



LOCALIZAÇÃO DE CETÁCEOS A PARTIR DE ASSOBIOS EMITIDOS COM ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DEVIDA AO EFEITO LLOYD-MIRROR

Amilcar Mangueira Aguiar Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Marcos Nicolás Gallo

Rio de Janeiro
Outubro de 2021

LOCALIZAÇÃO DE CETÁCEOS A PARTIR DE ASSOBIOS EMITIDOS COM
ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DEVIDA AO EFEITO LLOYD-MIRROR

Amilcar Mangueira Aguiar Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Marcos Nicolás Gallo

Aprovada por: Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Prof. Marcos Nicolás Gallo
Prof. Alexandre de Freitas Azevedo
Prof. Fábio Contrera Xavier

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2021

Aguilar Junior, Amilcar Mangueira

Localização de cetáceos a partir de assobios emitidos com análise da interferência devida ao efeito Lloyd-mirror/Amilcar Mangueira Aguilar Junior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XII, 50 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Marcos Nicolás Gallo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 42 – 45.

1. Lloyd-mirror. 2. assobio. 3. ruído. I. Ribeiro, Carlos Eduardo Parente *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*"Eis que eu estou convosco todos
os dias, até o fim do mundo."
Mt 28,20.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que me concedeu o dom da vida, e permitiu chegar até aqui. Minha esposa, pelo apoio incondicional, minhas filhas Maria e Sofia por serem minha motivação. À minha vó Jacira um exemplo de vida que sempre vai me inspirar. Aos meus pais, por me trilharem no caminho do estudo e por todo o amor dedicado a mim. Ao meu irmão, pelo exemplo de dedicação ao trabalho. Aos meus familiares, sempre presentes na minha vida. Ao Capelão João Roberto, pelos conselhos e amizade.

Ao professor Carlos Eduardo Parente, que me guiou nesta empreitada. Ao professor Alexandre de Freitas Azevedo, um grande conhecedor da bioacústica, sempre pronto para me ajudar na obtenção de gravações, tão importantes para meu estudo. Ao Diogo Taranto, por ter sido minha referência no decorrer do mestrado.

Marinha do Brasil, pela oportunidade de realizar o curso, e ao Centro Tecnológico da Marinha no Rio de Janeiro, que prestou todo o suporte necessário durante o curso. Ao Laboratório de Instrumentação Oceanográfica - LIOc, pela estrutura fornecida no decorrer do mestrado, aos amigos Assis, William e Henrique Pereira, pelo apoio e disponibilidade em ajudar.

Aos professores da COPPE, que tanto me ensinaram, aos funcionários, a engrenagem motriz desse grande centro. E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o término desta dissertação. Obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

LOCALIZAÇÃO DE CETÁCEOS A PARTIR DE ASSOBIOS EMITIDOS COM ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DEVIDA AO EFEITO LLOYD-MIRROR

Amilcar Manguiera Aguilar Junior

Outubro/2021

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Marcos Nicolás Gallo

Programa: Engenharia Oceânica

Apresenta-se, nesta dissertação de mestrado, uma técnica de estimativa da posição de uma fonte sonora, emissora de assobio. A metodologia consiste em correlacionar as interferências geradas pelo efeito Lloyd-mirror entre o assobio gabarito (detectado pelo hidrofone) e os assobios gerados pelos vários cenários de profundidade e distância, permitindo obter o cenário que mais se aproxima do assobio gabarito. Para isso, este estudo foi elaborado a partir de gravações de assobios do boto-cinza (*Sotalia guianensis*) e do golfinho nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*). Os testes demonstraram a capacidade do algoritmo em reproduzir os assobios observados e a influência da profundidade do receptor e da fonte na qualidade dos resultados. Além disso, a análise do resultado demonstrou a confiabilidade do algoritmo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

LOCATION OF CETACEANS FROM WHISTLES EMITTED WITH ANALYSIS
OF INTERFERENCE DUE TO THE LLOYD-MIRROR EFFECT

Amilcar Manguiera Aguilar Junior

October/2021

Advisors: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Marcos Nicolás Gallo

Department: Ocean Engineering

This master's thesis presents a technique for estimating the position via a sound source of a whistle broadcaster. The methodology consists of correlating the interferences generated by the Lloyd-mirror effect between the whistling feedback (detected by the hydrophone) and the whistles generated by the various depth and distance scenarios allowing to obtain the scenario that most closely approximates the whistling feedback. For this, this study was elaborated from recordings of guiana dolphin whistles (*Sotalia guianensis*) and bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). The tests demonstrated the ability of the algorithm to reproduce the observed whistles and the influence of the depth of the receiver and the source on the quality of the results. Furthermore, the analysis of the result demonstrated the reliability of the algorithm.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.2 Objetivos Específicos	2
2 Embasamento Teórico	3
2.1 Monitoramento Acústico Passivo (MAP)	3
2.2 Perfil da velocidade do som	4
2.3 Caracterização dos caminhos de propagação	6
2.3.1 Efeito Lloyd-mirror	7
2.3.2 Reflexão no fundo e coeficiente de reflexão	10
2.4 Métodos de medição da distância da fonte	13
2.5 Emissões sonoras: o assobio	15
3 O algoritmo de localização	19
3.1 Processamento do sinal recebido	20
3.1.1 Assobio ascendente	20
3.1.2 Assobio côncavo	23
3.2 Efeito das reflexões	25
3.2.1 O efeito Lloyd-mirror	25
3.2.2 Reflexão no fundo	26
3.2.3 Somatório dos efeitos	27
3.3 Correlação das amplitudes	29
4 Testes e análises dos resultados	31
5 Conclusões e recomendações	40
5.1 Conclusão	40
5.2 Recomendações	41

Referências Bibliográficas	42
A Coleta de dados	46
A.1 Perfilador Acústico de Queda Livre	46
A.1.1 Características do Perfilador Acústico de Queda Livre	47

Lista de Figuras

2.1	Temperatura, salinidade e velocidade do som, adaptado de [1].	4
2.2	Perfil típico da velocidade do som [2].	5
2.3	Esquema de propagação do som no oceano, adaptado de [3].	6
2.4	Geometria do efeito Lloyd-mirror[4].	7
2.5	Perda de transmissão pela distância, adaptado de [4].	10
2.6	Efeito de uma onda sonora sobre a interface entre duas regiões [5].	11
2.7	Características geoacústicas de vários tipos de solo, adaptado de [4].	12
2.8	Geometria de dois hidrofones com a fonte localizada no ponto $s(x,y)$ [6]	13
2.9	Técnica de posicionamento de hidrofone, adaptado de [6]	15
2.10	Espectro geral com alguns parâmetros de caracterização do assobio, adaptado de [6]	16
2.11	Exemplos de espectrogramas dos contornos fundamentais, adaptado de [6]	17
2.12	Tabela das características da emissão do boto-cinza, adaptado de [7]	18
3.1	Fluxograma de funcionamento do algoritmo de localização	20
3.2	Sinal do boto-cinza analisado.	21
3.3	Espectrograma do assobio do boto-cinza filtrado.	22
3.4	Assobio do boto-cinza no domínio do tempo.	22
3.5	Assobio sintético ascendente sem efeitos da propagação.	23
3.6	Assobio do golfinho nariz-de-garrafa.	24
3.7	Assobio do boto-cinza no domínio do tempo.	24
3.8	Assobio sintético côncavo sem efeitos da propagação.	25
3.9	Representação trigonométrica do efeito Lloyd-Mirror.	26
3.10	Representação geométrica da reflexão no fundo.	26
3.11	Assobio sintético emitido (sem efeito).	28
3.12	Assobio sintético emitido (com efeitos).	29
3.13	Amplitude do assobio do boto-cinza.	30
4.1	Gráfico da correlação pela distância dos pontos de maiores correlações para o assobio do boto-cinza.	32

4.2	Gráfico da correlação pela profundidade dos pontos de maiores correlações para o assobio do boto-cinza.	33
4.3	Gráfico das distâncias e profundidades dos pontos de maiores correlações para o assobio do boto-cinza.	34
4.4	Gráfico das amplitudes do assobio do boto-cinza e do assobio sintético de maior correlação.	35
4.5	Gráfico da distância pela profundidade das 10 maiores correlações de um assobio linear com o receptor à profundidade de 2m.	36
4.6	Gráfico da correlação pela distância de um assobio linear com o receptor à profundidade de 2m e 18m.	37
4.7	Gráfico da correlação pela distância normalizada de um assobio linear com o receptor e cetáceo à profundidade de 2m e 18m.	38
4.8	Gráfico da correlação pela profundidade normalizada de um assobio linear com o receptor e cetáceo à profundidade de 2m e 18m.	38
A.1	Curva de Wenz [8].	47
A.2	Hidrofone Spherical transducer D70.	48
A.3	Curva sensibilidade do hidrofone [9].	48
A.4	Protótipo do Perfilador Acústico de Queda Livre [10]	49
A.5	Teste LabOceano [10]	49

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros da equação sonar	3
4.1	Informações dos assobios	31

Capítulo 1

Introdução

A energia eletromagnética é bastante atenuada nos meios condutores, como é o caso da água salgada, o que já não ocorre com a energia acústica (mecânica). Isso permite que a onda sonora propague a grandes distâncias no mar e forneça informações importantes sobre o ambiente marinho. [5]

Muitas dessas informações estão presentes no ruído ambiente [11], um ruído de fundo que pode ajudar a caracterizar o ambiente e interferir com sinais acústicos obtidos de forma ativa ou passiva [4].

Durante a 2ª Guerra Mundial, o estudo do ruído ambiente tornou-se uma área de pesquisa de grande relevância. Essas pesquisas foram apresentadas por Knudsen [11], e depois por Urick e Pryce [12]. Após a guerra, durante os anos cinquenta houve uma redução nas pesquisas até o importante estudo publicado por Wenz [13],[8], que demonstrou a capacidade do ruído em descrever o ambiente marinho.

Com o advento da revolução industrial, quando ocorre a transição dos navios a vela para os navios motorizados, há um crescimento contínuo da introdução de ruídos antropogênicos no oceano. Com esse aumento, ocorre um conflito evolutivo na adaptação de animais marinhos a utilização do som, causando efeitos deletérios nesses animais.[14]

Em janeiro de 2005, 36 baleias de três diferentes espécies ficaram encalhadas e morreram ao longo dos Outer Banks da Califórnia do Norte durante o teste de sonar de navios da marinha americana [15]. Em março de 2000, dezesseis baleias encalharam a 150 milhas da costa ao longo dos canais norte das Bahamas. Nesse mesmo local, dentro de 24 horas antes ocorreu o uso de sonares de grande potência e médias frequências da marinha americana [16].

Nessa linha, em 2018 o Ministério do Meio Ambiente revisou o Guia de Monitoramento da Biota Marinha em Pesquisas Sísmicas Marítimas [17], com o objetivo de mitigar o efeito das pesquisas sísmicas sobre os animais marinhos. Esse documento apresenta procedimentos obrigatórios que devem ser realizados para se obter as Licenças de Pesquisas Sísmicas.

Segundo [18], o impacto do ruído antropogênico nas espécies marinhas pode ser melhor previsto se conseguirmos estimar com confiabilidade o nível da fonte do ruído impactante e a posição do mamífero.

Muitos métodos e estudos ([19], [20]) são realizados para determinar com maior precisão a localização do mamífero, sejam eles passivos (sem emissão de sinal) ou ativos. As técnicas passivas são as mais utilizadas em pesquisas de espécies marinhas, devido a mínima intervenção no ambiente marinho.

A variabilidade dos sinais dos mamíferos, com emissão de tons com certa duração e frequência modulada, leva à necessidade de várias metodologias para a sua detecção, que dependem das características do sinal e de sua localização.

Um dos estudos [21] usa o efeito Lloyd-mirror para a detecção da fonte de banda larga e estreita. Outros estudos, utilizam esse mesmo efeito para determinar a localização de baleias [22].

Apesar da grande presença de sinais de frequência modulada produzidos por animais marinhos, pouco se fala na utilização desses sinais para a sua localização.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia para análise de assobios emitidos por mamíferos usando o efeito Lloyd-mirror.

1.2 Objetivos Específicos

- Simular assobios com diversas formas, ascendente, e descendente, linear, não linear, côncava, etc.
- Desenvolver uma metodologia para determinação de distância e profundidade de fontes emissoras.

Capítulo 2

Embasamento Teórico

2.1 Monitoramento Acústico Passivo (MAP)

O Monitoramento Acústico Passivo (MAP), conhecido internacionalmente como *Passive Acoustic Monitoring* (PAM), é uma metodologia que permite obter os sons existentes no ambiente marinho sem emissões sonoras, ou seja, de forma passiva [23].

Utilizado tanto para fins militares [21], como para pesquisa e preservação do ambiente marinho [17], o MAP permite monitorar o ambiente marinho através das emissões sonoras recebidas. Esse tipo de monitoramento pode ser explicado através da equação do sonar passivo, a qual é apresentada por Urick [24] da seguinte forma logarítmica:

$$SL - TL - (NL + DI) = DT \quad (2.1)$$

Em que SL-TL é o sinal recebido, (NL-DI) é o ruído interferente e DT é um valor a ser atribuído a essa relação sinal ruído.

A tabela 2.1, adaptada de Urick [24], apresenta um resumo dos parâmetros para o estudo das equações do sonar. Todos os termos da equação são expressos utilizando a escala logarítmica decibéis (dB), onde a intensidade de referência é definida como a intensidade de uma onda plana com uma pressão RMS, do inglês *root mean square*, de $1 \mu\text{Pa}$ [25].

Tabela 2.1: Parâmetros da equação sonar

VARIÁVEIS	DEFINIÇÃO ($10 \log()$)	REFERÊNCIAS
Nível da fonte (SL)	$\frac{\text{intensidade da fonte}}{\text{intensidade de referência}}$	1 metro da fonte
Perda na transmissão (TL)	$\frac{\text{intensidade da fonte}}{\text{intensidade no alvo}}$	Da fonte ao alvo
Nível do ruído (NL)	$\frac{\text{intensidade do ruído}}{\text{intensidade de referência}}$	Local do hidrofone
Índice de diretividade (DI)	$\frac{\text{pot. do som} \rightarrow \text{omnidirecional}}{\text{pot do som} \rightarrow \text{direção de interesse}}$	Direção de interesse
Limiar de detecção (DT)	$\frac{\text{pot. do sinal detectável}}{\text{pot. do ruído}}$	Local do hidrofone

2.2 Perfil da velocidade do som

O principal fator que afeta a propagação da onda acústica no oceano é a velocidade do som. A velocidade do som no oceano varia com a sua posição e estação do ano, sendo uma função da temperatura, salinidade e pressão (profundidade)[4].

Num oceano estratificado, devido a pouca variação da temperatura e salinidade horizontalmente a velocidade do som varia apenas com a profundidade, sendo uma condição válida para regiões de águas profundas, afastadas de vórtices e fronteiras de massas d'água [1].

A figura 2.1 mostra um exemplo da temperatura, salinidade e velocidade do som medido em setembro de 2012 em Tonga Trench, no sul do Oceano Pacífico, no ponto de profundidade máxima de 8.515m.[1]

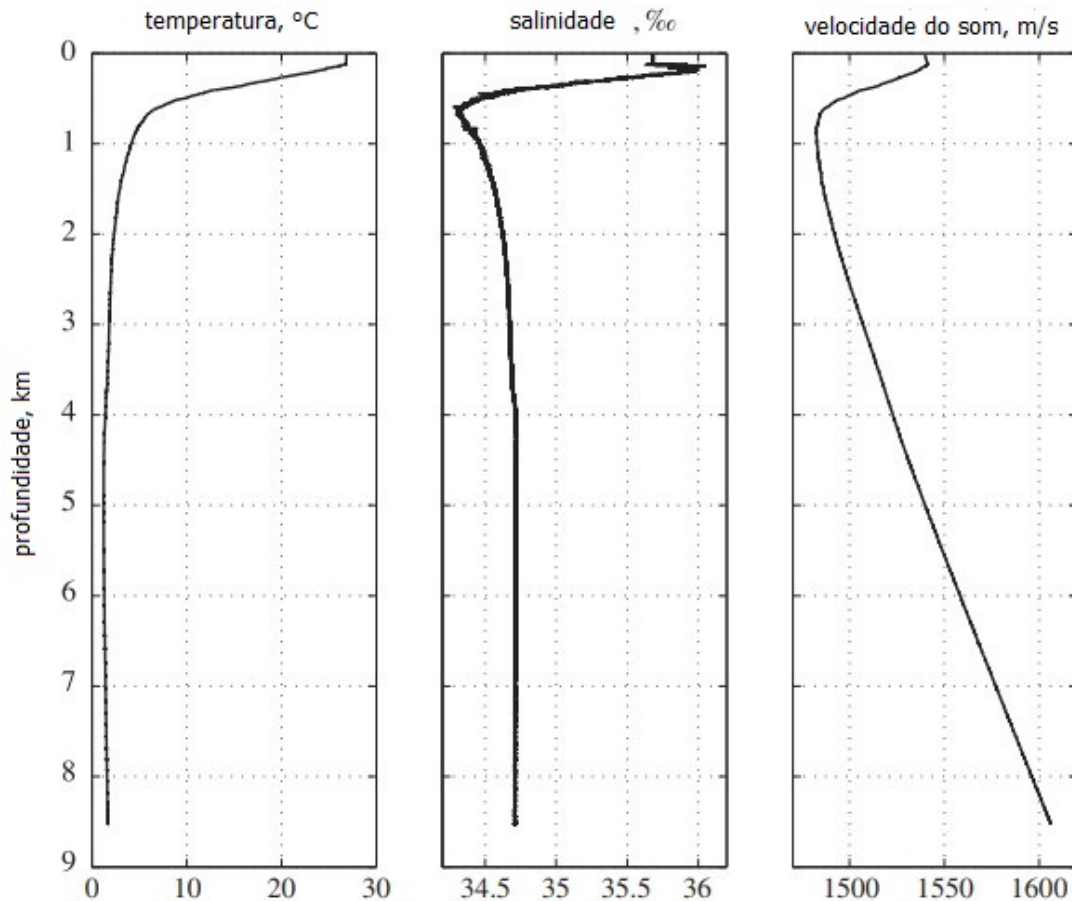


Figura 2.1: Temperatura, salinidade e velocidade do som, adaptado de [1].

Costuma-se expressar a velocidade do som (c) como uma função empírica de três variáveis independentes: temperatura (T), em graus celsius; salinidade (S), em psu (practical salinity unit); e profundidade (z), em metros. Uma expressão simplificada para essa dependência é: [4]

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z. \quad (2.2)$$

A figura 2.2 mostra um típico perfil da velocidade do som, indicando a maior variabilidade próximo à superfície. Nas estações mais quentes, há um aumento da temperatura próximo à superfície. Esse aquecimento próximo a superfície (e subsequente resfriamento) tem um profundo efeito nos sonares das embarcações de superfície [4].

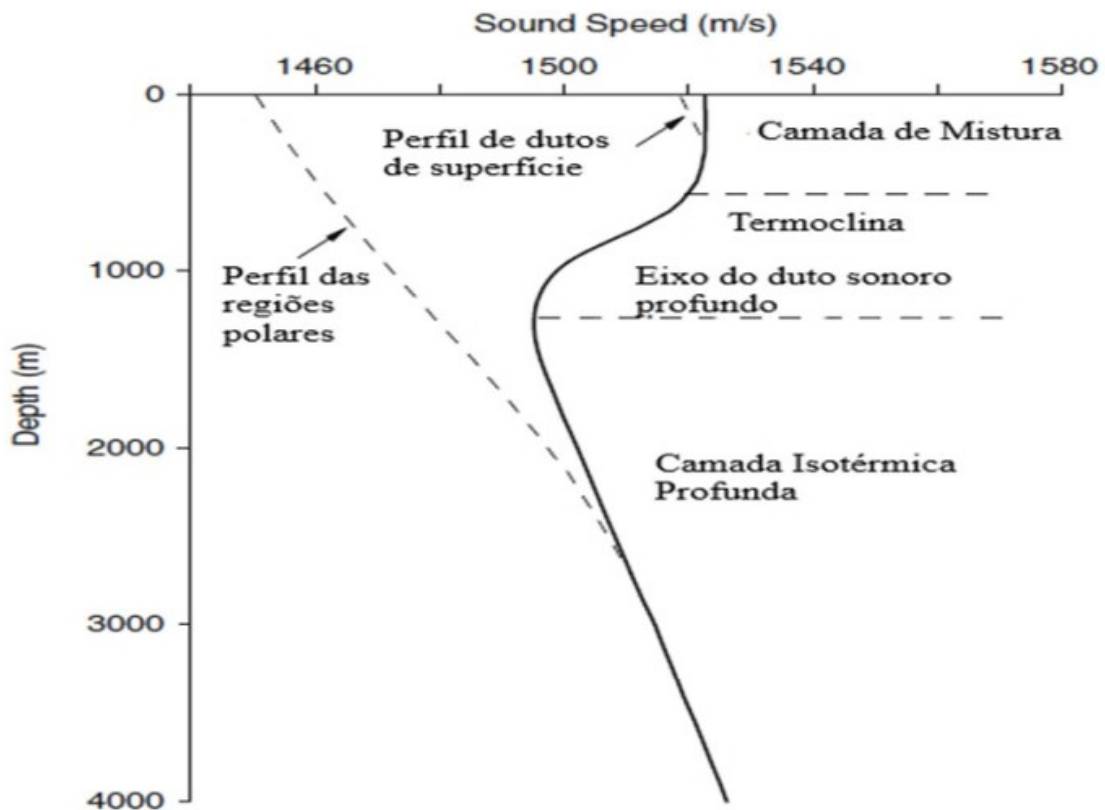


Figura 2.2: Perfil típico da velocidade do som [2].

Nas regiões não polares, na camada mais superficial, ocorre a mistura da água devido à ação do vento e à atividade das ondas, formando uma camada de mistura com uma temperatura constante [2]. Devido a esse comportamento e à pouca variação da profundidade, o perfil da velocidade do som se mantém constante nessa camada.

Abaixo da camada de mistura, existe a termoclina, onde ocorre a redução da velocidade do som, devido à diminuição da temperatura com a profundidade.

Na camada isotérmica profunda, a temperatura se mantém constante, acarretando na predominância do parâmetro pressão (profundidade) sobre a velocidade

do som, ou seja, ocorre o aumento da velocidade do som. Na fronteira entre essas duas regiões, ocorre o eixo do duto sonoro profundo, onde se localiza o menor valor da velocidade do som [2].

2.3 Caracterização dos caminhos de propagação

Na propagação da onda sonora no oceano, o caminho seguido por ela é resultante do perfil de velocidade do som existente no oceano. Esses caminhos podem ser determinados com o auxílio da equação da lei de Snell, apresentada abaixo [5]:

$$\frac{\text{sen}\theta}{c} = \text{constante} \quad (2.3)$$

Essa lei relaciona o ângulo do raio sonoro com a vertical com a velocidade local, implicando uma curvatura do som em direção à região com o menor valor da velocidade do som [4].

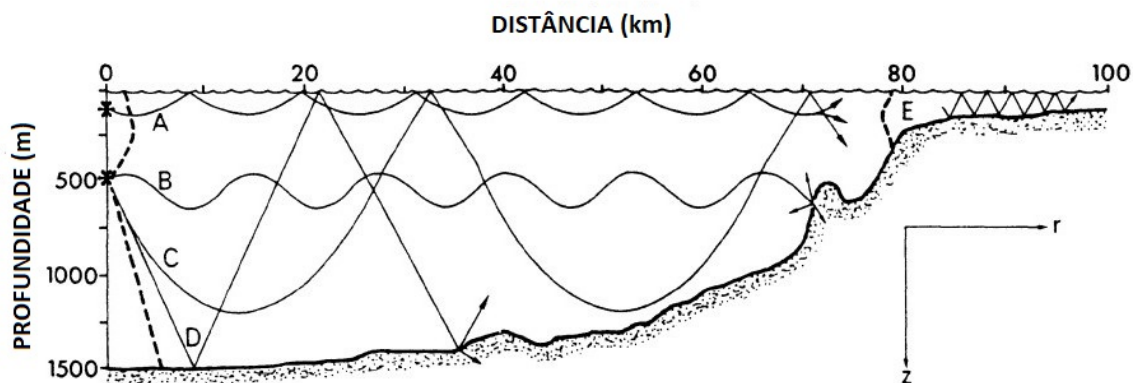


Figura 2.3: Esquema de propagação do som no oceano, adaptado de [3].

A figura 2.3 apresenta os principais caminhos percorridos pelas ondas sonoras. As linhas tracejadas nas distâncias 0 e 80 km na horizontal correspondem aos perfis de velocidade do som que podem ocorrer com a profundidade naquelas regiões [3].

O caminho A corresponde à propagação no duto de superfície, onde o perfil da velocidade do som tende a aprisionar o som próximo à superfície do mar [3].

O caminho B descreve um raio sonoro deixando uma fonte mais profunda com um ângulo de saída próximo a 90^0 . Seu comportamento caracteriza uma propagação no Canal SOFAR (*Sound Fixing And Ranging*) ou "*deep sound channel*" [4], sem a interação com a superfície e o fundo do mar [3]. Em médias latitudes, esse canal permite a propagação a longas distâncias sem perdas pelas fronteiras. Em baixa frequência, pode-se observar uma propagação a centenas de quilômetros de distância

[4]. A parte superior do caminho B normalmente interage com a termoclina, a qual é a região de maior atividade de ondas internas [26].

O caminho C, que apresenta ângulo ligeiramente maior em relação ao caminho B, é considerado como a propagação da zona de convergência, espacialmente periódica (35 a 70 km), criando regiões de alta intensidade próxima a superfície, devido à natureza refrativa ascendente do perfil de velocidade em grandes profundidades [4]. Regiões entre essas zonas são referenciadas como regiões de sombra [26].

O caminho E representa múltiplas reflexões e caracteriza a propagação em águas rasas, funcionando como um guia de onda [26].

Desses caminhos apresentados, serão considerados de interesse dessa dissertação, como se verá mais adiante, percursos diretos a pequena distância e profundidade de cetáceos e os refletidos na superfície e no fundo (caso de águas rasas)

2.3.1 Efeito Lloyd-mirror

A onda refletida na superfície do mar sofre uma mudança de fase de 180° e ao encontrar com o raio direto no receptor, produz interferências construtivas e destrutivas. Esse efeito é chamado de efeito Lloyd-mirror [27].

O fenômeno de interferência é resultado da pressão sonora de mais de uma fonte no mesmo ponto ao mesmo tempo. Na acústica linear, a pressão sonora resultante em um ponto é a soma algébrica das contribuições, independente das direções e dependente do tempo e das suas amplitudes, ou seja, a pressão acústica instantânea no ponto são escalares e são adicionados algebricamente [25].

Assim pode-se equacionar o efeito Lloyd-mirror através da geometria do efeito observado na figura 2.4.

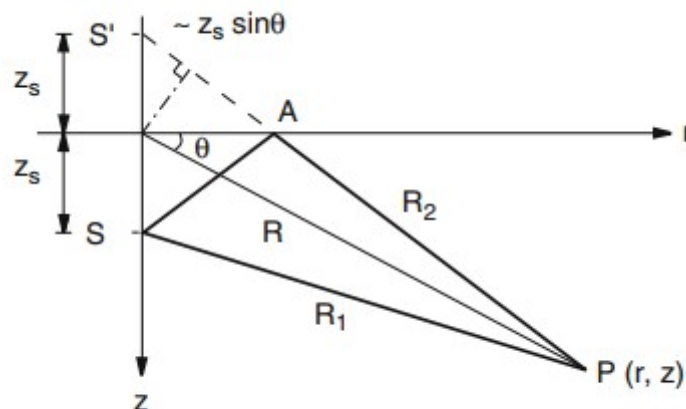


Figura 2.4: Geometria do efeito Lloyd-mirror[4].

Sendo o campo total $P(r,z)$ escrito simplesmente como a soma das contribuições de duas fontes pontuais, temos [4]:

$$P(r, z) = \frac{e^{ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{ikR_2}}{R_2} \quad (2.4)$$

onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda acústica, o θ é o ângulo com a horizontal e:

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z - z_s)^2} \quad (2.5)$$

$$R_2 = \sqrt{r^2 + (z + z_s)^2} \quad (2.6)$$

Na equação 2.4, é suprimida a fase temporal $e^{-i\omega t}$ e o sinal negativo do segundo termo da equação representa a inversão de fase devido à reflexão na superfície do mar. A equação 2.4 representa um padrão de interferência complexo, para o qual pode ser simplificada assumindo a distância R da origem muito maior que a profundidade da fonte z_s . Sendo o ângulo de inclinação da fonte com a horizontal representada por θ , encontramos que para $R \gg z_s$, as distâncias R_1 e R_2 podem ser aproximadas por:

$$R_1 \simeq R - z_s \text{sen}\theta \quad (2.7)$$

$$R_2 \simeq R + z_s \text{sen}\theta \quad (2.8)$$

Assumindo que as distâncias que aparecem nos denominadores de ambos os termos podem ser substituídas simplesmente pela distância R e conhecendo que a amplitude decai lentamente com a distância, podemos obter:

$$\begin{aligned} P(r, z) &\simeq \frac{1}{R} [e^{ik(R-z_s \text{sen}\theta)} - e^{ik(R+z_s \text{sen}\theta)}] \\ &= \frac{e^{ikR}}{R} [e^{-ikz_s \text{sen}\theta} - e^{ikz_s \text{sen}\theta}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

Substituindo os exponenciais pela função trigonométrica $e^{ix} + e^{-ix} = 2i \text{sen}(x)$, obtemos:

$$P(r, z) = -\frac{2i}{R} \text{sen}(kz_s \text{sen}\theta) e^{ikR}, \quad (2.10)$$

assim, a variação da amplitude é representada da seguinte forma:

$$|P| = \frac{2}{R} |\text{sen}(kz_s \text{sen}\theta)|. \quad (2.11)$$

Para uma fonte pontual no espaço, teríamos uma onda com expansão esférica com $|P| = 1/R$. A reflexão na superfície do mar é vista gerando um padrão direcional com pressões máximas e mínimas dadas por:

$$|P|_{max} = \frac{2}{R} \quad \text{para} \quad \text{sen}\theta = (2m - 1)\frac{\pi}{2kz_s}, \quad m=1,2,\dots(2.12)$$

$$|P|_{min} = 0 \quad \text{para} \quad \text{sen}\theta = (m - 1)\frac{\pi}{kz_s}, \quad m=1,2,\dots (2.13)$$

Através dessas equações, observamos que o valor máximo da pressão é duas vezes aquela produzida por uma única fonte, demonstrando o efeito da interferência construtiva da fonte. Para o valor de pressão mínima, observa-se o efeito da interferência destrutiva entre o raio direto e o raio refletido na superfície. Para que as equações acima sejam atendidas, devemos ter: $\text{sen}\theta \leq 1$, onde M é o maior inteiro que atende as equações e indica o número máximo de feixes. Assim:

$$(2m - 1)\frac{\pi}{2kz_s} \leq 1. \quad (2.14)$$

sendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, temos:

$$(2m - 1)\frac{\lambda}{4kz_s} \leq 1. \quad (2.15)$$

Logo:

$$M \leq \frac{2z_s}{\lambda} + 0,5 \quad (2.16)$$

ou

$$M = \text{int}\left(\frac{2z_s}{\lambda} + 0,5\right) \quad (2.17)$$

onde λ é o comprimento de onda acústica. Sendo assim, o número de feixes é diretamente proporcional à distância da fonte à superfície em termos de comprimentos de onda.

Na acústica submarina, a dependência da pressão sonora em relação à distância a uma profundidade fixa z_r é de grande importância para análise de seu comportamento [4]. Assim, substituindo $\text{sen}\theta = \frac{z_r}{R}$ na equação 2.11, temos:

$$|P| = \frac{2}{\sqrt{r^2 + z_r^2}} \left| \text{sen}\left(\frac{kz_s z_r}{\sqrt{r^2 + z_r^2}}\right) \right|, \quad (2.18)$$

Essa expressão demonstra novamente os pontos máximos e mínimos intermitentes da amplitude da pressão com a distância. No entanto, para grandes distâncias ($r \gg z_r$, $\text{sen}\theta \simeq \theta$), simplificamos a equação para [4]:

$$|P| = \left(\frac{2kz_s z_r}{r^2}\right), \quad (2.19)$$

Observa-se que para, grandes distâncias, o decaimento da amplitude proporcionalmente a r^2 equivale a uma perda de transmissão de $TL = 40\log(r)$, o que corresponde a duas vezes à perda na transmissão esférica $TL = 20\log(r)$ [27]. Segundo [28], esse fato gera muitos erros na estimação da intensidade da fonte (SL), pois não considera o efeito Lloyd-mirror na estimação do valor da perda (TL).

A figura abaixo apresenta um exemplo numérico de uma onda com frequência de 150 Hz, localizada a 25m abaixo da superfície do mar em uma região com velocidade do som constante de 1500 m/s, com o receptor a 200m de profundidade [4].

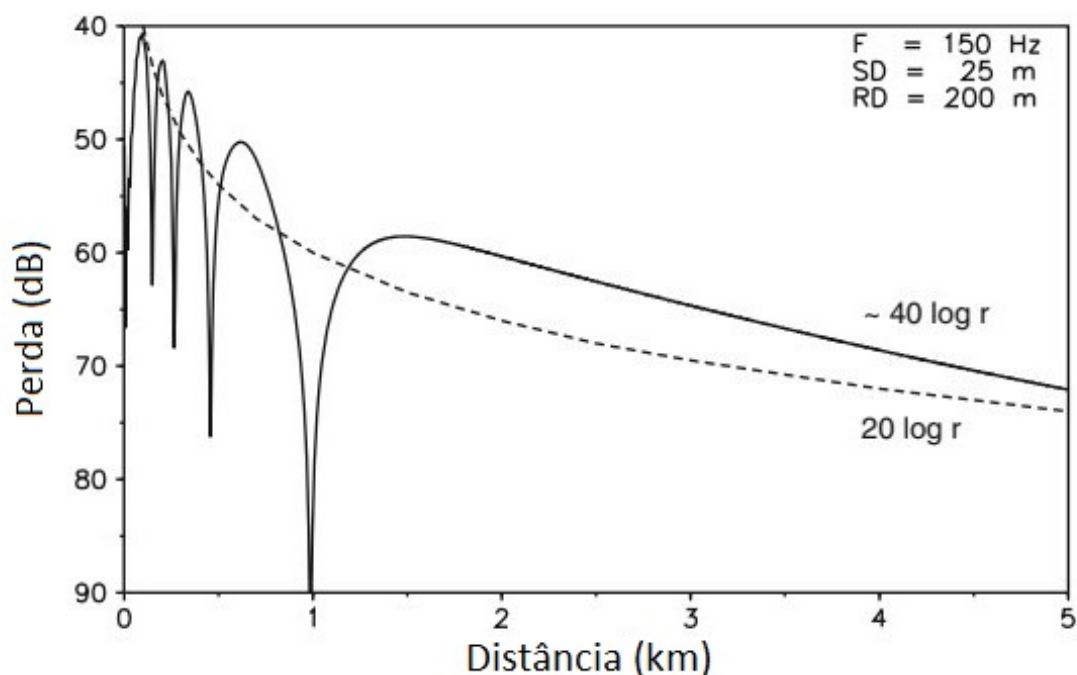


Figura 2.5: Perda de transmissão pela distância, adaptado de [4].

Observam-se na figura 2.5 os pontos de máximo e mínimo. A linha tracejada representa o decaimento devido à perda na transmissão esférica, e a linha contínua, o decaimento devido ao efeito Lloyd-mirror.

Em [21], pode-se observar a capacidade do efeito Lloyd-mirror para determinar as características de uma fonte sonora de tons discretos emitindo continuamente. Já em [22], através do efeito Lloyd-mirror, infere-se a profundidade de emissão de uma baleia numa frequência característica de 20 Hz.

2.3.2 Reflexão no fundo e coeficiente de reflexão

A pressão sonora refletida no fundo que retorna ao hidrofone é uma importante

informação na análise sonora em águas rasas. Para determinar essa energia recebida pelo hidrofone, é necessário conhecer o coeficiente de reflexão.

A onda, ao atravessar a fronteira de uma região com características (velocidade do som e densidade) diferentes, sofre efeito de transmissão (refração) e reflexão, ou seja, a pressão incidente (p_i) ao entrar em contato com a fronteira sofre reflexão (p_r), e transmissão (p_t), conforme figura 2.6.

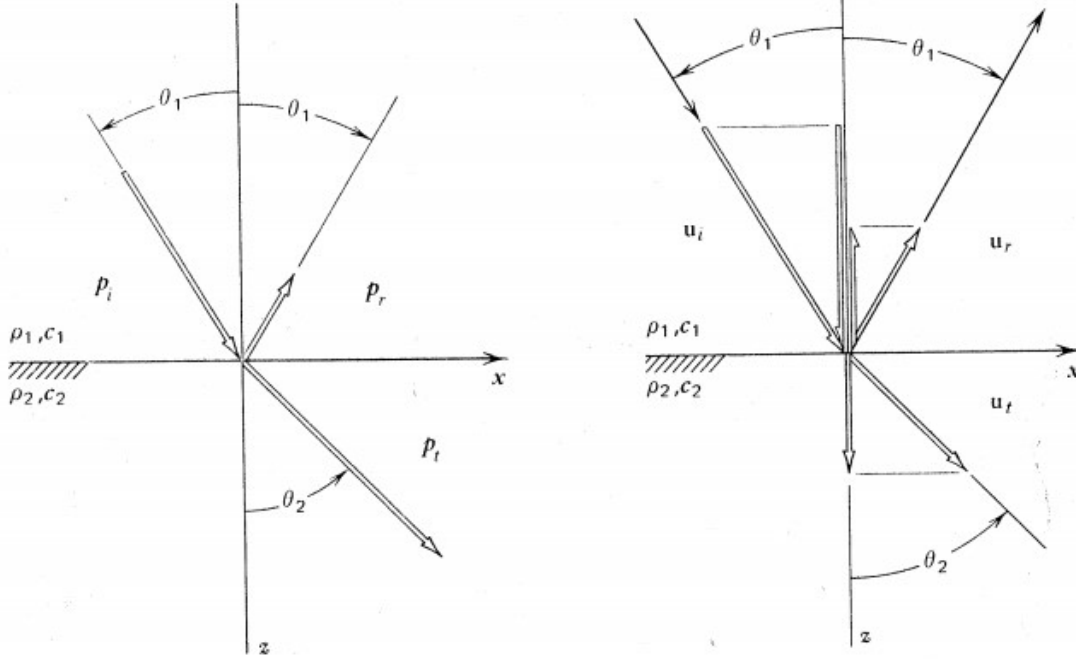


Figura 2.6: Efeito de uma onda sonora sobre a interface entre duas regiões [5].

Segundo [5], como não ocorre o movimento da fronteira, pode-se equacionar as pressões sonoras como uma soma vetorial da seguinte forma:

$$p_i + p_r = p_t \quad (2.20)$$

A segunda condição requer que as componentes verticais da velocidade das partículas sejam iguais em ambos os lados. Usando u_i , u_r e u_t como as velocidades da partícula na incidência, reflexão e transmissão respectivamente, podemos relacionar as componentes verticais da seguinte forma [5]:

$$u_i \cos \theta_1 + u_r \cos \theta_1 = u_t \cos \theta_2 \quad (2.21)$$

O ângulo de incidência (θ_1) e o ângulo de transmissão (θ_2) se relacionam através da lei de Snell: $\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}$, onde c_1 representa a velocidade do som no meio 1 e c_2 , a velocidade do som no meio 2. Sendo $\Delta p = \pm(\rho_A c)u$ [5], logo:

$$p_i = \rho_1 c_1 u_i \quad (2.22)$$

$$p_r = -\rho_1 c_1 u_r \quad (2.23)$$

$$p_t = \rho_2 c_2 u_t \quad (2.24)$$

Substituindo as equações acima na equação 2.21, a segunda condição pode ser escrita:

$$p_i \frac{\cos\theta_1}{\rho_1 c_1} - p_r \frac{\cos\theta_1}{\rho_1 c_1} = p_t \frac{\cos\theta_2}{\rho_2 c_2} \quad (2.25)$$

Assim, podemos definir o coeficiente de reflexão entre o meio 1 e 2 (R_{12}) como a relação entre a pressão refletida (p_r) e a pressão incidente (p_i), e o coeficiente de transmissão (T_{12}) como a relação entre a pressão transmitida (p_t) e a pressão incidente (p_i) [25].

$$R_{12} = \frac{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 - \rho_1 c_1 \cos\theta_2}{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 + \rho_1 c_1 \cos\theta_2} \quad (2.26)$$

$$T_{12} = \frac{2\rho_2 c_2 \cos\theta_1}{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 + \rho_1 c_1 \cos\theta_2} \quad (2.27)$$

onde:

$$\theta_2 = \arcsen\left(\frac{c_2}{c_1} \sen\theta_1\right) \quad (2.28)$$

A tabela abaixo, retirada da referência [4], apresenta alguns valores para vários tipos de solo. Essa informação foi utilizada para o desenvolvimento da metodologia.

Tipo de fundo	P (%)	ρ_b/ρ_w —	c_p/c_w —	c_p (m/s)	c_s (m/s)	α_p (dB/ λ_p)	α_s (dB/ λ_s)
Argila	70	1.5	1.00	1500	<100	0.2	1.0
Silte	55	1.7	1.05	1575	$c_s^{(1)}$	1.0	1.5
Areia	45	1.9	1.1	1650	$c_s^{(2)}$	0.8	2.5
Cascalho	35	2.0	1.2	1800	$c_s^{(3)}$	0.6	1.5
Morena	25	2.1	1.3	1950	600	0.4	1.0
Giz	—	2.2	1.6	2400	1000	0.2	0.5
Calcário	—	2.4	2.0	3000	1500	0.1	0.2
Basalto	—	2.7	3.5	5250	2500	0.1	0.2

$$c_s^{(1)} = 80 z^{0.3} \quad c_w = 1500 \text{ m/s}, \quad \rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$c_s^{(2)} = 110 z^{0.3}$$

$$c_s^{(3)} = 180 z^{0.3}$$

Figura 2.7: Características geoacústicas de vários tipos de solo, adaptado de [4].

2.4 Métodos de medição da distância da fonte

Segundo [6], o processo de localização de uma fonte de forma passiva baseia-se na propriedade da hipérbole, onde o módulo da diferença entre os pontos focais da hipérbole é constante, ou seja, $d_2 - d_1 = \text{constante}$.

A figura 2.8 apresenta dois hidrofones (h_1 e h_2) localizados no ponto focal da hipérbole de distância d_h do centro, onde as possíveis soluções da fonte $s(x,y)$ são os pontos na curva da hipérbole, pois apresentam a mesma diferença de tempo de chegada.

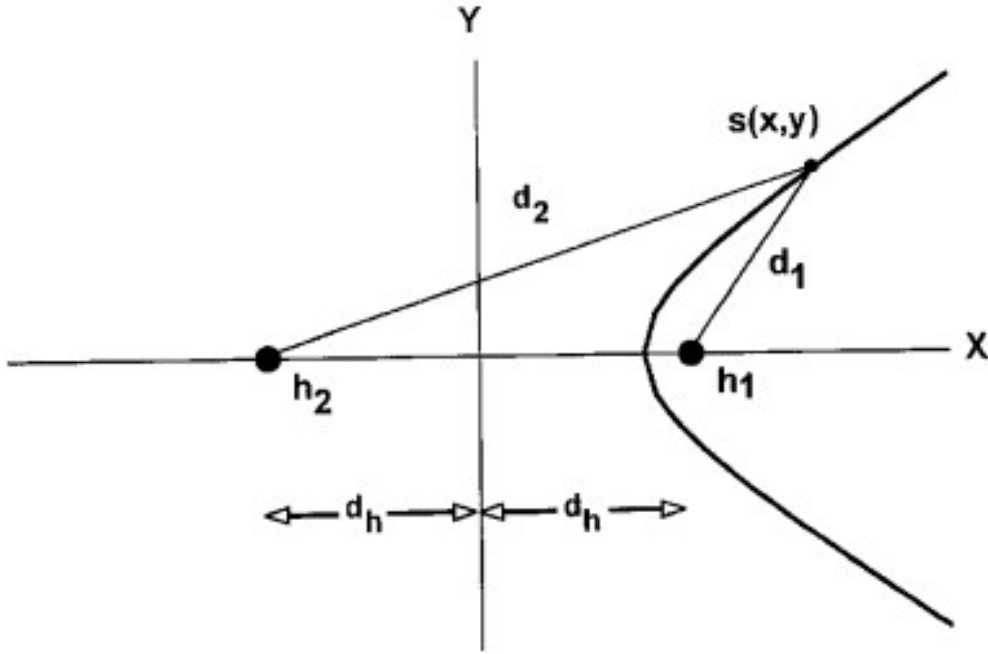


Figura 2.8: Geometria de dois hidrofones com a fonte localizada no ponto $s(x,y)$ [6]

Generalizando para vários hidrofones h_i na posição (x_i, y_i, z_i) , onde $i=1..M$, e uma fonte na posição (x_w, y_w, z_w) , a distância R_{wi} entre a fonte e o hidrofone é dada por M equações da seguinte forma [23].

$$R_{wi}^2 = (x_i - x_w)^2 + (y_i - y_w)^2 + (z_i - z_w)^2 \quad (2.29)$$

Note que para determinar a posição da fonte, numa análise em duas dimensões, é necessário obter o valor de três variáveis, ou seja, são necessárias de ao menos três equações para resolver as três incógnitas, assumindo que as posições dos hidrofones são conhecidas. Devido à dificuldade de medir diretamente a distância R_i , utiliza-se uma forma de medir indiretamente esse valor através do tempo de viagem do som de um hidrofone para o outro, ou seja, substituindo as distâncias individuais por: $R_i = R_0 + \delta R_i$, onde R_0 é a posição do hidrofone de referência h_0 e δR_i é a

distância estimada entre o hidrofone h_i e o hidrofone de referência h_0 . A distância δR_i é estimada através do tempo de chegada entre o som δT_i , através da relação $\delta R_i = c\delta T_i$, onde c é a velocidade do som entre os dois hidrofones [23].

Expandindo a equação 2.29 para o hidrofone de referência, temos:

$$\begin{aligned} R_0^2 &= x_0^2 - 2x_0x_w + x_w^2 \\ &+ y_0^2 - 2y_0y_w + y_w^2 \\ &+ z_0^2 - 2z_0z_w + z_w^2 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Para os outros hidrofones, obtemos:

$$\begin{aligned} R_0^2 + 2R_0(\delta R_i) + (\delta R_i)^2 &= x_i^2 - 2x_ix_w + x_w^2 \\ &+ y_i^2 - 2y_iy_w + y_w^2 \\ &+ z_i^2 - 2z_iz_w + z_w^2 \end{aligned} \quad (2.31)$$

Subtraindo a equação 2.30 da 2.31, removemos todos os termos quadráticos desconhecidos.

$$\begin{aligned} 2R_0(\delta R_i) + (\delta R_i)^2 &= x_i^2 - x_0^2 - 2(x_i - x_0)x_w \\ &+ y_i^2 - y_0^2 - 2(y_i - y_0)y_w \\ &+ z_i^2 - z_0^2 - 2(z_i - z_0)z_w \end{aligned} \quad (2.32)$$

Assim temos quatro incógnitas, R_0, x_w, y_w, z_w , e vamos precisar de cinco hidrofones para obter quatro equações para se chegar a uma única solução através da resolução da seguinte equação linear.

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} (x_1^2 - x_0^2) + (y_1^2 - y_0^2) + (z_1^2 - z_0^2) - (\delta R_1)^2 \\ (x_2^2 - x_0^2) + (y_2^2 - y_0^2) + (z_2^2 - z_0^2) - (\delta R_2)^2 \\ (x_3^2 - x_0^2) + (y_3^2 - y_0^2) + (z_3^2 - z_0^2) - (\delta R_3)^2 \\ (x_4^2 - x_0^2) + (y_4^2 - y_0^2) + (z_4^2 - z_0^2) - (\delta R_4)^2 \end{pmatrix} \\ &= 2 \begin{pmatrix} \delta R_1 & (x_1 - x_0) & (y_1 - y_0) & (z_1 - z_0) \\ \delta R_2 & (x_2 - x_0) & (y_2 - y_0) & (z_2 - z_0) \\ \delta R_3 & (x_3 - x_0) & (y_3 - y_0) & (z_3 - z_0) \\ \delta R_4 & (x_4 - x_0) & (y_4 - y_0) & (z_4 - z_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_0 \\ x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Algumas técnicas de posicionamento dos hidrofones nos permitem reduzir a quantidade de equações necessárias para resolver as incógnitas, levando à redução da quantidade de hidrofones necessários para determinar a posição da fonte [6]. A figura 2.9 apresenta algumas técnicas de posicionamento de hidrofones, onde as coordenadas apresentadas na figura são em relação ao hidrofone um, posicionado na origem.

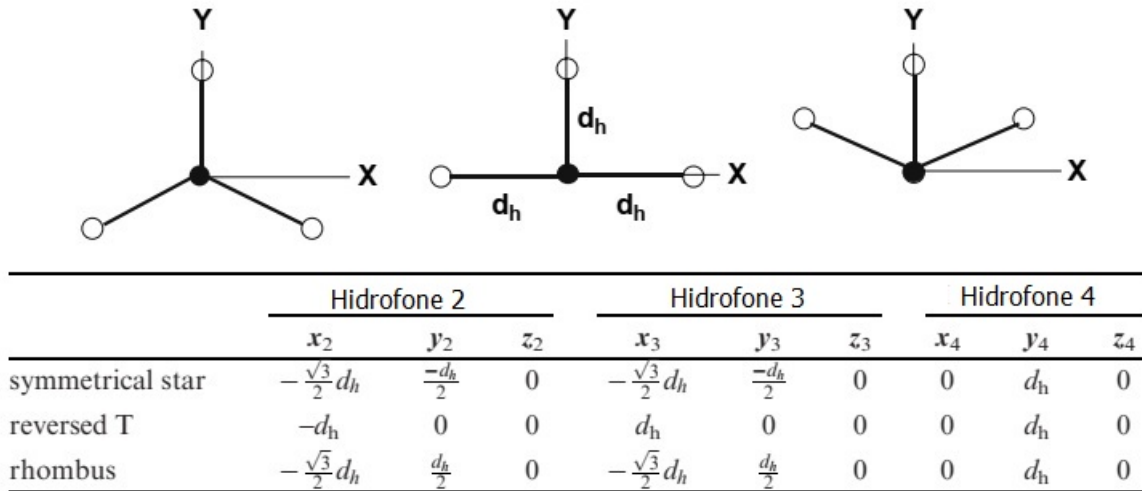


Figura 2.9: Técnica de posicionamento de hidrofone, adaptado de [6]

Em [6] e [23], são apresentadas outras técnicas de localização da fonte como a de Cato, que calcula a localização da fonte mediante a utilização de dois hidrofones. O método do Cato obtém essa localização através da diferença dos tempos de chegada e a diferença da intensidade medida entre os hidrofones [29].

Outro método de grande relevância citado em ambas as referências [6, 23] é a medição da localização da fonte analisando o tempo de chegada de diferentes caminhos percorridos pelo som (múltiplos-caminhos). A metodologia é baseada na diferença de percursos e tempo de chegada para a localização da fonte.

Sendo assim, o algoritmo desenvolvido reduz a complexidade da medição utilizando o sinal de frequência modulada e a informação de apenas um hidrofone.

2.5 Emissões sonoras: o assobio

O assobio é um dos vários tipos de sons gerados pelos golfinhos e frequentemente é utilizado para identificar a sua presença no ambiente [23].

Caracterizado pelo espectro de uma onda modulada e na maioria das vezes com a presença de harmônicos, o assobio pode ser identificado pelos seguintes parâmetros apresentados no seu espectro: frequência inicial, frequência final, frequência

mínima, frequência máxima, número de inflexões, frequência de inflexão, duração, alteração do contorno e presença de harmônicos [6]. A figura 2.10 permite uma melhor visualização de alguns dos parâmetros de caracterização do assobio.

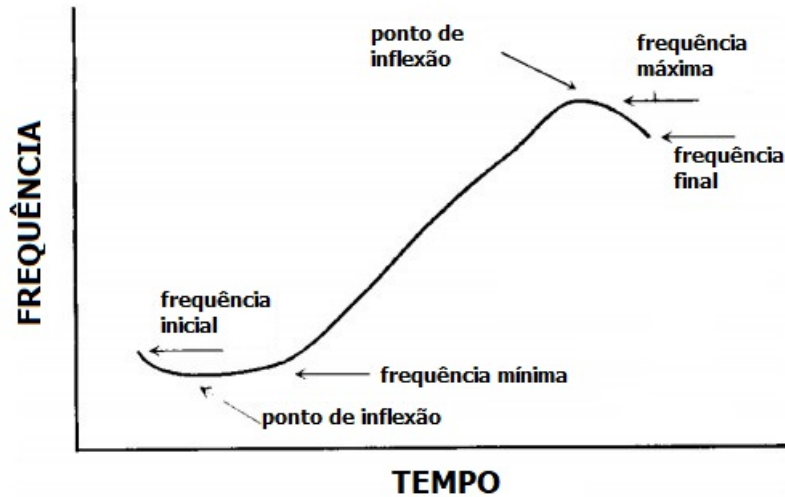


Figura 2.10: Espectro geral com alguns parâmetros de caracterização do assobio, adaptado de [6]

Os assobios emitidos pelos odontocetos (baleias-bicudas, botos, golfinhos e cachalotes [30]) podem ser divididos em seis fundamentais categorias conforme o contorno do espectrograma que eles apresentam [6].

- **Constante:** sinal no qual a variação da frequência altera menos de 25% durante a duração do sinal. Nessa categoria, a frequência do assobio não é constante durante toda a duração, mas tem um valor mínimo de variação da frequência (figura 2.11-a).

- **Ascendente:** assobio de frequência modulada, com o aumento da frequência durante toda a duração do assobio, sem um significativo ponto de inflexão (figura 2.11-b).

- **Descendente:** assobio de frequência modulada, com a diminuição da frequência durante toda a duração do assobio, sem um significativo ponto de inflexão (figura 2.11-c).

- **Côncavo:** assobio com frequência modulada, com um aumento da frequência seguida por uma redução da frequência com o tempo (figura 2.11-d).

- **Convexo:** assobio com frequência modulada, com uma redução da frequência seguida por um aumento da frequência (figura 2.11-e).

- **Senoidal ou múltiplos:** assobio com frequência modulada, com mais de uma repetição do assobio côncavo ou convexo, tendo um contorno que se assemelha a uma senoide com ao menos dois pontos de inflexão (figura 2.11-f).

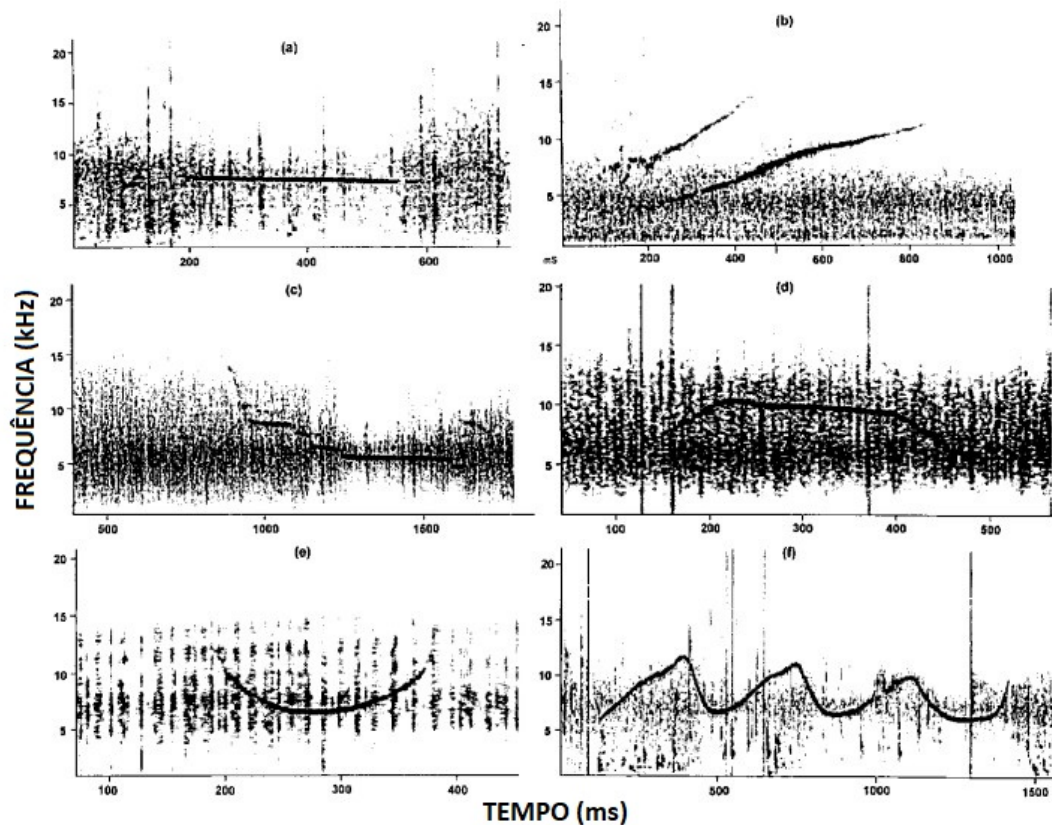


Figura 2.11: Exemplos de espectrogramas dos contornos fundamentais, adaptado de [6]

Uma outra classificação, apresentada pela referência [31], permite classificar o assobio em vários tipos a depender da sua duração e modulação da frequência, podendo classificar os assobios com uma curta duração (menor ou igual a 300 ms) de chirp.

Estudos realizados [7, 32, 33] demonstram que a forma ascendente com nenhuma ou uma inflexão dos assobios é predominante nas emissões do boto-cinza (*Sotalia guianensis*) no Brasil. A figura 2.12 apresenta uma tabela retirada de [7], que traça uma análise das características principais dos assobios do boto-cinza na Baía de Guanabara, no Brasil.

Tipos de contornos de assobio	n	%
Sem inflexão - com aumento da frequência	2011	39.5
Sem inflexão - com queda da frequência	203	4.0
Sem inflexão - com pouca variação da frequência	544	10.7
Um ponto de inflexão	1443	28.4
Dois pontos de inflexão	718	14.1
Três pontos de inflexão	126	2.5
Quatro pontos de inflexão	29	0.6
Cinco pontos de inflexão	9	0.2
Seis pontos de inflexão	3	~0.01

Figura 2.12: Tabela das características da emissão do boto-cinza, adaptado de [7]

Capítulo 3

O algoritmo de localização

O algoritmo de localização permite a determinação da profundidade e distância do cetáceo através do processamento do assobio recebido em um hidrofone.

Esse assobio possui muitas informações que podem ser divididas em duas categorias:

- uma ligada diretamente à fonte emissora como frequência inicial, frequência máxima, duração e contorno do assobio;

- outra que depende da propagação da onda sonora como sinal direto, refletido na superfície (efeito Lloyd-mirror) e refletido no fundo.

O algoritmo gera um assobio sintético o máximo possível semelhante ao emitido, somente com as características da fonte emissora e acrescenta a esse assobio os efeitos da propagação para diferentes distâncias e profundidades.

Cada sinal gerado pelos inúmeros cenários (profundidade e distância) é correlacionado com o assobio recebido e o de maior correlação indica a localização do cetáceo.

Foram utilizados assobios gravados pelo prof. Alexandre Azevedo do Laboratório de Mamíferos Aquáticos e Bioindicadores "Profa. Izabel M. G. do N. Gurgel" da UERJ, do boto-cinza (*Sotalia guianensis*) com contorno ascendente e do golfinho-nariz de garrafa (*Tursiops truncatus*) com contorno côncavo.

A figura 3.1 apresenta o fluxograma do algoritmo.

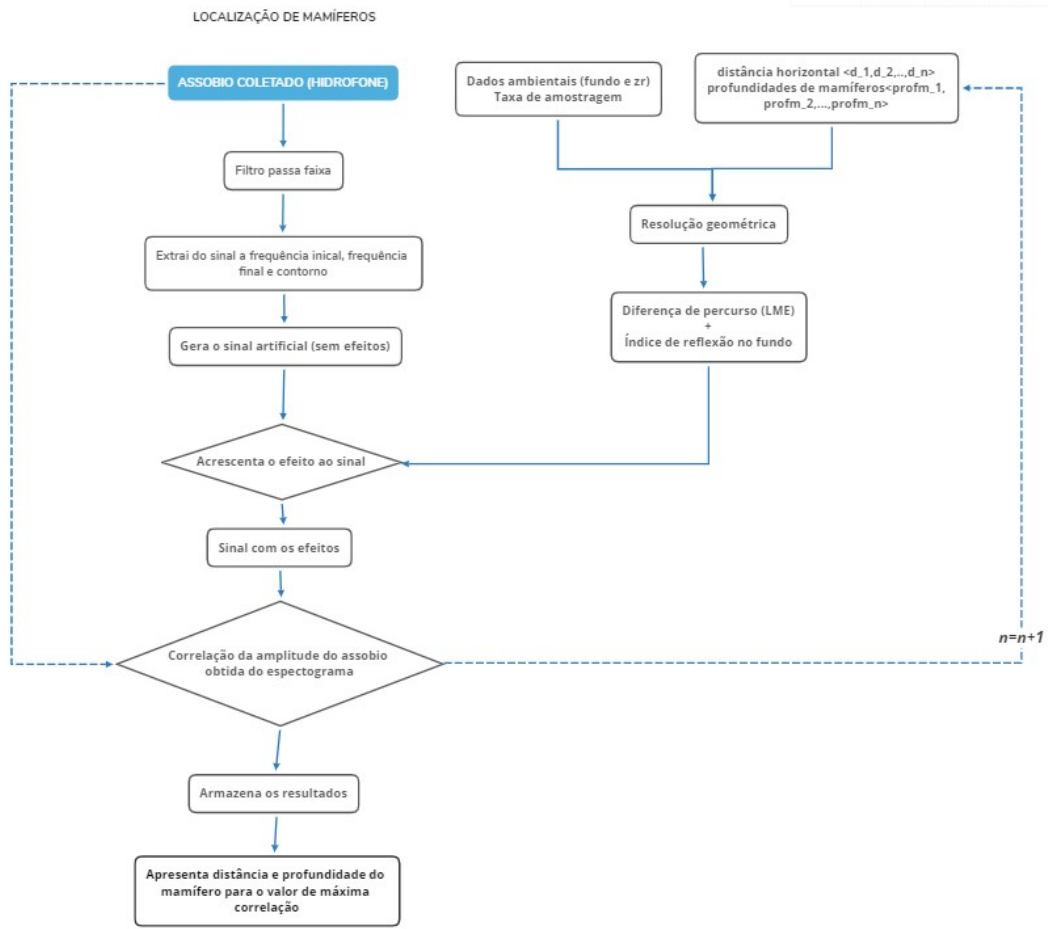


Figura 3.1: Fluxograma de funcionamento do algoritmo de localização

3.1 Processamento do sinal recebido

O algoritmo inicia-se com a análise do sinal recebido no hidrofone, onde o contorno do assobio, frequência inicial, frequência máxima e duração são os parâmetros de entrada do algoritmo. Esses parâmetros são utilizados para gerar um assobio que será a base da simulação. Isto é, esse assobio sintético que se considera emitido pelo golfinho sofrerá as alterações da propagação e chegará ao receptor (para várias distâncias e profundidades).

No receptor a correlação desses sinais com o sinal recebido é usada para a localização do cetáceo.

3.1.1 Assobio ascendente

O estudo foi iniciado por meio da análise das gravações de assobios de botos-cinza captados no mesmo dia sob as mesmas condições ambientais na baía de Guanabara.

O hidrofone estava localizado aproximadamente a 2 metros de profundidade e a frequência de amostragem foi de 96kHz.

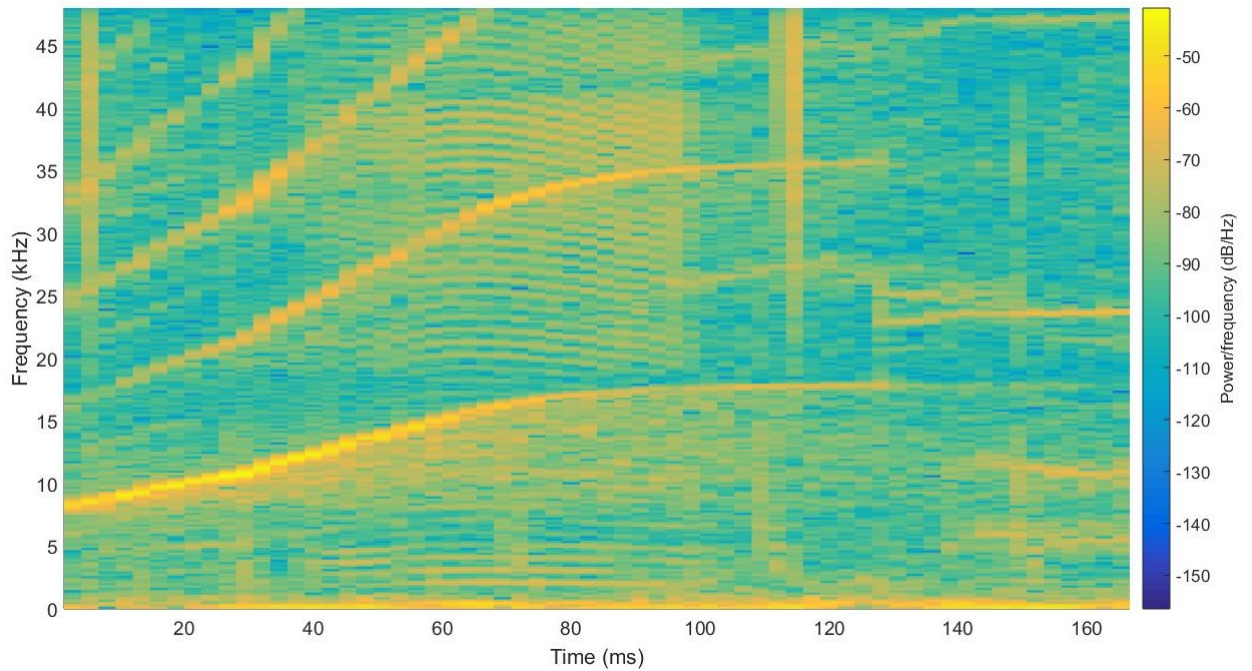


Figura 3.2: Sinal do boto-cinza analisado.

Primeiramente foi aplicado um filtro passa-faixa para retirada dos harmônicos e do ruído de baixa frequência. Depois foi separado dentre todo o sinal. O intervalo de tempo em que o assobio mais se assemelharia a um comportamento linear o que facilitaria a geração de um sinal sintético. O intervalo escolhido foi o de 0 a 60ms com frequência inicial de 8250Hz e final de 14438Hz conforme o espectrograma (tempo - frequência) apresentado na figura 3.3.

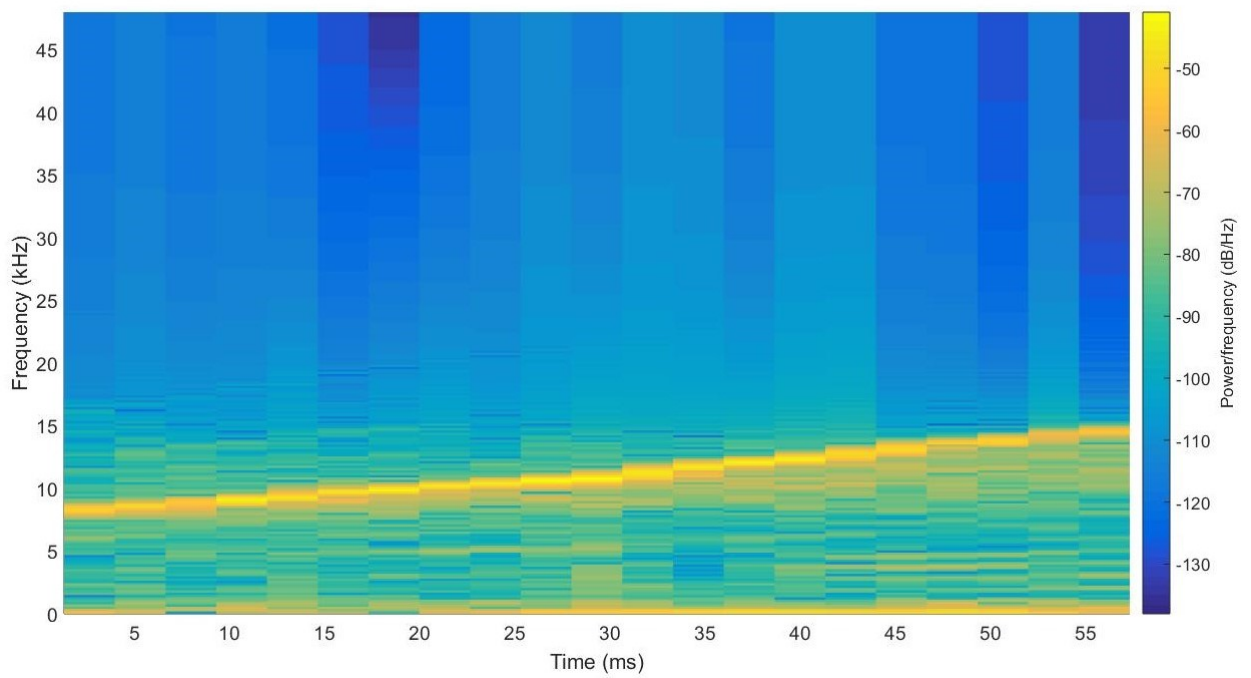


Figura 3.3: Espectrograma do assobio do boto-cinza filtrado.

O sinal no domínio do tempo pode ser visto na figura 3.4.

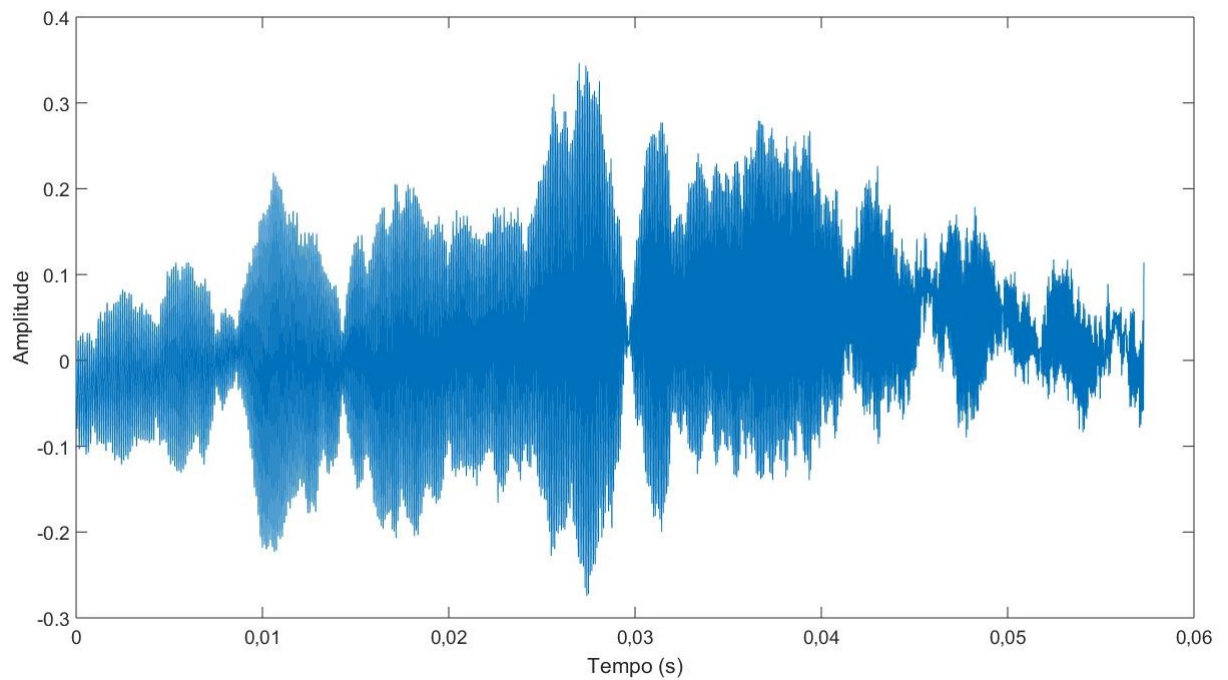


Figura 3.4: Assobio do boto-cinza no domínio do tempo.

O assobio sintético do boto-cinza gerado é mostrado na figura 3.5, ainda sem os

efeitos da propagação.

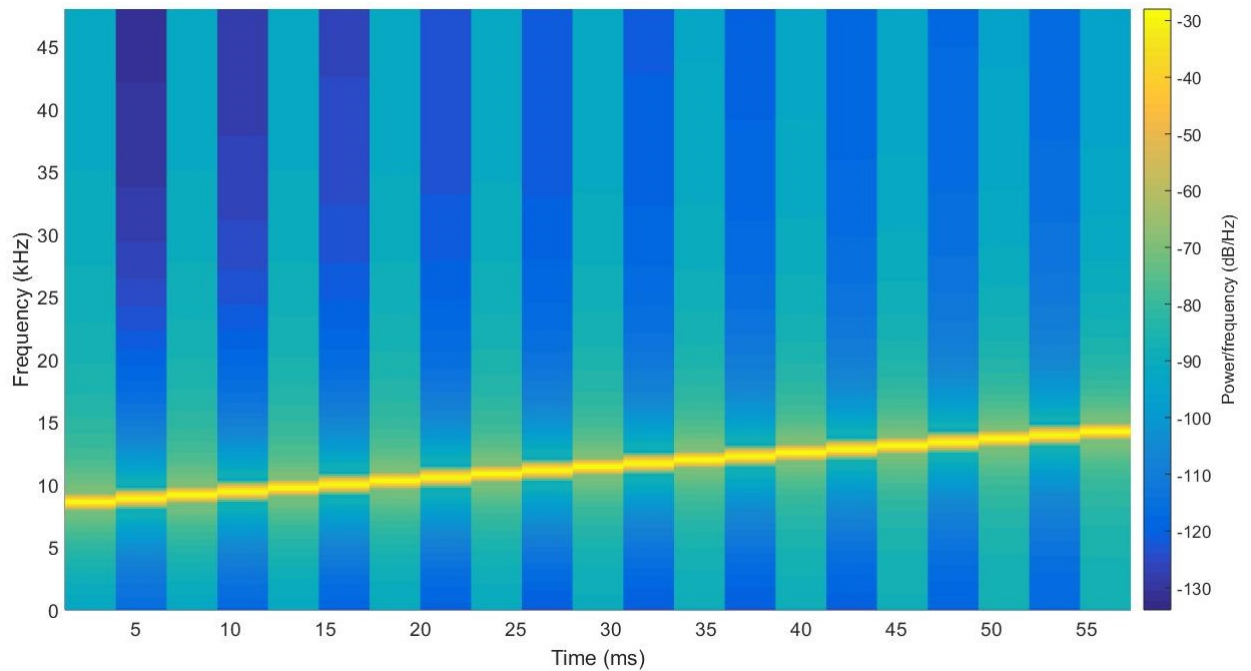


Figura 3.5: Assobio sintético ascendente sem efeitos da propagação.

3.1.2 Assobio côncavo

Com o intuito de verificar a capacidade do algoritmo de gerar um sinal de maior complexidade, foi realizado o mesmo procedimento para comparar o sinal emitido por um golfinho nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*) com o sinal sintético gerado pelo algoritmo.

Nesse caso, o assobio real foi obtido de uma medição realizada em Copacabana, com o hidrofone a 20m de profundidade e a 3m do fundo a uma taxa de amostragem de 48kHz.

Para utilizar o sinal foi separado um intervalo que tivesse um comportamento mais próximo de um sinal quadrático e aplicou-se filtros para retirada das frequências fora do intervalo definido, resultando no assobio apresentado na figura 3.6. Apesar da utilização de filtros, o assobio contém um acentuado ruído, afetando os resultados.

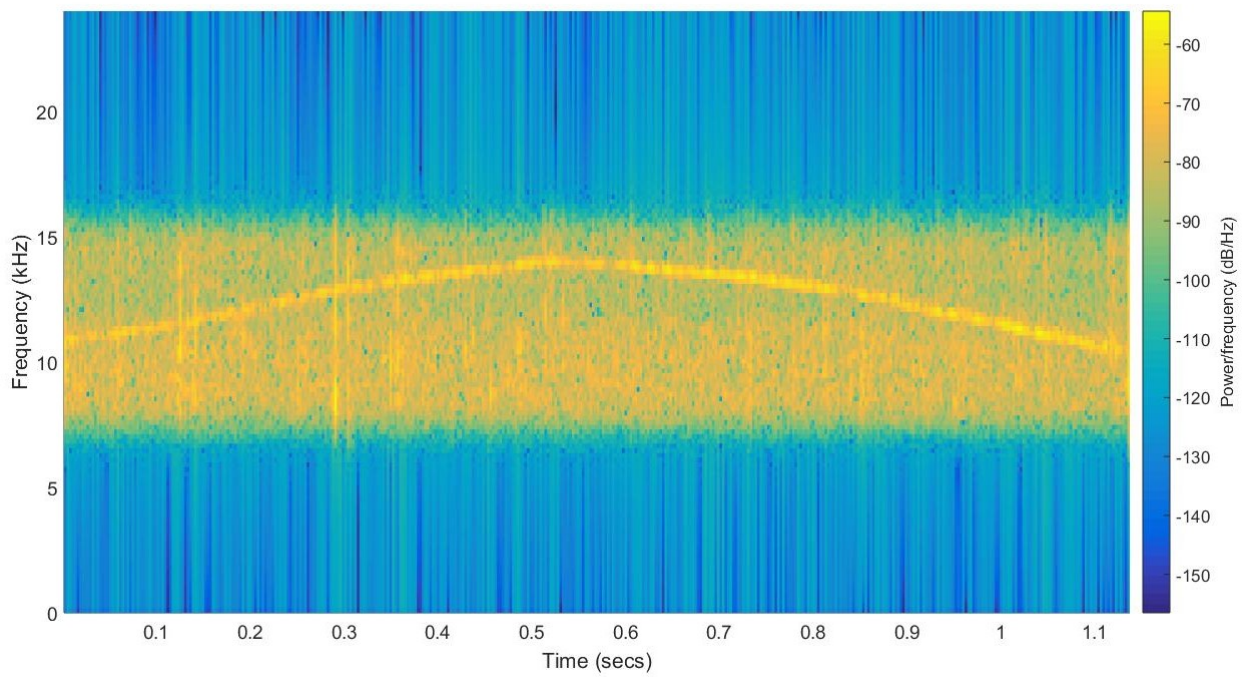


Figura 3.6: Assobio do golfinho nariz-de-garrafa.

Podemos observar esse ruído no domínio do tempo, figura 3.7.

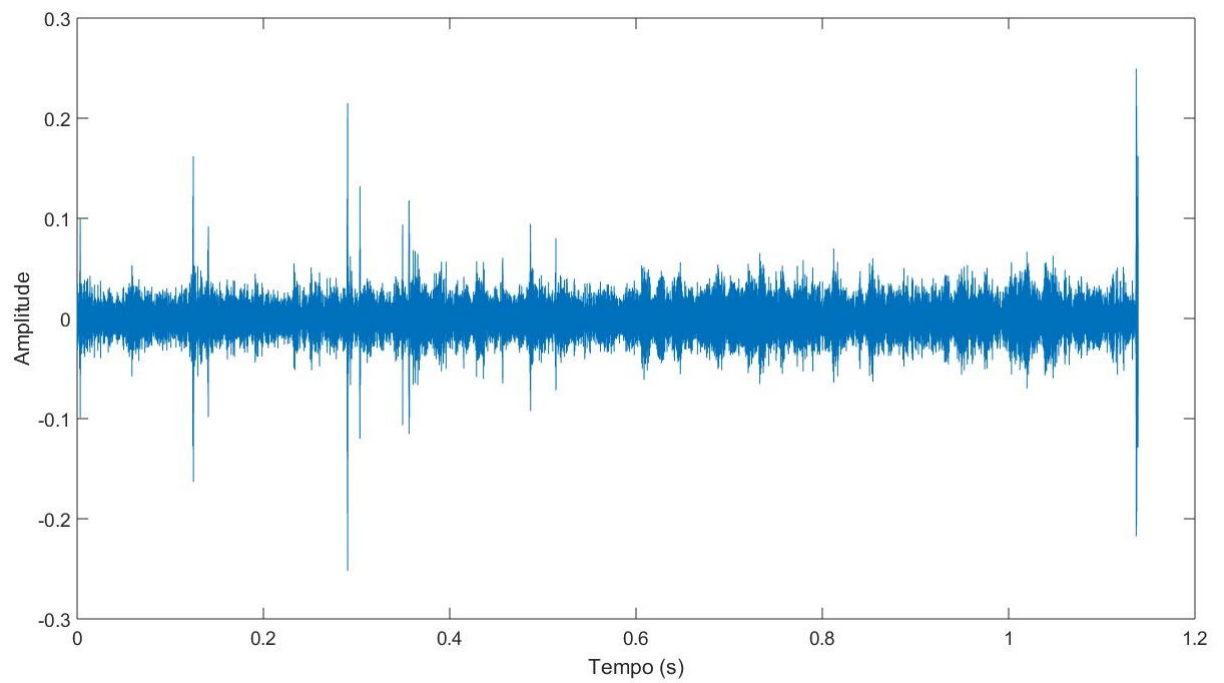


Figura 3.7: Assobio do boto-cinza no domínio do tempo.

Esse assobio apresenta uma duração de 1,139s, uma frequência inicial 10870Hz

e frequência máxima de 14060Hz. Assim, foi gerado um assobio sintético côncavo simulando o emitido pelo cetáceo.

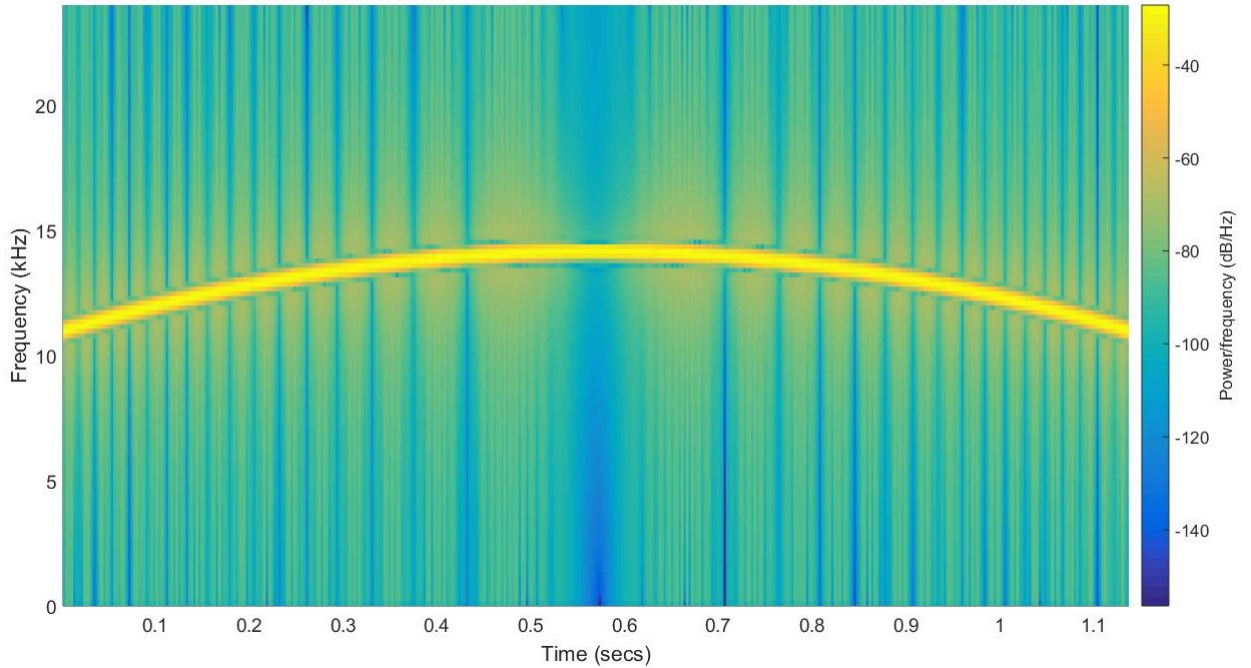


Figura 3.8: Assobio sintético côncavo sem efeitos da propagação.

3.2 Efeito das reflexões

A partir das características da fonte foi gerado o assobio sintético e depois adicionados os efeitos da propagação para vários cenários de distância e profundidade.

3.2.1 O efeito Lloyd-mirror

Devido à incerteza na determinação da profundidade local, foram considerados apenas o sinal direto e o refletido na superfície. Como visto anteriormente, o sinal se compõe no receptor como: $\frac{e^{ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{ikR_2}}{R_2}$ de acordo com o indicado na figura 3.9. R_2 é igual à $r_{21} + r_{22}$. Trata-se de uma soma coerente dos dois sinais na face do receptor.

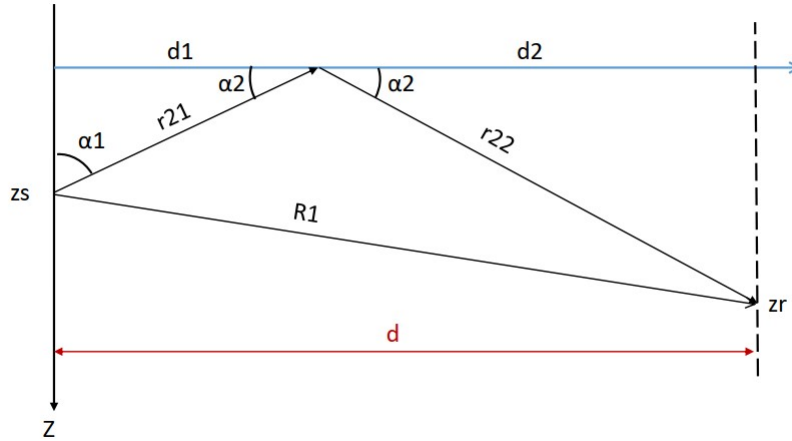


Figura 3.9: Representação trigonométrica do efeito Lloyd-Mirror.

3.2.2 Reflexão no fundo

Uma forma encontrada para reduzir o número de ambiguidades obtidas com a resolução do algoritmo foi acrescentar à estimativa da pressão sonora o efeito da reflexão no fundo. Para determinar a pressão sonora recebida no hidrofone oriunda da reflexão no fundo, é necessário obter o valor do índice de reflexão (R_{12}).

Para resolver a equação do índice de reflexão (R_{12}), faz-se necessária uma resolução geométrica da reflexão da onda no fundo. A figura 3.10 apresenta a representação geométrica do caminho do raio refletido no fundo.

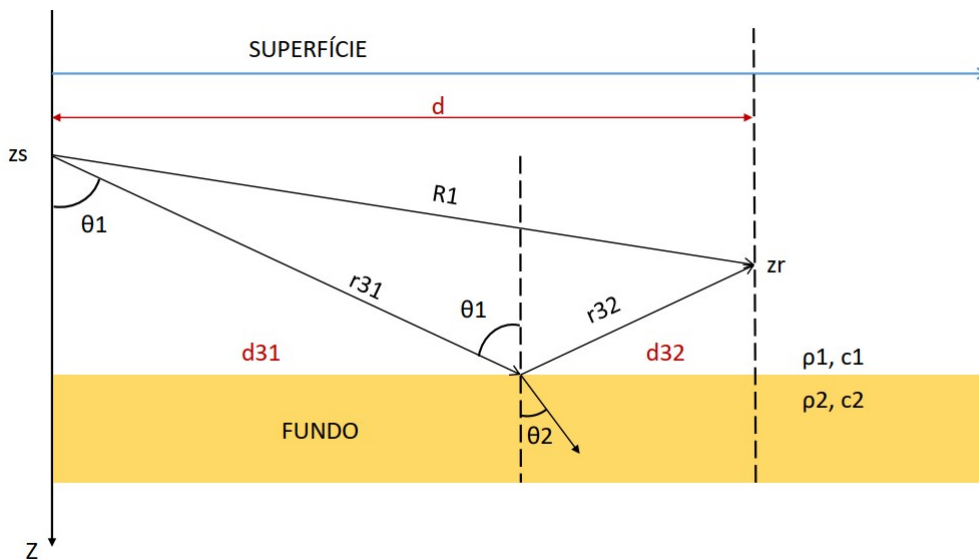


Figura 3.10: Representação geométrica da reflexão no fundo.

Resolvendo, temos:

$$\begin{aligned}
q_1 &= 2 * fundo - z_s - z_r \\
q_2 &= fundo - z_r \\
d_{31} &= \frac{q_2 d}{q_1} \\
d_{32} &= d - d_{31} \\
\theta_1 &= atan\left(\frac{d_{31}}{q_2}\right)
\end{aligned}$$

Pela lei de Snell, temos;

$$\theta_2 = asin\left(\frac{c_2}{c_1} sin\theta_1\right)$$

Assumindo que o fundo é formado por areia, assim a velocidade do som no fundo é definida como $c_2= 1742$ m/s e sua densidade de $\rho_2=1,98$ g/cm³ [5]. Para o oceano, foram definidas uma velocidade constante de $c_1=1523,8$ m/s e a densidade de $\rho_1=1,03$ g/cm³, valores médios da região. Com esses dados, pode-se determinar o coeficiente de reflexão (R_{12}) para cada ângulo θ_1 .

Dessa mesma resolução geométrica, podemos ainda obter os valores de r_{31} e r_{32} e assim calcular o percurso percorrido pelo raio refletido no fundo (R_3).

$$\begin{aligned}
r_{31} &= \frac{d_{31}}{sin\theta_1} \\
r_{32} &= \frac{d_{32}}{sin\theta_1}
\end{aligned}$$

Logo:

$$R_3 = r_{31} + r_{32} = \frac{d}{sin\theta_1} \quad (3.1)$$

Com essa informação, pode-se obter a defasagem temporal entre o raio direto (R_1) e o raio refletido no fundo (R_3).

Como mencionado, devido à incerteza na determinação da profundidade local não foi levada em conta a reflexão no fundo. No caso de águas profundas também não se leva em conta essa reflexão.

3.2.3 Somatório dos efeitos

Na composição dos sinais no receptor leva-se em conta os diferentes tempos de chegada dos sinais.

Com as diferenças de tempo de chegada dos raios ao hidrofone e o fato de a

reflexão na superfície sofrer uma inversão de fase, pode-se equacionar o efeito que a pressão sonora sofrerá ao ser recebida pelo receptor.

$$P_H = P_D + P_F - P_S \quad (3.2)$$

onde:

P_H =pressão sonora resultante;

P_D =pressão sonora do raio direto;

P_F =pressão sonora do raio refletido no fundo;

P_S =pressão sonora refletido na superfície.

O sinal negativo no termo P_S da equação é devido a defasagem de 180° que ocorre no raio refletido na superfície em relação ao raio direto.

Para exemplificar, a figura 3.11 mostra um assobio gerado artificialmente sem os efeitos das reflexões enquanto a figura 3.12 apresenta a mesma onda, só que submetida aos efeitos das reflexões. A onda original tem 560ms com uma frequência inicial de 7.125 Hz e final de 9.375 Hz, emitido por uma fonte a 15m de profundidade e 30m do receptor. O receptor está localizado a 25m de profundidade e o leito marinho a 50m da superfície.

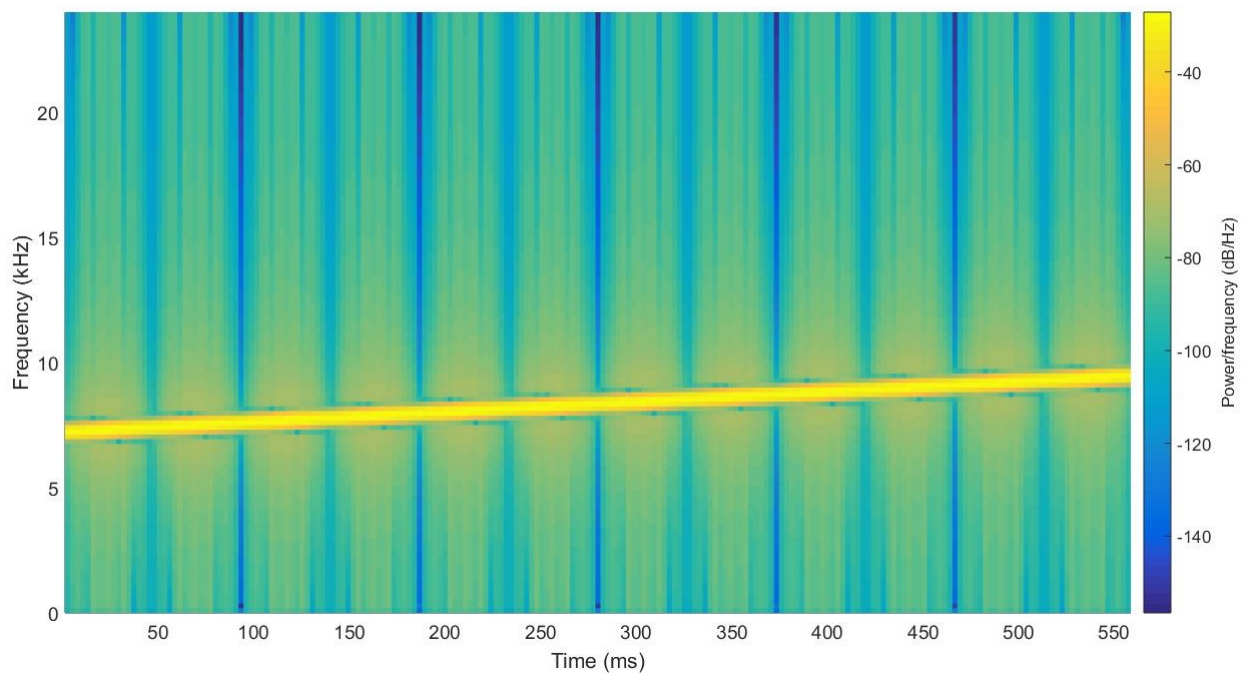


Figura 3.11: Assobio sintético emitido (sem efeito).

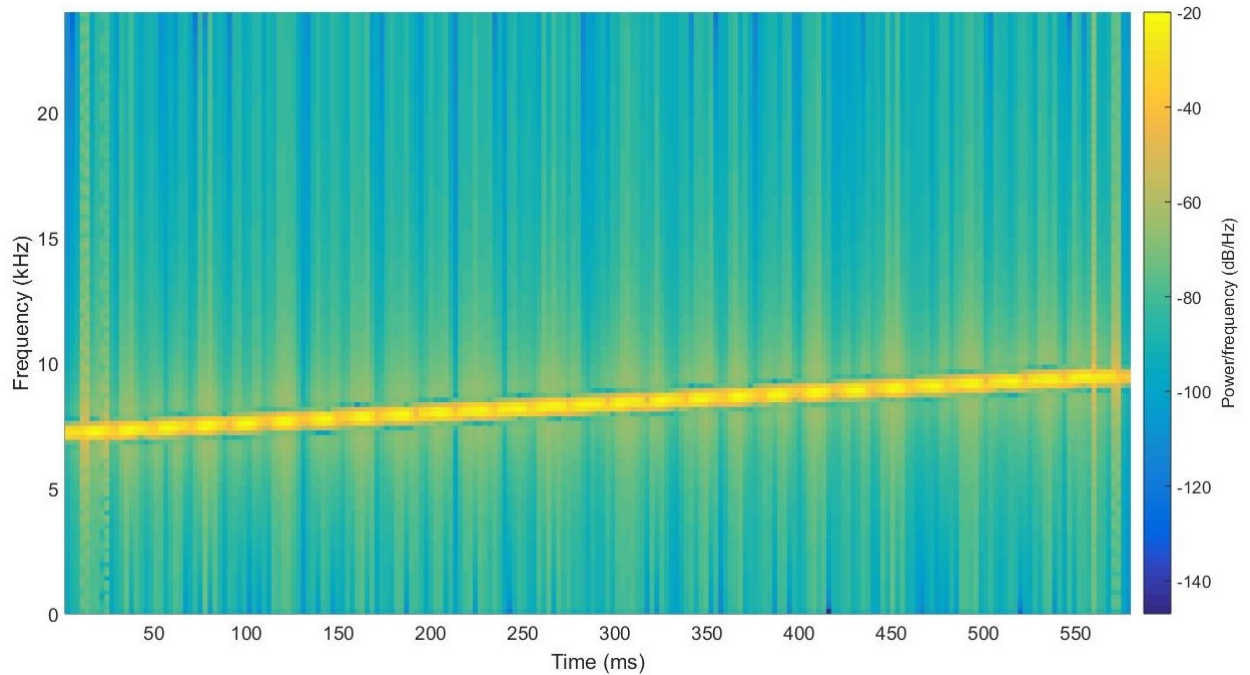


Figura 3.12: Assobio sintético emitido (com efeitos).

Na figura 3.12, as regiões de um amarelo mais intenso representam as interações construtivas devido ao efeito Lloyd-mirror. Devido ao tempo de chegada das ondas serem diferentes, há uma deformação no início e final do espectrograma. Essa deformação não afeta nosso resultado, pois esse efeito se repete em todos os cenários, alterando por igual o resultado da correlação.

3.3 Correlação das amplitudes

Para cada cenário (profundidade e distância), é gerado um sinal com os efeitos da propagação.

Para esse sinal sintético e para o assobio recebido calculam-se as amplitudes para cada seção dos espectrogramas. Correlaciona-se então essas amplitudes.

As amplitudes são obtidas através da transformada de Fourier dos sinais obtidos, para cada seção do espectro.

A figura 3.13 apresenta esses valores para o assobio recebido do boto-cinza.

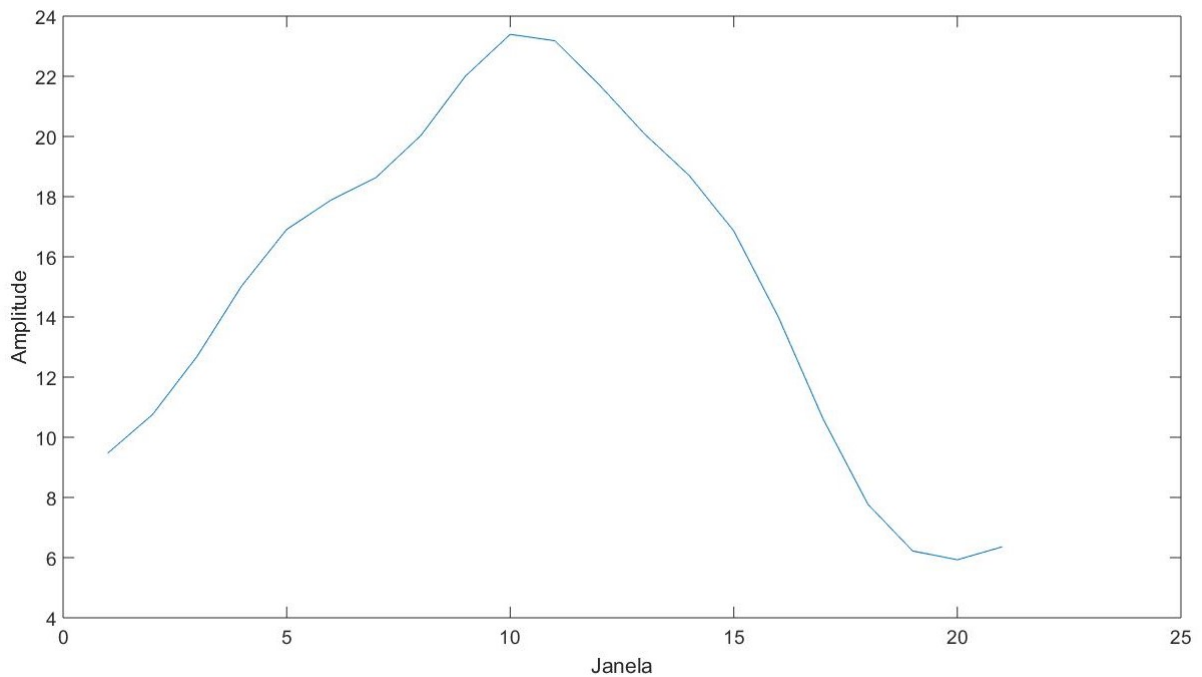


Figura 3.13: Amplitude do assobio do boto-cinza.

Observa-se que na figura 3.13 não há pontos de mínimos.

Cabem os seguintes comentários:

Pela duração do assobio, cerca de 60 ms, considera-se que praticamente o cetáceo parado. O efeito Lloyd-mirror provoca pontos de máximos e mínimos devido à interferências destrutivas e construtivas quando a distância entre fonte e receptor varia; o que não é o caso aqui em que o cetáceo está parado. A interferência se dá então entre frequências diferentes que estão chegando pelo sinal direto e o refletido na superfície com sinal trocado. Há reforços e atenuações porém para pequenas diferenças de percursos essas combinações produzem interferências de menor valor. Isto justamente ocorre quando o hidrofone está em pequenas profundidades, o que é o caso do assobio do boto-cinza.

Capítulo 4

Testes e análises dos resultados

Para o teste do programa de localização, foram utilizados os assobios do boto-cinza e do golfinho nariz-de-garrafa cujas características do sinal foram fornecidas pelo professor Alexandre Azevedo e estão indicadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Informações dos assobios

	BOTO-CINZA	GOLFINHO NARIZ-DE-GARRAFA
<i>Contorno</i>	ascendente	côncavo
<i>Frequência de amostragem</i>	96 kHz	48 kHz
<i>Profundidade local</i>	desconhecido	23m
<i>Profundidade receptor</i>	2m	20m
<i>Frequência inicial</i>	8.250 Hz	10.870 Hz
<i>Frequência final</i>	17.250 Hz	14.060 Hz
<i>Duração do assobio</i>	0,060s	1,139s
<i>Distância do cetáceo</i>	25 a 80m	desconhecido
<i>Profundidade do cetáceo</i>	desconhecido	desconhecido
<i>Velocidade do som no sedimento</i>	1.742 m/s	1.742 m/s
<i>Velocidade do som na água</i>	1.523,8 m/s	1.523,8 m/s
<i>Densidade do sedimento</i>	1,98 g/cm ³	1,98 g/cm ³
<i>Densidade da água</i>	1,033 g/cm ³	1,033 g/cm ³

Com base nessas informações foram produzidos assobios sintéticos o mais semelhantes possível aos assobios recebidos.

Esses assobios sintéticos podem ser vistos nas figuras 3.5 e 3.8 do capítulo anterior.

Foram acrescidos a esses assobios sintéticos os efeitos da propagação para 1400 cenários diferentes (distância e profundidade) da seguinte forma:

- 35 valores de profundidade entre 2 e 18 metros (incremento de 0,5 m);

- 40 valores de distância entre 20 e 80 metros (incremento de 1,5 metros).

A figura 4.1 mostra o resultado das correlações para o boto-cinza em função da distância.

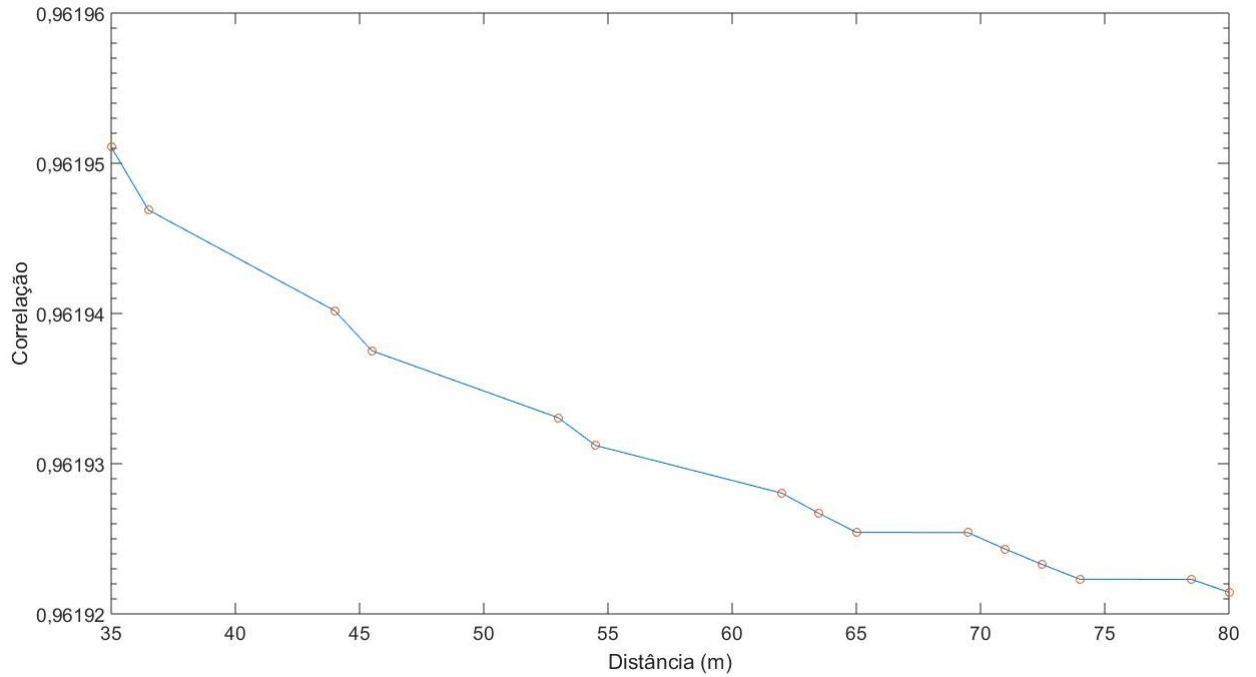


Figura 4.1: Gráfico da correlação pela distância dos pontos de maiores correlações para o assobio do boto-cinza.

As diferenças entre valores de correlação são muito pequenas. Com esse valor de profundidade do receptor, as diferenças de percurso entre o pulso direto e o refletido na superfície são muito pequenas produzindo essa quase ambiguidade.

A figura 4.2 mostra os mesmos resultados em função da profundidade. Persistem as ambiguidades agora para uma faixa mais estreita de profundidade.

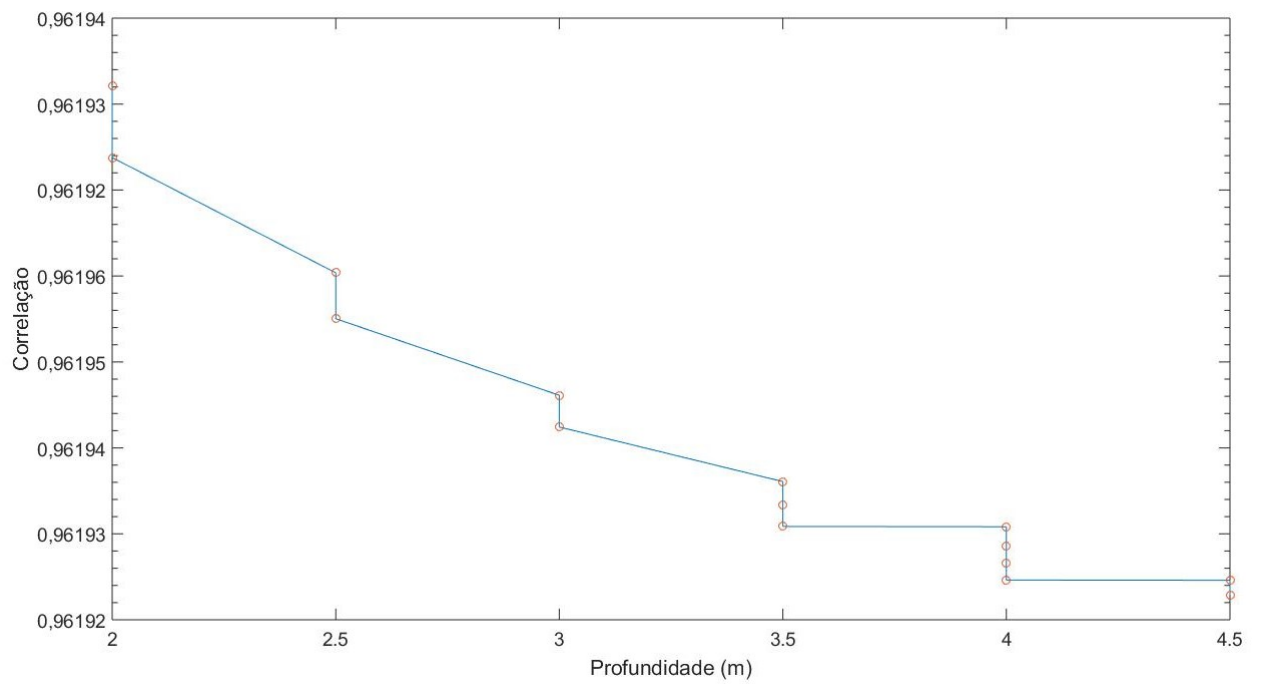


Figura 4.2: Gráfico da correlação pela profundidade dos pontos de maiores correlações para o assobio do boto-cinza.

A figura 4.3 mostra agora o gráfico distância vs profundidade onde se observa a correspondência entre os diferentes pares de distância e profundidade.

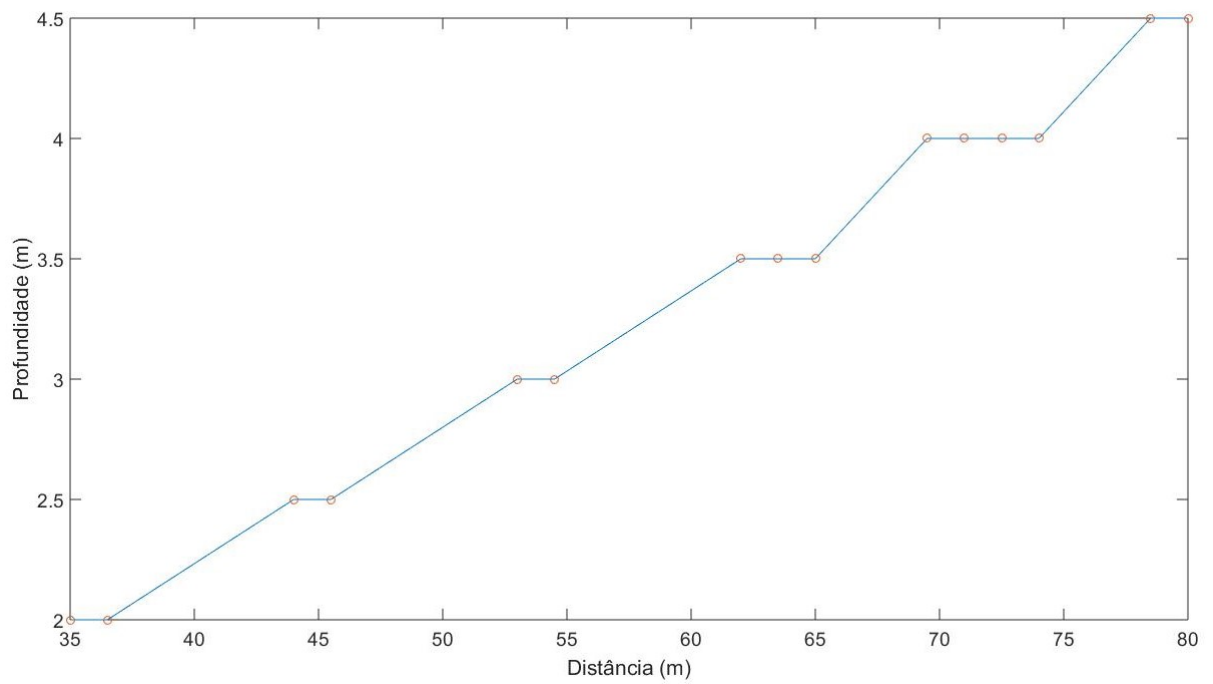


Figura 4.3: Gráfico das distâncias e profundidades dos pontos de maiores correlações para o assobio do boto-cinza.

A figura 4.4 mostra os gráficos de amplitude do espectrograma do assobio recebido e do simulado para a situação de correlação. Como dito anteriormente não há mínimos, só um máximo para uma combinação construtiva.

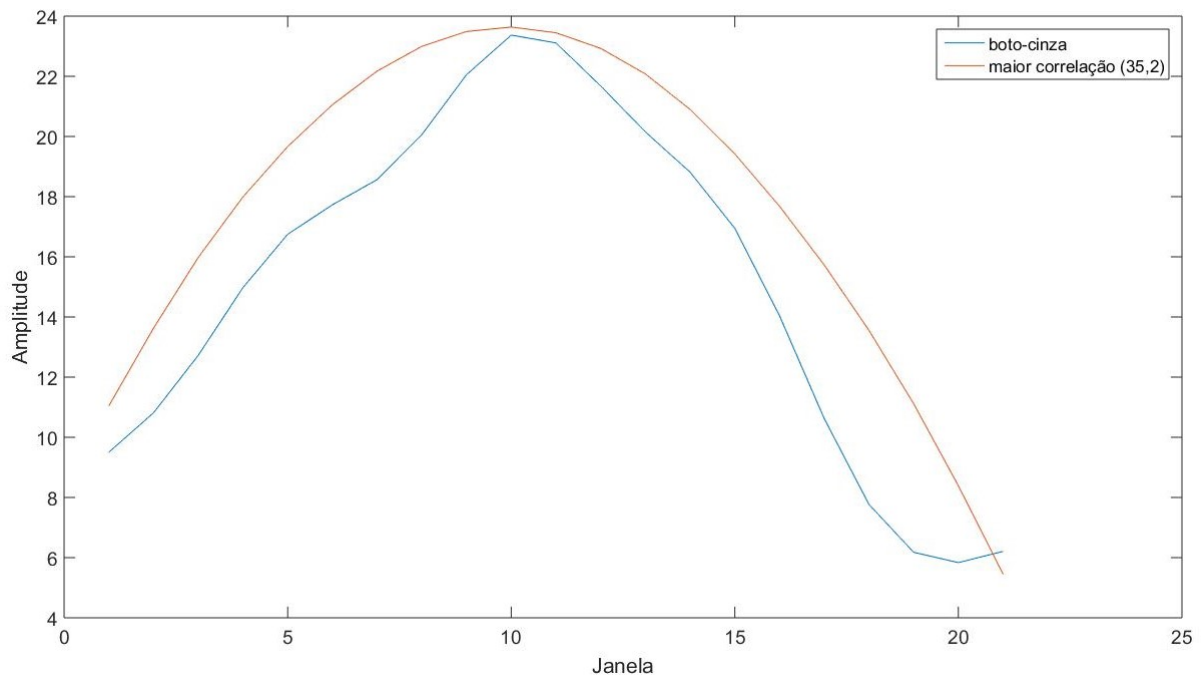


Figura 4.4: Gráfico das amplitudes do assobio do boto-cinza e do assobio sintético de maior correlação.

No caso do assobio côncavo, os valores de correlação foram bastante baixos, da ordem de 0,2, provavelmente devido a um sinal recebido muito ruidoso, por isso não são aqui apresentados.

Como já mencionado no capítulo anterior, a sensibilidade na determinação da posição do cetáceo, é relativamente pequena quando o receptor está próximo a superfície – as diferenças dos percursos são poucas. Não foi possível ter acesso a gravações de melhor qualidade e em profundidade maiores do receptor.

Com o objetivo de se avaliar melhor a sensibilidade do processo de localização, simulou-se o recebimento de assobios em um receptor nas profundidades de 2 a 18 metros com intervalo de 2 metros. Esses assobios foram gerados a uma distância fixa de 35 metros e nas mesmas profundidades do receptor, respectivamente de 2 a 18 metros com intervalos de 2 metros.

São simulados agora 1400 cenários de distância e profundidade com os valores já mencionados anteriormente. Para cada um dos 9 pares considerados (uma distância e nove profundidades) são selecionadas as 10 maiores correlações com os 1400 cenários simulados.

Na figura 4.5 – com a profundidade do receptor e do cetáceo de 2 metros e distância 35 metros, pode-se observar a baixa sensibilidade, expressa por pouca variação da correlação para diferentes pares simulados.

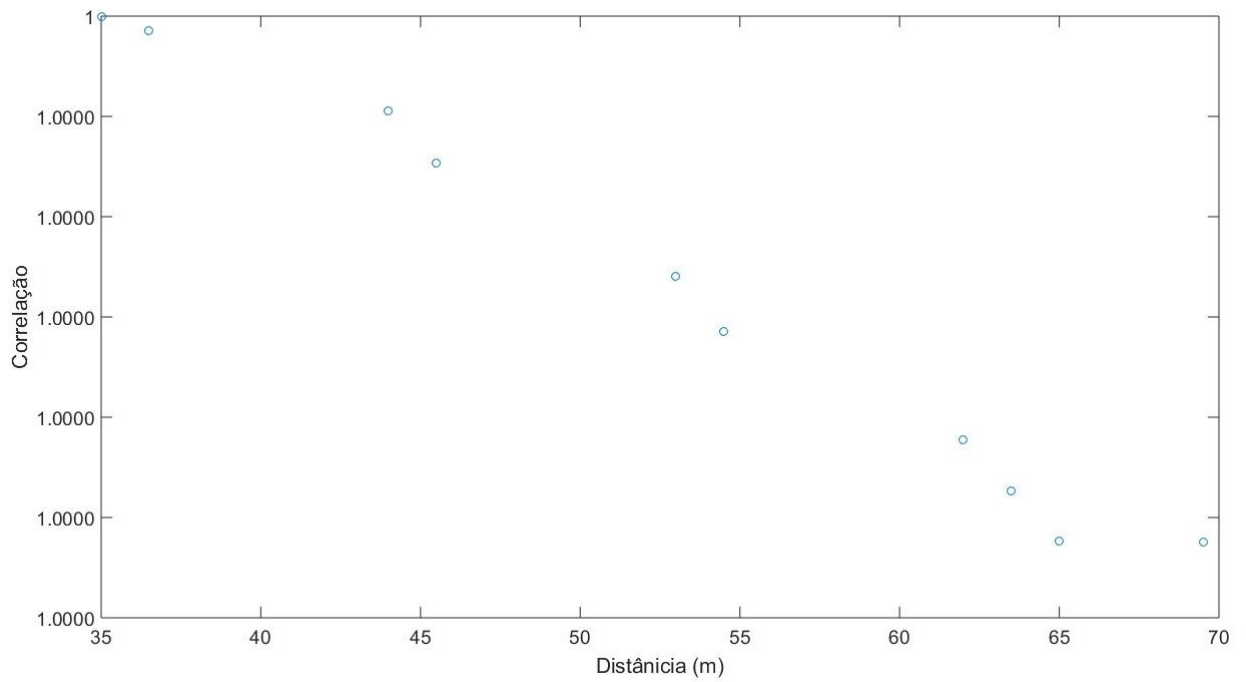


Figura 4.5: Gráfico da distância pela profundidade das 10 maiores correlações de um assobio linear com o receptor à profundidade de 2m.

Na figura 4.6, mostra-se simultaneamente as correlações para 2 e 18 metros em azul (2 metros) e vermelho (18 metros). Observa-se claramente a sensibilidade maior para o caso de 18 metros (menor variação da faixa de distância).

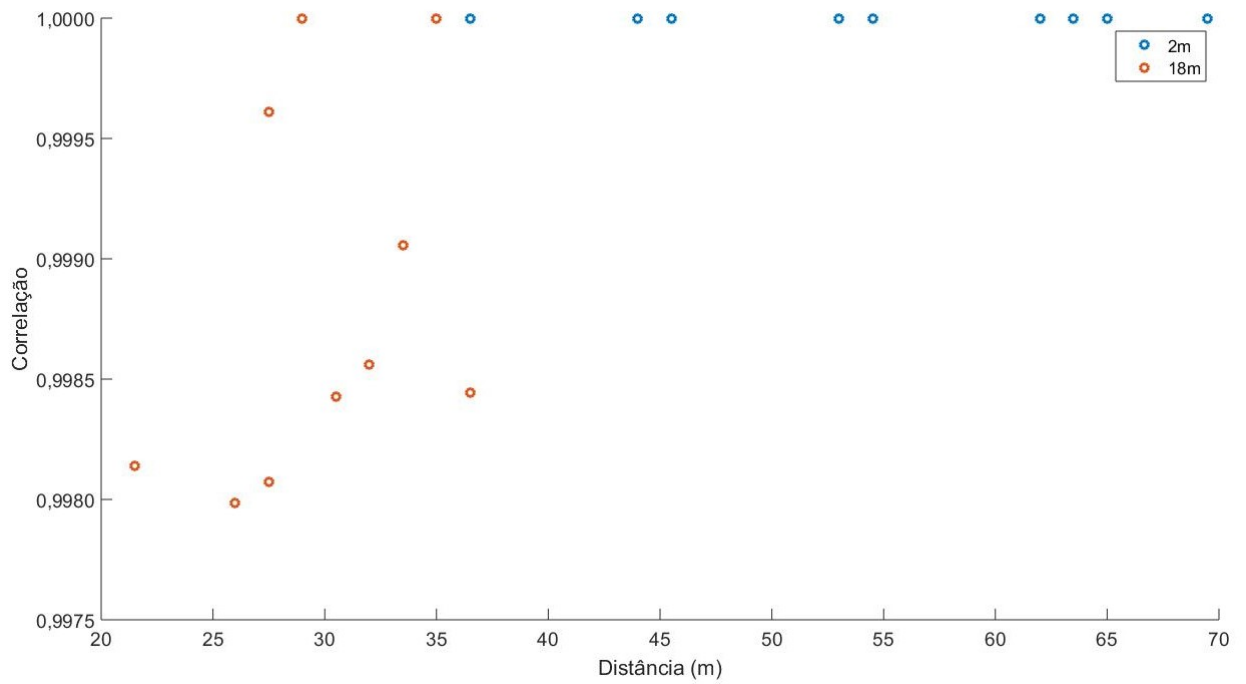


Figura 4.6: Gráfico da correlação pela distância de um assobio linear com o receptor à profundidade de 2m e 18m.

Nas figuras 4.7 e 4.8 a seguir, os mesmos gráficos com normalização da distância e da profundidade.

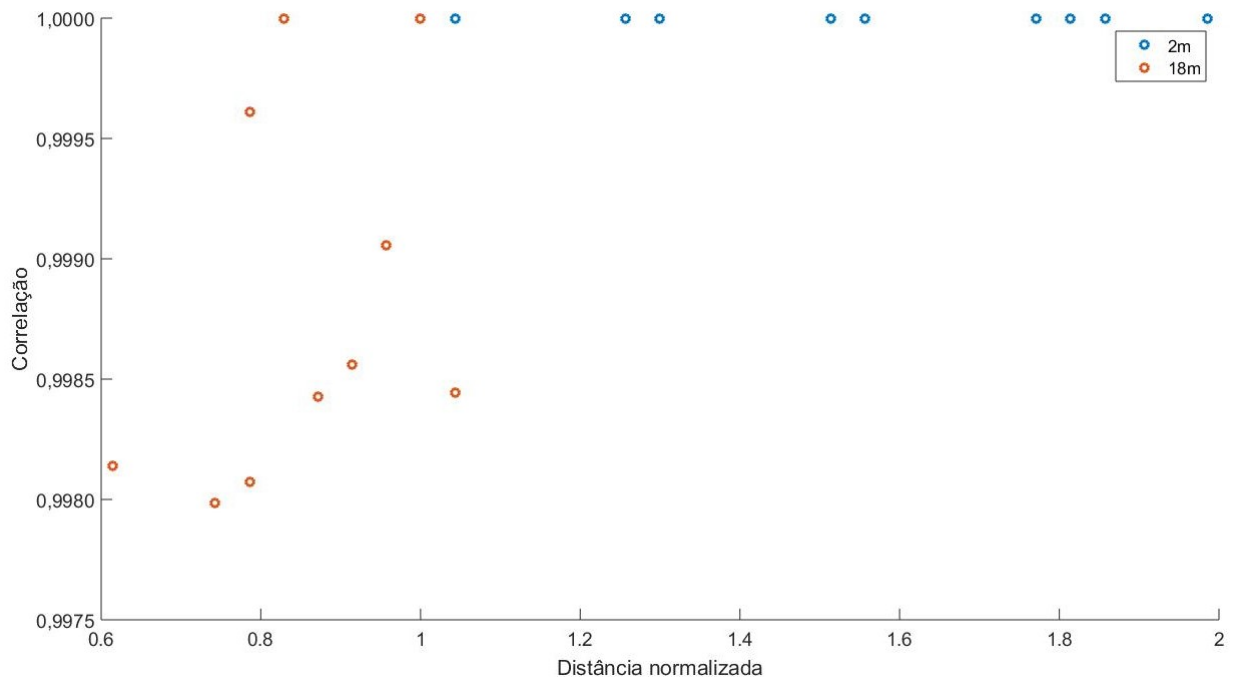


Figura 4.7: Gráfico da correlação pela distância normalizada de um assobio linear com o receptor e cetáceo à profundidade de 2m e 18m.

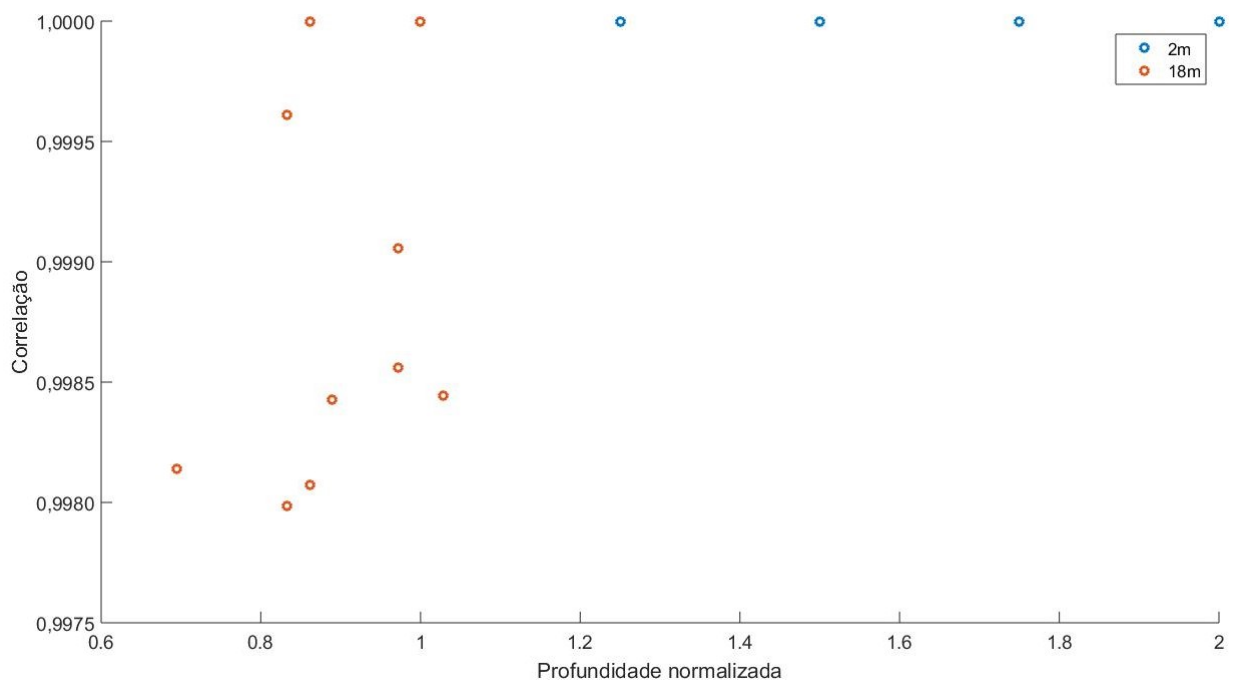


Figura 4.8: Gráfico da correlação pela profundidade normalizada de um assobio linear com o receptor e cetáceo à profundidade de 2m e 18m.

Vê-se que o aumento de profundidade diminui a variância na determinação da distância e da profundidade.

Capítulo 5

Conclusões e recomendações

5.1 Conclusão

Este trabalho apresentou uma metodologia de utilização do efeito Lloyd-mirror para localizar uma fonte emissora de um sinal de frequência modulado conhecido na bioacústica como assobio. Durante a elaboração da dissertação, foi possível observar a capacidade do algoritmo em reproduzir de forma satisfatória o assobio ascendente gerado pelo boto-cinza (*Sotalia guianensis*) e o assobio côncavo gerado pelo golfinho nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*).

De forma inicial, a metodologia apresenta a possibilidade da extração da informação da fonte emissora de um assobio com apenas um hidrofone, o que, em comparação aos métodos usuais, corresponde a uma redução dos custos da operação e de sua complexidade.

Além disso, essa metodologia permite um maior controle sobre as emissões próximas a espécies marinhas, possibilitando a redução dos danos causados. Na pesquisa marítima, permite o dimensionamento do tamanho de grupos de animais, velocidade e estudo sobre a função biológica da vocalização. No que se refere à conservação, o conhecimento da localização da fonte torna viável um correto dimensionamento da emissão da fonte e o efeito do ruído antropogênico sobre as espécies marinhas.

Na análise do sinal do boto-cinza foi possível demonstrar a influência da profundidade do receptor e da fonte na qualidade dos resultados.

Não foi possível avaliar a acurácia desse algoritmo, pois na maioria das gravações de assobios dos cetáceos não se conhecem com precisão a profundidade do receptor e a profundidade local. Logo, o resultado do algoritmo foi analisado de forma qualitativa. Apesar de os resultados qualitativos serem promissores, é necessária a realização de testes em ambientes controlados para definir suas limitações.

5.2 Recomendações

Os resultados preliminares demonstraram uma promissora possibilidade do uso do algoritmo. Alguns testes e simulações devem ser realizados para avaliar a funcionalidade do algoritmo e permitir a sua melhoria, como:

- teste com um número maior de sinais reais: essa avaliação pode ser realizada utilizando o Perfilador Acústico de Queda Livre como um array vertical. Esse equipamento permite a coleta de assobios sem a preocupação da profundidade do receptor, pois é conhecida a sua velocidade de queda;

- determinação do efeito da variação da frequência de amostragem, incrementos da distância e profundidade sobre o erro da estimação da posição da fonte;

- teste para determinar o tempo mínimo de duração do assobio que permita a utilização do algoritmo;

- uso do algoritmo para sinais antropogênicos, similares aos assobios;

- efeito da variação da velocidade do som sobre o funcionamento do algoritmo;

- extensão do algoritmo para atender a outros tipos de contornos de assobios.

Referências Bibliográficas

- [1] BJØRNØ, L. *Applied underwater acoustics*. Elsevier, 2017.
- [2] ROSSING, T. *Springer handbook of acoustics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] PIERCE, A. D. *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*. Springer, 2019.
- [4] JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B., et al. *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [5] CLAY, C. S., MEDWIN, H. *Acoustical oceanography: principles and applications*. New York, NY (USA) Wiley-Interscience, 1977.
- [6] AU, W. W., HASTINGS, M. C. *Principles of marine bioacoustics*, v. 510. Springer, 2008.
- [7] AZEVEDO, A. F., SIMÃO, S. M. “Whistles produced by marine tucuxi dolphins (*Sotalia fluviatilis*) in Guanabara Bay, southeastern Brazil”, *Aquatic Mammals*, v. 28, n. 3, pp. 261–266, 2002.
- [8] CAREY, W. M., EVANS, R. B. *Ocean ambient noise: measurement and theory*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [9] LIMITED, N. S. *Spherical Transducers Model D/70*. <http://www.neptune-sonar.co.uk/wp-content/uploads/2016/03/Model-D70.pdf>.
- [10] DE SOUZA TARANTO, D. *Estimativa do Estado de Mar Gerado Pelo Vento e suas Correlações com Medições do Ruído Ambiente*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.
- [11] KNUDSEN, V. O., ALFORD, R., EMLING, J. “Underwater ambient noise”, *J. Mar. Res.*, v. 7, n. 3, pp. 410–429, 1948.

- [12] URICK, R., PRYCE, A. *A SUMMARY OF UNDERWATER ACOUSTIC DATA. PART II. TARGET STRENGTH*. Relatório técnico, OFFICE OF NAVAL RESEARCH ARLINGTON VA, 1953.
- [13] WENZ, G. M. “Review of underwater acoustics research: Noise”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 51, n. 3B, pp. 1010–1024, 1972.
- [14] BOARD, O. S., COUNCIL, N. R., OTHERS. *Marine mammal populations and ocean noise: determining when noise causes biologically significant effects*. National Academies Press, 2005.
- [15] HOHN, A. A., ROTSTEIN, D. S., HARMS, C. A., et al. “Report on marine mammal unusual mortality event UMESE0501Sp: Multispecies mass stranding of pilot whales (*Globicephala macrorhynchus*), minke whale (*Balaenoptera acutorostrata*), and dwarf sperm whales (*Kogia sima*) in North Carolina on 15-16 January 2005”, 2006.
- [16] ABATE 1, R. S. “NEPA, national security, and ocean noise: the past, present, and future of regulating the impact of navy sonar on marine mammals”, *Journal of International Wildlife Law & Policy*, v. 13, n. 4, pp. 326–356, 2010.
- [17] DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, I. B. *Guia de Monitoramento da Biota Marinha em Pesquisas Sísmicas Marítimas*, 2018.
- [18] RICHARDSON, W., GREENE JR, C., MALME, C., et al. “Marine mammals and noise”, 1995.
- [19] ZIMMER, W. M., HARWOOD, J., TYACK, P. L., et al. “Passive acoustic detection of deep-diving beaked whales”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 124, n. 5, pp. 2823–2832, 2008.
- [20] ZIMMER, W. M. “Range estimation of cetaceans with compact volumetric arrays”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 134, n. 3, pp. 2610–2618, 2013.
- [21] DE ANDRADE, D. F. G. *Determinação de parâmetros de alvos submarinos a partir de interferências devidas ao efeito Lloyd-mirror*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.
- [22] PEREIRA, A., HARRIS, D., TYACK, P., et al. “Lloyd’s mirror effect in fin whale calls and its use to infer the depth of vocalizing animals”. In: *Pro-*

ceedings of Meetings on Acoustics 4ENAL, v. 27, p. 070002. Acoustical Society of America, 2016.

- [23] ZIMMER, W. M. *Passive acoustic monitoring of cetaceans*. Cambridge University Press, 2011.
- [24] ROBERT, U. J. *Principles of Underwater Sound*. McGraw-Hill, New York, 1983.
- [25] MEDWIN, H., CLAY, C. S. *Fundamentals of acoustical oceanography*. Elsevier, 1998.
- [26] ROSSING, T. *Springer handbook of acoustics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [27] HODGES, R. P. *Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar*. John Wiley & Sons, 2011.
- [28] CHARIF, R. A., MELLINGER, D. K., DUNSMORE, K. J., et al. “Estimated source levels of fin whale (*Balaenoptera physalus*) vocalizations: Adjustments for surface interference”, *Marine Mammal Science*, v. 18, n. 1, pp. 81–98, 2002.
- [29] CATO, D. H. “Simple methods of estimating source levels and locations of marine animal sounds”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 3, pp. 1667–1678, 1998.
- [30] MIRANDA, A., LUNA, F., SOUSA, G., et al. *Guia Ilustrado de Identificação de Cetáceos e Sirênios do Brasil - ICMBio/CMA*. 06 2019. ISBN: 978-85-61842-90-1.
- [31] JONES, B., ZAPETIS, M., SAMUELSON, M. M., et al. “Sounds produced by bottlenose dolphins (*Tursiops*): a review of the defining characteristics and acoustic criteria of the dolphin vocal repertoire”, *Bioacoustics*, v. 29, n. 4, pp. 399–440, 2020.
- [32] MONTEIRO-FILHO, E. L., MONTEIRO, K. D. “Low-frequency sounds emitted by *Sotalia fluviatilis guianensis* (Cetacea: Delphinidae) in an estuarine region in southeastern Brazil”, *Canadian Journal of Zoology*, v. 79, n. 1, pp. 59–66, 2001.
- [33] PIVARI, D. *Caracterização das emissões sonoras de *Sotalia fluviatilis* (Gervais, 1853) (Cetacea, Delphinidae) durante o comportamento alimentar em duas praias do estuário de Cananéia, São Paulo*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2004.

- [34] RIBEIRO, C. E. P. *Instrumentos de Queda Livre Para Medição de Parâmetros Oceanográficos*. Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1977.
- [35] *TASCAM DR-40X Linear PCM Recorder*. TEAC Corporatin, <https://tascam.com/us/product/dr-40x/download>, 2019.

Apêndice A

Coleta de dados

Os dados coletados no ambiente real são importantes na validação e no desenvolvimento de novas técnicas de análise e de simulação. Os constantes desenvolvimentos da oceanografia levam a necessidade de dados de melhor qualidade e mais abrangente, como consequência, de equipamento mais complexos.

Na acústica, isso se torna evidente devido ao aumento do ruído antropogênico obtido nas medições acústicas. Esse ruído somado ao ruído próprio do equipamento e da sua plataforma de medição comprometem a qualidade dos dados.

Nas medições acústicas de cetáceos isso se torna ainda mais preocupante pela dificuldade de prever sua localização e a variação de sua emissão no ambiente.

Um instrumento de vasta abrangência é o Perfilador Acústico de Queda Livre (PAQL). Esse instrumento permite que dados possam ser obtido com uma redução significativa do ruído emitido pela plataforma de lançamento, além do uso como um array vertical. Essas informações são importantes para permitir a validação do algoritmo desenvolvido.

A.1 Perfilador Acústico de Queda Livre

Durante a elaboração da dissertação, foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação - LIOc um equipamento baseado na referência [34]. Coordenado pelo Professor Doutor Carlos Eduardo Parente, esse equipamento denominado de Perfilador Acústico de Queda Livre, permite obter de forma autônoma medições de ruído irradiado em várias profundidades.

Desenvolvido para a medição do ruído ambiental [10] numa coluna de água de profundidade máxima de 200m, o perfilador é lançado da superfície da água e através de uma descida controlada obtém o ruído irradiado durante todo o trajeto.

Apesar de desenvolvido para medir o ruído irradiado em cada estado do mar, o equipamento possui uma aplicabilidade para a bioacústica bem relevante. Seu intervalo de funcionamento compreende boa parte dos ruídos emitidos por cetáceos.

A.1.1 Características do Perfilador Acústico de Queda Livre

Para atender seu objetivo, determinou-se a sua faixa de trabalho através das curvas de Wenz (figura A.1), ou seja, uma sensibilidade entre 20 e 40 dB nas frequências de 1 a 10 kHz [8].

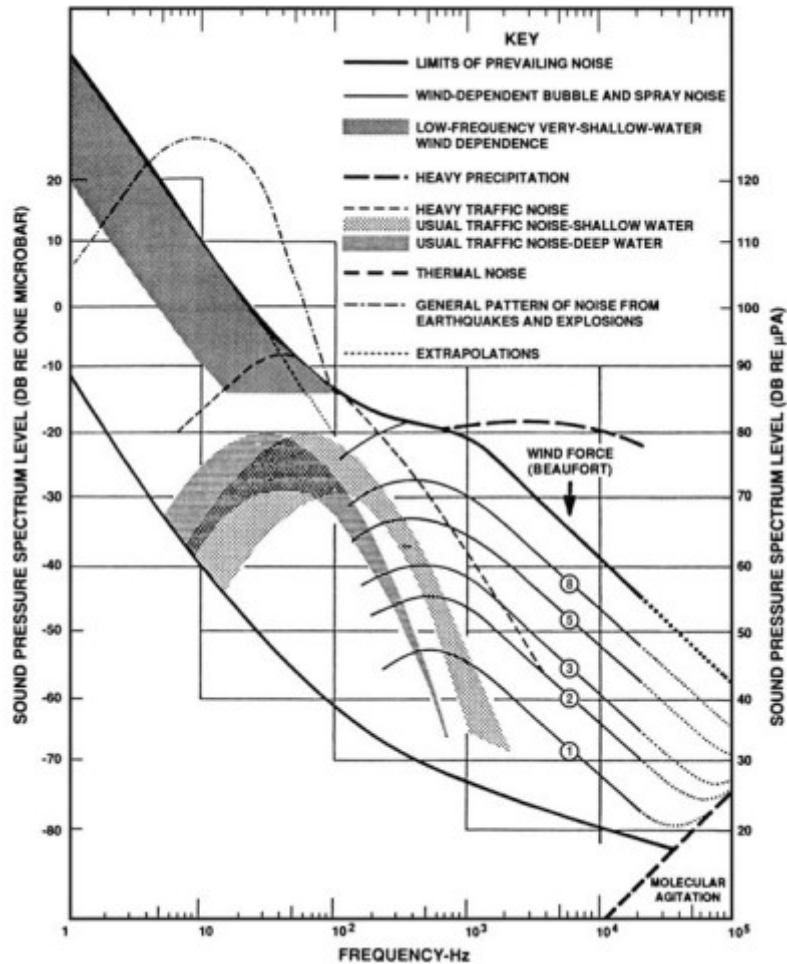


Figura A.1: Curva de Wenz [8].

Dentre as alternativas presentes no LIOc, optou-se pelo hidrofone Spherical transducer D70, da *Neptune Sonar Limited*, figura A.2 com frequência de ressonância de 70kHz.

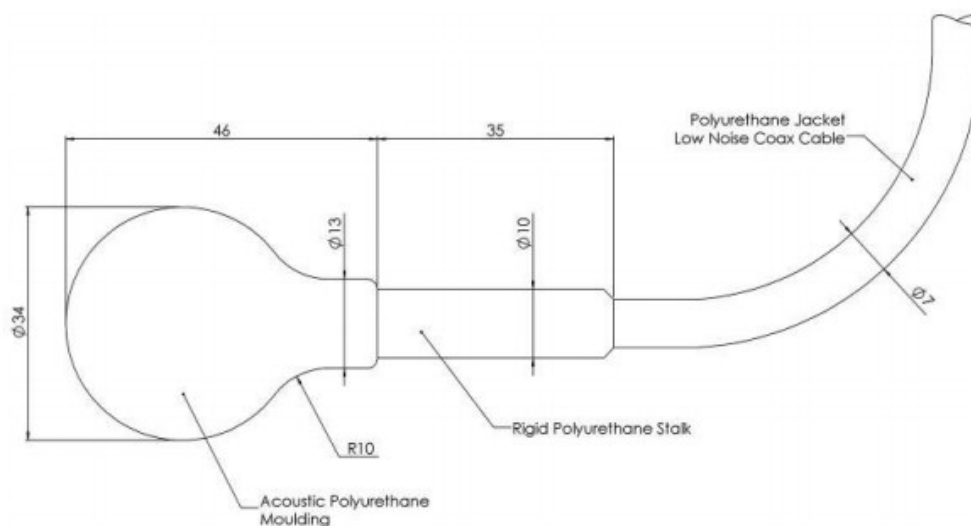


Figura A.2: Hidrofone Spherical transducer D70.

Através da informação presente no manual do fabricante [9], figura A.3, podemos observar a sensibilidade do transdutor.

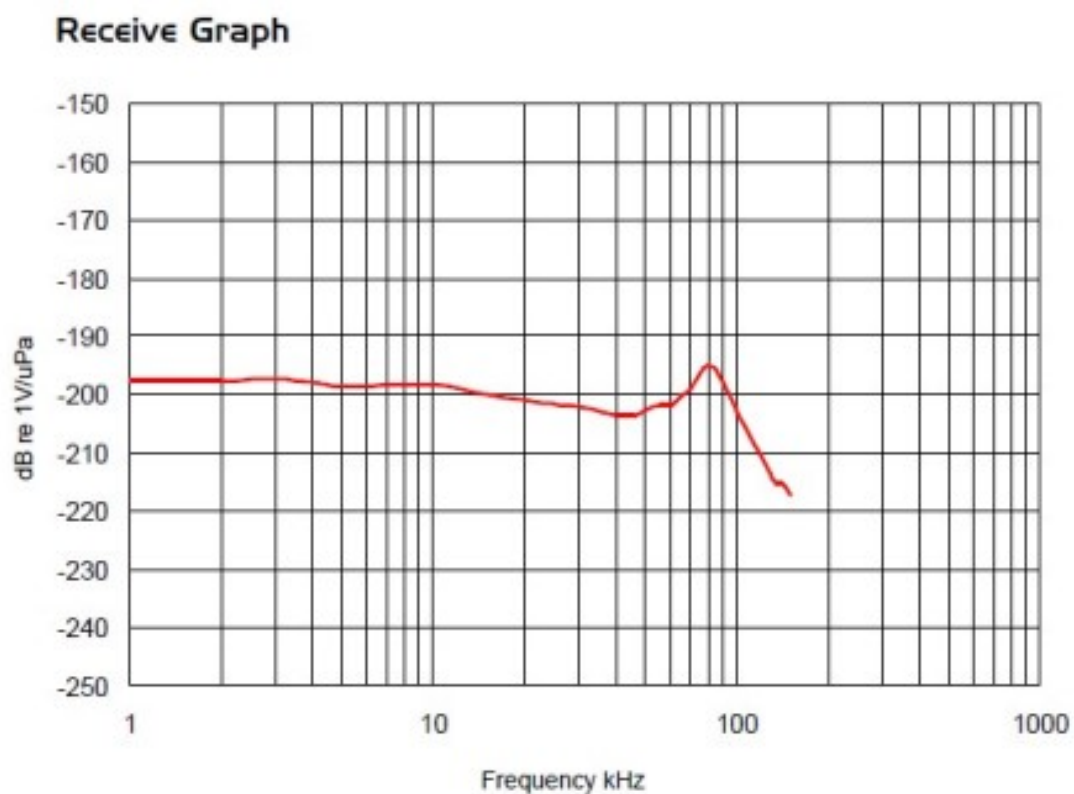


Figura A.3: Curva sensibilidade do hidrofone [9].

Para a gravação do ruído, foi escolhido o gravador TASCAM DR-40X, com taxa de amostragem máxima de 96 kHz a 24 bits, operado em formato WAV em cartão

SD. Oferece autonomia de aproximadamente 17h de gravação, com filtros passa-altas de 40, 80, 120 e 220 Hz [35].

O protótipo foi feito utilizando um vaso na forma de um cone com diâmetro máximo de 79mm e comprimento de 290mm, figura A.4.



Figura A.4: Protótipo do Perfilador Acústico de Queda Livre [10]

Seu formato tem como objetivo reduzir o arrasto das correntes sobre o perfilador, e a hélice acoplada ao corpo do perfilador tem a função de diminuir a velocidade de queda e estabilizar o corpo, evitando o giro em torno do seu próprio eixo.

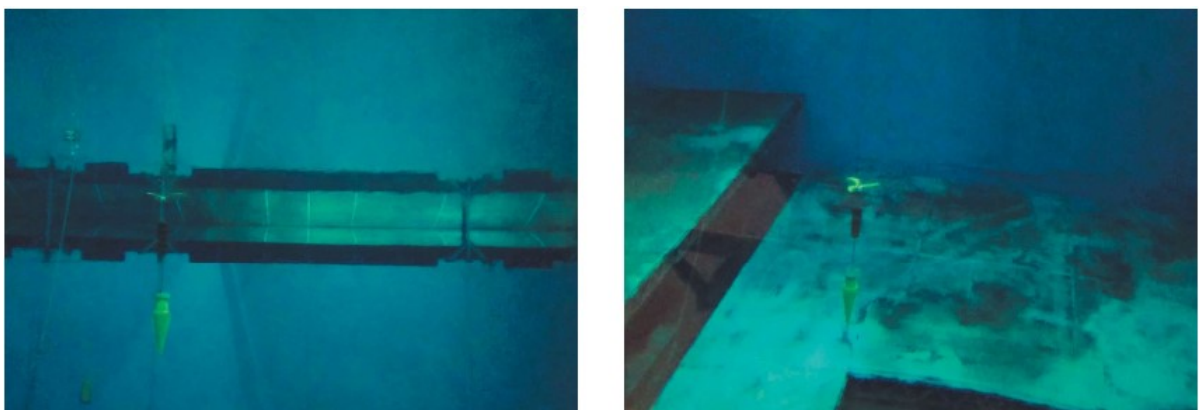


Figura A.5: Teste LabOceano [10]

Nos ensaios realizados no LabOceano e no mar, o perfilador apresentou uma velocidade de queda de aproximadamente 1,0 m/s, que atende a necessidade do experimento.

Para assegurar a confiabilidade dos dados apresentados, o equipamento foi calibrado no Departamento de Sistemas Acústicos do Instituto de Pesquisa da Marinha do Brasil - IPqM.

No dia 31 de janeiro de 2021 das 7:00 às 15:00 horas foi realizado teste de campo nas proximidades da ilha Rasa-RJ a bordo do veleiro Akanni.

Foram realizadas medições estáticas a 15 metros de profundidade e medições dinâmicas com profundidade local de 30 metros. Dessas medições foi possível obter o comportamento do perfilador em condições reais de utilização.

A utilização do perfilador aliado ao algoritmo de localização permite determinar o comportamento do cetáceo e seus hábitos em toda a profundidade da coluna de água.