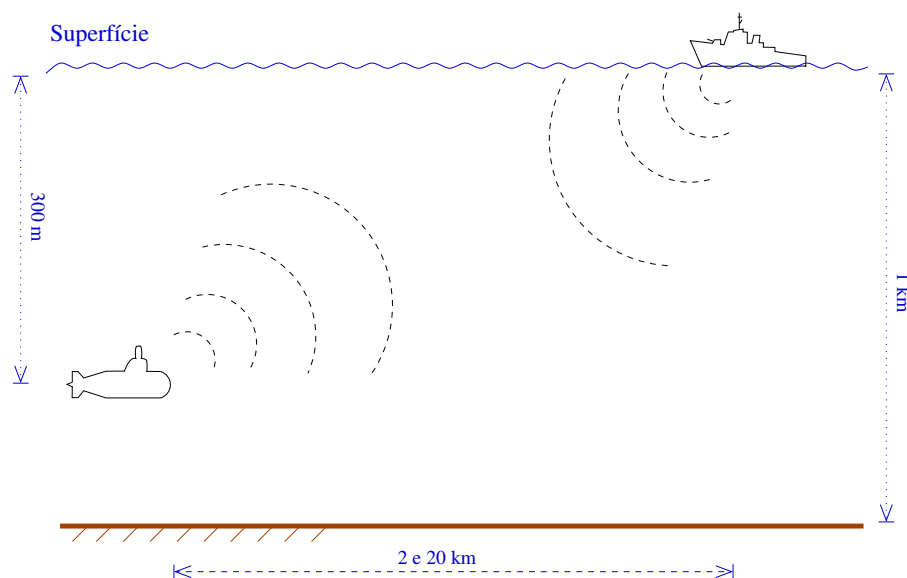


Figura 27 – Cenário de comunicação entre o navio e submarino para grandes profundidades.

Neste cenário, realizam-se simulações para a transmissão com arranjo e fonte singular do submarino a uma profundidade de 300 m para o navio que está a 2 km de distância e o receptor a 5 m de profundidade. O perfil de velocidade do som neste cenário foi retirado do manual do BELLHOP (PORTER, 2011).

Observando na Figura 28, o gráfico apresenta a variação da BER em função de  $\theta$  para o valor da SNR igual a -4 dB. Percebe-se, nessa figura, uma boa aproximação da curva utilizando o sincronismo pela correlação do sinal piloto (transmitido e recebido) com a utilizada pelo sincronismo da amplitude máxima. Em ambos os casos, o ângulo ótimo, de apontamento, foi  $90^\circ$ , enquanto o ângulo de visada é próximo de  $85^\circ$  para a transmissão realizada pelo submarino.

O alcance que o beamforming de transmissão pode proporcionar em relação a

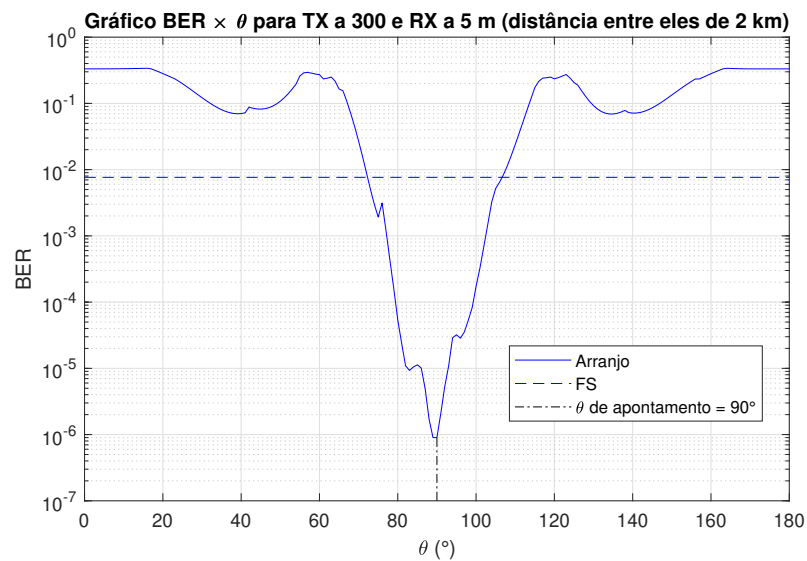


Figura 28 – Gráfico  $BER \times \theta$  para a transmissão do submarino para o navio a 2 km de distância.

uma fonte singular de mesma potência, foi analisado através do aumento gradual da distância entre os sensores até que a BER do arranjo seja igual a BER da fonte singular a 2.000 m. Com isso, percebe-se na Figura 29 o aumento da taxa de erros em relação ao acréscimo gradual da distância até um ponto, próximo a 4.700 m, que a BER na direção do apontamento está próximo da BER transmitida pela fonte singular a 2.000 m.

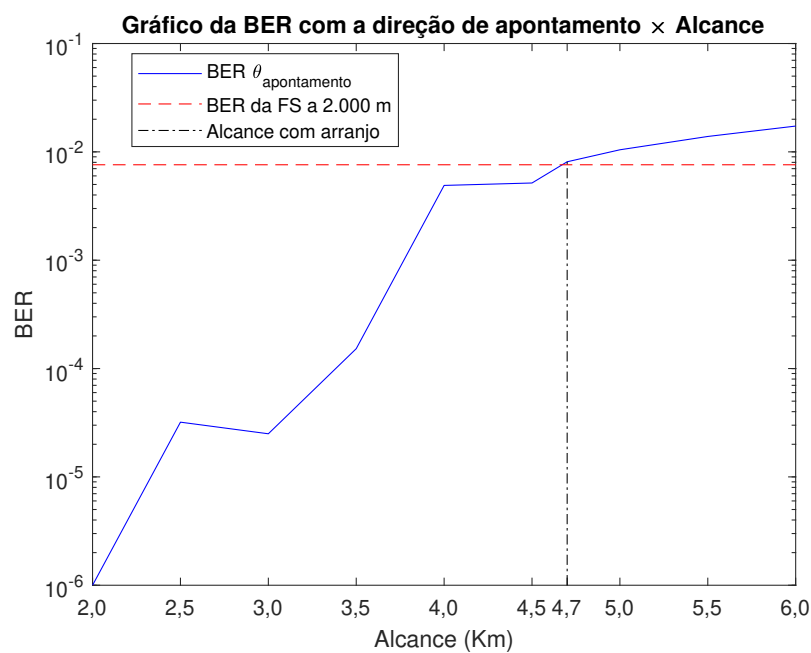


Figura 29 – Gráfico da BER com apontamento em função da distância.

A Figura 30 representa o mesmo cenário (TX a 300 m e RX a 5m) porém com

uma distância maior entre os sensores (4.700 m), e pode-se perceber que neste cenário a BER com a direção de apontamento, do cenário anterior, é muito próximo a BER da fonte singular a 2.000 m. Ou seja, considerando-se uma mesma BER, com um arranjo de transmissão como o utilizado nesta dissertação, o alcance do mesmo utilizando o apontamento adequado aumenta 2,3 vezes em relação a uma fonte singular posicionada a uma distância de 2.000 m do hidrofone.

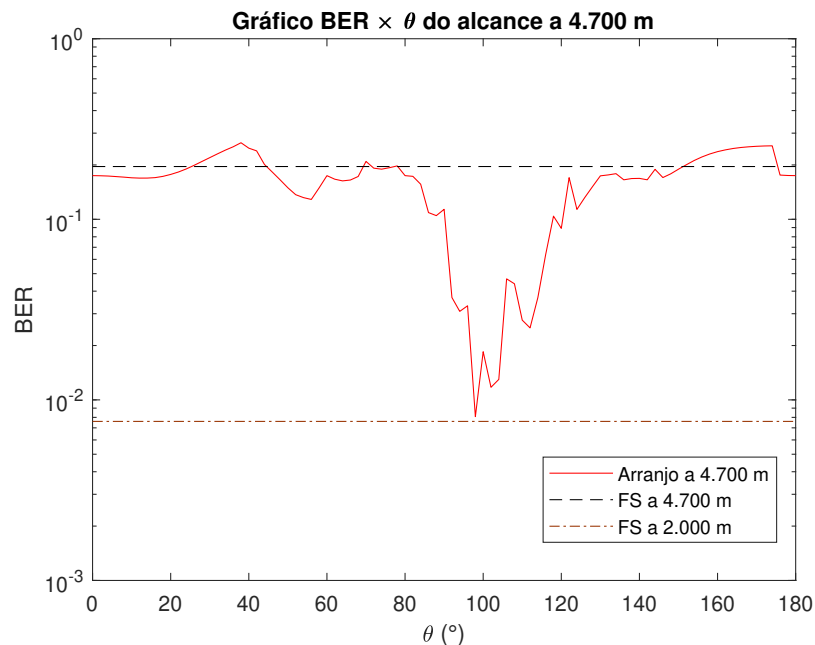


Figura 30 – Gráfico  $BER \times \theta$  com o mesmo cenário porém com aumento da distância.

A Figura 31 ilustra o diagrama de raios para este cenário com o transmissor a 300 m, o receptor a 5 m e a distância entre eles de 2 km. Como a distância entre os sensores (TX e RX) não é tão grande em relação a profundidade do fundo do mar, existem poucos raios que chegam ao receptor reduzindo a quantidade de interferências por múltiplos percursos. Entretanto há raios diretos (em vermelho) que são importantes pois sofrem menos perdas e raios com apenas uma reflexão (em verde e azul) que sofrem pequenas atenuações, e os raios com mais de uma reflexão (em preto) que chegam ao receptor com muitas perdas. Ocorrem também pequenas refrações para essa profundidade.

A próxima simulação é realizada para o cenário apresentado na Figura 27, onde o transmissor é navio, e o receptor, o submarino. A distância entre o transmissor e o receptor, neste caso, é de 20 km. A Figura 32 representa a taxa de erros de *bits* (BER) pela conformação de feixe na transmissão, em diferentes marés, para uma grande profundidade e uma longa distância, um cenário típico de comunicações desses meios navais. Pode-se perceber que há variações das curvas  $BER \times \theta$  para as diferentes marés porém menor que no cenário ilustrado na Figura 26. As curvas  $BER \times \theta$  para as marés apresentadas são similares e possuem os ângulos de apontamento agrupados, porém ainda apresentam

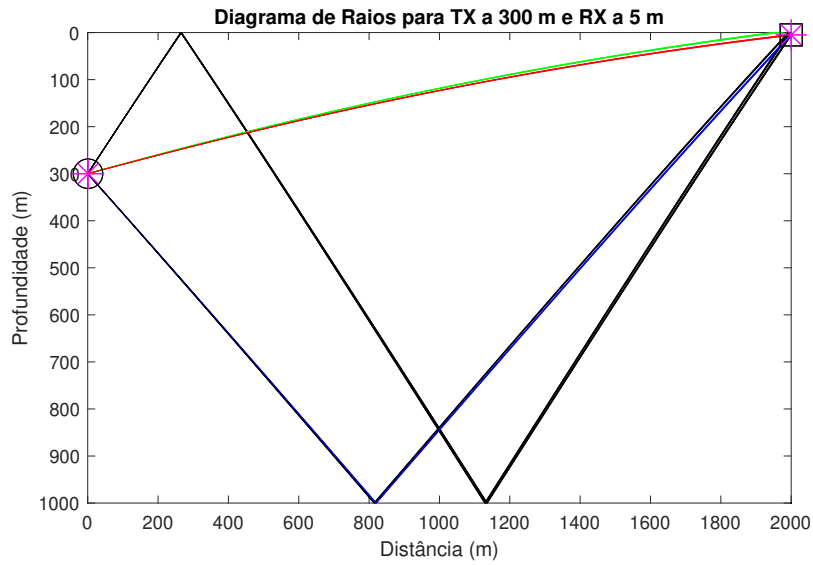


Figura 31 – Diagrama de raios para a transmissão do submarino para o navio a 2 km de distância.

variações em relação à maré e a máxima variação desses ângulos é de  $6^\circ$ , de  $94^\circ$  para  $88^\circ$ , para as marés 0 e 0,8 m, respectivamente.

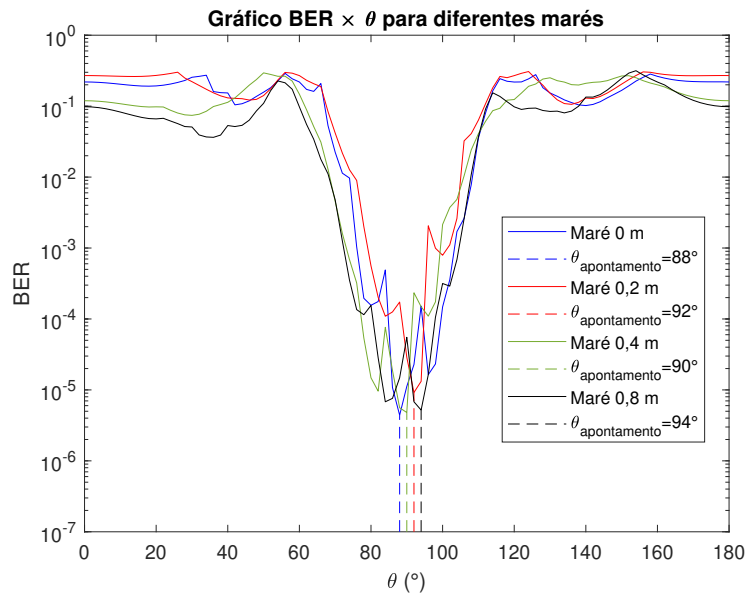


Figura 32 – Gráfico  $BER \times \theta$  para a transmissão do navio para o submarino a 20 km de distância.

Ao analisar somente uma curva  $BER \times \theta$  na Figura 32, pode-se perceber que ocorrem mais variações da BER em função de  $\theta$  que na Figura 28. Um dos motivos para essas variações são as quantidades de múltiplos percursos e os tipos de raios. De acordo com Figura 33 verifica-se que há um grande número de raios e todos com duas ou mais

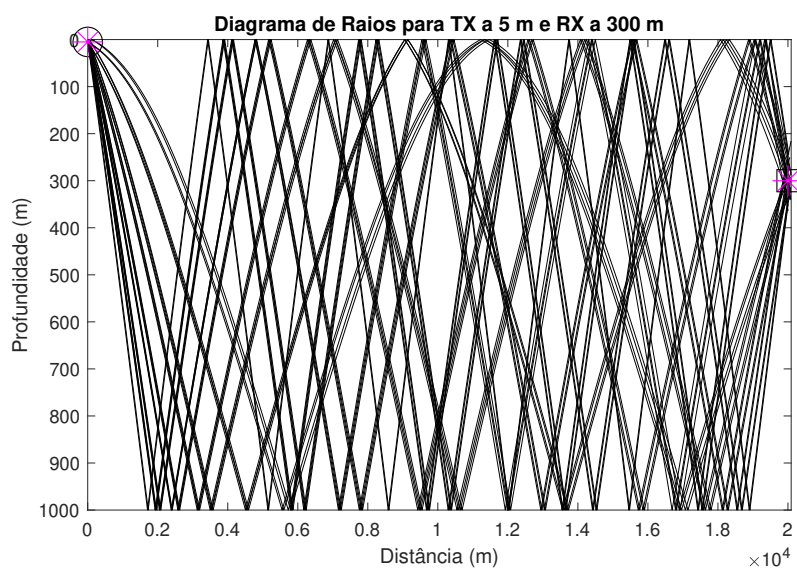


Figura 33 – Diagrama de raios para a transmissão do navio para o submarino a 20 km de distância.

reflexões nas interfaces (em preto), além das refrações.

### 3.3 Experimentos de Campo

Os experimentos foram realizados na Baía do Anjos, em Arraial do Cabo. Para realizar o *beamforming* de transmissão em um cenário subaquático, foi necessária a construção de um arranjo que permita fixar os projetores com alimentações independentes e espaçamentos iguais entre eles. Este arranjo foi construído com um material de polipropileno e, para que os espaçamentos sejam exatamente iguais foram inseridas chapas metálicas de mesma largura. O arranjo não pode ficar diretamente no fundo do mar pois as correntes marítimas podem derrubá-lo. Então, o arranjo deve ser colocado em uma estrutura ou base que o fixe no fundo do mar e não sofra influências de correntes marítimas. O IEAPM possui algumas estruturas que foram utilizadas nos experimentos, uma delas ilustrada na Figura 34.

Os projetores utilizados são EDO-610 (*Hull Sonar*), utilizados em um sonar móvel do Esquadrão de Helicópteros Antissubmarino (EsqHS) da MB. Esses projetores não estavam sendo utilizados pelo Esquadrão e foram testados, calibrados e aproveitados pelo IEAPM. Eles podem ser utilizados tanto para transmitir como para receber sinais e sua faixa de frequência linear está entre 5 kHz e 10 kHz.

A Figura 35 representa o modelo utilizado no experimento para transmissão e recepção, incluindo o esquema de ligação. Primeiro, o sinal modulado em *BPSK* (mensagem) é gerado pelo *notebook* que o transmite, via *USB*, para um conversor digital-analógico



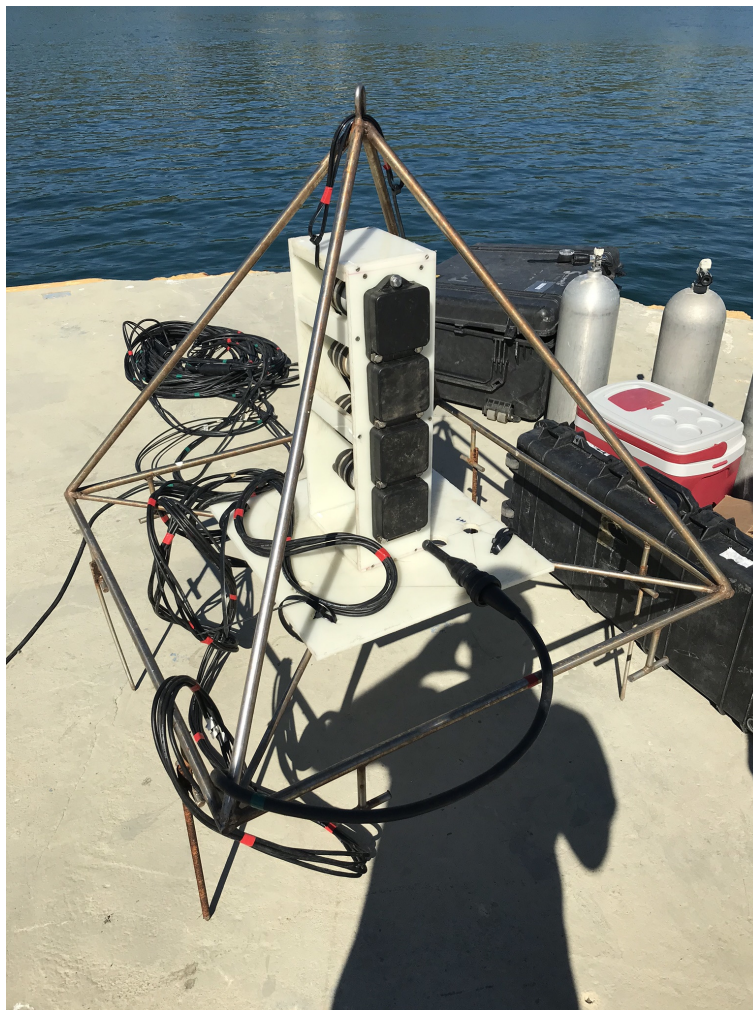


Figura 34 – Estrutura que fixa o arranjo no fundo do mar.

(D/A), que suporta até 4 saídas, e, depois, aumenta o ganho através de um amplificador para a transmissão nos projetores. Como a ligação entre a amplificação do sinal e os sensores de transmissão (projetores) é via cabo e possui um comprimento cerca de 20 m, pode haver quedas de tensão neles e, assim, não ocorrer a transmissão da potência esperada pelo amplificador. Para evitar isso, são utilizados transformadores como casadores de impedância, que são instalados entre o amplificador e os sensores. O sinal transmitido passa pelo canal subaquático e é recebido pelo hidrofone que o converte em sinal digital pelo conversor (A/D) até chegar ao *notebook*, via *USB*.

A Figura 36 ilustra os equipamentos e as ligações utilizadas na experiência conforme o modelado ilustrado na Figura 35: o amplificador da marca *Crown* com potência de 2000 W, o conversor D/A e A/D da marca *National Instruments*.

### 3.3.1 Primeiro Experimento

O primeiro experimento foi realizado com as seguintes especificações:



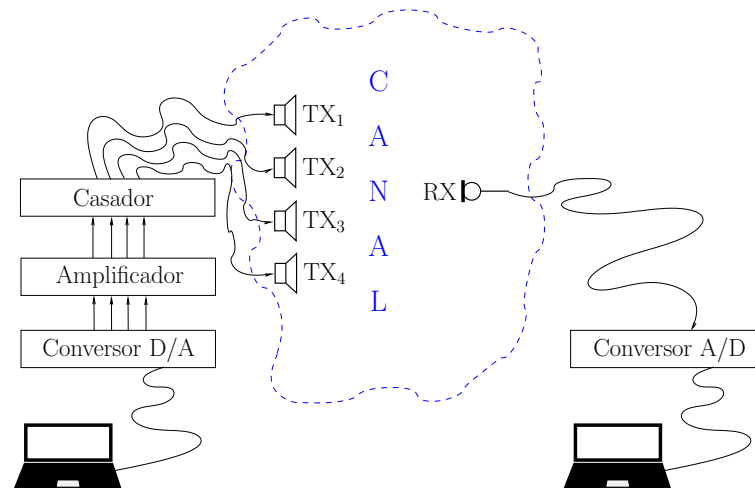


Figura 35 – Relação entre a temperatura e os perfis de velocidade do som pela profundidade.



Figura 36 – Equipamentos utilizados de acordo com modelo da Figura 35.

- O arranjo de 3 projetores (eram 4, porém o primeiro transmissor tornou-se indisponível para os testes do experimento no mar) foi colocado próximo ao cais do Anel (vide mapa na Figura 23);
- A fonte singular foi considerada o primeiro elemento do arranjo;
- A potência da fonte singular ( $FS$ ) é a mesma do arranjo quando o ganho do sinal, transmitido pela FS, for multiplicado  $\sqrt{3}$  do sinal transmitido pelo arranjo (3 fontes);
- O hidrofone, o receptor, foi instalado próximo à praia dos Anjos e ao IEAPM (vide mapa na Figura 23);

- Os sinais transmitidos pelo arranjo tiveram a conformação de feixe entre os ângulos  $20^\circ$  e  $120^\circ$ , com intervalo de  $2^\circ$ ;
- O sinal foi modulado em BPSK;
- Foram utilizadas três taxas de transmissão: 200 e 400 bps.

### 3.3.2 Transmissão a 200 bps

Como a taxa de transmissão de 200 bps aumenta o tempo de duração de cada símbolo (*bit*), então foi definida a mensagem transmitida com 5.000 *bits*. Um sinal mensagem com 5.000 *bits* e uma taxa de transmissão de 200 bps possui um tempo de duração de 25 s. Considerando um *beamforming* variando de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , com intervalo de  $1^\circ$ , a transmissão desta mensagem duraria 75 minutos, e o canal subaquático pode variar muito durante este intervalo de tempo. Então, foi definido a conformação de feixe entre  $20^\circ$  e  $120^\circ$ , com intervalo de  $2^\circ$ .

Uma análise a ser realizada é potência recebida pela transmissão com arranjo e com a fonte singular. Considerando que o sinal transmitido é decorrelacionado do ruído ambiente, pode-se estimar a variância do sinal de interesse como

$$\hat{\sigma}_{\text{sinal}}^2 = \sigma_{RX}^2 - \hat{\sigma}_n^2, \quad (3.3)$$

onde  $\hat{\sigma}_n^2$  é a variância estimada do ruído ambiente, computada num período (tempo) imediatamente antes do sinal ser recebido pelo hidrofone, e  $\sigma_{RX}^2$  é a variância do sinal recebido.

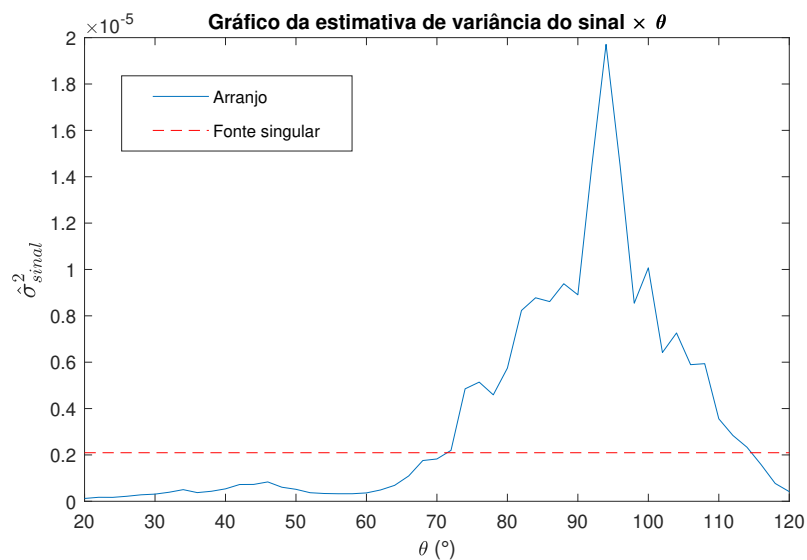


Figura 37 – Estimativas da variância do sinal recebido pela transmissão da fonte singular e do arranjo a uma taxa de 200 bps.

De acordo com a Figura 37, pode-se perceber que a potência recebida pelo *beamforming* de transmissão é maior que a recebida pela fonte singular para os ângulos entre  $72^\circ$  e  $115^\circ$ .

### 3.3.3 Transmissão a 400 bps

Verifica-se na Figura 38 que, aumentando a taxa de transmissão para 400 bps e o tamanho da mensagem para 10.000 símbolos, a potência recebida pela transmissão, tanto pelo arranjo como pela fonte singular, reduziu em relação à taxa de 200 bps. A potência recebida pela conformação de feixe é maior também que a fonte singular para os ângulos entre  $68^\circ$  e  $115^\circ$ .



Figura 38 – Potência recebida pela transmissão da fonte singular e do arranjo a uma taxa de 400 bps.

## 3.4 Segundo Experimento

O segundo experimento foi realizado no mesmo cenário que o primeiro, porém com 4 sensores de transmissão e usando somente uma taxa de transmissão. Seguem abaixo os dados desse experimento:

- O arranjo de 4 projetores (transmissor) foi colocado próximo ao cais do Anel (vide mapa na Figura 23);
- A fonte singular foi considerada o primeiro elemento do arranjo;
- A potência da fonte singular (*FS*) é a mesma do arranjo, ou seja cada projetor do arranjo transmite  $1/4$  da potência da FS;
- O hidrofone foi instalado próximo à costa da Baía dos Anjos (vide mapa na Figura 23);

- Os sinais transmitido pelo arranjo tiveram a conformação de feixe entre os ângulos  $20^\circ$  e  $120^\circ$ , com intervalo de  $2^\circ$ ;
- Foi utilizada a taxa de transmissão de 400 bps;
- O sinal mensagem contém 10.000 *bits*;
- O sinal foi modulado em BPSK;
- A frequência de amostragem é 100 kHz;
- O amplificador utilizado nesse experimento foi 6.000 W da marca *Crown*.

A experiência foi realizada com a seguinte dinâmica, em três casos: Primeiro, uma transmissão com a fonte singular e com o arranjo para uma determinada potência ajustada no amplificador. Segundo caso, a mesma dinâmica, porém com a potência do amplificador menor. Por último, a repetição exata do primeiro, porém com a maré mais alta, para verificar a sua influência.

Nesse experimento foi utilizado um amplificador de maior potência (6.000 W) em comparação ao do primeiro experimento. Devido a este fato ocorreram poucos erros na transmissão com arranjo, inclusive, em muitos casos (ângulos), não tiveram erros.

Tabela 4 – Quantidade de *bits* errados ocorridos para transmissão com arranjo (segundo experimento, caso 2: SNR=18 dB)

$\theta$ ( $^\circ$ )	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
erros	4	7	0	2	0	22	9	0	0	1	0
$\theta$ ( $^\circ$ )	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62
erros	0	0	0	1	58	0	1	0	0	0	0
$\theta$ ( $^\circ$ )	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84
erros	0	3	0	0	1	6	3	0	0	1	1
$\theta$ ( $^\circ$ )	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106
erros	2	45	1	1	3	0	1	0	0	3	0
$\theta$ ( $^\circ$ )	108	110	112	114	116	118	120				
erros	2	12	0	8	19	0	0				

A Tabela 4 representa o resultado do segundo experimento (caso 2) com a transmissão pelo arranjo para uma *SNR* estimada de 18 dB. Verifica-se que na tabela ocorrem muitos erros nulos, enquanto, para a transmissão com fonte singular de mesma potência do arranjo, 1.759 erros, considerando que a mensagem tem 10.000 *bits*.

Os outros casos (1 e 3) também apresentaram resultados semelhantes e com erros ainda menores, pois a potência do sinal transmitido era maior e a *SNR* média de 19,5 dB. Com a finalidade de verificar melhor o comportamento da curva de *BER* dos experimentos com arranjo, foi, então, adicionado ruído gaussiano branco no sinal recebido

pelo *beamforming* de transmissão. Esse ruído adicionado tem uma estimativa de variância resultante de uma SNR igual a 7 dB, para o caso 2, e 7,2 dB, para os casos 1 e 3, utilizando o sinal recebido pela fonte singular (mesma potência do arranjo).

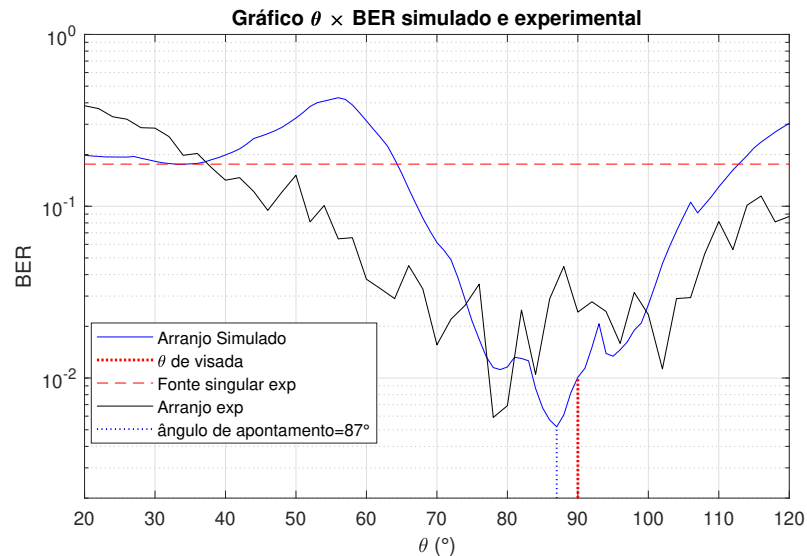


Figura 39 – Gráfico  $BER \times \theta$  experimental com ruído gaussiano branco inserido para uma  $SNR$  de 7 dB.

Com o ruído adicionado, pode-se verificar, de acordo com a Figura 39, uma semelhança entre as curvas simulada e prática. O ângulo da menor BER experimental está em  $78^\circ$  enquanto o simulado está em  $87^\circ$ . As variações da curva experimental, que podem ter diversas interferências, principalmente causada pelo ruído ambiente, podem causar um falso ângulo de apontamento; porém, observa-se uma tendência para a direção de apontamento simulado.

A forma de verificar a influência da maré na comunicação foi realizar a mesma transmissão no início e no final do experimento, onde ocorreu uma variação de 40 cm de maré. Não foram inseridas as curvas simuladas pois a intenção é verificar a influência da maré no experimento real e comparar com o que foi simulado na Figura 26. Através da Figura 40, percebe-se uma diferença dos ângulos da menor BER experimental devido a variação da maré e comparando com as direções de apontamentos para a maré 0,6 m, o ângulo de  $85^\circ$ , e para a maré de 1,0 m,  $88^\circ$ . Então, verifica-se que, na maré de 0,6, o ângulo da menor BER experimental ( $86^\circ$ ) está bem próximo do apontamento, e a maré de 1,0 m o ângulo da BER experimental ( $94^\circ$ ) mas ainda está próximo à direção de apontamento, que é  $88^\circ$ .

Neste capítulo foram apresentadas simulações para diversos cenários, alterando parâmetros como a profundidade, distância, batimetria e marés. A batimetria é o parâmetro mais difícil de mensurar pois a carta náutica, em alguns casos, é antiga e não possui o detalhamento próprio para realizar as simulações precisas. Entretanto, a influência da

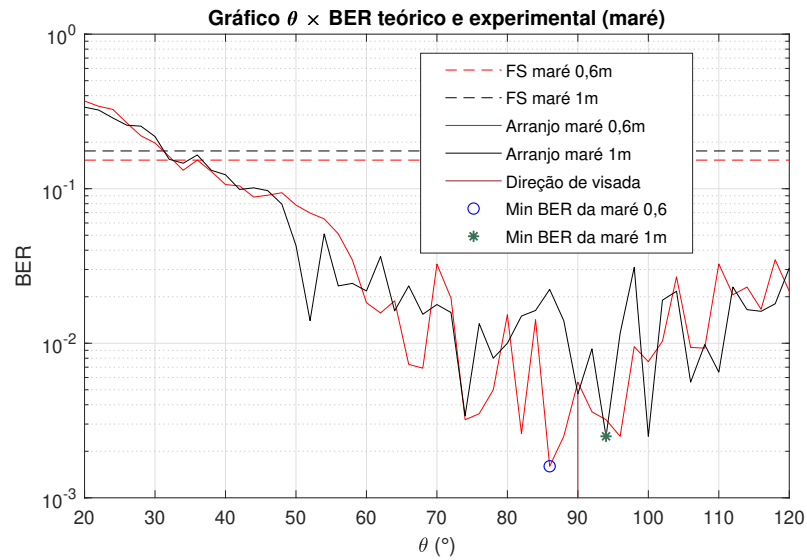


Figura 40 – Gráfico  $BER \times \theta$  experimental com diferentes marés para uma SNR de 7,2 dB.

batimetria na taxa de erros não causa muitas variações. O parâmetro que causa mais alterações na curva de BER é a variação da maré, principalmente em águas rasas, onde uma variação de 20 a 40 cm pode alterar sensivelmente o ângulo da menor BER experimental. Com os resultados obtidos pelos experimentos reais foram observados que as variações das marés influenciam na conformação de feixe (ângulo de apontamento), as transmissões com arranjo apresentam melhores taxas de erros em relação à fonte singular, para uma determinada direção, e além da maior potência recebida.

## 4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A comunicação em um ambiente submarino possui diversos fatores e parâmetros que influenciam em um beamforming de transmissão. A conformação de feixe utilizada nesse trabalho assume o conhecimento do ambiente submarino e busca otimização na taxa de erro de *bits* numa comunicação *BPSK*. Observou-se que, através de uma transmissão com arranjo de projetores realizando um *beamforming* em uma dada direção de apontamento, obteve-se um melhor rendimento em relação a uma fonte singular, reduzindo assim a BER e aumentando a ocorrência de *bits* certos. O ângulo da menor BER experimental está próximo do ângulo de apontamento simulado em alguns casos, pois dependem de fatores como batimetria e maré. Estimativas da *SNR* (devido ao ruído ambiente, que é variante no tempo), da maré e da batimetria necessitam de uma grande precisão e detalhamento, para que a direção de apontamento seja a mais próxima possível do experimento real para que possamos minimizar a *BER*. Observou-se ainda que a utilização do arranjo com a marcação de  $\theta$  próxima ao ângulo de apontamento foi sempre melhor que a transmissão com fonte singular. O erro de apontamento de maior eficiência é diferente do ângulo de visada. Verificamos em simulações que o uso do arranjo de transmissão aumenta consideravelmente o alcance de uma comunicação subaquática. Os navios e submarinos, da Marinha do Brasil, ainda não possuem comunicações submarinas entre eles, mas existem projetos nesse sentido, e este trabalho serve para corroborar essa área.

### 4.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros e uma extensão desta dissertação, recomenda-se aprofundar o estudo no processamento de sinais visando a melhoria da comunicação subaquática e conseqüente redução da taxa de erros. Além disso, a obtenção de um conjunto (corpus) de sinais reais gravados em maior quantidade e em diferentes configurações em muito poderia auxiliar a pesquisa do emprego de arranjo de projetores na transmissão de sinais subaquáticos. A seguir estão listadas algumas sugestões mais específicas de possíveis trabalhos futuros.

- Algumas técnicas utilizadas em processamento de sinais, dentre elas beamforming de transmissão adaptativo, equalização do canal e janelamento, poderiam ser empregadas visando melhorar a comunicação e reduzir as taxas de erros;
- O aumento do banco de dados em diferentes condições ambientais e diferentes geometrias de arranjo é muito importante para avançar a pesquisa de arranjos de transmissão aplicados às comunicações subaquáticas;

- Uma das técnicas bastante utilizada recentemente é o aprendizado de máquinas a qual pode ser útil no estudo de comunicações em meio subaquático;
- Utilização de diferentes geometrias do arranjo de transmissão, incluindo arranjos planares e cilíndricos, e não somente arranjo linear uniforme.



## REFERÊNCIAS

- CHE, X.; WELLS, I.; DICKERS, G.; KEAR, P.; GONG, X. Re-evaluation of rf electromagnetic communication in underwater sensor networks. Communications Magazine, IEEE, v. 48, p. 143 – 151, 01 2011. 19
- CHITRE, M.; SHAHABUDEEN, S.; STOJANOVIC, M. Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges. In: . [S.l.: s.n.], 2008. v. 42, p. 103–116. 18
- ETTER, P. Underwater acoustic modeling: Principles, techniques, and applications. In: . [S.l.]: CRC Press, 2003. ISBN 9780429177552. 27
- ETTER, P. Underwater acoustic modeling and simulation. CRC Press, 2018. 18, 22
- FARR, N.; BOWEN, A.; WARE, J.; PONTBRIAND, C.; TIVEY, M. An integrated, underwater optical /acoustic communications system. In: OCEANS'10 IEEE SYDNEY. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6. 19, 20
- GUSSEN, C. M. G.; DINIZ, P. S. R.; CAMPOS, M. L. R. de; MARTINS, W. A.; COSTA, F. M.; GOIS, J. N. A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies. Journal of Communication and Information Systems, v. 31, n. 1, p. 242–255, 2016. ISSN 19806604. 18
- HAN, X.; YIN, J.-w.; LIU, B.; GUO, L.-x. Mimo underwater acoustic communication in shallow water with ice cover. China Ocean Engineering, v. 33, p. 237–244, 04 2019. 39
- HAYKIN, S. Communication systems, 4th ed. In: . [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc, 2001. ISBN 9788126509041. 67
- HE, Z.; SHI, Q.; WU, S. Investigation of low-sidelobe beampattern controlling methods for acoustic transmitting array of underwater vehicles. Polish Maritime Research, v. 24, 01 2017. 39
- ISTEPANIAN, R. S. H.; STOJANOVIC, M. Underwater acoustic digital signal processing and communication systems. In: . [S.l.: s.n.], 2002. ISBN 978-1-4419-4882-3. 18
- JENSEN, F. B.; KUPERMAN, W. A.; PORTER, M. B. Computational ocean acoustics. In: . [S.l.]: Springer Publishers, 2011. v. 1. 23, 26
- KINSLER, L.; KINSLER, L.; FREY, A.; COPPENS, A.; SANDERS, J. Fundamentals of Acoustics. [S.l.]: Wiley, 2000. ISBN 9780471847892. 21
- LEE OE-HYUNG LEE, K.-M. K. Y.-J. Transmit array for acoustic communications in multipath underwater channel. In: MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. [S.l.: s.n.], 2001. v. 3, p. 1573–1576. 18, 19, 38, 44
- LIAO, L.; ZAKHAROV, Y.; MITCHELL, P. Underwater localization based on grid computation and its application to transmit beamforming in multiuser UWA communications. In: . [S.l.: s.n.], 2018. June, p. 4297–4307. 18, 37

- LURTON, X. An introduction to underwater acoustics: Principles and applications. In: . [S.l.]: Praxis Publishing, 2002. ISBN 3540429670. 21, 22, 23, 24, 25, 43
- PALMEIRO, A.; MARTIN, M.; CROWTHER, I.; RHODES, M. Underwater radio frequency communications. In: OCEANS 2011 IEEE - Spain. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8. 18
- PORTER, M. B. The Bellhop manual and user's guide: Preliminary draft. In: . [S.l.: s.n.], 2011. 27, 29, 50
- RAHMATI, M.; POMPILI, D. Ssfb: Signal-space-frequency beamforming for underwater acoustic video transmission. p. 180–188, 2017. 38
- RHODES, M. Electromagnetic propagation in sea water and its value in military systems. In: . [S.l.: s.n.], 2007. 20
- RODRIGUEZ, O. C. General description of the bellhop ray tracing program. In: . [S.l.: s.n.], 2008. 27
- SAJMATH, P. K.; RAVI, R. V. Beamforming based underwater wireless optical communication systems. p. 1289–1293, 2019. 39
- SHARAGA, N.; TABRIKIAN, J.; MESSER, H. Optimal cognitive beamforming for target tracking in mimo radar/sonar. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, v. 9, n. 8, p. 1440–1450, Dec 2015. ISSN 1941-0484. 38
- SIMPSON, J.; HUGHES, B. L.; MUTH, J. Smart transmitters and receivers for underwater free-space optical communication. In: . [S.l.: s.n.], 2012. v. 30, p. 964–974. 18
- SOUZA, D. B. de; APOLINÁRIO Jr., J. A.; CAMPOS, M. L. R. de. Uma proposta de beamforming de transmissão para sinais subaquáticos. XXXVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 2019. 37
- STOJANOVIC, M.; PREISIG, J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. IEEE Communications Magazine, v. 47, n. 1, p. 84–89, 2009. 19, 24
- TALIB, K. H.; OTHMAN, M. Y.; SULAIMAN, S. A. H.; WAZIR, M. A. M.; AZIZAN, A. Determination of speed of sound using empirical equations and svp. In: 2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications. [S.l.: s.n.], 2011. p. 252–256. 22
- THOMPSON, D.; NEASHAM, J.; SHARIF, B. S.; HINTON, O. R.; ADAMS, A. E.; TWEEDY, A. D.; LAWLOR, M. A. Performance of coherent psk receivers using adaptive combining, beamforming and equalisation in 50 km underwater acoustic channels. v. 2, p. 845–850 vol.2, 1996. 39
- TREES, H. L. V. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. In: . [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc, 2004. ISBN 9780471463832. 31, 35, 37
- WIESEL, A.; ELDAR, Y.; SHAMAI, S. Zero-forcing precoding and generalized inverses. Trans. Sig. Proc., IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 56, n. 9, p. 4409–4418, Sep. 2008. ISSN 1053-587X. 18, 38

## ANEXO A – MODULAÇÃO FSK

A modulação digital em frequência (FSK, do inglês *Frequency Shift Keying*) é bastante utilizada em comunicação subaquática devido, principalmente, a sua robustez. Essa modulação consiste em modificar a frequência do sinal da portadora de acordo com o conteúdo da mensagem. Considerando a forma binária BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*), ou 2-FSK, as duas frequências estão associadas aos *bits* “0” ou “1”.

Então, o sinal modulado a ser transmitido pode ser expresso como

$$x(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_1 t} & \text{bit 1,} \\ e^{j2\pi f_2 t} & \text{bit 0,} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

onde os *bits*, ou símbolos, “1” e “0” estão associados às frequências  $f_1$  e  $f_0$ , respectivamente. O sinal é definido como tom, e somente com o lado positivo do espectro da frequência, para que a conformação de feixe seja eficiente.

A modulação BFSK pode ser visualizada na Figura 41 onde a primeira imagem é o sinal portadora, a segunda, o sinal mensagem ( $s_k$ ), e a terceira, o sinal modulado. Pode-se verificar que o sinal modulado inverte a fase portadora em  $180^\circ$  a cada mudança de *bit*.

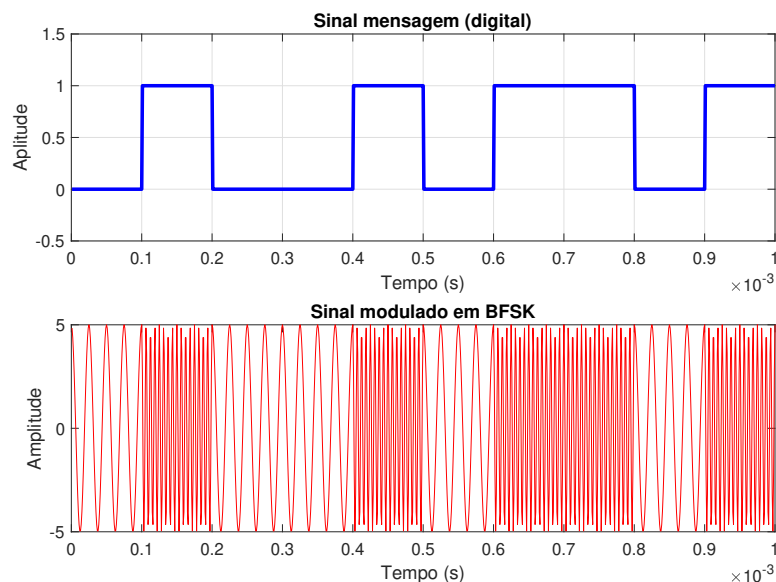


Figura 41 – Modulação BFSK.

Sendo assim, o sinal é transmitido conforme o diagrama de blocos ilustrado na Figura 10, no Capítulo 2, onde é realizada a conformação de feixe, passando pelo canal

subaquático (modelo) até ser recebido pelo receptor. O sinal recebido pode ser definido como

$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L A_{m,l} x(t - \tau_{m,l}) a_m(\theta) \right\} + n(t),$$

onde  $n(t)$  é o ruído ambiente, e  $A_{m,l}$  e  $\tau_{m,l}$  são as amplitudes e delays, respectivamente, que cada raio ( $l$ ) chega ao receptor, emitido pela fonte de transmissão ( $m$ ).

A demodulação é realizada conforme o modelo de detecção coerente apresentado na Figura 42 (Adaptada de (HAYKIN, 2001)). O sinal  $y(t)$  é recebido pelo hidrofone e é realizado o sincronismo para encontrar o  $\tau_{ref}$ . Após o sincronismo, a demodulação é feita utilizando as duas portadoras, onde o sinal é multiplicado pela portadora  $f_1$  e  $f_2$ . Os sinais resultantes são integrados no período de duração de cada símbolo e subtraindo os resultados que passa pelo decisor, onde o valor positivo está relacionado ao *bit* “1” e o valor negativo ao *bit* “0”.

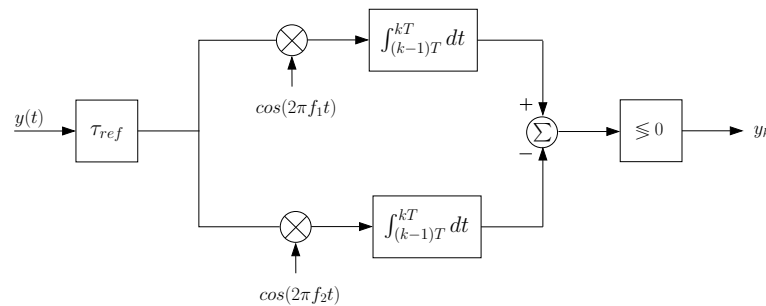


Figura 42 – Detecção do sinal BFSK recebido.

Considerando que o espaçamento ( $d$ ) entre os sensores de transmissão mede 0,12 m, e a velocidade média do som no mar é 1.500 m/s, então a frequência para  $\lambda/2$  é 6.250 Hz. Essa frequência é definida como a frequência central entre as duas portadoras ( $f_1$  e  $f_2$ ), e é utilizada nos componentes do *steering vector*. Uma propriedade da modulação FSK é que as frequências das portadoras devem ser múltiplas da taxa de transmissão (HAYKIN, 2001) para que não ocorra descontinuidade na transição entre os símbolos distintos, então foram definidas as frequências de 6.000 e 6.500 Hz para  $f_1$  e  $f_2$ , respectivamente, e a taxa de transmissão de 250 bps.

A Figura 43 apresenta o sinal modulado no domínio da frequência, e pode-se verificar que as frequências e a taxa de transmissão foram definidas adequadamente. A banda do sinal é maior, característica da modulação FSK, pois utiliza duas frequências, porém não está tão grande que possa influenciar na transmissão com arranjo e, também, não há interferências entre os lóbulos principais das portadoras.

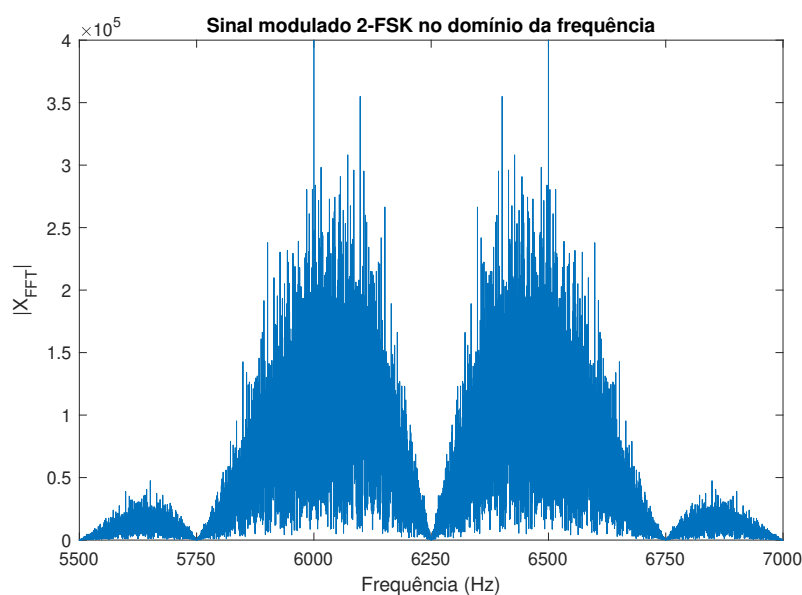


Figura 43 – Sinal modulado no domínio da frequência.

## A.1 Experimentos

O experimento foi realizado na Baía dos Anjos, em Arraial do Cabo, o cenário foi definido conforme a Figura 23, no Capítulo 3, e com os seguintes parâmetros:

- Mensagem foi escolhida aleatoriamente com 5.000 *bits*;
- O arranjo de transmissão e o receptor estão a uma profundidade de 11 e 9,5 m, respectivamente, e a distância entre eles é de 420 m;
- Taxa de transmissão 250 bps;
- Frequências das portadoras: 6.000 e 6.500 Hz;
- Frequência de amostragem 50 kHz;

O experimento foi realizado em dois momentos com os mesmos parâmetros, porém com a potência do amplificador diferente, uma menor e outra maior. A Figura 44 representa o gráfico do experimento com menor potência, em uma maré de 0,8 m, e pode-se verificar que há ângulos em que a BER do arranjo é melhor que a BER transmitida pela fonte singular, e mais eficiente para ângulos entre 60° e 70°. O ângulo da menor BER está bem afastado do ângulo de visada (em torno de 90°), mas próximo à direção de apontamento. A taxa de erros para transmissão com arranjo é menor para alguns ângulos que a transmissão feita pela fonte singular. A SNR experimental da fonte singular, com mesma potência do arranjo, foi estimada em -5,4 dB, enquanto a SNR da simulação, para o ajuste da curva, foi definida como -9 dB.

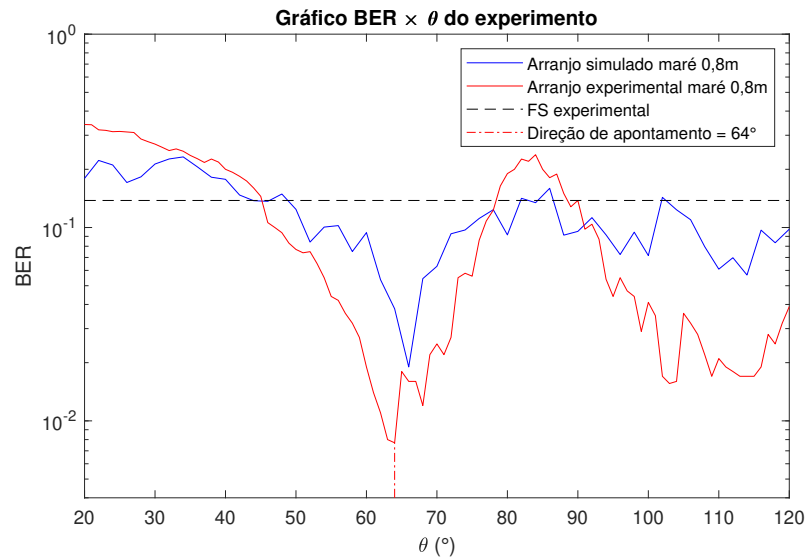
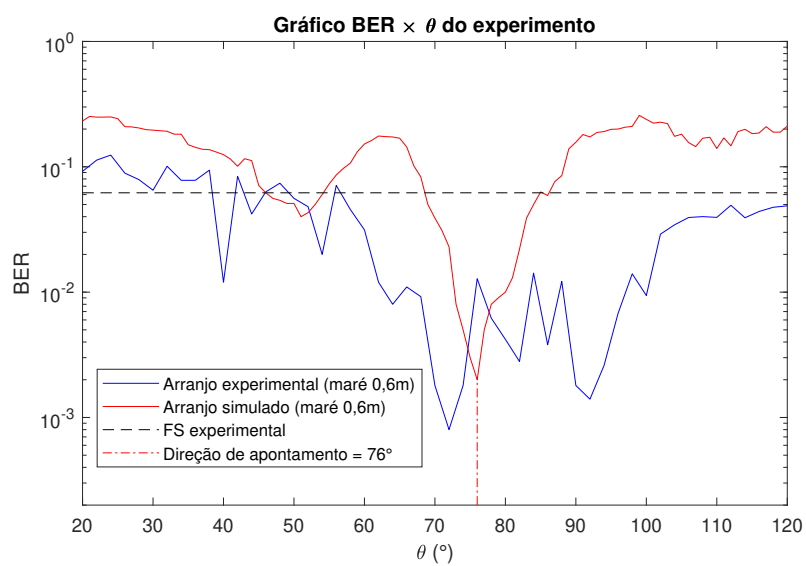


Figura 44 – Gráfico BER  $\times$   $\theta$  experimental com menor potência.

O segundo momento do experimento foi realizado com os mesmos parâmetros, mas com a potência do amplificador maior (ajustada por um potenciômetro). A Figura 45 apresenta o gráfico do experimento para a transmissão com arranjo e a fonte singular. Pode-se perceber que uma grande quantidade de ângulos (entre  $6^{\circ}$  e  $100^{\circ}$ ) onde a BER, do arranjo, é bem inferior a BER da fonte singular. O ângulo da menor BER alterou em relação ao momento anterior, porém continua afastado do ângulo de visada, que pode ter ocorrido em função da variação da maré pois, na curva simulada, a direção de apontamento também não é o mesmo com a variação deste parâmetro. A SNR estimada pela fonte singular no experimento, para esta potência, foi de  $-2,5$  dB, e na simulação definida como  $-5$  dB.

A modulação digital FSK é uma ótima ferramenta de comunicação pois apresenta uma demodulação mais robusta e com menos variações, principalmente apresentadas nas simulações. Como esta modulação não há inversão de fase, os sensores de transmissão não sofrem a influência da inércia na transdução da elétrica para pressão sonora. A utilização desta modulação em uma transmissão com arranjo pode apresentar os *grating lobes* devido ao *steering vector* não possuir uma frequência para  $\lambda/2$ . E caso a frequência seja maior que a definida no *steering vector*, podem surgir os *grating lobes*. Nesta dissertação não foi utilizada uma banda do sinal tão grande e nem uma faixa de ângulos que possam apresentar os *grating lobes*.

Figura 45 – Gráfico BER  $\times$   $\theta$  experimental com maior potência.