



USO DO EFEITO *LLOYD MIRROR* NA DETECÇÃO DO RUÍDO IRRADIADO  
EM ÁGUAS RASAS

Bruno Nunes Mendes

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 Nicolas Gallo

Rio de Janeiro  
Março de 2021

USO DO EFEITO *LLOYD MIRROR* NA DETECÇÃO DO RUÍDO IRRADIADO  
EM ÁGUAS RASAS

Bruno Nunes Mendes

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 Nicolas Gallo

Aprovada por: Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro  
Prof. Marcos Nicolas Gallo  
Pesq. Lussac Prestes Maia  
Pesq. Rogéiro de Moraes Calazan

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
MARÇO DE 2021

Mendes, Bruno Nunes

Uso do efeito *Lloyd Mirror* na detecção do ruído irradiado em águas rasas/Bruno Nunes Mendes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

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

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Marcos Nicolas Gallo

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

Referências Bibliográficas: p. 44 – 47.

1. Efeito *Lloyd Mirror*. 2. ruído irradiado. 3. águas rasas. I. Parente Ribeiro, Carlos Eduardo *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*O saber não ocupa espaço e sim  
o vazio de nada saber  
(Eça de Queiroz)*

*Dedicatória*

À minha mãe, Alzineide, que mesmo sem ter estudado, teve sabedoria nos momentos difíceis nos quais precisou escolher entre comprar um brinquedo ou livros para os seus filhos.

# Agradecimentos

Aos meus pais Francisco (em memória) e Alzineide, pela vida que me deram, em especial à minha mãe, por sempre ter lutado em função do futuro dos seus filhos. Mãe, você foi e continua sendo um exemplo a ser seguido.

Aos meus irmãos Luiz André, Sidney e Leandro, por fazerem parte da minha vida. Sei que nunca estarei sozinho. André, muito obrigado pelas noites de sono que perdeu enquanto estudava comigo para a prova do Colégio Naval.

À minha tia Maria de Fátima, por ter ajudado financeiramente com meus estudos e por ser minha amiga ao longo da minha jornada.

Aos meus orientadores, Professores Parente e Marcos Gallo, pelas incansáveis orientações, compreensão e parceria para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca, Capitão de Mar e Guerra Lussac Prestes Maia e Capitão de Corveta Rogério de Moraes Calazan por confiarem no meu trabalho.

Aos amigos Alex e Gimenez, por orientações objetivas, as quais me levaram a concretizar este trabalho.

Aos meus amigos das turmas 99 e 00 pelos momentos que compartilhamos enquanto estudávamos na COPPE-UFRJ. O convívio intra turma facilitou bastante a minha adaptação ao ambiente de estudos.

Aos meus chefes navais, Capitão de Mar e Guerra Ciola, Capitães de Fragata Júlio Bitencourt e Romar, pelo apoio e compreensão fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao Capitão de Mar e Guerra Robson Netto da Silva, pela amizade e por ter acumulado o meu trabalho na Marinha diversas vezes, permitindo-me dedicação aos estudos.

Aos meus subordinados, por terem respondido aos meus chefes com profissionalismo e dedicação nos momentos em que tive de me ausentar do trabalho.

Aos militares do Departamento de Medidas Acústicas e Eletromagnéticas do Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP), por sempre terem me recebido com profissionalismo nas vezes em que os visitei para buscar dados e tirar dúvidas.

À minha amada esposa, Simone, por sempre ter me ajudado nos diversos momentos em que eu me encontrava perdido, pelas diversas demonstrações de companheirismo e amor enquanto tive de estudar e por sempre estar ao meu lado, por pior

que parecesse o caminho a ser seguido.

À minha filha, Bianca, minha pequena Bianca, seu sorriso foi e para sempre será a fonte de energia em minha vida. Papai te ama, você não imagina o quanto.

A todos os colaboradores, servidores e alunos do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIOC) por ter me recebido tão bem e me permitirem fazer parte da família.

À Marinha do Brasil, por ter me dado a oportunidade de aprimorar meu conhecimento na COPPE-UFRJ.

Por último, porém não menos importante a Deus, por permitir que tudo isso acontecesse.

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

USO DO EFEITO *LLOYD MIRROR* NA DETECÇÃO DO RUÍDO IRRADIADO  
EM ÁGUAS RASAS

Bruno Nunes Mendes

Março/2021

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro  
Marcos Nicolas Gallo

Programa: Engenharia Oceânica

Apresentam-se, nesta dissertação, procedimentos para reduzir a interferência em sinais de ruído irradiado medidos na Raia Acústica da Marinha Brasileira, este sinal já tratado é gravado em formato de matriz e posteriormente usado para calcular o valor da correlação com a matriz obtida em simulações. Estas últimas usam o efeito Lloyd Mirror que produz interferências construtivas e destrutivas no sinal recebido relacionado ao ruído irradiado dos navios. Para estimar os níveis desses sinais a um metro de distância do navio, método padronizado para especificar esses níveis, torna-se necessário levar em conta as interferências mencionadas.

Dos resultados é possível verificar a eficácia destes procedimentos. Estes adicionalmente permitem achar valores de parâmetros como: distância horizontal e profundidade da fonte. Com poucas modificações nos modelos acredita-se que em trabalhos futuros seja possível calcular outros valores como velocidade do navio, etc.

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

USE OF THE *LLOYD MIRROR* EFFECT ON IRRADIATED NOISE  
DETECTION IN 'SHALLOW WATERS'

Bruno Nunes Mendes

March/2021

Advisors: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Marcos Nicolas Gallo

Department: Ocean Engineering

In this dissertation, procedures are presented to reduce the interference over irradiated noise signals measured in the Acoustic Range of the Brazilian Navy, this signal already treated is recorded in matrix format and later used to calculate the value of the correlation with the matrix obtained in simulations. The latter use the Lloyd Mirror effect which produces constructive and destructive interference in the received signal related to the radiated noise of the ships. In order to estimate the levels of these signals at a distance of one meter from the ship, a standardized method for specifying these levels, it is necessary to take into account the mentioned interference.

From the results it is possible to verify the effectiveness of these procedures. These additionally allow you to find parameter values such as: horizontal distance and depth of the source. With few modifications to the models, it is believed that in future works it is possible to calculate other values such as ship speed, etc.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Raia acústica de Arraial do Cabo . . . . .	2
1.2 Objetivo geral . . . . .	3
1.3 Objetivos específicos . . . . .	3
1.4 Organização da dissertação . . . . .	3
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1 Estado da arte . . . . .	4
2.2 Guia de Ondas Acústico de Águas Rasas . . . . .	6
2.3 Velocidade do som . . . . .	10
2.4 Ruído e unidades . . . . .	12
2.4.1 Ruído irradiado . . . . .	13
2.4.2 Ruído de maquinaria . . . . .	13
2.4.3 Ruído de hélice . . . . .	13
2.4.4 Ruído hidrodinâmico . . . . .	14
2.4.5 Unidades . . . . .	14
2.5 Parâmetros de Acústica Submarina . . . . .	15
<b>3 Efeito <i>Lloyd Mirror</i></b>	<b>18</b>
3.1 Padrão de campo próximo Lloyd-Mirror . . . . .	20
3.2 Espectrograma do Guia de Ondas . . . . .	23
<b>4 Metodologia</b>	<b>26</b>
4.1 modelo <i>gMatrizEspectroDados.m</i> . . . . .	26
4.1.1 Diagrama de blocos <i>gMatrizEspectroDados.m</i> . . . . .	28
4.2 modelo <i>simulacao.m</i> . . . . .	29
4.2.1 Diagrama de blocos <i>simulacao.m</i> . . . . .	31
4.3 modelo <i>calcValorMedioSinal.m</i> . . . . .	31

4.3.1	Diagrama de blocos <i>calcValorMedioSinal.m</i> . . . . .	32
4.4	modelo <i>calcValorMedioDistProf.m</i> . . . . .	33
4.4.1	Diagrama de blocos <i>calcValorMedioDistProf.m</i> . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>35</b>
5.1	Teste dos modelos - arquivo 44C02.wav . . . . .	35
5.1.1	Ruídos . . . . .	35
5.1.2	Comparação entre o sinal no PMA e o sinal médio . . . . .	36
5.1.3	Valores médios de distância e profundidade da fonte . . . . .	36
5.2	Teste dos modelos - arquivo 44C03.wav . . . . .	36
5.2.1	Ruídos . . . . .	36
5.2.2	Comparação entre o sinal no PMA e o sinal médio . . . . .	38
5.2.3	Cálculo de valores médios de distância e profundidade . . . . .	38
5.3	Teste dos modelos - arquivo 7114C03.wav . . . . .	39
5.3.1	Ruídos . . . . .	39
5.3.2	Comparação entre o sinal no PMA e o sinal médio . . . . .	39
5.3.3	Cálculo de valores médios de distância e profundidade . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>42</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>44</b>
<b>A</b>	<b>Técnicas de correção de medidas antes do PMA</b>	<b>48</b>
A.1	Decimação . . . . .	48
A.2	Método de Bartlett . . . . .	49
A.3	Método de Welch . . . . .	50

# Lista de Figuras

2.1	Fenômenos ondulatórios de ondas sonoras e suas relações com o ângulo de incidência em uma superfície com maior impedância acústica (ocorre reflexão total quando o ângulo de incidência é inferior a um certo valor de ângulo crítico). . . . .	7
2.2	Ilustração da lei de Snell para a refração. . . . .	8
2.3	Modos discretos de propagação do som na água, obtidos por Prof. Parente na raia acústica brasileira, em 1980 (adaptado de [1]). . . . .	9
2.4	Espectrograma de frequências, observa-se a região de modos virtuais, região afastada do hidrofone. . . . .	9
2.5	Espectrograma de frequências, observa-se a região do efeito <i>Lloyd Mirror</i> a menos de 300 metros do hidrofone. . . . .	10
2.6	Perfil genérico da velocidade do som em águas profundas (adaptado de [2]). . . . .	11
2.7	Síntese de espectro de ruído irradiado de um navio moderno. . . . .	14
3.1	Configuração do experimento Espelho do Lloyd. . . . .	18
3.2	Percursos direto e refletidos. Adaptado de [3]. . . . .	19
3.3	Exemplo de padrão de interferência <i>Lloyd Mirror</i> , profundidade da fonte 50m, profundidade do receptor 100m, frequência 300 Hz. . . . .	20
3.4	Esquema básico do efeito Lloyd-Mirror, adaptado de [2]. . . . .	21
3.5	Interferências raios direto e refletido, ilustrando os máximos e mínimos. . . . .	23
3.6	Espectrograma da passagem de um navio sintetizada mostrando o efeito <i>Doppler</i> e o efeito <i>Lloyd Mirror</i> . O eixo horizontal mostra o tempo e o eixo vertical a frequência. A cor indica pressão sonora. . . . .	25
4.1	Geometria da corrida na Raia acústica . . . . .	27
4.2	sinal nas proximidades do PMA, a velocidade do navio é constante, 0,0313 s é o tempo de amostragem, observe que o PMA ocorre aproximadamente em 1256 segundos . . . . .	27
4.3	Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar do valor tradicional de 6 dB por oitava. Observa-se valores próximos. . . . .	28

4.4	Este diagrama de blocos descreve o modelo gMatrizEspectroDados.m.	28
4.5	Cálculo de R1 e R2. . . . .	30
4.6	Cálculo de R3. . . . .	30
4.7	Este diagrama de blocos descreve o modelo simulacao.m. . . . .	31
4.8	Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar ao valor tradicional de 6 dB por oitava. Observa-se valores próximos. . .	32
4.9	Este diagrama de blocos descreve o modelo calcValorMedioSinal.m . .	32
4.10	Valores médios de distância e profundidade da fonte. . . . .	33
4.11	Este diagrama de blocos descreve o modelo calcValorMedioDistProf.m que é usado para calcular valores médios de distância e profundidade da fonte. . . . .	34
5.1	Sinal 44C02.wav (ruído de cavitação) depois do processo de tratamento do sinal (gMatrizEspectroDados.m). . . . .	35
5.2	Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar do valor tradicional de 6 dB por oitava. . . . .	36
5.3	Valores médios de distância e profundidade da fonte. . . . .	37
5.4	Sinal 44C03.wav (ruído de cavitação) depois do processo de tratamento do sinal (gMatrizEspectroDados.m). . . . .	37
5.5	Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar do valor tradicional de 6 dB por oitava. . . . .	38
5.6	Valores médios de distância e profundidade da fonte. . . . .	39
5.7	Sinal 7114c03.wav (ruído de cavitação) depois do processo de tratamento do sinal (gMatrizEspectroDados.m). . . . .	39
5.8	Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar do valor tradicional de 6 dB por oitava. . . . .	40
5.9	Valores médios de distância e profundidade da fonte. . . . .	41
A.1	Diagrama em bloco do decimador com redução da taxa de amostragem por um fator M. . . . .	49
A.2	O circuito de decimação completo. . . . .	49

# Lista de Tabelas

5.1 Resultados dos modelos . . . . .	40
--------------------------------------	----

# Capítulo 1

## Introdução

Sinônimo de poder e riqueza de um povo desde a Antiguidade, o mar, um gigante que cobre cerca de  $2/3$  da superfície terrestre e é a via de mais de 90% do comércio internacional, continua, de certo modo, obscuro. Assim, torna-se imperioso o seu conhecimento, que pode ser obtido por meio de técnicas de acústica submarina.

A onda acústica é um importante instrumento de exploração do mar, por se propagar a grandes distâncias [4]. Normalmente, frequências de ondas acústicas entre 10 Hz e 1 MHz são utilizadas com essa finalidade [2]. Entretanto, os levantamentos feitos em grande escala pelos satélites não conseguem penetrar mais do que alguns metros no oceano, devido ao fato da onda eletromagnética não se propagar bem nos meios de boa condução elétrica.

Em termos militares, o uso da acústica submarina concentrou-se historicamente em águas profundas, em grande parte por conta da guerra anti-submarina, seja nas Guerras Mundiais como depois na Guerra Fria [5, 6]. Atualmente, seu uso tem foco maior nas águas rasas, tipicamente com profundidades inferiores a 200 m, pois os conflitos armados passaram a ocorrer em regiões com essas profundezas (Golfo Pérsico e Leste Europeu, por exemplo) e por causa da vigilância de portos, costas e plataformas de petróleo. Outras aplicações militares da acústica submarina em águas rasas são a localização de alvos a longas distâncias, localização de minas, determinação de parâmetros geoacústicos de fundo para previsão de alcance sonar, comunicações submarinas e monitoração de explosões a longa distância.

Submarinos convencionais, devido ao arranjo de propulsão convencional (baterias e motores elétricos), são compactos e silenciosos e por isso praticamente indetectáveis em águas rasas. A fim de diminuir a probabilidade de detecção, operam normalmente em modo passivo. As informações obtidas nesse modo são as marcações ou direções de onde vêm os ruídos irradiados por outro navio. A distância desse navio, que não é conhecida a priori, pode ser estimada por técnicas de análise do movimento do alvo, as quais necessitam que o submarino realize algumas manobras que aumentem a sua exposição.

Os avanços tecnológicos militares sempre implicam em muitas aplicações civis, tais como: exploração de riquezas renováveis (pesca) e não renováveis (minerais), monitoração sísmica, mapeamento da estrutura do oceano e sua topografia, localização de artefatos arqueológicos, monitoração da biologia marinha, monitoração de variações da temperatura e fenômenos físicos associados, como o aquecimento global, entre outras.

## 1.1 Raia acústica de Arraial do Cabo

A necessidade de conhecer o ruído irradiado por nossos navios e submarinos, de realizar medições de propagação de ondas sonoras para diversos perfis de temperaturas em águas rasas (velocidades, profundidades e condições climáticas), permitir medidas corretivas e outras pesquisas levou a Marinha do Brasil a estabelecer uma raia acústica em Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro. Esta raia é interessante por possuir profundidades relativamente grandes e próximas da costa, com variação suave, quando não constante, além de permitir a fácil fixação do hidrofone para a aquisição de dados, facilitando assim a realização de experimentos. Vale ressaltar que esta região é conhecida pela ocorrência do fenômeno de ressurgência, o qual propicia um cenário ímpar de variedades de situações ambientais e de sua avaliação. A raia acústica brasileira é do tipo fixa e foi desenvolvida no final da década de 1970 pelo Dr. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, professor do Programa de Engenharia Oceânica da Coppe/UFRJ.

Como o foco desta dissertação é a detecção do ruído irradiado em águas rasas, os dados obtidos (em diferentes corridas) nesta raia acústica foram muito importantes para a realização deste trabalho. A seguir são apresentados alguns pontos principais relacionados ao ruído irradiado:

- **Detecção submarina** - Analisando os sinais irradiados pelos nossos navios e submarinos, é possível obter níveis pequenos de ruídos e de operação de forma a diminuir a possibilidade de serem detectados, além de servir de suporte para a operação de sistemas passivos e controle de navegação.
- **Dedução dos níveis de ruído produzidos na fonte** - Para estimar os níveis de pressão sonora produzidos na fonte geradora de ruído (SPL @ 1m), através da caracterização do nível de pressão sonora produzido por cada tipo de embarcação.
- **Parâmetros geoacústicos de fundo** - A faixa de frequências de interesse nesta dissertação corresponde a altas frequências onde as ondas tem pouca penetração no sedimento e onde as ondas sofrem principalmente absorção pela

camada superficial do sedimento [7]. Através da análise deste ruído irradiado é possível a determinação de parâmetros geoacústicos de fundo e do meio.

## 1.2 Objetivo geral

Estabelecer um método padronizado, considerando o efeito *Lloyd Mirror*, para reduzir o nível de interferências no sinal de detecção submarina quando este é medido a 1 metro de distância de um navio. Esta redução é necessária para eliminar as interferências provenientes de outras fontes além do próprio navio em si (como exemplo o ruído de cavitação do gerado pelo hélice).

## 1.3 Objetivos específicos

Como objetivo específico pode-se mencionar o desenvolvimento de modelos para a redução de interferências de ruído que incorporem o efeito *Lloyd Mirror* na medição do ruído irradiado.

## 1.4 Organização da dissertação

Para atingir os seus objetivos, esta dissertação foi organizada da seguinte maneira: no capítulo 1 uma introdução à dissertação conjuntamente com os objetivos; no capítulo 2 apresentam-se a revisão bibliográfica dos conceitos base passando do estado da arte, conceito de guia de ondas acústico, velocidade do som, ruído, unidades e, para terminar, a descrição de alguns parâmetros acústicos; no capítulo 3 apresentam-se separadamente os fundamentos do efeito *Lloyd Mirror* base teórica principal deste trabalho; no capítulo 4 a metodologia com a descrição detalhada dos modelos desenvolvidos nesta dissertação; e, nos capítulos 5 e 6, os resultados e as conclusões do trabalho respectivamente. As referências bibliográficas assim como o *apêndice A* estão presentes na parte final complementando o trabalho.

# Capítulo 2

## Revisão bibliográfica

### 2.1 Estado da arte

As primeiras atividades na raia acústica de Arraial do Cabo foram conduzidas em 1977 por PARENTE [8], quando obteve o primeiro registro de propagação por modos em águas rasas, por meio do efeito Lloyd Mirror. O sinal registrado era característico de uma propagação por modos em banda larga originados de ruídos de cavitação de navio, onde se observavam estrias produzidas pelo padrão de interferências. Os primeiros resultados da análise desses registros foram publicados por VIANNA e SOARES-FILHO [9], em 1986.

ZAULI [10] investigou o uso de processamento digital de sinais (filtragem espacial, ou conformação de feixe) na melhoria da relação sinal/ruído em sistemas acústicos submarinos. A utilização considerada é a diminuição da probabilidade de erros de transmissão em um enlace de comunicação digital por acústica em águas profundas.

Os estudos sobre propagação acústica por modos normais tiveram início na COPPE com MACHADO [11] (1996) com sua dissertação *Um estudo sobre propagação do som no mar*. Dentre as possibilidades de abordagem do problema da propagação acústica em baixa frequência, os modos normais têm demonstrado fornecer bons resultados, assim como outros métodos. A teoria dos modos normais tem suas origens nos anos 1940, embora, devido as limitações computacionais, começou a ser implementada numericamente a partir dos anos 1970, tendo maior desenvolvimento nos anos 1980 e 1990.

Em 1997, seguiram-se os trabalhos de ALVES [12] sobre investigações da propagação da onda por modos e ROCHA [13] sobre a aplicação de técnicas de inversão para determinação da posição de uma fonte sonora monocromática no interior de um guia de ondas através de coincidência de modos normais. Esses trabalhos representaram as primeiras tentativas de empregar a inversão modal no cenário da raia

acústica da Marinha do Brasil.

Em 2008, SOUSA [14] usou técnicas de *Matched Field Processing* (MFP) com sinais de banda larga na estimação de distâncias de fontes. O método empregou diferentes tipos de estimadores e foi testado, inicialmente, por meio de simulações com uso de dados experimentais, fornecidos pela Universidade do Algarve (UAlg), Portugal (oriundos do experimento INTIMATE 96), de uma fonte sonora conhecida; e, posteriormente, com uso do ruídos de cavitação de navios de superfície (fonte sonora desconhecida). Os sinais foram gravados por submarinos da Marinha do Brasil e sobre um único hidrofone, em distâncias que variaram entre 6 a 20 km. O trabalho pode confirmar que o uso de um único hidrofone compensa a falta de resolução espacial (abertura) com o processamento dos sinais no domínio do tempo, o que dá origem a uma espécie de MFP multifrequência, capaz de estimar a distância da fonte com certa acurácia.

Em 2010, MAIA [15] usou técnicas de inversão geoacústica na localização passiva de fontes em águas rasas, com uso de MFP aplicado a sinais CW multitons e de técnicas *Model-Based Matched Filter* (MBMF), no domínio da frequência, aplicado a sinais tipo *chirp*, *Linear Frequency Modulated* (LFM) densamente amostrados.

Em 2013, PESSEK [1] apresentou um método acústico interferométrico para estimativa de distância passiva. O trabalho propôs a quantificação do padrão de interferência modal, em uma dada área de observação, por meio do invariante  $\beta$  do guia de ondas, um parâmetro adimensional que carrega uma espécie de assinatura da propagação do som característico daquele ambiente.

Em 2015, CHAVES [16] ampliou o trabalho inicial de PESSEK [5] e propôs o uso do comprimento de onda de interferência entre modos adjacentes de mais baixa ordem (observados em espectrogramas) para previsão das estrias e para a estimativa da distância e da velocidade da fonte acústica.

MARIN [17] (2015) abordou a estimativa de perturbações de velocidade do som em um ambiente de águas rasas, com o uso de tomografia acústica oceânica, utiliza variações de tempo de percurso acústico para obter, por inversão, perturbações de velocidade do som, com base no processamento dos dados do experimento INTIMATE 96, realizado em 1996 ao largo da costa de Portugal.

Em 2016, XAVIER [18] apresentou um estudo sobre o uso da interferometria acústica na caracterização de ruído de banda larga irradiado por navios. Este estudo teve como base medições acústicas do ruído produzido por um navio na raia acústica brasileira. Programas de domínio público foram usados de forma a entender as características dos padrões de interferência encontrados nas medições. Estes programas utilizam modelos de propagação baseados na teoria de traçado de raios e modos normais. Os resultados mostraram que esses padrões de interferência são fortemente influenciados pelas primeiras chegadas do sinal. Verificou-se que as che-

gadas estão relacionadas aos raios que possuem um ângulo incidente maior que o ângulo crítico, ou seja, elas estão, também, ligadas aos modos propagantes.

Em 2018, SIMÕES [19] estendeu o modelo clássico de guia de ondas de duas camadas (oceano e fundo) de Pekeris, para um modelo de três camadas, com variantes para o tratamento dos modos que interagem com a superfície e com o fundo, considerando um canal adiabático e temporalmente invariante, usa as propriedades de acoplamento adiabático dos modos.

Em 2018, BARROSO apresentou, em sua tese de doutorado [20], uma metodologia para localização tridimensional de fontes em águas rasas, fazendo uso de vários modelos acústicos tridimensionais, em especial modelos contemporâneos, os quais são combinados com tradicionais técnicas de processamento por campo casado [20]. Barroso propôs aproveitar a quebra da simetria azimutal do ambiente, decorrente das variações batimétricas, a fim de se conhecer a terceira dimensão do problema - a direção da fonte. A performance da metodologia proposta foi avaliada por meio de dados experimentais coletados sobre um único arranjo vertical de hidrofone, em uma região no mar ao norte da ilha de Elba, no litoral oeste da Itália. Os resultados obtidos indicaram ser possível localizar uma fonte estática de banda estreita, em termos de distância, profundidade e marcação, dentro de uma margem de erro aceitável, superando os resultados, disponíveis na literatura, sobre localizações pretéritas, realizadas por meio de modelos bidimensionais e com uso do mesmo conjunto de dados experimentais aqui empregados.

Recentemente ANDRADE [21], usou o efeito *Lloyd Mirror* conjuntamente com o efeito *Doppler* para a determinação de parâmetros de alvos submarinos, em especial a sua profundidade. Foram usados dados de campanhas de medidas correspondentes a medições de ruídos irradiados, obtidos na raia acústica brasileira e proporcionados pelo Centro de Análise de Sistemas Operativos (CASOP), localizado em Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro.

Esta dissertação é uma continuação do trabalhos anteriores, em especial à parte que corresponde ao uso do efeito de *Lloyd Mirror*. A seguir são abordados brevemente os fundamentos de acústica submarina importantes para o encadeamento do trabalho.

## 2.2 Guia de Ondas Acústico de Águas Rasas

Para águas rasas, por exemplo a profundidades de até 200 m, e com características físico-químicas uniformes, o mar atua como um guia de ondas de placas paralelas, atenuando o sinal conforme o seu alcance [22]. Adicionalmente, tendo em mente as impedâncias acústicas dos meios na interface ar/mar (ar:  $415 Pa.s/m$  e água:  $1.48 \times 10^6 Pa.s/m$  [23]) e considerando a superfície do mar uma superfície plana e

perfeitamente lisa, esta atua como um refletor de som perfeito, promovendo mudança de fase entre as ondas incidente e refletida de  $180^\circ$  e coerência no som que chega ao receptor, ou seja, os caminhos entre as ondas sonoras refletidas têm diferença de fase constante entre si [2]. Porém, a rugosidade da superfície do mar causa, por espalhamento, alguma perda de energia nas ondas refletidas e aumento no nível de ruído da medida [2].

Como limite inferior, esse guia de ondas possui o fundo do mar, um limite com perdas e que apresenta uma topografia fortemente variável em todas as bacias oceânicas. Em termos de modelagem acústica, o fundo do mar é definitivamente o meio mais complexo, exibindo características de refletividade vastamente diferentes em diferentes localizações [2].

No fundo do mar, se a velocidade de propagação do som no sedimento é maior do que na água, o que é a situação mais comum, para ângulos de incidência maiores do que um determinado valor de ângulo crítico, a reflexão também é total (ilustrado na figura 2.1). Se em uma primeira aproximação se considera o fundo rígido, a reflexão também é total para qualquer ângulo de incidência.

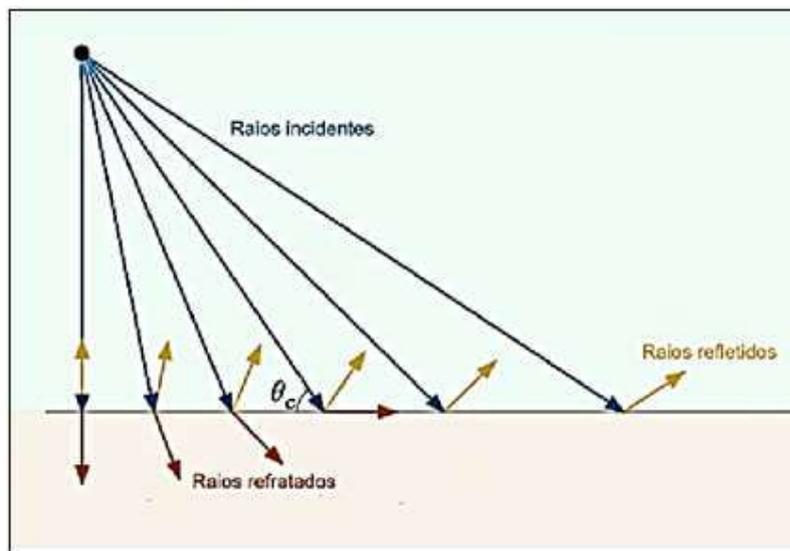


Figura 2.1: Fenômenos ondulatórios de ondas sonoras e suas relações com o ângulo de incidência em uma superfície com maior impedância acústica (ocorre reflexão total quando o ângulo de incidência é inferior a um certo valor de ângulo crítico).

Uma segunda aproximação, conhecida como guia de ondas de Pekeris, considera o fundo penetrável, com velocidade de propagação e densidades constantes e superiores aos valores destas grandezas na água. Neste caso, teremos para ângulos de incidência (em relação à vertical) superiores ao ângulo crítico, modos reais (situação em que é detalhada na figura 2.1) e para ângulos inferiores ao ângulo crítico, modos imaginários ou virtuais [2].

Na figura 2.2 é possível também Observar que as velocidades  $c_1 = \Delta R_1 / \Delta t$  e

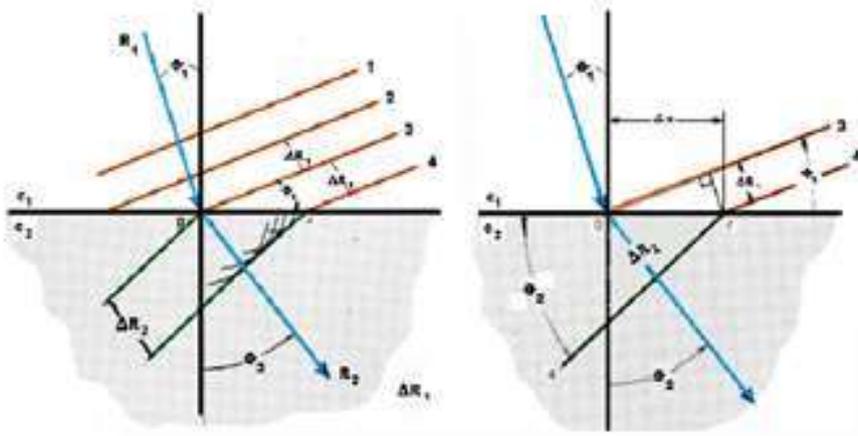


Figura 2.2: Ilustração da lei de Snell para a refração.

$c_2 = \Delta R_2 / \Delta t$ , além das diferenças entre os frentes de onda  $\Delta R_1 = \Delta x \text{sen}(\theta_1)$  e que  $\Delta R_2 = \Delta x \text{sen}(\theta_2)$ , nos leva finalmente a  $\text{sen}(\theta_1)/c_1 = \text{sen}(\theta_2)/c_2$  (Adaptado das notas de aulas da disciplina, de autoria do Prof. Parente).

O conceito do ângulo crítico é extremamente importante para o correto entendimento da natureza da propagação acústica em um guia de ondas, especialmente em ambientes de águas rasas, e é dado pela expressão 2.1 [2]:

$$\theta_c = \text{asin} \left( \frac{c}{c_b} \right) \quad (2.1)$$

onde  $c$  representa a velocidade de propagação do som na coluna da água (considerada homogênea) e  $c_b$  representa a velocidade de propagação do som no fundo (considerado um fluido homogêneo), sendo  $c_b > c$ . Valores típicos para  $\theta_c$  variam entre  $10^\circ$  e  $30^\circ$  para sedimentos na plataforma continental [2].

Vamos abordar somente a solução para ângulos superiores ao crítico e, portanto somente os modos com autovalores reais. Os modos imaginários são atenuados exponencialmente com a distância, portanto conforme nos afastamos da fonte, na região do campo distante, os modos discretos dominam a propagação acústica.

É importante apontar que nesta última aproximação foram assumidas as seguintes hipóteses: a superfície é modelada como "pressure-release"; o fundo é modelado como semi-espaço fluido; o guia de ondas tem profundidade constante; a velocidade de propagação é constante na água e no fundo; as velocidades de propagação do som, assim como as densidades, são constantes na água e no fundo, sendo maiores no fundo; a fonte se encontra na posição  $(0, z_o)$ ; é considerada a simetria cilíndrica [24].

A interação com a superfície e o fundo, gera o que se chama de propagação por modos e a aparição de um padrão de interferências no receptor (figura 2.3).

Padrões de interferências, ou estrias, são vistas frequentemente em espectrogra-

mas acústicos submarinos de fontes de banda larga com níveis contínuos espectrais da fonte.

Para uma fonte à longa distância, cuja descrição da onda por modos normais seja válida, surgem as raias a partir das interferências mútuas construtivas ou destrutivas entre modos. A onda interage inúmeras vezes com as fronteiras do guia de onda, resultando em uma complicada estrutura de múltiplos percursos.

No caso da raia acústica, pode-se identificar três regiões distintas de propagação de som na água, a saber:

- Região de propagação por modos discretos – a cerca de alguns quilômetros do hidrofone receptor, ver figura 2.3:

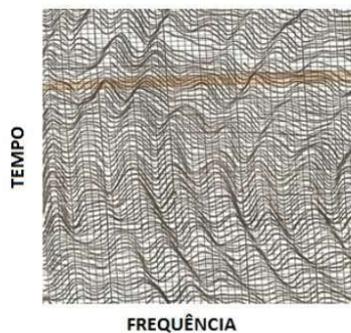


Figura 2.3: Modos discretos de propagação do som na água, obtidos por Prof. Parente na raia acústica brasileira, em 1980 (adaptado de [1]).

- Região de propagação por modos virtuais – a cerca de 300 a 1000 metros do hidrofone, onde, os *eigen rays* interferem fortemente com o fundo ver figura 2.4:

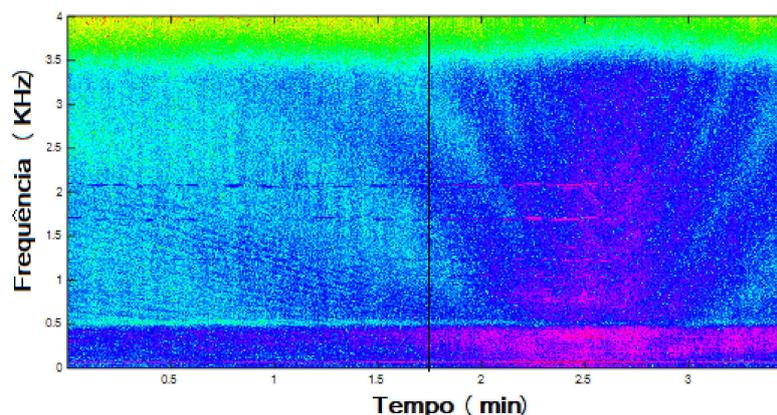


Figura 2.4: Espectrograma de frequências, observa-se a região de modos virtuais, região afastada do hidrofone.

- Região de efeito *Lloyd Mirror* – a menos de 300 metros do hidrofone, ver figura 2.5:

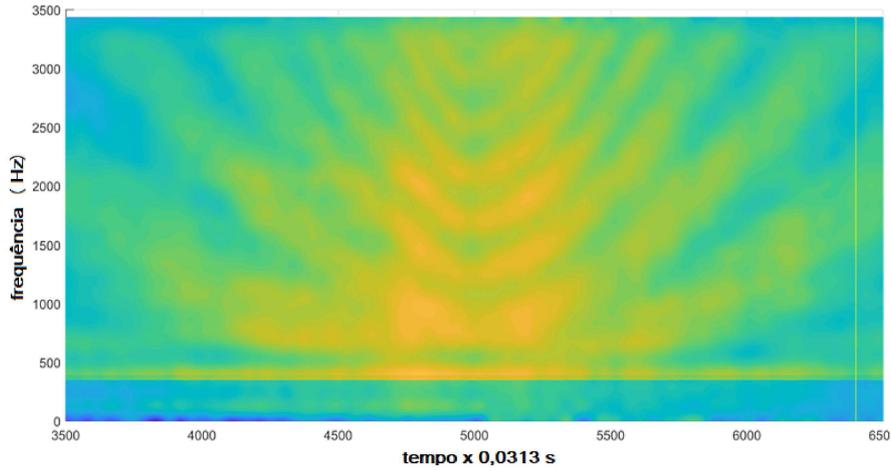


Figura 2.5: Espectrograma de frequências, observa-se a região do efeito *Lloyd Mirror* a menos de 300 metros do hidrofone.

## 2.3 Velocidade do som

A velocidade do som no guia de ondas desempenha o mesmo papel que o índice de refração faz na óptica, e, normalmente, essa velocidade é relacionada às densidades e às compressibilidades dos fluidos [2].

No oceano, a densidade está relacionada à pressão estática, à salinidade e à temperatura [2]. A velocidade do som no oceano, por sua vez, é uma função crescente da temperatura, da salinidade, e da pressão, sendo esta última uma função da profundidade. Costuma-se expressar a velocidade do som no mar ( $c$ ) como uma função empírica de três variáveis independentes: temperatura ( $T$ ), em graus centígrados; salinidade ( $S$ ), em partes por mil; e profundidade ( $z$ ), em metros. Uma expressão simplificada para essa dependência é dada na equação (2.2) [2]:

$$c(T, S, z) = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z \quad (2.2)$$

Na maioria dos casos, a Equação (2.2) tem uma acurácia suficiente porém, em alguns casos onde são necessários resultados mais acurados, diferentes fórmulas são usadas [25, 26].

Mudanças sazonais e diurnas afetam os parâmetros oceanográficos no oceano. Além disso, todos esses parâmetros variam em função da geografia [2].

Na Figura 2.6, pode-se observar um conjunto típico de perfis de velocidade do som (PVS) indicando a maior variabilidade perto da superfície em função da estação climática e da hora do dia.

A influência da temperatura na variação do PVS pode ser medida e observada ao longo do ano e também ao longo do dia. Durante a estação mais quente e,

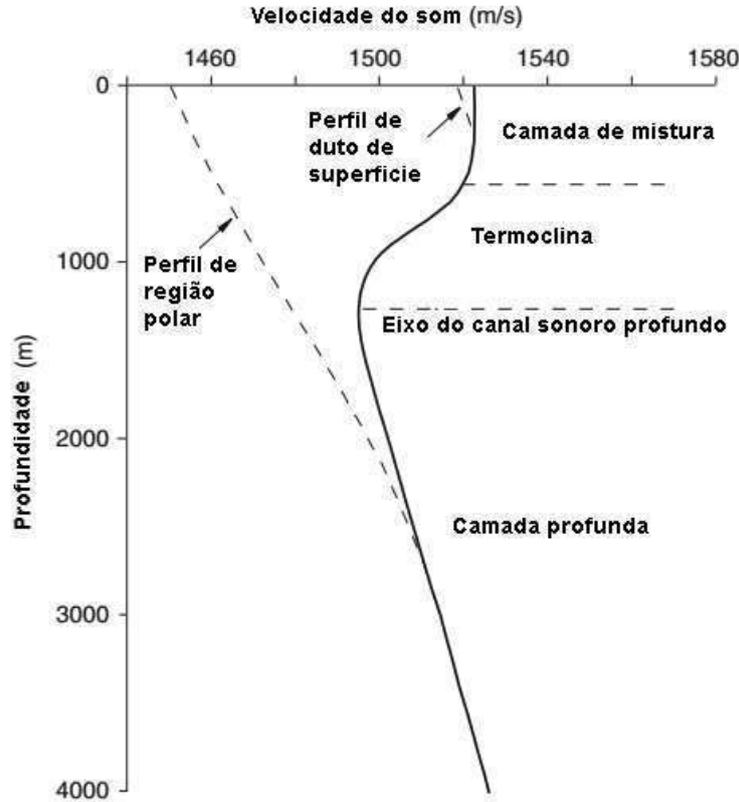


Figura 2.6: Perfil genérico da velocidade do som em águas profundas (adaptado de [2]).

também, na parte mais quente do dia, quando a temperatura aumenta em função de um maior aquecimento da superfície do mar, observa-se que a velocidade do som se torna maior nessa região. Esse aquecimento próximo da superfície (e subsequente resfriamento) tem um profundo efeito nos sonares das embarcações de superfície [2]. Assim, o aquecimento diurno causa desempenho de sonar mais fraco à tarde [2], um fenômeno conhecido como efeito da tarde. A variabilidade sazonal, no entanto, é muito maior e, portanto, mais importante no que diz respeito à acústica submarina.

Em regiões da plataforma continental (águas rasas) com profundidades da ordem de algumas centenas de metros, apenas a parte superior do PVS na figura 2.6 é relevante. Esta região superior depende da estação e da hora do dia, que, por sua vez, afetam a propagação do som na coluna de água.

Em regiões não polares, as propriedades oceanográficas da água perto da superfície resultam da mistura devida à atividade do vento e das ondas na interface entre o ar e o mar [2].

Geralmente, essa camada próxima à superfície apresenta uma temperatura constante, exceto quando a superfície está calma e quente [2]. Assim, nesta camada mista isotérmica, temos um perfil de velocidade do som que aumenta suavemente com a profundidade por causa do efeito do gradiente de pressão [2], o último termo

na Equação 2.2. Essa é a região do duto de superfície, e sua existência depende das condições oceanográficas próximas à superfície.

Note que quanto mais agitada a parte superior da camada, mais profunda se torna a camada de mistura e menos provável se torna a possibilidade de haver qualquer fuga de raios dessa camada. Portanto, a tempestade atmosférica aliada ao efeito do vento podem interferir misturando as águas próximas à superfície, de modo que um duto seja criado ou, caso já exista, tenha suas dimensões ampliadas [2].

Abaixo da camada de mistura, observa-se a presença de uma camada denominada termoclina, onde a temperatura diminui com profundidade e, portanto, a velocidade do som também diminui gradativamente [2].

É importante destacar que essa estrutura da velocidade do som do oceano é variável pois o oceano possui seu próprio sistema climático. Some-se a isso a influência das correntes, no caso da costa brasileira, poderíamos citar a forte influência da corrente do Brasil, da corrente das Guianas e da corrente das Falklands. A corrente das Guianas e a corrente do Brasil surgem a partir da divisão da corrente Sul Equatorial quando esta encontra a costa brasileira, deslocando-se no sentido leste-oeste. Dessa divisão, surgem dois ramos: a corrente do Brasil (que segue no sentido sul), e a corrente das Guianas (que segue no sentido noroeste), dirigindo-se ao Caribe. Ambas são correntes de águas não profundas e apresentam temperatura quente, pois se originam de áreas equatoriais, influenciando diretamente na formação da camada de mistura [21].

## 2.4 Ruído e unidades

Ruído é qualquer sinal sonoro que caracteriza um evento sonoro, sem nenhuma outra finalidade, tendo portanto uma natureza aleatória. O mar, ao ser bom condutor do som, é também condutor de ruídos que podem interferir com a propagação e recepção de sinais acústicos. Qualquer fenômeno que cause perturbações de pressão na face de um transdutor/hidrofone de um sistema acústico, exposto ao oceano, depois de identificadas e removidas todas as fontes próximas, será interpretado como ruído acústico. Para a perfeita operação de um sistema acústico, as fontes e os tipos de ruído devem ser bem caracterizados. Uma boa caracterização está relacionada com as unidades de medida e as dimensões. Como a acústica submarina contém uma série de parâmetros que são usados em outras áreas da física, é importante ser rigoroso na escolha das unidades apropriadas e a sua dimensão. A seguir, será apresentado: o ruído irradiado e seus diferentes tipos, dando especial ênfase ao ruído de cavitação (assunto da dissertação), a continuação apresentam-se uma seção das unidades relacionadas com o ruído irradiado, para finalmente apresentar a seção das definições formais de alguns parâmetros de acústica submarina.

### 2.4.1 Ruído irradiado

Ruído irradiado é aquele induzido no sistema pelos equipamentos de medida (atualmente não é um problema com os amplificadores modernos, dotados de filtros) ou pela própria embarcação. A magnitude deste ruído captado pelo hidrofone está diretamente ligada à diretividade do hidrofone e à sua localização [27].

Existem três tipos principais de ruídos gerados por embarcações: os gerados pela maquinaria, pelo hélice (de interesse nesta dissertação) e pelo efeito hidrodinâmico.

### 2.4.2 Ruído de maquinaria

O ruído de maquinaria é criado pelas máquinas de propulsão ou auxiliares, geradores, bombas, engrenagens, fricção, explosão de cilindros, compressores, tubulações e válvulas, e tudo que provoque vibração. Sua contribuição para o ruído próprio ocorre principalmente em baixas frequências como componentes tonais (identificadas como linhas discretas). Seu espectro é de frequência correspondente as vibrações mecânicas (da ordem de 100 Hz com diversos múltiplos). Navios de posicionamento dinâmico e veículos de controle remoto, em geral possuem diversos “thrusters” com hélices, em alta rotação, gerando ruído em frequências mais altas que de navios de propulsão convencional.

### 2.4.3 Ruído de hélice

Embora o hélice seja parte do sistema de propulsão, seu sinal acústico é altamente diferencial se comparado aos sinais gerados pelos outros componentes do sistema propulsor. Este ruído é usado nesta dissertação como fonte acústica. O som produzido é um chiado que normalmente domina o extremo de alta frequência do espectro do ruído do navio.

O ruído do hélice é provocado pela cavitação (fenômeno de formação de regiões de baixa pressão, menor do que a pressão circunvizinha) ou pela excitação ressonante do hélice no casco. Pressões negativas nas pontas dos hélices provocam a ruptura das moléculas de água, fazendo surgir minúsculas bolhas de gás que entram em colapso logo em seguida, emitindo um som cujo espectro é concentrado entre 100 e 1000 Hz [28]. Em geral a cavitação do hélice está associada a componentes de banda larga. O aumento da velocidade aumenta a intensidade e diminui a frequência central do pico de banda larga. As frequências correspondentes à rotação das pás do hélice modulam em amplitude o ruído, provocando o surgimento de picos correspondentes. Os submarinos modernos possuem grandes hélices com muitas pás, o que diminui a cavitação, mas à medida que a velocidade aumenta ainda aparece o ruído de cavitação. Na figura 2.7, apresenta-se um exemplo de síntese de espectro de ruído

irradiado de um navio que possui 1 hélice com 4 pás. A escala de frequência é logarítmica e a de intensidade da fonte (SL) é linear (figura retirada de PARENTE, C.E., ZAULI, R., 1992, Caracterização do sinal disponível para a detecção acústica passiva, Relatório técnico para a Firma SFB, Rio de Janeiro, RJ).

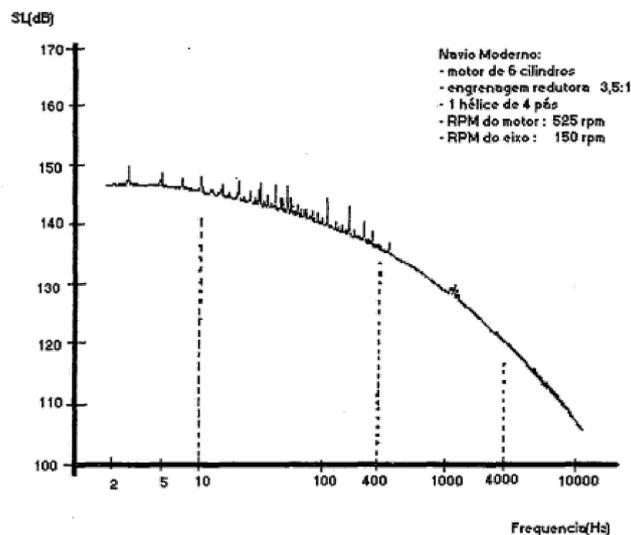


Figura 2.7: Síntese de espectro de ruído irradiado de um navio moderno.

O ruído das máquinas é produzido no interior das embarcações, sendo transmitido à água através do casco; já o ruído do hélice se origina externamente ao casco, pelo hélice em movimento. Os hélices gerarão diferentes sons, dependendo se estão cavitando ou não e conforme o nível de cavitação.

#### 2.4.4 Ruído hidrodinâmico

O ruído hidrodinâmico é causado pela proa rompendo a água, e a passagem da água e de bolhas de ar ao longo do corpo do veículo ou hidrofone.

Este ruído aumenta fortemente com o aumento da velocidade do veículo. O tráfego de navios distantes pode ser o contribuinte mais significativo para o ruído de fundo entre 5 a 200 Hz, com níveis que podem chegar a até 80 dB @  $1\mu Pa$ . O tráfego de navios próximos, especialmente os de posicionamento dinâmico, são a maior fonte de ruído acústico, atingindo frequências a até dezena de kHz, não só devido aos “thrusters”, mas também devido à proximidade, impedindo a absorção maior das altas frequências.

#### 2.4.5 Unidades

O ruído irradiado é analisado em termos de nível de intensidade sonora, cuja unidade de medida é o decibel. Considera-se ruído de interesse o que provém de áreas

distantes, correspondendo à intensidade medida a uma determinada distância da fonte (deverá ser elevada) ajustada à referência padrão, geralmente um metro do centro da fonte.

O decibel (dB) é a unidade dominante na acústica submarina e denota uma razão de intensidades (não pressões) expressa em termos de uma escala logarítmica (base 10). Duas intensidades,  $I_1$  e  $I_2$ , têm uma razão  $I_1/I_2$  em decibéis de  $10 \log(I_1/I_2)$  dB. Intensidades absolutas podem, portanto, ser expressas usando uma intensidade de referência. A intensidade de referência atualmente aceita em acústica submarina é baseada em uma pressão de referência de um micropascal ( $1\mu Pa$ ) [27]. Portanto, tomando  $I_2$  como a intensidade de uma onda plana de pressão  $1\mu Pa$ , uma onda sonora com uma intensidade de, digamos, um milhão de vezes a de uma onda plana de pressão *rms*  $1\mu Pa$  tem um nível de  $10 \log(10^6/1) \equiv 60 \text{ dB re } 1 \mu Pa$  [29]. Esta definição não se concentra na potência irradiada de uma fonte, senão na intensidade a uma distância. O conceito físico importante, entretanto, é que uma fonte emite uma certa potência por unidade de ângulo sólido (que pode variar com a direção)[30].

As razões de pressão (p) são expressas em *dB re*  $1 \mu Pa$  tomando  $20 \log(p_1/p_2)$  onde se entende que a referência se origina da intensidade de uma onda plana de pressão igual a  $1\mu Pa$ . A intensidade média,  $I$ , de uma onda plana com pressão *rms*  $p$  em um meio de densidade  $\rho$  e velocidade do som  $c$  é  $I = p^2/(\rho c)$ . Na água do mar,  $(\rho c)_{\text{água}}$  é  $1,5 \times 10^6 \text{ Pa.s.m}^{-1}$  de forma que uma onda plana de pressão *rms*  $1\mu Pa$  tem uma intensidade de  $6,76 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2$ .

Para referência, mencionamos também as unidades relevantes no ar onde a pressão de referência, relacionada com, mais ou menos, o nível mínimo de som que podemos ouvir, é  $20\mu Pa$ . Este é um nível de pressão  $26 \text{ dB}$  superior à referência da água. Além disso, como  $(\rho c)_{\text{ar}} \approx 420$ , o nível de intensidade associado a esta referência é  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Portanto, deve-se ter cuidado ao relacionar unidades entre água e ar, sendo a intensidade de referência do último mais de  $60 \text{ dB}$  maior do que a anterior [29].

## 2.5 Parâmetros de Acústica Submarina

Uma série de quantidades e termos diferentes são usados em relação ao ruído submarino.

### 1.- Banda de oitava (1/3)

Definição geral: uma banda de frequência cuja largura de banda é um terço de uma oitava.

Em aplicações práticas, a largura dos filtros é definida para um décimo de década e a frequência central e com a propriedade de que a soma da potência

em todas as bandas adjacentes de 1/3 de oitava cobrindo toda a largura de banda de um determinado sinal é igual à potência total do sinal.

A definição específica: relacionada à análise de ruído e audiometria está intimamente ligada ao conceito de largura de banda crítica do sistema auditivo de mamíferos e ao modelo auditivo comumente usado do ouvido de mamíferos como um banco de filtros estreitos e sobrepostos com proporção constante de largura de banda para frequência central (Fator Q)[31].

## 2.- Som transiente

Um termo que descreve as propriedades temporais de um som. Som de duração relativamente curta, com início e fim, em um período de tempo relativamente curto. O som transiente inclui sons de explosões, sons de armas de ar, bate-estacas e sonares [31].

Um som com um início e final claro ou exponencial decadente sem restrições de largura de banda e sem restrições para o produto de largura de banda de tempo quando a faixa de frequência é banda larga. Sons transitórios têm potência e energia finitas. A potência do sinal é altamente dependente da janela de tempo de análise.

O som transiente se subdivide em pulsado e impulsivo, segundo [32] o pulsado é um som com um início agudo e bem definido e um final agudo ou gradualmente reduzido. O sinal é de banda larga com um pequeno produto de largura de banda de tempo e o impulsivo é aquele que não é pulsado.

## 3.- Pressão sonora $p(t)$ em [Pa]

A diferença entre a pressão total instantânea e a pressão que existiria na ausência de som. Pressão instantânea no tempo  $t$ .

## 4.- Pico de pressão sonora $p_{pico}$ em [Pa]

Relacionado à pressão sonora máxima durante um intervalo de tempo determinado:

$$p_{pico} = \max(\text{abs}(p(t)))$$

## 5.- Pressão sonora pico a pico $p_{p-p}$ em [Pa]

A soma da pressão sonora máxima e o valor absoluto da pressão sonora mínima durante um tempo determinado:

$$p_{p-p} = \max(p(t)) - \min(p(t))$$

## 6.- RMS Pressão sonora $p_{rms}$ em [Pa]

A raiz quadrada da pressão quadrada média, onde a pressão quadrada média é a integral de tempo da pressão sonora quadrada em um intervalo de tempo específico dividido pela duração do intervalo de tempo:

$$p_{rms} = \sqrt{1/T \int_T p(t)^2 dt}$$

## 7.- Largura de banda $BW$ em $[Hz]$

A diferença entre os limites superior e inferior do espectro de potência de um sinal ou resposta de frequência de um filtro.

Abordagens práticas incluem:

### 7.1) RMS- $BW$

$$BW = \sqrt{\frac{\int (f - f_c)^2 - s^2(f) df}{\int s^2(f) df}}$$

onde  $f_c$  é a frequência central, e  $s$  a densidade espectral de potência do sinal.

### 7.2) -3dB $BW$

Diferença entre a frequência mais alta e a frequência mais baixa onde:  $s(f) = \max(s(f)) - 3dB$

### 7.3) -10dB $BW$

Diferença entre a frequência mais alta e a frequência mais baixa onde:  $s(f) = \max(s(f)) - 10dB$

### 7.4) 90% dB $BW$

A diferença entre os limites de frequência superior e inferior de uma banda que é simétrica em torno do frequência centróide e que contém 90% da energia total do sinal.

## Capítulo 3

### Efeito *Lloyd Mirror*

O efeito *Lloyd Mirror* é um fenômeno óptico que foi descrito pela primeira vez em 1834 por Humphrey Lloyd em Transactions da Academia Real de Ciências Irlandesa [33] e em seu livro *Elementary Treatise on the Wave-Theory of Light*. Seu objetivo original era fornecer evidências com relação à natureza ondulatória da luz, estas evidências seriam adicionais às fornecidas por Thomas Young e Augustin-Jean Fresnel. No experimento, a luz de uma fonte de fenda monocromática reflete em uma superfície de vidro em um pequeno ângulo, esta luz parece vir de uma fonte virtual. A luz refletida interfere na luz direta da fonte, formando franjas de interferência, como podemos ver na figura 3.1:

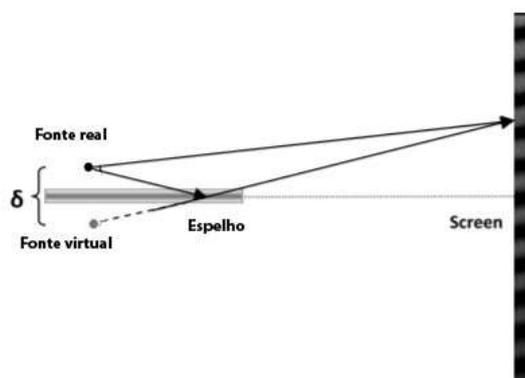


Figura 3.1: Configuração do experimento Espelho do Lloyd.

Em Acústica Submarina quando a superfície do mar é suave e perfeitamente refletora, o som de uma fonte pontual localizada logo abaixo da superfície da água gera interferência construtiva e destrutiva entre os percursos diretos e os percursos refletidos (figura 3.2) das ondas que chegam no receptor.

O som refletido na superfície do mar pode ser considerado originário de uma fonte-imagem localizada no lado oposto (imagem espelhada) da superfície (figura 3.2). Este sinal da imagem terá uma amplitude quase igual à do sinal incidente, mas

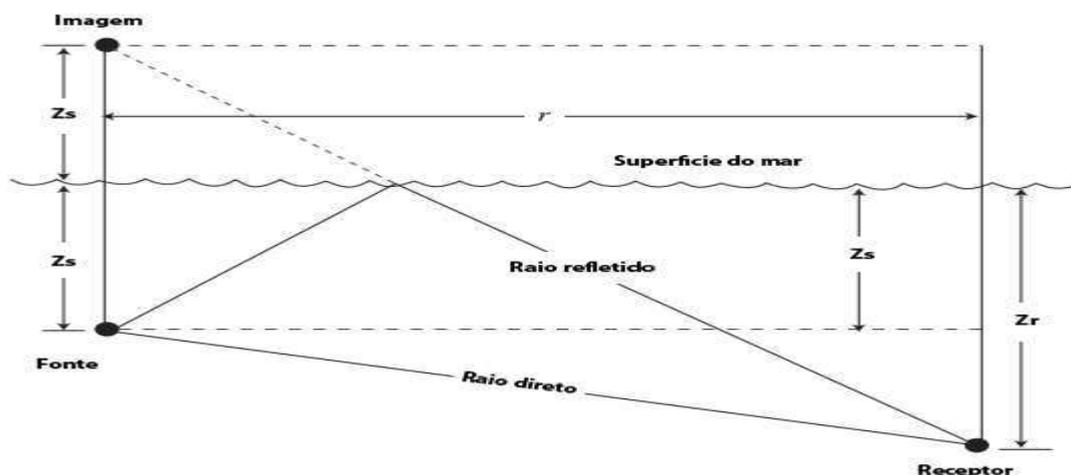


Figura 3.2: Percursos direto e refletidos. Adaptado de [3]

estará fora de fase, ou seja as reflexões sonoras estarão quase 180 graus fora de fase com as ondas incidentes. O efeito espelho de Lloyd tem sido implicado como tendo um papel importante na explicação de por que animais marinhos como peixes-boi e baleias foram atingidos repetidamente por barcos e navios. A interferência causada pelo espelho do Lloyd faz com que os sons das hélices de baixa frequência não sejam discerníveis perto da superfície, onde a maioria dos acidentes ocorre. Isso ocorre porque, na superfície, esta mudança de fase combinada aos efeitos de propagação e sombreamento acústico, tem como resultado o fato do animal marinho ser incapaz de ouvir uma embarcação se aproximando antes de ser atropelado ou aprisionado pelas forças hidrodinâmicas da passagem da embarcação [34].

Quando os dois sinais se recombinaem no receptor, eles se sobrepõem e causam interferência. O caminho refletido na superfície não terá apenas um deslocamento de  $180^\circ$  de fase devido à reflexão, mas também terá um segundo deslocamento de fase devido às diferenças no tempo de viagem (delays) ao longo dos dois caminhos. Quando eles se recombinaem, eles produzem um padrão de interferência exclusivo chamado Efeito de Espelho de Lloyd. A figura 3.3 mostra um padrão de interferência típico desse efeito.

Em geral, o padrão de interferências pode ser dividido em três regiões distintas, com base no intervalo. Na região do campo próximo, normalmente muito próximo da fonte, o caminho refletido na superfície será muito maior que o caminho direto, resultando em uma atenuação muito maior. Quando eles se recombinaem, o caminho refletido na superfície não tem força para causar interferência significativa e o efeito geralmente é insignificante nessa região.

No campo intermediário, de aproximadamente a partir de algumas dezenas de metros da fonte, o tempo de viagem entre os sinais começa a ser comparável. Os picos e nulos na interferência são criados pela diferença de fase entre os sinais que

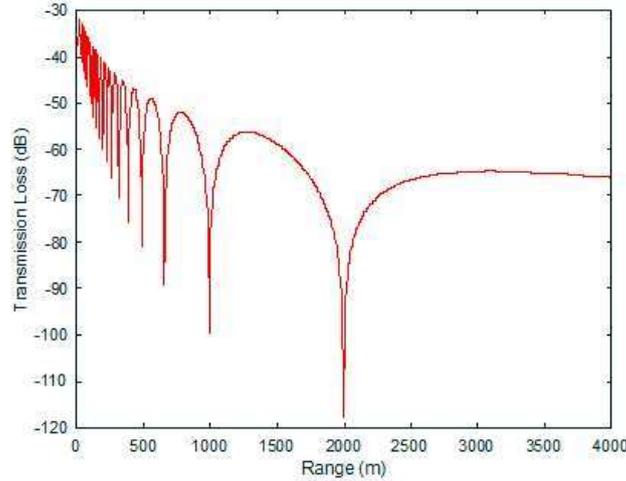


Figura 3.3: Exemplo de padrão de interferência *Lloyd Mirror*, profundidade da fonte 50m, profundidade do receptor 100m, frequência 300 Hz.

se combinam. Os picos correspondem a um estado quase em fase em que o sinal é praticamente duplicado, enquanto os nulos correspondem ao estado fora de fase em que o sinal é quase eliminado.

Finalmente, na região do campo distante, os sinais estão cada vez mais fora de fase à medida que os dois caminhos se tornam idênticos, resultando em uma perda de transmissão cada vez maior e a intensidade cai com o inverso da quarta potência da distância [3].

### 3.1 Padrão de campo próximo Lloyd-Mirror

Esse efeito consiste em um padrão de interferência acústica criado por uma fonte pontual colocada perto de uma superfície suave e perfeitamente refletora do mar [2].

A geometria desse efeito pode ser observada na figura 3.4, com  $S$  indicando a posição da fonte a uma profundidade  $z_s$  abaixo da superfície do mar ( $z = 0$ ).

Uma expressão geral para a perda de transmissão do *Lloyd Mirror* pode ser difícil de obter para todas as fontes, exceto para as mais simples. Para uma fonte pontual, que transmite em uma única frequência, o campo total de pressão acústica  $P(r, z)$  pode ser escrito simplesmente como a soma de contribuições devidas a duas fontes pontuais, equação 3.1 [2]:

$$P(r, z) = \frac{e^{ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{ikR_2}}{R_2} \quad (3.1)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 k &= 2\pi/\lambda \quad \text{é o número de ondas acústico} \\
 R_1 &= \sqrt{r^2 + (z_r - z_s)^2} \\
 R_2 &= \sqrt{r^2 + (z_r + z_s)^2}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

A equação 3.1 representa um padrão de interferência bastante complexo. O sinal de menos nessa equação representa a inversão de fase sofrida pelo sinal refletido na superfície do mar.

Neste trabalho, transportando os conceitos para nosso caso específico de estudo, temos que o hélice do navio (fonte pontual), o qual está localizado a uma certa profundidade ( $Z_s$ ), emite ruídos de cavitação que chega ao hidrofone (receptor) tanto de forma direta como refletida na superfície do oceano.

Usando-se a figura 3.4, pode-se obter uma expressão simplificada [2] assumindo que a distância  $R$  seja muito maior que a profundidade da fonte  $Z_s$  (isto está em concordância com o experimento de Lloyd [33] e com a profundidade do hélice do navio para qualquer embarcação) e denotando o ângulo de inclinação por  $\theta$ , encontramos que, para  $R$  e  $Z_s$ , as distâncias  $R_1$  e  $R_2$  podem ser aproximadas pelas equações 3.3:

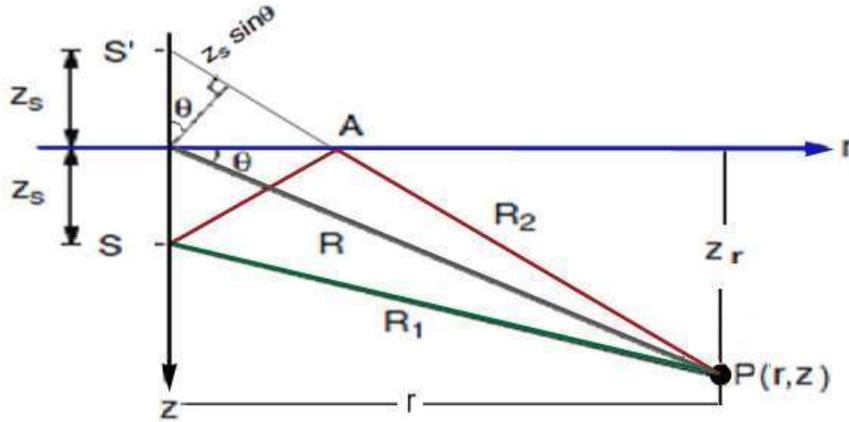


Figura 3.4: Esquema básico do efeito Lloyd-Mirror, adaptado de [2].

$$R_1 \cong R - Z_s \sin(\theta) \tag{3.3}$$

$$R_2 \cong R + Z_s \sin(\theta)$$

Assumindo ainda que as distâncias que aparecem nos denominadores de ambos os termos podem ser substituídas simplesmente pela distância  $R$  e, sabendo-se que,

as amplitudes decaem lentamente com a distância, podemos obter a equação 3.5:

$$p(r, z) = \frac{1}{R} [e^{ik(R-Z_s \text{sen}(\theta))} - e^{ik(R+Z_s \text{sen}(\theta))}] \quad (3.4)$$

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR}}{R} [e^{-ikZ_s \text{sen}(\theta)} - e^{ikZ_s \text{sen}(\theta)}] \quad (3.5)$$

Cabe ressaltar que, como resultado de usar o modelo simplificado [2], estamos destruindo a interferência, mas podemos aproximar o denominador da equação 3.1 (por ser um termo multiplicativo, interfere apenas na amplitude da interferência e não no padrão da interferência). Além disso, podemos separar o expoente na equação acima, dado que a base é o número de Euler, a lei da soma para potência continua válida. Ou seja, como  $e^{ik(R-Z_s \text{sen}(\theta))} = e^{ikR}e^{-Z_s \text{sen}(\theta)}$  podemos chegar na equação 3.8 a partir das equações 3.6 e 3.7.

Uma vez que  $e^{ix} = \cos(x) + i \text{sen}(x)$  e que,  $e^{-ix} = \cos(-x) + i \text{sen}(-x)$  e, sabendo-se também que  $\cos(x) = \cos(-x)$  obtemos que:

$$e^{-ix} = \cos(x) + i \text{sen}(-x) \quad (3.6)$$

Portanto, somando podemos obter a equação:

$$e^{ix} + e^{-ix} = 2i \text{sen}(x) \quad (3.7)$$

Usando  $x = -ikz_s \text{sen}(\theta)$ , vemos que a equação 3.5 pode ser simplificada nos permitindo obter a equação:

$$p(r, z) = \frac{-2i}{R} \text{sen}(kz_s \text{sen}(\theta)) e^{ikR} \quad (3.8)$$

Ao calcularmos, temos que o módulo  $e^{ikR}$  é unitário assim como  $i$ , e portando saem da fórmula de forma que o módulo da amplitude pode ser dado pelo equação que retrata a variação da amplitude:

$$|p(r, z)| = \frac{2}{R} |\text{sen}(kz_s \text{sen}(\theta))| \quad (3.9)$$

Os pontos máximos e mínimos dessa amplitude ocorrem quando  $\text{sen}(kz_s \text{sen}(\theta)) = \pm 1$ , ou seja, nos múltiplos ímpares de  $\pi/2$  (lembrando que um número ímpar é simplesmente um número da forma  $(2m - 1)$ ), quando:

$$\begin{aligned} kz_s \text{sen}(\theta) &= \frac{(2m - 1)\pi}{2} \\ \text{sen}(\theta) &= \frac{(2m - 1)\pi}{2kz_s} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Quando tivermos um múltiplo de  $\pi$ , estamos na posição em que o seno assume zero. Nesses casos, teremos a equação:

$$\text{sen}(\theta) = m \frac{\pi}{kz_s} \quad (3.11)$$

com  $m$  começando em zero, ou  $m - 1$  começando em 1.

Observa-se, na figura 3.5, que o sinal de pressão oscila entre contribuições construtivas ( $\text{seno} = 1$ ) e destrutivas ( $\text{seno} = 0$ ).

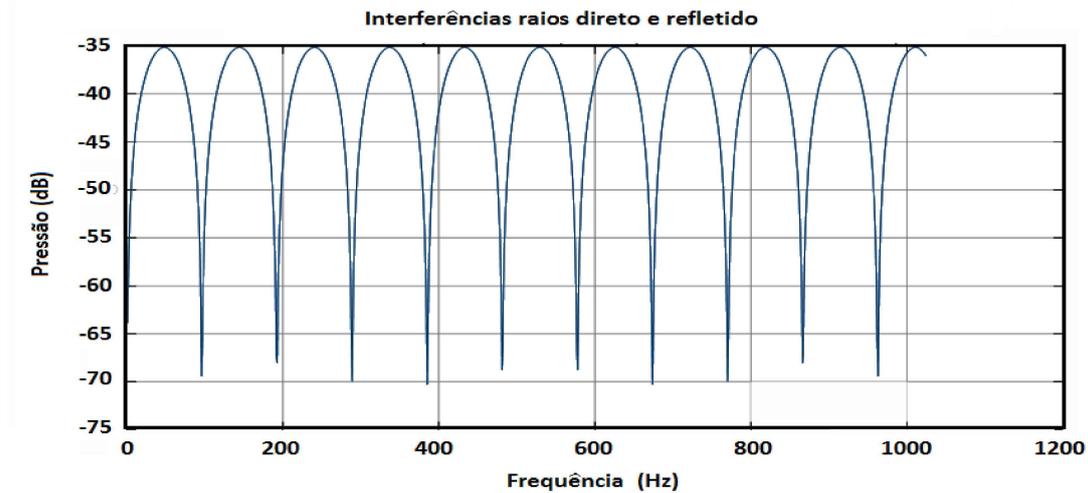


Figura 3.5: Interferências raios direto e refletido, ilustrando os máximos e mínimos.

## 3.2 Espectrograma do Guia de Ondas

Como já mencionado, o experimento de *Lloyd Mirror* publicado nos inícios dos anos 1800, para descrever os padrões de interferência observados entre os caminhos diretos e refletidos dos raios de luz [33] foi estendido aos padrões de interferência posteriormente vistos em sinais acústicos no oceano. Logo após o trabalho original do espelho de Lloyd, *Doppler* e *Fizeau* mostraram independentemente que a frequência aparente de uma onda muda como resultado do movimento relativo entre a fonte e o receptor [35].

Esses dois efeitos, ou seja, o *Lloyd Mirror* e o deslocamento *Doppler*, foram usados por Hudson [36] para mostrar que para uma embarcação em curso e velocidade constantes passando próximo de um sensor acústico, é possível calcular, tanto a velocidade, profundidade e distância do CPA (Ponto de maior aproximação). Para aplicar esse método, o transmissor precisa emitir sons de banda larga e banda estreita. A análise de Hudson assumiu propagação linear simples, na qual o som viajando ao longo do caminho direto, interferia no som refletido na superfície do oceano. A existência desse padrão de interferência ou espectrograma **requer**

uma superfície relativamente lisa e intervalos curtos para preservar a coerência dos dois percursos. Tanto a superfície lisa como a coerência dos percursos são condições importantes para aplicar esse método.

Recentemente ANDRADE [21] usou a combinação dos efeitos *Lloyd Mirror* e *Doppler* na determinação de parâmetros de alvos submarinos, em especial a determinação da profundidade. Esta dissertação de Mestrado usa gravações de medições de ruídos irradiados obtidas na raia acústica do Centro de Análise de Sistemas Operativos (CASOP) localizado em Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro (Brasil). As gravações de ruído irradiado foram analisadas a partir de um espectrograma desenvolvido durante o processo de pesquisa. Para obter os parâmetros da análise de movimento do alvo (AMA) foram elaborados programas de simulação capazes de gerar as características de um sinal submetido ao efeito Lloyd-Mirror levando em consideração a profundidade da fonte sonora, a distância entre a fonte sonora e o receptor, ângulo de marcação que o alvo faz do receptor (ângulo de proa) e a velocidade relativa entre a fonte sonora e o receptor além de realizar os cálculos característicos de uma rosa de manobras. Os resultados das simulações obtidas nesta dissertação mostram que, uma vez conhecida a direção da marcação do alvo, profundidade e velocidade do receptor, os espaçamentos entre os mínimos de sinal devidos à interferência destrutiva podem ser correlacionados a uma solução para a AMA que forneça a distância ao alvo, sua velocidade, rumo e o principal, sua profundidade.

Um exemplo de um espectrograma de guia de ondas na raia acústica, no qual conseguimos observar o efeito de *Lloyd Mirror* ou espectro de interferência, pode ser observado na figura 3.6 que o eixo  $x$  corresponde ao tempo (s), onde  $0,313s$  é o intervalo de tempo entre cada amostragem e enquanto que o eixo  $y$  corresponde as frequências (Hz).

Esse exemplo corresponde a uma corrida realizada por um certo navio mantendo um curso e velocidade constantes à medida que passa pelo PMA, na Raia Acústica Brasileira de Arraial do Cabo em águas rasas, os dados correspondem a medição de ruídos irradiados do CASOP. O PMA corresponde aproximadamente a  $5000 \times 0,313s$ .

Como os padrões de *Lloyd Mirror* são comumente observados em intervalos razoavelmente curtos devido à interferência entre um caminho refletido na superfície e um caminho direto, a refração é ignorada. No entanto, o método proposto (próxima seção) certamente poderia ser estendido para incluir refração. Também deve ser salientado que, a longas distâncias, muitas outras interações de múltiplos caminhos devem ser considerados.

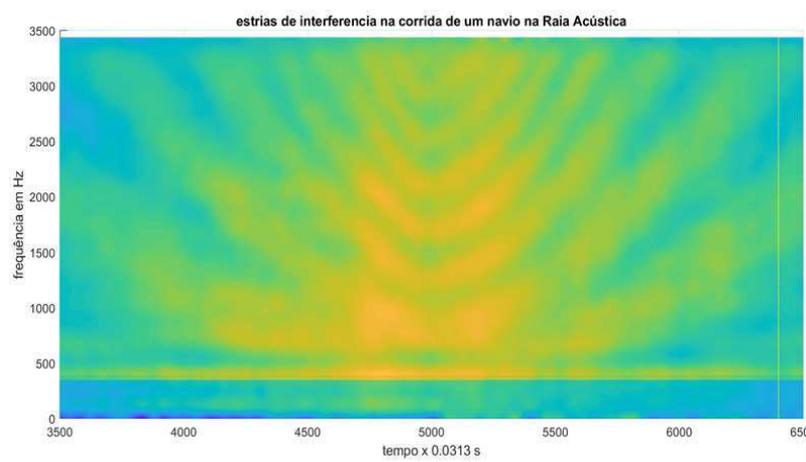


Figura 3.6: Espectrograma da passagem de um navio sintetizada mostrando o efeito *Doppler* e o efeito *Lloyd Mirror*. O eixo horizontal mostra o tempo e o eixo vertical a frequência. A cor indica pressão sonora.

# Capítulo 4

## Metodologia

Em termos gerais a metodologia usada corresponde à criação de modelos (programas em matlab) para redução de interferências nos dados de ruído irradiado medidos (ruídos de cavitação) na Raia Acústica da Marinha do Brasil. Em uma primeira fase, os dados de medida foram decimados, eliminados os tons discretos, filtrados e por último gravados em formato de matriz.

Em uma segunda fase foram criados modelos dos procedimentos mencionados de forma a tentar reproduzir os dados tratados das medições (fase 1) usando a teoria do efeito de *Lloyd Mirror* e também gravados em formato de matriz. Esta segunda matriz correspondente às simulações foi correlacionada com a primeira matriz correspondente aos dados de medições já tratados.

A seguir são apresentados os modelos desenvolvidos em ordem sequencial de execução, cada um deles constitui um submodelo especializado, parte de um modelo maior que a partir do valor de correlação entre as matrizes dos dados de ruído medidos e os dados ruído simulados consegue-se obter a profundidade da fonte e distância horizontal usando a fórmula exata de *Lloyd Mirror*. Os modelos são: *gMatrizEspectroDados.m*, *simulacao.m*, *calcValorMedioSinal.m* e *calcValorMedioDistProf.m*.

### 4.1 modelo *gMatrizEspectroDados.m*

Utilizado para calcular o espectrograma do ruído irradiado **medido no PMA**, na raia acústica, mostrando as estrias do efeito *Lloyd Mirror*. Detalhes da geometria da corrida pode ser vista na figura 4.1, indicando a posição do hidrofone e o PMA.

A frequência de amostragem ( $f_a$ ) do sinal gravado é de 48000 Hz decimada para 8000 Hz. O espectro é calculado por amostras de 8192 pontos com 16 graus de liberdade usando a técnica de Welch (ver Apêndice A). Cada amostra é obtida a cada 250 pontos ao longo do registro. Isto equivale a amostras a cada distância dada por  $r = 250vdt$  em que  $v$ =velocidade do navio e  $dt = 1/f_a$ . Nessa corrida

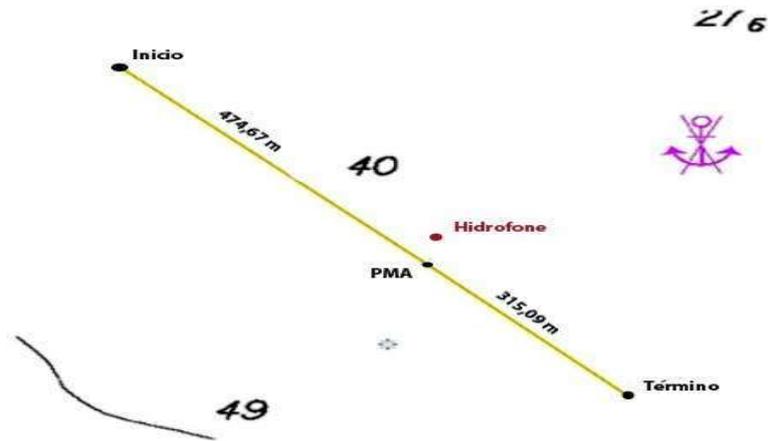


Figura 4.1: Geometria da corrida na Raia acústica

os valores foram de:  $v = 3.35m/s$  e  $fa = 8000Hz$ , equivalendo a um intervalo de distância de  $0.1m$ , e uma medição ao longo de  $8192 v dt = 3.43m$  valores que indicam uma pequena variação da geometria, e, conseqüentemente, uma estacionariedade no processo. Calcula-se o valor RMS do processo, técnica convencional em Acústica Submarina.

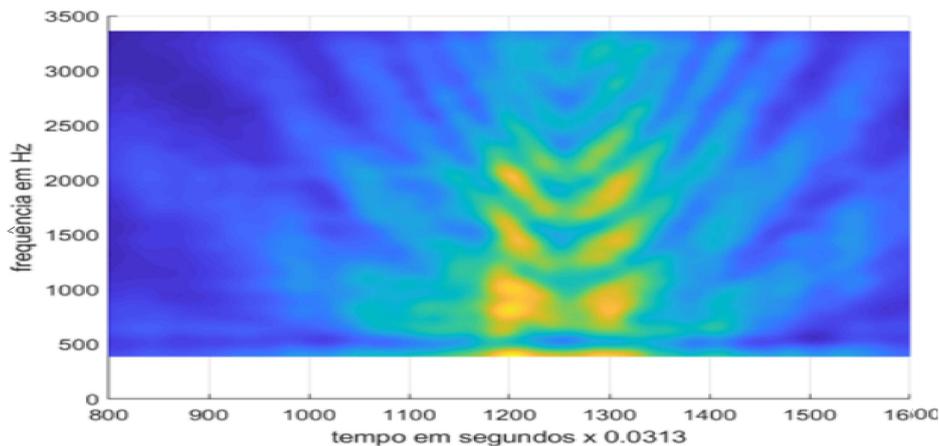


Figura 4.2: sinal nas proximidades do PMA, a velocidade do navio é constante,  $0,0313 s$  é o tempo de amostragem, observe que o PMA ocorre aproximadamente em 1256 segundos

Para melhora do sinal e posterior análise, usa-se varias funções do matlab: alisa-se 4 componentes dos 1048 pontos usando a função "*pwelch*", elimina-se os tons discretos com o uso da função "*filloutliers*", por último o sinal é filtrado em frequência e distância com a função "*butter*"(ver apêndice A), para finalmente gerar o espectrograma do sinal. A figura 4.2 mostra as estrias de interferências formadas a partir de um sinal de banda larga – cavitação do navio – sob o efeito *Lloyd Mirror*.

Na figura 4.2 observa-se que em uma região afastada do PMA, as estrias produzidas pelas interferências são fracas. Estas podem ser usadas para a determinação

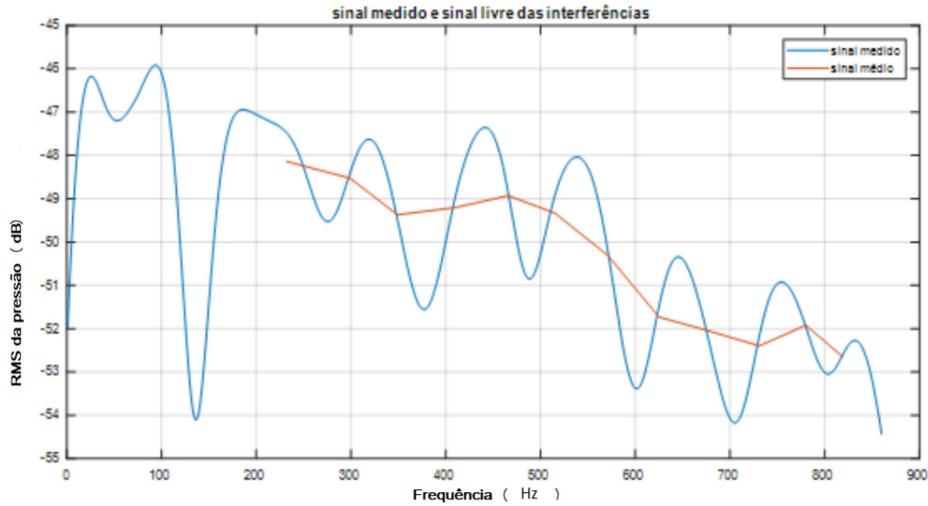


Figura 4.3: Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar do valor tradicional de 6 dB por oitava. Observa-se valores próximos.

de parâmetros geoacústicos do fundo, como mostrado em [37].

Para o cálculo do ruído irradiado do navio, estamos interessados no sinal nas proximidades do PMA que contem máximos e mínimos produzidos pela mencionada interferência. Na figura 4.3 pode-se ver um exemplo típico:

Este sinal (ainda em volts RMS) será usado depois para corrigir as interferências e permitir a sua redução para  $1m$  do navio, forma usual de se expressar o ruído irradiado de um navio:  $Xdb$  referência  $1\mu Pa @ 1m$ .

#### 4.1.1 Diagrama de blocos *gMatrizEspectroDados.m*

A figura 4.4 apresenta o diagrama de blocos do modelo *gMatrizEspectroDados.m*.

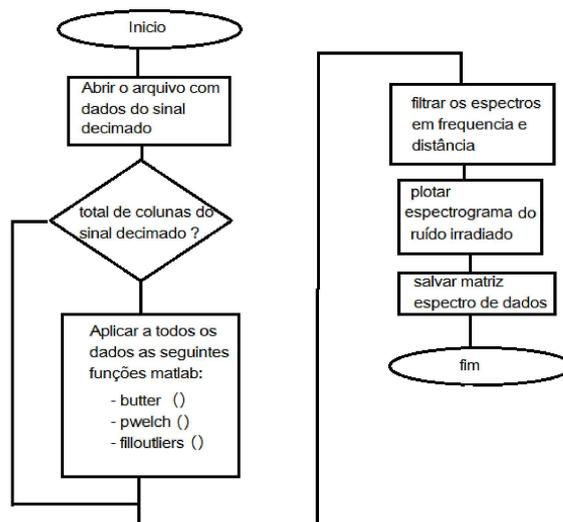


Figura 4.4: Este diagrama de blocos descreve o modelo *gMatrizEspectroDados.m*.

## 4.2 modelo *simulacao.m*

Simula situações de sinais no PMA, variando profundidade da fonte e distância usando a fórmula exata de *Lloyd Mirror* - considera sinal direto, sinal refletido na superfície e sinal refletido no fundo; usa sinais de banda larga de cavitação medidos na Raia Acústica, compara os sinais simulados com os medidos na Raia no PMA; obtém também sinais corrigidos das interferências destrutivas e construtivas para serem reduzidos a um metro de distância do navio; corrigidos da sensibilidade do hidrofone e ganhos usados na gravação, representam o ruído irradiado do navio.

Correspondendo à simulação, o modelo desenvolvido usa os valores da matriz4.mat (matriz com dados de medidas já tratados) e os valores iniciais (distância horizontal e profundidade da fonte) escolhidos de uma faixa coerente dos valores, na fórmula exata de *Lloyd Mirror* e através de um processo de iterativo e convergente, procura valores aceitáveis de coeficientes de correlação entre as matrizes de dados medidos e simulados.

- a) O ponto de partida é o sinal analisado pelo programa gMatrizEspectroDados.m nas proximidades do PMA, como mostrado na figura 4.4 Esse sinal será correlacionado com diversas simulações como explicado a seguir.
- b) Parte-se de um valor baixo de profundidade da fonte (prof) e vai-se aumentando com pequenos incrementos, por exemplo, 0.025m. São 100 valores.
- c) Para cada novo valor de profundidade da fonte usa-se valores de distância que também são incrementados a cada 0.1metros. Por exemplo um valor de profundidade para 200 valores de distância. O total é de 20000 pares.
- d) Para cada par calcula-se o sinal gerado no hidrofone, usando-se a fórmula exata do efeito *Lloyd Mirror*, através da equação:

$$sinal = \frac{exp(ikR_1)}{R_1} - 0.3cr \frac{exp(ikR_2)}{R_2} + reflex \frac{exp(ikR_3)}{R_3} \quad (4.1)$$

O primeiro termo é o sinal direto, com amplitude 1; o segundo é o refletido na superfície (com o sinal negativo pela mudança de fase), e amplitude 0.3cr representando as perdas na superfície (aqui foi arbitrado um coeficiente adicional 0.3 para multiplicar a atenuação na superfície) e o terceiro termo, é o refletido no fundo com a atenuação devida à reflexão não total. A dedução de  $R_1$  e  $R_2$  é apresentada na figura 4.5 e a dedução de  $R_3$  na figura 4.6. As distâncias  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  são *slant ranges*.

- e) De posse de um par de distância e profundidade da fonte, de  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , e  $\theta_1$ , verifica-se que esse ângulo de incidência está sempre acima do ângulo

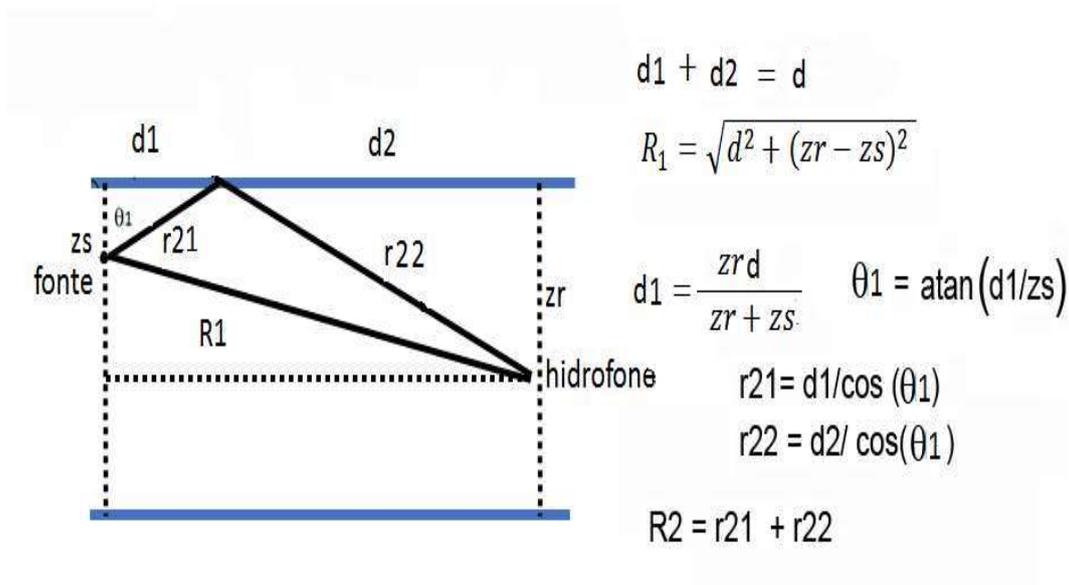


Figura 4.5: Cálculo de R1 e R2.

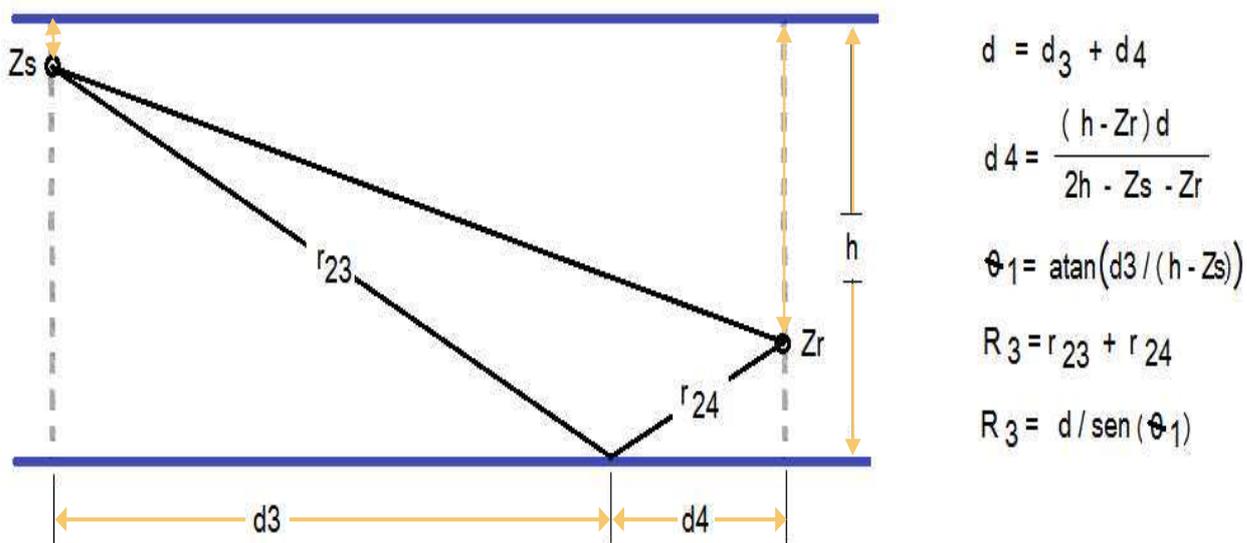


Figura 4.6: Cálculo de R3.

crítico, dado por  $\theta_2 = \text{asin}((c_2/c_1)\sin(\theta_1))$ ; nesse caso então deve-se calcular o coeficiente de reflexão no fundo, dado pela equação 4.2:

$$reflex = \frac{\rho_2 c_2 \cos(\theta_1) - \rho_1 c_1 \cos(\theta_2)}{\rho_2 c_2 \cos(\theta_1) + \rho_1 c_1 \cos(\theta_2)} \quad (4.2)$$

f) Calcula-se então o sinal e correlaciona-se com o sinal medido no PMA:

**Correlação = corrcoef(sinal, sinal1);**

g) Finalmente, da maior correlação obtêm-se o par profundidade e distância da



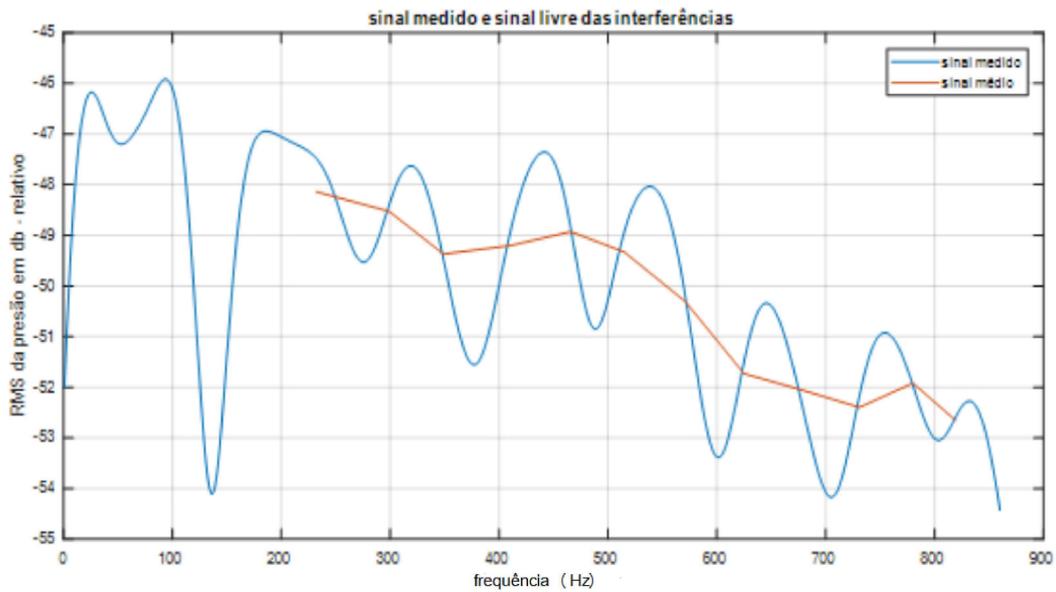


Figura 4.8: Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar ao valor tradicional de 6 dB por oitava. Observa-se valores próximos.

### 4.3.1 Diagrama de blocos *calcValorMedioSinal.m*

A figura 4.9 apresenta o diagrama de blocos do modelo ValorMedioSinal.m.

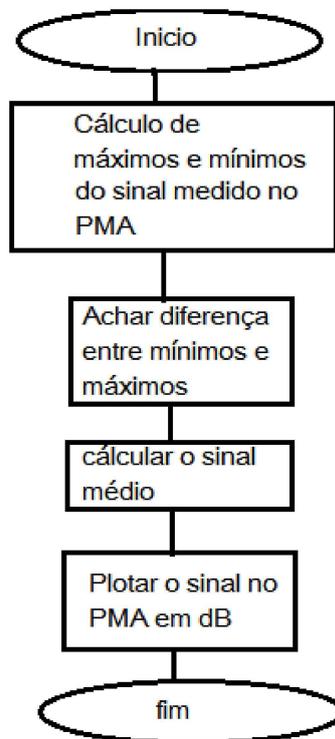


Figura 4.9: Este diagrama de blocos descreve o modelo calcValorMedioSinal.m

#### 4.4 modelo *calcValorMedioDistProf.m*

Para calcular valores médios de distância e profundidade da fonte a partir de comparação de simulações com o sinal real no PMA calculado por *simulacao.m*. Aqui vão ser simulados valores de atenuação na superfície (valor de onda significativa em fórmula de atenuação) e atenuação no fundo (coeficiente de reflexão). A figura 4.10 mostra um gráfico com ocorrências de distância e profundidade da fonte.

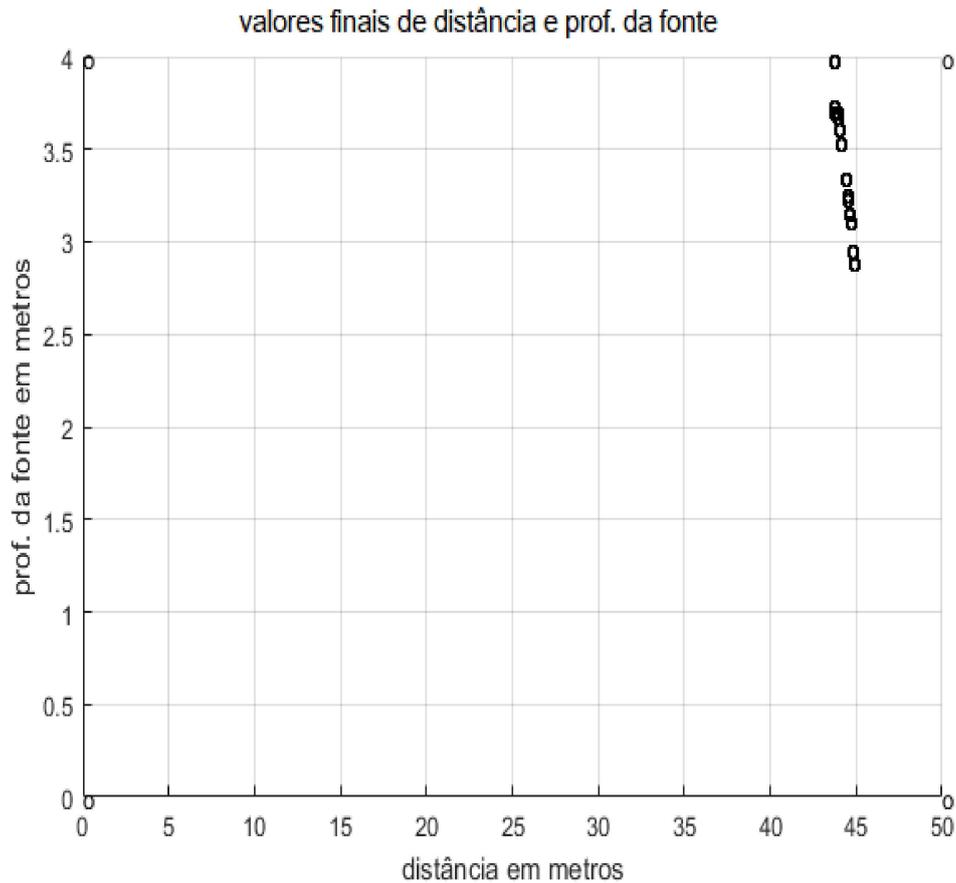


Figura 4.10: Valores médios de distância e profundidade da fonte.

#### 4.4.1 Diagrama de blocos *calcValorMedioDistProf.m*

A figura 4.11 apresenta o diagrama de blocos do modelo ValorMedioDistProf.m. O modelo usa informações do *simulacao.m* e faz uso de dois *loops* principais: o mais externo onde varia-se a reflexão no fundo e o interno onde varia-se o coeficiente de reflexão. Antes de executar estes loops carregam-se os dados do mundo real e sinal de pressão sonora, destes dados obtêm-se os mínimos do sinal devido a que são mais exatos, se comparados com os máximos. Estes mínimos são salvos para correlacionar com os mínimos do sinal nas simulações, assim se obtém o valor de correlação entre os mínimos. Esta é a diferença do modelo *simulacao.m*, onde procura-se a máxima correlação entre as matrizes de dados tratados e reorganizados matricialmente.

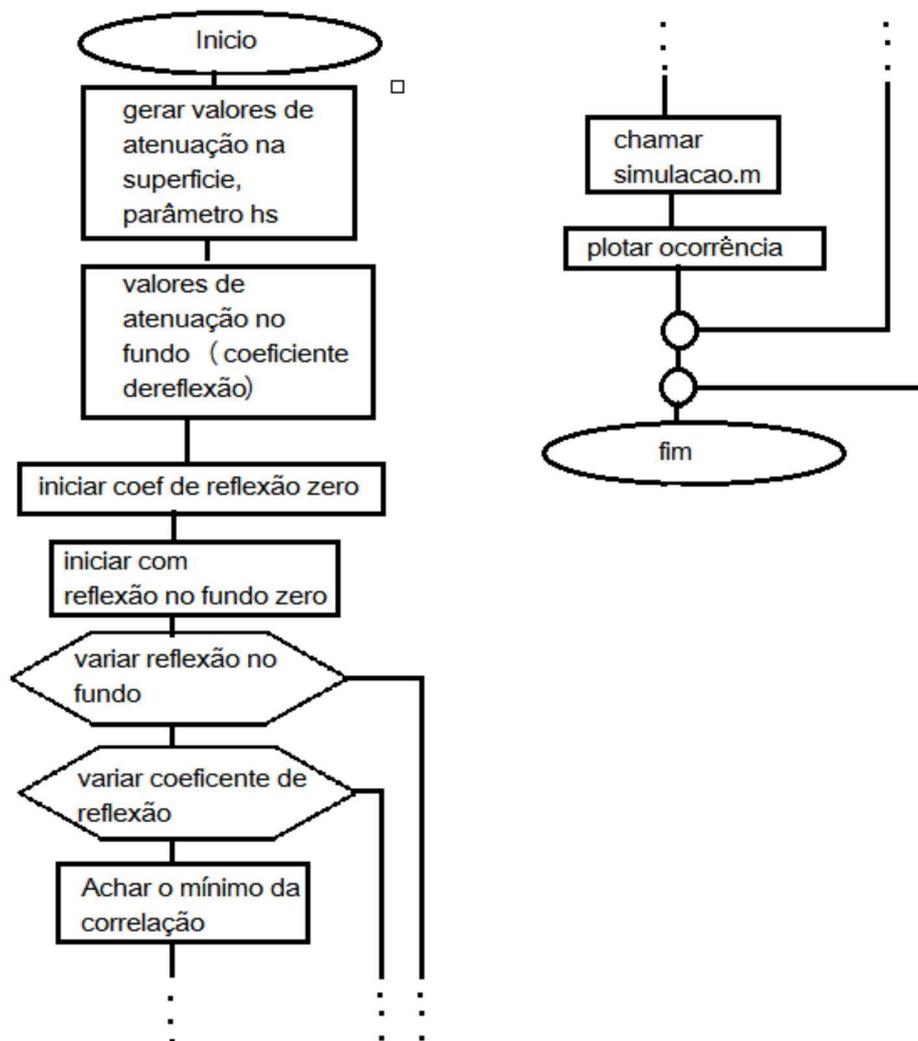


Figura 4.11: Este diagrama de blocos descreve o modelo *calcValorMedioDistProf.m* que é usado para calcular valores médios de distância e profundidade da fonte.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 Teste dos modelos - arquivo 44C02.wav

#### 5.1.1 Ruídos

O programa gMatrizEspectroDados.m trata os ruídos na raia. A figura 5.1 apresenta o resultado deste tratamento, tendo como fonte de dados de medições o arquivo 44C02.wav. Esta figura apresenta duas zonas diferenciadas: a primeira longe do PMA (estrias pouco visíveis), onde os *eigen rays* interferem fortemente com o fundo; e a segunda zona (onde as estrias estão em amarelo) próximas do PMA. Para frequências entre 0 e 1300 Hz, existem outras interferências que precisam ser tratadas. Este é o motivo de escolher frequências altas para conformar a matriz de correlação de dados de medidas.

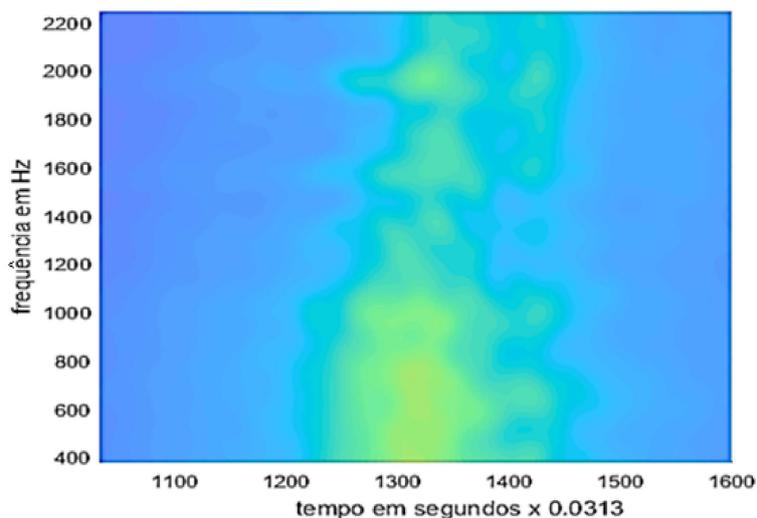


Figura 5.1: Sinal 44C02.wav (ruído de cavitação) depois do processo de tratamento do sinal (gMatrizEspectroDados.m).

### 5.1.2 Comparação entre o sinal no PMA e o sinal médio

O sinal médio se comparado com o sinal medido e tratado no PMA, representa um sinal sem os extremos de máximos e mínimos. Foi usado o programa calcValorMedioSinal.m na obtenção do sinal médio. A figura 5.2 apresenta a comparação entre estes sinais:

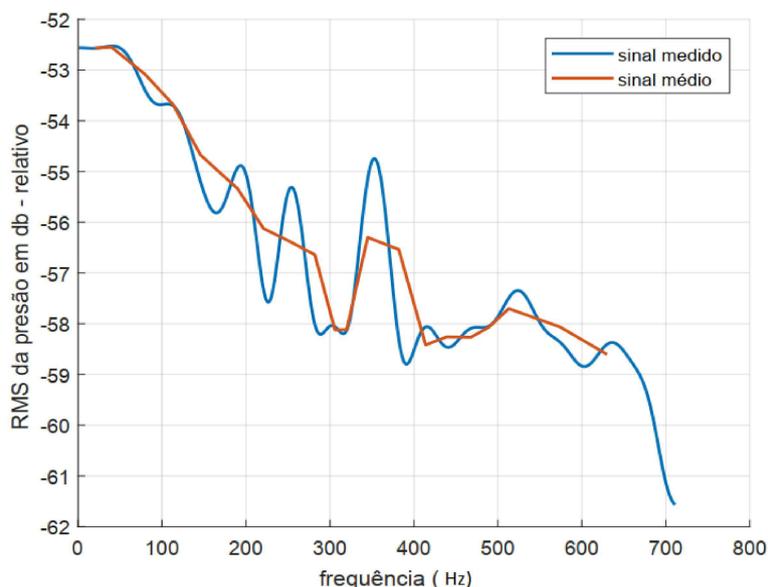


Figura 5.2: Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar do valor tradicional de 6 dB por oitava.

### 5.1.3 Valores médios de distância e profundidade da fonte

Para calcular valores médios de distância e profundidade da fonte a partir de comparação de simulações com o sinal real no PMA, calculado por calcValorMedioSinal.m, é necessário realizar simulações dos valores de atenuação na superfície (valor de onda significativa em fórmula de atenuação) e atenuação no fundo (coeficiente de reflexão); além de gerar um gráfico com ocorrências de distância e profundidade da fonte.

Na Figura 5.3, nota-se a concentração de valores na faixa entre 43 e 45m para a distância e a maior concentração de valores ao redor do valor 3,1m para a profundidade da fonte.

## 5.2 Teste dos modelos - arquivo 44C03.wav

### 5.2.1 Ruídos

Na figura 5.4, observamos o resultado do tratamento de ruídos (**medido no PMA**) e cálculo do espectrograma do sinal, na raia acústica brasileira, mostrando as estrias

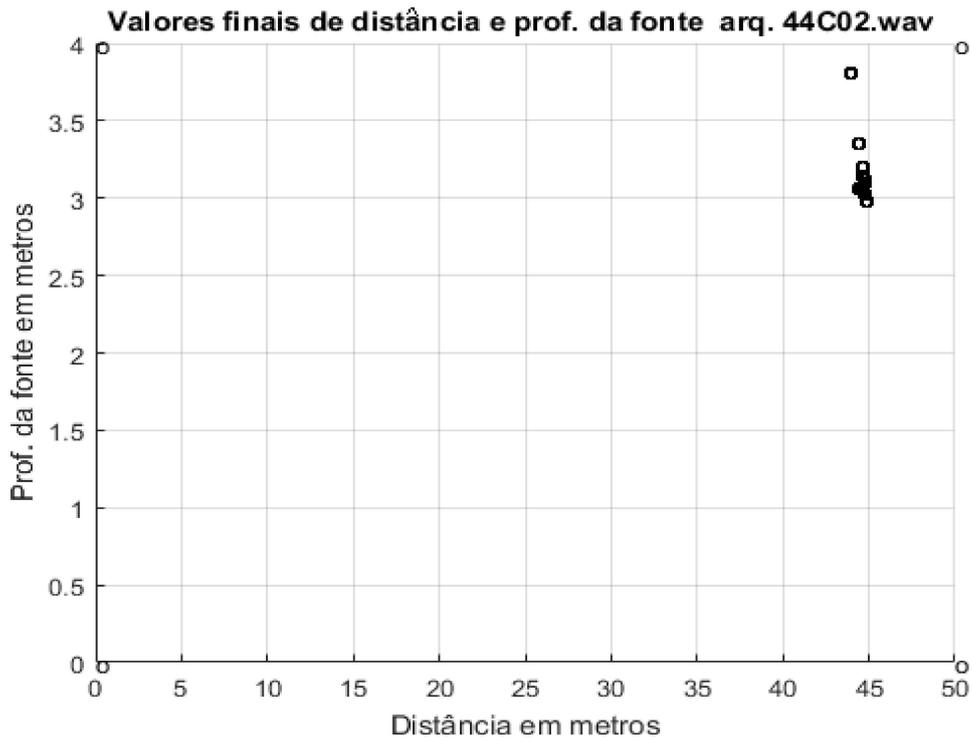


Figura 5.3: Valores médios de distância e profundidade da fonte.

do efeito Lloyd Mirror.

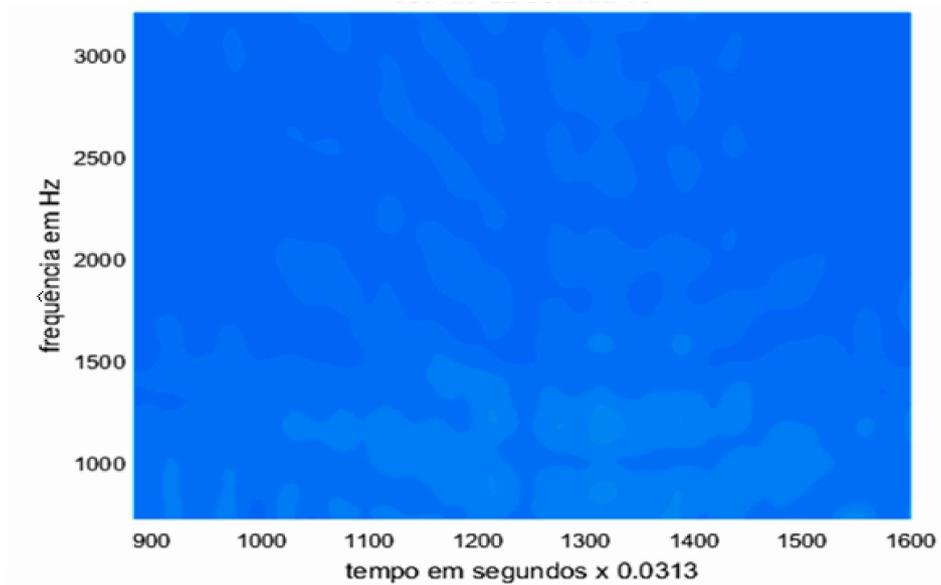


Figura 5.4: Sinal 44C03.wav (ruído de cavitação) depois do processo de tratamento do sinal (gMatrizEspectroDados.m).

## 5.2.2 Comparação entre o sinal no PMA e o sinal médio

O sinal médio se comparado com o sinal medido e tratado no PMA, representa um sinal sem os extremos de máximos e mínimos. Foi usado o programa `calcValorMedioSinal.m` na obtenção do sinal médio. A figura 5.5 apresenta a comparação entre estes sinais:

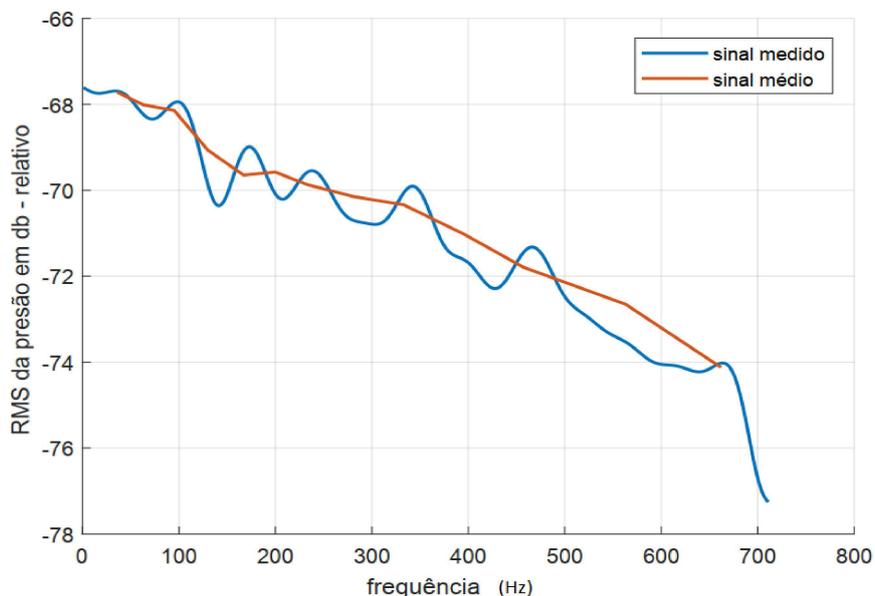


Figura 5.5: Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar do valor tradicional de 6 dB por oitava.

## 5.2.3 Cálculo de valores médios de distância e profundidade

Para calcular valores médios de distância e profundidade da fonte a partir de comparação de simulações com o sinal real no PMA calculado por `calcValorMedioSinal.m`, é necessário realizar simulações dos valores de atenuação na superfície (valor de onda significativa em fórmula de atenuação) e atenuação no fundo (coeficiente de reflexão); além de gerar um gráfico com ocorrências de distância e profundidade da fonte.

Na Figura 5.6, nota-se a concentração de valores na faixa entre 43 e 45m para a distância e a maior concentração de valores ao redor do valor 3,2m para a profundidade da fonte.

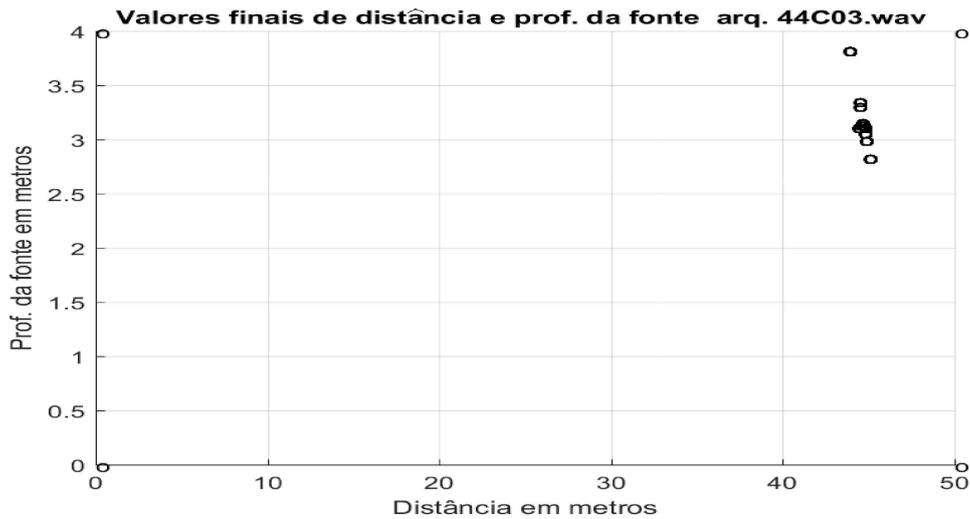


Figura 5.6: Valores médios de distância e profundidade da fonte.

### 5.3 Teste dos modelos - arquivo 7114C03.wav

#### 5.3.1 Ruídos

Na figura 5.7, observamos o resultados do tratamento de ruídos (**medido no PMA**) e cálculo do espectrograma do sinal, na raia acústica brasileira, mostrando as estrias do efeito Lloyd Mirror.

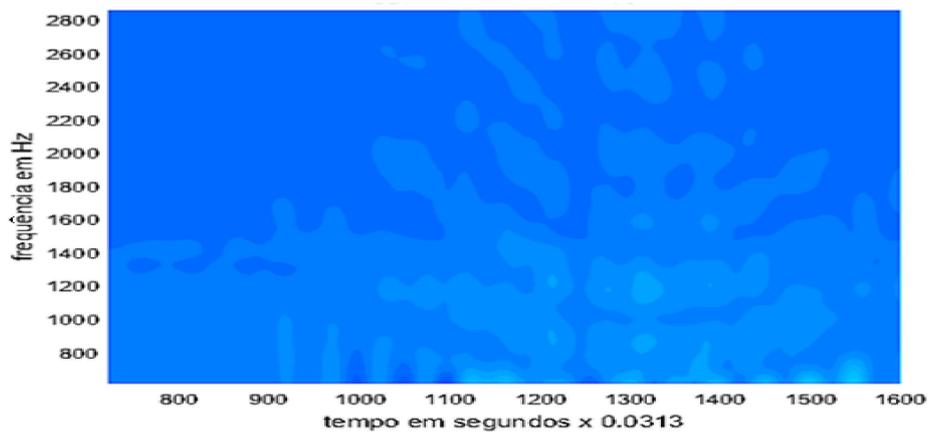


Figura 5.7: Sinal 7114c03.wav (ruído de cavitação) depois do processo de tratamento do sinal (gMatrizEspectroDados.m).

#### 5.3.2 Comparação entre o sinal no PMA e o sinal médio

Para obter a comparação entre o sinal no PMA e o sinal médio, foi usado o programa calcValorMedioSinal.m.

A figura 5.8 apresenta a comparação entre o sinal no PMA e sinal médio.

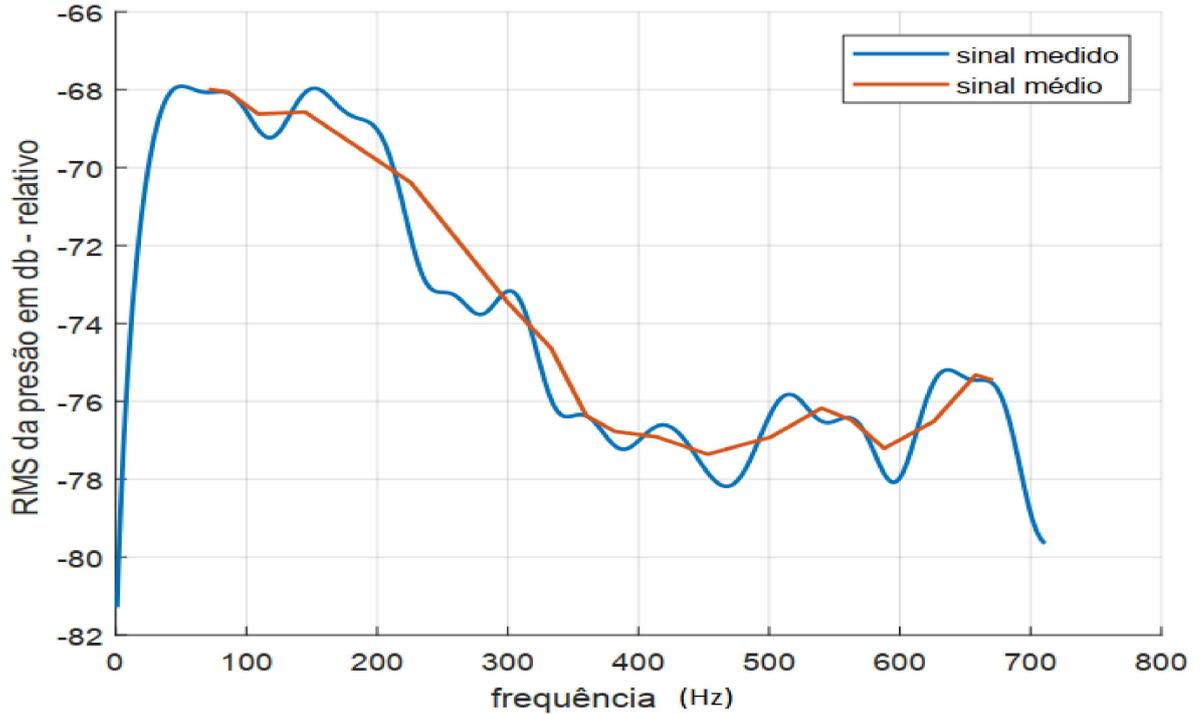


Figura 5.8: Sinal no PMA e sinal médio. O sinal médio deve se aproximar do valor tradicional de 6 dB por oitava.

### 5.3.3 Cálculo de valores médios de distância e profundidade

Para calcular valores médios de distância e profundidade da fonte a partir de comparação de simulações com o sinal real no PMA calculado por `calcValorMedioDist-Prof.m`, é necessário realizar simulações dos valores de atenuação na superfície (valor de onda significativa em fórmula de atenuação) e atenuação no fundo (coeficiente de reflexão); além de gerar um gráfico com ocorrências de distância e profundidade da fonte.

Na figura 5.9, nota-se a concentração de valores na faixa entre 43 e 45m para a distância e a maior concentração de valores ao redor do valor 3,2m para a profundidade da fonte.

A tabela 5.1 faz um comparativo dos resultados obtidos, com os diferentes sinais.

Tabela 5.1: Resultados dos modelos

Arquivo do Sinal	Distância Horizontal (m)	Profundidade da Fonte (m)
sinal1.wav	43	3,4
44C02.wav	44	3,1
44C03.wav	43	3,3
7114C03.wav	43	3,2

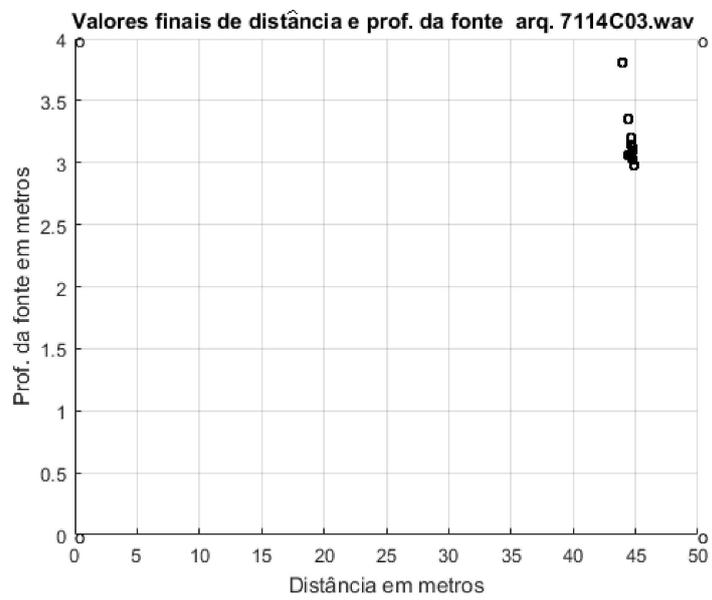


Figura 5.9: Valores médios de distância e profundidade da fonte.

# Capítulo 6

## Conclusões

- Dos resultados obtidos com o modelo `gMatrizEspectroDados.m`, podemos afirmar que foram reduzidas satisfatoriamente as interferências nos sinais de ruído irradiado dos navios e foi gerado o espectrograma através do uso do efeito de Lloyd Mirror. Para todos os casos de teste, a redução das interferências obtidas foi suficiente para realizar o processo de correlação com os dados da simulação, como pode-se observar nas figuras 4.2, 5.1, 5.4, 5.7 e os resultados da tabela 5.1.
- O modelo `simulacao.m`, corresponde à parte principal da simulação, além de ter sido usado em `calcValorMedioDistProf.m`. O modelo desenvolvido usa os valores conhecidos da raia acústica e escolhe uma faixa coerente dos valores desconhecidos da raia e através de um processo de convergência e otimização, procura estes valores usando a correlação de matrizes de dados medidos e filtrados com a matriz de dados simulados. Vale dizer que são usados os mínimos das frequências mais altas, com comprimentos de onda menores, que apresentam interferências construtivas e destrutivas mais bem definidas a diferença dos mínimos das frequências baixas com muito ruído. Os valores obtidos são a distância e profundidade de uma fonte acústica, ver tabela 5.1.
- O modelo `calcValorMedioSinal.m`, corresponde ao cálculo do valor médio do sinal medido, eliminando os máximos e mínimos. Para todos os arquivos, testes foram necessários, com escolhas de intervalos para delimitar o espectrograma ao redor do PMA e para frequências altas, como pode-se observar nas figuras 5.2, 5.5 e 5.8.
- A tabela 5.1 mostra os valores de distância horizontal (m) e Profundidade da fonte (m), obtidos com o modelo `calcValorMedioDistProf.m`, com valores muito próximos, em relação à profundidade da fonte e distância ao hidrofone. Este valor deve ser analisado com cuidado uma vez que fatores como: calado,

cavitação, etc, podem alterá-lo, o que é tolerável dentro de uma faixa aceitável.

- Os principais problemas no desenvolvimento do trabalho foram relacionados com o uso do software matlab, este software é amplo e dispõe de muitas funções prontas as quais eram desconhecidas no estágio inicial do trabalho.
- Vale ressaltar que os modelos foram otimizados de forma a serem executados no menor tempo possível. Versões iniciais dos modelos chegaram a rodar em horas (devido ao desconhecimento do matlab), para passar a rodar em menos de 10 segundos (programação vetorial), usando um PC com uma configuração básica (8 Gb de ram, processador Intel i5, com 400 Mb de HD livre, Matlab 2015 versão estudante).
- É possível afirmar que estes modelos serão de grande utilidade em experimentos e investigações na Raia Acústica Brasileira, em especial, em trabalhos futuros correlatos.
- Como sugestão para os trabalhos futuros, é necessário completar os modelos considerando outros caminhos percorridos pelo som na água, uma vez que este trabalho considerou somente os seguintes caminhos: direto, refletido na superfície do mar e refletido no fundo do mar.

# Referências Bibliográficas

- [1] PESSEK, K. *Estimativa de Distância Passiva por Método Acústico Interferométrico*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2013.
- [2] JENSEN, F., KUPERMAN, W., PORTER, M. *Computational Ocean Acoustics. Modern Acoustics and Signal Processing*. Springer-Verlag, 2011.
- [3] ETTER, P. C. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. 4 ed. Boca Raton, FL, CRC Press, Taylor - Francis Group, 2013.
- [4] LI, Q. *Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications*. New York, Springer, 2012.
- [5] JENSEN, F., KUPERMAN, W., PORTER, M., et al. *Computational Ocean Acoustics (Modern Acoustics and Signal Processing)*. AIP Press, 1994.
- [6] FRISK, G. *Ocean and Seabed Acoustics - A theory of Wave Propagation*. PTR Printice Hall, 1994.
- [7] MCDANIEL, S., BEEBE, J. “Influencie of semiconsolidated sediments on sound propagation in a coastal region”, *Bottom-Interacting Ocean Acoustics*, v. 4, n. 5, pp. 507–524, 1980.
- [8] PARENTE, C., HASSE, R., MARTIN, R. *Joint U. S. / Brazil Acoustic Measurement Exercise*. Washington, D.C., NUSC Technical Report 5543, Naval Underwater Systems Center, 1977.
- [9] VIANNA, M. L., SOARES FILHO, W. “Broadband noise propagation in a Pekeris waveguide”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 79, n. 1, pp. 76–83, 1986.
- [10] FILHO, R. Z. M. *Técnicas de Processamento Espacial e Temporal de Sinais Acústicos submarinos*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 1993.

- [11] DA COSTA, O. M. *Um Estudo Sobre a Propagação do Som No Mar*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 1996.
- [12] ALVES, A. M. V. *Investigações sobre a Propagação da Onda Sonora por Modos*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 1997.
- [13] ROCHA, A. *Aplicação de Técnica de Inversão para a determinação da Posição de uma Fonte Sonora Monocromática em Movimento Retilínea Uniforme no Interior de um Guia de Ondas através de Coincidência de Modos Normais*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 1997.
- [14] SOUSA, A. V. G. *Estimação de Distância de Fontes Sonoras no Mar com Técnicas Acústicas Passivas*. Tese de d.sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [15] MAIA, L. P. *Inversão Geoacústica e Localização Passiva de Fontes em Águas Rasas*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2010.
- [16] CHAVES, A. H. S. *Um Estudo sobre o Padrão de Interferência Sonora em Aguas Rasas e sua Aplicação no Aprimoramento da Estimativa de Distância e Velocidade por Método Passivo*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2015.
- [17] DE OLIVEIRA MARIN, F. *Tomografia Acústica Oceânica por Tempo de Percurso Modal em Águas Rasas*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2015.
- [18] XAVIER, F. C. *Um estudo sobre o uso de interferometria acústica aplicada ‘a caracterização do ruído de banda larga de navios*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2016.
- [19] DA SILVA SIMÕES, M. V. *Modelagem da Propagação Acústica em Águas Rasas em Apoio a Implantação de Redes ee Comunicação Acústica Submarina*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2018.
- [20] JUNIOR, V. B. *Localização de Fontes Sonoras em Águas Rasas com uso de um Unico Arranjo de Hidrofones em linha por meio de Modelagem Acústica*

*Tridimensional*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Ocêânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2018.

- [21] DE ANDRADE, D. F. G. *Determinação de Parâmetros de Alvos Submarinos a partir De Interferências devidas ao Efeito Lloyd Mirror*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Ocêânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2020.
- [22] WIGGINS, S., MCDONALD, M., MUNGER, L., et al. “Waveguide propagation allows range estimates for north pacific right whales in the Bering Sea”, *Canadian Acoustics*, v. 32, n. 2, pp. 146–154, 2004.
- [23] YASUI, K. *Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics*. Springer International, 2018.
- [24] KATOPODES, N. D. *Free-surface flow shallow water dynamics*. Elsevier Science and Technology, 2019.
- [25] DUSHAW, B. D., WORCESTER, P. F., CORNUELLE, B. D., et al. “On equations for the speed of sound in seawater”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 93, n. 1, pp. 255–275, 1993.
- [26] WORCESTER, P. F., CORNUELLE, B. D., HILDEBRAND, J. A., et al. “A comparison of measured and predicted broadband acoustic arrival patterns in travel time-depth coordinates at 1000-km range”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 95, n. 6, pp. 3118–3128, 1994.
- [27] URICK, R. J. *Principles of underwater sound*. New York, McGraw-Hill, 1983.
- [28] HODGES, R. P. *Underwater acoustics. Analysis, design and performance sonar*. England, John Wiley, 2010.
- [29] KUPERMAN, W. A., ROUX, P. “Underwater Acoustics”, *Springer Handbook of Acoustics, ISBN 978-0-387-30446-5. Springer-Verlag New York, 2007*, v. -1, n. 1, pp. 149, 2007.
- [30] TURGUT, A., ORR, M., , et al. “Broadband source localization using horizontal-beam acoustic intensity striations”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 127, n. 1, pp. 73–83, 2010.
- [31] RICHARDSON, W. J., GREENE, C. R., MALME, C. I., et al. *Marine Mammals and Noise*. Sand Diego, CA, Academic Press, 1995.
- [32] SOUTHALL, E. *Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations*. Aquatic Mammals, 2007.

- [33] LLOYD, H. “On a New Case of Interference of the Rays of Light”, *Transactions of the Royal Irish Academy*, v. XVII, n. 1, pp. 171, 1837.
- [34] GERSTEIN, E. R. “Manatees, Bioacoustics and Boats”, *American Scientist*, v. 90, n. 2, pp. 154, mar. 2002. doi: 10.1511/2002.2.154.
- [35] WILSON, J. K. *Maritime Surveillance Using a Wideband Hydrophone*. Master’s thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, EEUU, 2007.
- [36] HUDSON, R. F. *A Horizontal Range vs. Depth Solution of Sound Source Position under General Sound Velocity Conditions using the Lloyd Mirror Interference Pattern*. Master’s thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, EEUU, 1983.
- [37] BRIGIDA, C. R. S. *Desenvolvimento De Técnicas Para Determinação De Parâmetros Geoacusticos Do Fundo a Partir De Dados De Ruído Irrradiado De Navios De Oportunidade Na Raia Acustica De Arraial Do Cabo*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2021.
- [38] PROAKIS, J. G., MANOLAKIS, D. G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1996.
- [39] JACKSON, L. B. *Digital filters and signal processing*. 3 ed. Boston, USA, Kluwer, 1966.

# Apêndice A

## Técnicas de correção de medidas antes do PMA

Este apêndice tem os seguintes objetivos:

- Explicar as técnicas usadas para obter espectros reduzidos do ruído irradiado antes do PMA; obtenção de curvas do ruído reduzido a 1 metro;
- Mostrar a importância da medida do ruído ambiente antes e depois de um programa de corridas;

### A.1 Decimação

Uma das técnicas básicas de processamento de sinais é a decimação, ou redução da taxa de amostragem. Um decimador com um fator de decimação  $M$  gera, a partir de uma sequência  $x(n)$ , a sequência:

$$y_D = x(Mn) \quad (\text{A.1})$$

Somente aquelas amostras de  $x(n)$  que ocorrem no tempo igual aos múltiplos de  $M$  serão retidas pelo decimador. O decimador é também denominado como amostrador descendente, sub-amostrador, compressor de taxa de amostragem, ou simplesmente compressor. Ver Figura A.1

Pode-se mostrar que a expressão para a transformada de Fourier da saída decimador  $Y_D(e^{j\omega})$  em termos da transformada de entrada  $X_D(e^{j\omega})$ , é dada por:

$$Y_D(e^{j\omega}) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} X(e^{j(\omega-2\pi n)/M}) \quad (\text{A.2})$$

O decimador por um fator  $M$  resulta em uma intermodulação (*aliasing*), somente se  $x(n)$  não for limitado em banda. A fim de evitar a geração de intermodulação,

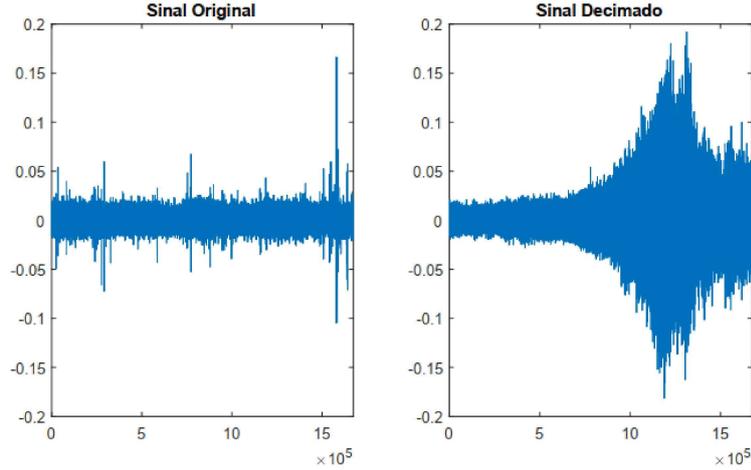


Figura A.1: Diagrama em bloco do decimador com redução da taxa de amostragem por um fator  $M$ .

coloca-se um filtro passa baixa de resposta em frequência  $H(z)$  antecedendo o decimador, conforme mostrado na figura a seguir:

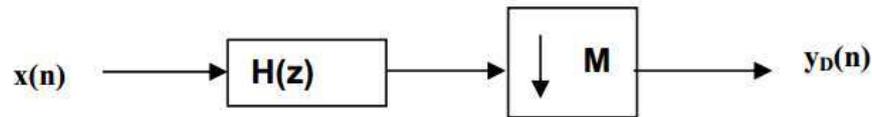


Figura A.2: O circuito de decimação completo.

## A.2 Método de Bartlett

O conceito básico por de trás deste método é reduzir grandes oscilações do espectrograma, subdividindo a amostra de  $N$  observações em  $K = N/M$  segmentos, sem overlapping, com  $M$  observações cada um.

Desta forma o cálculo do espectrograma para cada segmento  $P_s(\omega)$  é dada por:

$$P_s(\omega) = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_i(n) e^{-i\omega n} \right|^2 \quad (i = 0, 1, \dots, k-1) \quad (\text{A.3})$$

Por fim efetuamos a média dos espectrogramas para os  $K$  segmentos para obter a Densidade de Potência do Espectro de Bartlett, equação (A.4).

$$P_B(\omega) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} P_s(\omega) \quad (\text{A.4})$$

### A.3 Método de Welch

Este método é obtido através da modificação do método de Bartlett em dois aspectos. Primeiramente, Welch demonstrou que, em vez de apenas dividir a sequência de dados em segmentos menores, é mais vantajoso permitir o overlap de segmentos adjacentes até 50%. Desta forma, possuímos mais espectrogramas para realizar uma média e assim, reduzir eficazmente a variância para a Densidade Espectral da Potência estimada. A segunda alteração ao método de Bartlett é a aplicação de uma função janela aos segmentos de dados antes do cálculo do espectrograma. O resultado disto será um espectrograma modificado [38].

$$P_{sw}(\omega) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} \right|^2 \quad (\text{A.5})$$

Para sinais aleatórios, a transformada de Fourier não é definida (porque não se conhece o sinal todo o tempo), e busca-se assim estimar o espectro de potência [39]

Definindo a sequência de autocorrelação para um processo estacionário discreto  $x(n)$  como sendo a equação (A.6):

$$r(m) = E[\bar{x}(n) \times (n + m)] \quad (\text{A.6})$$

o espectro de potência  $S(\omega)$  de  $x(n)$  é a transformada de Fourier de tempo discreto de  $r(m)$ , equação (A.7):

$$S(\omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r(m)e^{-j\omega m} \quad (\text{A.7})$$

Dado um sinal de entrada finito  $x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ , uma estimativa de  $r(m)$  é dada pela equação (A.8):

$$\hat{r}(m) = \frac{1}{N - m} \sum_{n=0}^{N-1-m} \bar{x}(n)x(n + m) \quad (\text{A.8})$$

para  $0 \leq n \leq N$  com  $\hat{r}(-m) = \bar{\hat{r}}(m)$  Esta estimativa é não polarizada já que  $E[\hat{r}(m)] = r(m)$ . Entretanto, com  $m$  se aproximando de  $N$ , a variância do estimador  $\hat{r}(m)$  torna-se muito grande porque o número  $(N - m)$  de amostras sendo usadas no cálculo da média temporal é muito pequeno. Em consequência, o estimador polarizado:

$$\hat{r}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-m} \bar{x}(n)x(n + m), \quad 0 \leq n < N \quad (\text{A.9})$$