



MARINHA DO BRASIL
INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ACÚSTICA SUBMARINA

CORREÇÃO DAS INTERFERÊNCIAS NA MEDIÇÃO DO RUÍDO
IRRADIADO DE UMA EMBARCAÇÃO EM ÁGUAS RASAS

Wendel Quintana Freitas de Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina, PPGAS, do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Acústica Submarina.

Orientadores: Rogério de Moraes Calazan
Fabio Contrera Xavier

Arraial do Cabo
Julho de 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

L732c Lima, Wendel Quintana Freitas de
Correção das interferências na medição do ruído irradiado de uma embarcação
em águas rasas / Wendel Quintana Freitas de Lima. – Arraial do Cabo, 2024.

74 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Rogério de Moraes Calazan
Coorientador: Fabio Contrera Xavier

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo
Moreira, Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina, Arraial do
Cabo, 2024.

1. Medição do ruído irradiado. 2. Correção de interferência. 3. Propagação
acústica submarina. I. Calazan, Rogério de Moraes. II. Xavier, Fabio
Contrera III. Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira.
Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina. IV. Título.

CDD:620.25

WENDEL QUINTANA FREITAS DE LIMA

**CORREÇÃO DAS INTERFERÊNCIAS NA MEDIÇÃO DO RUÍDO
IRRADIADO DE UMA EMBARCAÇÃO EM ÁGUAS RASAS**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Acústica Submarina.

COMISSÃO JULGADORA:

**Dr. William Soares Filho, D.Sc.
Instituto de Pesquisas da Marinha**

**Prof. Fabio Barbosa Louza, Ph.D.
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira**

**Prof. Renato Peres Vio, Ph.D.
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira**

**Prof. Fabio Contrera Xavier, D.Sc.
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
Professor Coorientador**

**Prof. Rogério de Moraes Calazan, Ph.D.
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
Professor Orientador – Presidente da Banca Examinadora**

Arraial do Cabo, 04 de julho de 2024.

CORREÇÃO DAS INTERFERÊNCIAS NA MEDIÇÃO DO RUÍDO
IRRADIADO DE UMA EMBARCAÇÃO EM ÁGUAS RASAS

Wendel Quintana Freitas de Lima

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ACÚSTICA SUBMARINA DO INSTITUTO DE
ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ACÚSTICA SUBMARINA.

Orientadores: Prof. Rogério de Moraes Calazan, Ph.D.
Prof. Fabio Contrera Xavier, D.Sc.

Aprovada por: Dr. William Soares Filho, D.Sc.
Prof. Fabio Barbosa Louza, Ph.D.
Prof. Renato Peres Vio, Ph.D.

ARRAIAL DO CABO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2024

*Dedico este trabalho em memória
aos meus pais.*

*Primeiramente, à minha mãe,
Maria de Fátima, que veio a
falecer em 30 de abril de 2021,
um pouco antes da minha
inscrição no mestrado. Sua força
e amor sempre me inspiraram a
buscar o conhecimento e a
superação.*

*Em seguida, ao meu pai, Paulo,
falecido em 04 de março de
2024, quando eu estava
finalizando esta dissertação. Seu
exemplo de dedicação e
perseverança foi fundamental
para a conclusão desta jornada.
Aos dois, minha eterna gratidão
e saudade.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por guiar meus passos e iluminar meu percurso com as bênçãos que me foram concedidas ao longo desta jornada. Gostaria de estender meu agradecimento a todos que contribuíram para o meu sucesso.

Agradeço, em memória, aos meus pais, Paulo e Maria de Fátima, pela existência que me proporcionaram. Valorizo imensamente o incentivo que me ofereceram para os estudos, assim como a alegria que sentiam nas cerimônias de formatura. Aos meus irmãos Wellington, Viviane e Monique, por acreditarem em mim e estarem presentes em todos os momentos.

Aos meus orientadores, expresso minha profunda gratidão, reconhecendo que muitas de suas palavras e ações permanecerão gravadas em minha mente.

Ao meu Orientador, Comandante Rogério de Moraes Calazan, manifesto meu reconhecimento sincero, especialmente pela disponibilidade e atenção. Seus ensinamentos foram fundamentais para meu êxito.

Ao meu Coorientador, Professor Fábio Contrera Xavier, agradeço pela oportunidade única de discutir sobre o tema, pela credibilidade depositada e pelo constante apoio e motivação.

Ao Comandante Bruno Nunes Mendes, meu Orientador técnico do Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP), agradeço pelos ensinamentos, acessibilidade e bondade.

Aos amigos de turma, Barbara Christina Soares de Abreu, Marco André Desbrousses Cotta, Murillo de Brito Santos, Richard Barbosa Nobre e Yasmin Cristina Bidú dos Anjos, agradeço pelo bom convívio. O ambiente de afinidade trouxe inspiração e ajudou a superar as dificuldades.

Ao Ph.D. Renato Peres Vio, ao Ph.D. Alexandre Geddes Lemos Guarino, ao D.Sc. Vicente Barroso Júnior e demais docentes do PPGAS, expresso minha gratidão pela dedicação em cada disciplina, contribuindo imensamente para minha formação.

Aos militares do IEAPM, CF Louza, CC(EN) Vale, CC(EN) Backer, CC(EN) Amilcar, CC(EN) Alex, CC(EN) Lima, CC(EN) Bozzi, 1ºTen(EN) Tavares, SO Braun e a tripulação da embarcação Anchova, agradeço pela presteza, carisma e apoio.

Aos militares do Departamento de Medidas Acústicas e Eletromagnéticas do CASOP, CMG(RM-1) Warley Gripp Santana e 1ºTen(QC-CA) Rodrigo Scarabotto Godinho, agradeço pela recepção agradável nas vezes em que os visitei para buscar dados e tirar dúvidas.

À Dra. Maria Helena, 1ºTen Lory e aos militares do setor da Pós-Graduação, agradeço pelo profissionalismo fundamental para o andamento do curso.

Aos membros da banca, Ph.D. Fabio Barbosa Louza e Ph.D. Renato Peres Vio, agradeço pela confiança em meu trabalho. Ao D.Sc. William Soares Filho, pela participação na banca examinadora e pelas valiosas contribuições para o enriquecimento do trabalho.

À minha esposa, Fernanda, agradeço pela motivação, companheirismo e compreensão nos momentos em que estive ausente. Ao meu filho, Heitor, agradeço pelo amor e carinho.

À Marinha do Brasil (MB), expresso minha gratidão por me proporcionar a oportunidade de cursar o mestrado acadêmico.

Por fim, que esta declaração de gratidão alcance todos aqueles que contribuíram. Expressar minha gratidão vai além de um simples gesto de respeito e reconhecimento por essas pessoas. O encerramento deste trabalho comprova a importância dessas pessoas para cada desafio superado ao longo desta jornada de aprendizado.

“O trabalho pode ser árduo e a disciplina severa; mas o interesse nunca falha, e grande é o privilégio da realização.”

John William Strutt (The Lord Rayleigh)

Resumo da Dissertação apresentada ao IEAPM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CORREÇÃO DAS INTERFERÊNCIAS NA MEDIÇÃO DO RUÍDO IRRADIADO DE UMA EMBARCAÇÃO EM ÁGUAS RASAS

Wendel Quintana Freitas de Lima

Orientadores: Rogério de Moraes Calazan

Fabio Contrera Xavier

Programa: Acústica Submarina

A medição do ruído irradiado de uma embarcação é fundamental para avaliar o seu grau de discricção acústica, bem como o impacto do ruído no ecossistema marinho e a prevenção de danos estruturais em navios. Entretanto, essa medição precisa ser realizada de forma dinâmica, ou seja, em uma raia acústica para verificar a embarcação durante uma corrida, sendo inviável medir a um metro da fonte. Portanto, para estimar o nível da fonte, é necessário somar o nível de pressão sonora registrado no receptor com as perdas na propagação, causadas pelos mecanismos de atenuação, assim como as interferências causadas pelos múltiplos caminhos de propagação, especialmente em ambientes de águas rasas. Diversos trabalhos apresentam soluções de correção mas não levam em conta a atenuação na água e as interações com o fundo elástico, podendo impactar negativamente no nível estimado da fonte. Assim, este trabalho propõe implementar métodos de correção do ruído irradiado baseados em soluções analíticas e métodos empíricos disponíveis na literatura. Além disso, uma versão modificada do método das imagens é desenvolvida neste trabalho, a qual considera as interações com o fundo elástico e a atenuação na água. Adicionalmente, um modelo de propagação acústica será utilizado como método de correção. Por fim, será realizada uma análise do desempenho dos métodos implementados pela comparação do nível medido pelo nível estimado, inicialmente com dados simulados e posteriormente com dados experimentais coletados em Arraial do Cabo. Os resultados demonstram que os métodos que possuem correção de interferências e atenuação apresentaram uma melhoria na acurácia de mais de 10 dB quando comparados com o método de perda na propagação esférica.

Palavras-chave: medição do ruído irradiado; correção de interferência; propagação acústica submarina.

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

CORRECTION OF INTERFERENCE WHEN MEASURING NOISE
RADIATED FROM A VESSEL IN SHALLOW WATERS

Wendel Quintana Freitas de Lima

Advisors: Rogério de Moraes Calazan

Fabio Contrera Xavier

Department: Underwater Acoustics

The measurement of a vessel's radiated noise is essential to assess its degree of acoustic discretion, as well as the impact of noise on the marine ecosystem and the prevention of structural damage to ships. However, this measurement needs to be performed dynamically, that is, in an acoustic track to measure the vessel during a track, making it unfeasible to establish a reference at a meter from the source. Therefore, to estimate the source level, it is necessary to add the sound pressure level recorded at the receiver to the propagation losses caused by the attenuation mechanisms, as well as the interference caused by multiple propagation paths, especially in shallow water environments. Several studies present correction solutions but do not take into account the attenuation in water and the interactions with the elastic bottom, which can negatively impact the estimated source level. Thus, this work proposes to implement methods for correcting radiated noise based on analytical solutions and empirical methods available in the literature. In addition, a modified version of the image method is developed in this work, which considers the interactions with the elastic bottom and the attenuation in water. Additionally, an acoustic propagation model will be used as a correction method. Finally, an analysis of the performance of the implemented methods will be performed by comparing the measured level with the estimated level, initially with simulated data and later with experimental data collected in Arraial do Cabo. The results demonstrate that the methods that have interference and attenuation correction presented an improvement in accuracy of more than 10 dB when compared to the spherical propagation loss method.

Keywords: measurement of radiated noise; interference correction; underwater acoustic propagation.

Sumário

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	viii
Lista de Símbolos	ix
Lista de Abreviaturas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Apresentação do problema	2
1.2 Motivação para o trabalho	2
1.3 O estado da arte	3
1.4 Objetivos	6
1.5 Estrutura do documento	6
2 Revisão Bibliográfica	8
2.1 Som e pressão sonora	8
2.1.1 Medidas quantitativas do som	9
2.1.2 Funções de probabilidade	9
2.1.3 Funções de correlação	9
2.1.4 Nível de pressão sonora	10
2.1.5 Análise no domínio da frequência	11
2.1.6 Densidade espectral de potência	11
2.1.7 Bandas de frequência proporcionais	11
2.2 Propagação acústica no oceano	13
2.2.1 Reflexão de ondas	13
2.2.2 Efeito Lloyds-mirror	14
2.2.3 Consequências do efeito Lloyds-mirror na medição	16
2.3 Caracterização do canal	19
2.3.1 Frequência de corte do canal	20
2.3.2 Resposta ao impulso do canal de caminhos múltiplos	21
2.3.3 Efeito Doppler	22

2.3.4	Função de espalhamento Doppler	24
2.4	Teoria de raios	26
2.5	Método das imagens	27
3	Método Proposto	31
3.1	Medição do ruído irradiado submarino	31
3.1.1	Perda por espalhamento esférico (ESF)	33
3.1.2	Método das imagens de Pang <i>et al.</i> (PY)	33
3.1.3	Método das imagens de Ainslie & Wood (AW)	34
3.1.4	Método empírico de Meyer & Audoly (MA)	35
3.1.5	Método empírico <i>Seabed Critical Angle</i> (SCA)	36
3.2	Método das imagens modificado	36
3.3	Modelagem de banda larga usando o Traceo	39
3.4	Validação dos métodos de correção	40
3.5	Análise da acurácia dos métodos de correção	40
4	Ambiente simulado e descrição dos experimentos	42
4.1	Ambiente simulado	43
4.2	Área dos experimentos	44
4.2.1	Experimento na Enseada dos Anjos	45
4.2.2	Experimento na Enseada do Forno	46
4.2.3	Dados da Raia Acústica	52
4.3	Parâmetros do processamento de sinais	54
5	Resultados e Discussões	55
5.1	Ambiente simulado	55
5.2	Experimento na Enseada dos Anjos	58
5.2.1	Correções de SL utilizando o sinal LFM	59
5.3	Experimento na Enseada do Forno	61
5.3.1	Resposta ao impulso estimada com o sinal LFM	61
5.3.2	Correções de SL utilizando o sinal LFM	64
5.3.3	Correções de SL utilizando uma embarcação	66
5.4	Dados da Raia Acústica	69
5.5	Desempenho dos métodos de correção nos experimentos	71
6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	73
	Referências Bibliográficas	75

A	Características dos hidrofones	81
A.1	ITC 8073	81
A.2	GeoSpectrum M36	82
B	Características projetores acústicos	84
B.1	EDO 610E	84
B.2	Lubell 916C	86

Lista de Figuras

1.1	Curvas do nível relativo para diversos tipos de fundo. A linha tracejada representa a equação empírica.	4
1.2	Curvas de PL.	5
2.1	Interface entre dois meios e o ângulo rasante θ	13
2.2	Geometria do efeito Lloyds-mirror. O ponto em vermelho representa a fonte, enquanto o ponto em verde representa o receptor. R_1 é a trajetória direta entre a fonte e o receptor, enquanto R_2 representa a trajetória refletida na superfície. $P(r, z)$ refere-se ao campo de pressão resultante considerando ambas as contribuições, z_r corresponde à profundidade do receptor e z_s à profundidade da fonte.	15
2.3	Curvas de <i>sound pressure spectral density</i> $L_{p,f}$ em função da frequência, a curva sólida em preto é o caminho direto, em azul banda estreita e em vermelho banda larga.	17
2.4	Curvas de <i>sound pressure spectral density</i> $L_{p,f}$ versus frequência.	18
2.5	Curvas de <i>sound pressure spectral density</i> $L_{p,f}$ versus frequência.	19
2.6	Vista superior da trajetória percorrida por uma embarcação durante a medição do URN, o ponto P_1 indica o início e o ponto P_2 simboliza o fim da corrida, φ é o azimute e o ponto H em verde representa o hidrofone.	19
2.7	Frequência de corte do canal para diferentes profundidades e velocidades de propagação do som no fundo.	20
2.8	Sinal LFM sintético.	21
2.9	Geometria da trajetória da fonte com efeito Doppler.	23
2.10	Canal estático simulado.	25
2.11	Canal simulado para uma fonte com velocidade constante.	25
2.12	Método de imagens aplicado a um ambiente de isovelocidade em águas rasas.	28

2.13	Três primeiras soluções de fonte de imagem para um guia de ondas ideal. Em preto o caminho direto, em laranja o caminho com reflexão no fundo, em cinza o caminho com reflexão na superfície e em violeta o caminho com reflexão na superfície e no fundo.	29
3.1	Fontes do URN, em termos de faixa de frequência e contribuição. Em vermelho alta contribuição alta, em laranja contribuição média e em verde contribuição baixa.	32
3.2	Reflexão de uma onda no fundo elástico. A onda incidente pode excitar no fundo a propagação das ondas longitudinal e transversal. .	37
3.3	Fluxograma mostrando os passos para calcular o erro médio absoluto.	41
4.1	Diagrama da configuração do guia de ondas utilizado no ambiente simulado.	43
4.2	Área dos experimentos. Em azul, os pontos T1 (projektor) e H1 (hidrofone) do experimento estático na Enseada dos Anjos. Em amarelo, o ponto H2 representa o hidrofone utilizado no experimento na Enseada do Forno. E em vermelho, o ponto H3 é o hidrofone para gravação dos dados na Raia Acústica da MB nas proximidades da Praia Brava.	44
4.3	Estações fixas de transmissão e recepção.	45
4.4	Estação fixa com projektor acústico e hidrofone.	46
4.5	Experimento na Enseada do Forno. O ponto H2 em amarelo representa a localização do dispositivo autônomo de gravação. Os pontos em azul, nomeados de Tx1 a Tx5, representam as posições da embarcação durante os eventos de transmissão.	47
4.6	Configuração do experimento com embarcação. O ponto H2, em amarelo, representa o dispositivo autônomo de gravação, o ponto Tx , em vermelho, simboliza a fonte e os demais pontos, Tx1, Tx2,... Tx5, são as estações de transmissão do sinal LFM.	48
4.7	Perfis de velocidades do som em relação à distância.	49
4.8	Projektor Lubell LL916C.	49
4.9	TVR em relação à frequência do projektor Lubell LL916C.	50
4.10	Dispositivo autônomo de gravação.	51
4.11	Embarcação Anchova.	51
4.12	Raia Acústica.	53
5.1	Curvas de TL versus frequência calculadas para frequências centrais de 1/3 de oitava.	56
5.2	Diferença média absoluta em função da distância entre as abordagens em relação a ESF na faixa de frequências de 10 Hz a 10 kHz.	57

5.3	(a) Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e (b) função de espalhamento Doppler $\hat{S}(\tau, \nu)$ estimadas através de sinais transmitidos. (c) O perfil de atraso de potência e (d) o espectro Doppler de potência.	58
5.4	Curvas de SL em função da frequência. A curva sólida em preto corresponde ao SPL registrado no hidrofone de referência, a curva tracejada em preto é o SPL medido no hidrofone afastado, em cinza ESF, em roxo PY, em pontilhado azul escuro JEN, em vermelho AW, em laranja Traceo, em azul SCA e em verde MA. O eixo vertical da direita representa o SPL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, e o eixo vertical da esquerda representa o SL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2/\text{Hz}$	59
5.5	Gráfico em barras com o erro médio absoluto, em dB, entre os SL estimado por cada abordagem e o SL estimado com os dados experimentais coletados, na faixa de frequências entre 5,5 a 9 kHz.	61
5.6	Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 100 m de distância entre fonte e receptor.	62
5.7	Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 200 m de distância entre fonte e receptor.	62
5.8	Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 300 m de distância entre fonte e receptor.	63
5.9	Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 400 m de distância entre fonte e receptor.	63
5.10	Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 500 m de distância entre fonte e receptor.	64
5.11	Curvas de $\hat{S}L(f)$, $dh = 100$ m. Entre parênteses o erro médio absoluto na faixa de 2 a 4 kHz. O eixo vertical da direita representa o SPL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, e o da esquerda representa o SL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2/\text{Hz}$	64
5.12	Erro médio absoluto em relação as distâncias para o experimento da Enseada do Forno.	65
5.13	Desempenho médio das abordagens durante o experimento da Enseada do Forno.	66
5.14	Espectrogramas do ruído irradiado pela embarcação nas posições Tx1 (100 m), Tx2 (200 m) e Tx3 (300 m).	66

5.15	Curvas de SL calculadas para NB em função da frequência. A linha sólida preta representa o SL medido próximo à embarcação (aproximadamente 1 m) e a linha tracejada preta é o SPL registrado no hidrofone a uma distância de aproximadamente 100 m. O nível de ruído ambiente (RA) é representado pela linha pontilhada marrom e as demais linhas representam os métodos de correção. O eixo vertical da direita representa o SPL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, e o da esquerda representa o SL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2/\text{Hz}$	67
5.16	Erro médio absoluto em função da distância para banda estreita na faixa de frequências de 10 Hz a 100 Hz.	68
5.17	Erro médio absoluto considerando as três distâncias na faixa de frequências de 10 Hz a 100 Hz.	68
5.18	Corrida 1. Curvas do erro médio absoluto em função da distância. . .	69
5.19	Corrida 2. Curvas do erro médio absoluto em função da distância. . .	70
5.20	Erro médio absoluto considerando as duas corridas.	71
5.21	Desempenho dos métodos de correção nos experimentos.	71

Lista de Tabelas

2.1	Frequências centrais, 1/3 de oitava.	12
2.2	Parâmetros geométricos para as simulações.	18
4.1	Parâmetros do fundo para as simulações das métricas.	43
4.2	Parâmetros geométricos utilizados na simulação dos métodos de correção.	43
4.3	Coordenadas e dados das estações	45
4.4	Parâmetros do sinal LFM transmitido na estação estática.	45
4.5	Parâmetros do ambiente de medições estáticas.	46
4.6	Distâncias entre as estações de transmissão e os receptores.	48
4.7	Parâmetros do sinal LFM transmitido da embarcação.	48
4.8	Especificações da embarcação.	52
4.9	Parâmetros das corridas.	53

Lista de Símbolos

R_{xx}	função de autocorrelação, p. 9
R_{xy}	função de correlação cruzada, p. 9
$\Delta\nu$	velocidade relativa entre a fonte e o receptor, p. 23
α_p	coeficiente de atenuação da onda de compressão no sedimento, p. 38
α_s	coeficiente de atenuação da onda de cisalhamento no sedimento, p. 38
β_{sed}	coeficiente de atenuação no sedimento, p. 35
λ	comprimento de onda, p. 15
ν	mudança na frequência, p. 24
ν_r	velocidade do receptor em relação a fonte, p. 23
ν_s	velocidade relativa da fonte, p. 23
ω	frequência angular, p. 8
ϕ	ângulo de fase, p. 8
ψ	ângulo crítico do fundo do mar, p. 34
ρ	densidade, p. 14
σ	desvio padrão, p. 9
σ^2	variância, p. 9
σ_1	termo de correção para a interferência entre o caminho direto e a reflexão da superfície, p. 36
σ_ψ	termo de correção para a interferência entre o caminho direto e a reflexão no fundo do mar, p. 36

τ	tempo de atraso, p. 9
τ_c	atraso no PMA, p. 23
τ_i	atraso de propagação, p. 16
τ_p	largura do pulso, p. 21
θ	ângulo rasante (<i>grazing angle</i>), p. 13
θ_i	ângulo de incidência ($90^\circ - \theta$), p. 13
φ	ângulo azimutal, p. 19
a_i	amplitude de propagação, p. 16
B	largura da banda, p. 21
c	velocidade de propagação do som no meio, p. 15
c_b	velocidade de propagação do som no fundo, p. 20
c_p	velocidade da onda de compressão no sedimento, p. 38
c_s	velocidade da onda de cisalhamento no sedimento, p. 38
c_w	velocidade de propagação do som na água, p. 20
D	profundidade do mar, p. 20
d	profundidade da fonte associada ao calado do navio, p. 34
f_d	mudança na frequência Doppler, p. 23
dh	distância entre fonte e o receptor, p. 15
d_{pma}	distância no PMA, p. 23
$e_i(f)$	diferença residual entre níveis, p. 40
f	frequência, p. 8
f_0	frequência inicial do sinal LFM, p. 21
f_c	frequências centrais para bandas de oitava, p. 11
f_{corte}	frequência de corte do canal, p. 20

f_l	frequência inferior da banda, p. 12
f_o	frequência original da fonte, p. 23
f_r	frequência observada no receptor, p. 23
f_{ref}	valor de referência da frequência (1 Hz), p. 11
f_s	frequência de amostragem, p. 69
f_u	frequência superior da banda, p. 12
h	altura do receptor a partir do fundo do mar, p. 35
$\hat{h}(t, \tau)$	resposta ao impulso estimada, p. 21
I_{mn}	intensidade acústica da onda, p. 39
k	numero de onda acústico, p. 14
L_p	nível de pressão sonora (<i>sound pressure level</i>), p. 10
$L_{p,f}$	<i>sound pressure spectral density</i> , p. 11
L_S	nível da fonte (<i>source level</i>), p. 12
$L_{S,i}(f)$	nível para medição i na frequência f , p. 40
$L_{S,ref}(f)$	nível de referência, p. 40
$\hat{P}(\nu)$	espectro Doppler de potência (<i>Doppler power spectrum</i>), p. 24
$\hat{P}(\tau)$	perfil de atraso de potência (<i>power delay profile</i>), p. 25
p	pressão acústica, p. 8
P_n	módulo da amplitude de pressão da componente de frequência, p. 8
\hat{p}_n	amplitude complexa, p. 8
p_n	pressão associada ao enésimo componente de frequência, p. 8
p_{ref}	valor de referência da pressão sonora ($1\mu\text{Pa}$), p. 10
p_{rms}	pressão sonora média quadrática, p. 10
R_1	caminho direto de propagação, p. 14

R_2	caminho com reflexão na superfície, p. 14
R_f	coeficiente de reflexão no fundo, p. 39
R_{mn}	caminho entre a fonte e o receptor, p. 29
R_s	coeficiente de reflexão na superfície, p. 39
$\hat{S}(\nu, \tau)$	função de espalhamento de atraso Doppler (<i>spreading function</i>), p. 24
$s(t)$	sinal LFM, p. 21
S_{xx}	densidade espectral de potência (<i>power spectral density</i>), p. 11
T	intervalo de tempo médio, p. 9
t	tempo, p. 8
t_c	tempo central, p. 10
w	razão de densidade, p. 35
z_r	profundidade do receptor, p. 14
z_s	profundidade da fonte, p. 14

Lista de Abreviaturas

A/S	antissubmarino, p. 2
ADR	amplitudes e atrasos (<i>Amplitudes and Delays using Regula falsi</i>), p. 39
AUV	veículo subaquático autônomo (<i>autonomous underwater vehicle</i>), p. 3
AW	método das imagens de Ainslie & Wood, p. 34
BB	banda larga (<i>broad band</i>), p. 16
CASOP	Centro de Apoio a Sistemas Operativos, p. 52
CIR	resposta ao impulso do canal (<i>channel impulse response</i>), p. 39
ESF	perda por espalhamento esférico, p. 33
GPS	sistema de posicionamento global (<i>global positioning system</i>), p. 47
JEN	método das imagens modificado de <i>Jensen, et al.</i> , p. 36
LFM	modulado em frequência linear (<i>linear frequency-modulated</i>), p. 21
LM	<i>Lloyds-mirror</i> , p. 2
MAE	erro médio absoluto (<i>mean absolute error</i>), p. 40
MA	método empírico Meyer & Audoly, p. 35
MB	Marinha do Brasil, p. 42
NB	banda estreita (<i>narrow band</i>), p. 16
PL	perda na propagação (<i>propagation loss</i>), p. 2

PMA	ponto de maior aproximação, p. 18
PSD	densidade espectral de potência (<i>power spectral density</i>), p. 11
PY	método das imagens Pang <i>et al.</i> , p. 33
RA	ruído ambiente, p. 67
RMS	raiz do valor quadrático médio (<i>root mean square</i>), p. 10
RNL	nível de ruído irradiado (<i>radiated noise level</i>), p. 33
RPM	rotações por minuto, p. 52
SCA	ângulo crítico do fundo do mar (<i>seabed critical angle</i>), p. 5
SL	nível da fonte (<i>source level</i>), p. 2
SNR	relação sinal-ruído (<i>signal-to-noise ratio</i>), p. 66
SPL	nível de pressão sonora (<i>sound pressure level</i>), p. 2
TL	perda na transmissão (<i>transmission loss</i>), p. 4
TRA	Traceo, p. 39
TVR	resposta de tensão de transmissão (<i>transmitting voltage response</i>), p. 49
URN	ruído irradiado submarino (<i>underwater radiated noise</i>), p. 1
dB	decibel, p. 50

Capítulo 1

Introdução

Um dos primeiros registros sobre a propagação do som no mar ocorreu em 1490 nas anotações do cientista italiano *Leonardo da Vinci* (1452-1519) quando escreveu o princípio para a escuta passiva, seu uso prático ocorreu até a Primeira Guerra Mundial, e foi aprimorado com adição de tubos de ar para determinar o rumo do alvo ruidoso (URICK, 1983).

"Se você parar o seu navio e colocar um longo tubo na água e a outra extremidade no seu ouvido, você ouvirá navios a uma grande distância de si."

Leonardo Da Vinci, 1490.

A acústica é amplamente utilizada no meio marinho, sendo as ondas sonoras a forma de radiação que melhor se propaga na água, especialmente devido à menor atenuação quando comparadas às ondas eletromagnéticas (URICK, 1983). A radiação acústica de navios e submarinos pode ser explorada com a medição passiva por hidrofones com a finalidade de avaliar o grau de discricção acústica de uma embarcação, associado ao nível de ruído irradiado submarino (URN, *underwater radiated noise*) e expresso como nível espectral. O espectro depende das características da embarcação, geralmente é descrito como uma assinatura acústica e pode ser separado em duas categorias gerais: banda larga e banda estreita (HODGES, 2011).

A avaliação do URN de uma embarcação é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias mais silenciosas, que podem ter várias finalidades, incluindo operações militares, redução do impacto no ecossistema marinho e prevenção de danos estruturais em navios (AUDOLY; MEYER, 2017; ERBE *et al.*, 2019). No entanto, essa medição é complexa quando realizada em um ambiente de guia de ondas de águas rasas. As seções deste capítulo apresentam as principais dificuldades encontradas na medição do ruído, a motivação para esta pesquisa, o estado da arte com algumas alternativas de solução e os objetivos.

1.1 Apresentação do problema

O nível da fonte (SL, *source level*) de uma embarcação pode ser calculado medindo o valor do nível da pressão sonora (SPL, *sound pressure level*) registrado no receptor e adicionando a perda na propagação (PL, *propagation loss*) (AINSLIE, 2010). Para determinar a PL entre a fonte e o receptor, é necessário conhecer os mecanismos de perda acústica mais importantes que são a atenuação volumétrica, a perda pela interação com as fronteiras e a perda por espalhamento (JENSEN *et al.*, 2011).

A dificuldade em medir o ruído irradiado por uma embarcação é principalmente atribuída às características do canal de propagação e às incertezas na geometria de medição, que influenciam diretamente o sinal captado pelo receptor (MACGILLIVRAY *et al.*, 2023). Sob a perspectiva de um problema de valor de contorno, o mar pode ser modelado como um canal para a propagação de ondas sonoras, estendendo-se da superfície até o fundo. Nesse canal, a absorção da energia acústica na água e a interação com as fronteiras resultam no decaimento da intensidade do som e no fenômeno de espalhamento (JENSEN *et al.*, 2011). A superfície atua como a fronteira superior, representando a interface entre água e ar, onde o som é totalmente refletido com uma mudança de fase de 180° . Quando a fonte sonora está próxima da superfície lisa, os raios de caminho direto e refletido que alcançam o receptor se combinam, resultando em padrões de interferência construtiva e destrutiva conhecidos como efeito *Lloyds-mirror* (LM) (HODGES, 2011). Por outro lado, o fundo é a fronteira inferior do canal, e sua proximidade é mais pronunciada em águas rasas, o que intensifica as interações (KATSNELSON; PETNIKOV; LYNCH, 2012; MACGILLIVRAY *et al.*, 2023). Como resultado, para determinar o SL, é necessário corrigir o SPL registrado no receptor, levando em consideração os efeitos das interferências e perdas ao longo da trajetória de propagação.

1.2 Motivação para o trabalho

A principal motivação deste trabalho reside em implementar e analisar diferentes métodos de correção do ruído irradiado, de modo a avaliar o desempenho de cada um por meio do erro associado à estimativa do SL de uma embarcação. Essa correção é fundamental uma vez que a assinatura acústica permite estimar a condição de ruído irradiado pelos meios navais e contribui para o planejamento, principalmente das operações antissubmarino (A/S). A eficácia dessas operações está associada aos meios de detecção e localização disponíveis. Por isso, tais operações demandam o desenvolvimento de sistemas silenciosos e proporcionam o emprego de técnicas de detecção cada vez mais sofisticadas. Como resultado, nos últimos anos,

observou-se uma tendência de os submarinos posicionarem-se e lançarem armas a distâncias maiores, devido ao aumento do alcance dos torpedos e à melhoria de seus sistemas sonares (TRAMUJAS, 2008; AUDOLY; MEYER, 2017; ARAGÃO, 2021).

O ruído irradiado representa um fator significativo que compromete a eficácia militar dos sistemas navais. Mesmo o ruído próprio do sonar impõe limitações à capacidade de detecção de alvos (ROSS, 1979). Portanto, o conhecimento do ruído irradiado pelas embarcações de superfície implica na adequação dos meios e das táticas navais (ARAGÃO, 2021). Além disso, é importante destacar as preocupações relacionadas à segurança dos portos, especialmente diante da evolução e do uso de veículos submarinos autônomos (AUV, *autonomous underwater vehicle*), os quais têm a capacidade de operar de forma silenciosa, dificultando sua detecção (ARAGÃO, 2019).

Outro motivo relevante está associado ao aumento do transporte marítimo, que transformou o URN em uma das principais fontes de poluição sonora nos oceanos (ERBE *et al.*, 2019; AINSLIE *et al.*, 2022). Portanto, é imprescindível avaliar o nível dessas emissões para prever o seu impacto no ecossistema marinho (MACGILLIVRAY *et al.*, 2023). Além disso, o ruído emitido pelas embarcações pode até mesmo causar riscos estruturais devido à vibração (LEAPER; RENILSON; RYAN, 2014).

1.3 O estado da arte

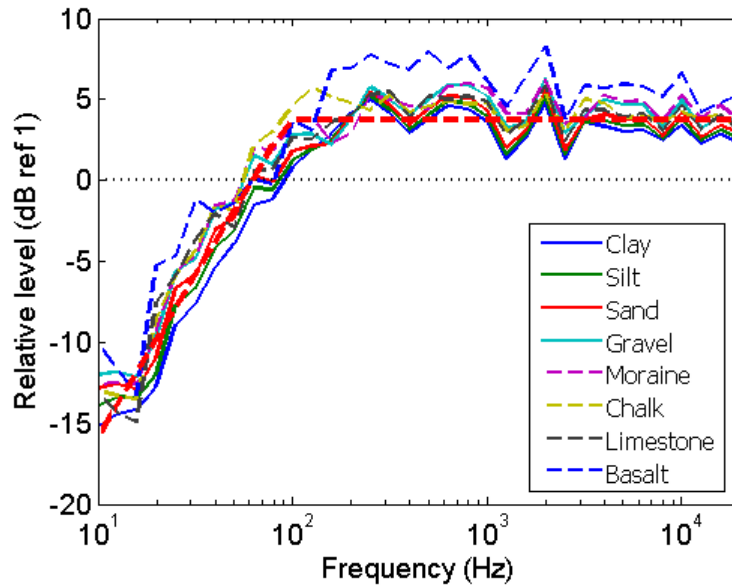
Na dissertação de mestrado desenvolvida em XAVIER (2016), o autor apresentou um estudo sobre o uso da interferometria acústica na caracterização de ruído de banda larga irradiado por navios nas proximidades de Arraial do Cabo, a fim de entender as características dos padrões de interferência encontrados nas medições, que dificultam a medição e podem mascarar tons característicos. O autor destacou a importância do perfil de velocidades do som, das características do sedimento e do ângulo de incidência na modelagem e, apontou, o estado do mar e a distância entre a fonte e o hidrofone, dois fatores fundamentais para modificar os padrões.

Na pesquisa conduzida por Audoly & Meyer (2017), o efeito LM na medição foi abordado através de simulações que se concentraram na interação do som com a superfície, em um guia de ondas ideal. Os autores investigaram os deslocamentos em amplitude e frequência resultantes das mudanças nos parâmetros geométricos, além de analisarem o aumento das interferências em relação à frequência. Eles também empregaram o nível médio, calculado em bandas de frequências centrais de 1/3 de oitava, como uma estratégia para lidar com as incertezas na geometria e as variações no SPL em frequências mais altas.

No estudo conduzido por Meyer & Audoly (2020), os autores desenvolveram uma fórmula empírica, utilizando simulação numérica, para corrigir a influência

ambiental e estimar o SL. Essas simulações foram realizadas para diferentes tipos de fundos utilizando um modelo de integração do número de onda para frequências até 1.000 Hz e um modelo de traçado de raios para frequências acima de 1.000 Hz. Ao considerar frequências discretas e calcular a média para bandas de um terço de oitava no intervalo de 10 Hz a 20 kHz, os autores observaram que o nível relativo apresenta uma inclinação na faixa de 10 a 100 Hz. Por outro lado, na faixa de alta frequência, o nível se mantém constante, devido às múltiplas reflexões das ondas acústicas tanto no fundo do mar quanto na superfície, conforme mostrado na Fig. 1.1.

Figura 1.1: Curvas do nível relativo para diversos tipos de fundo. A linha tracejada representa a equação empírica.



Fonte: Retirado de Meyer & Audoly (2020).

Em Pang *et al.* (2020), os autores realizaram a estimativa do fator de perda na propagação associado ao SL e, em seguida, simularam as características de propagação sonora para um ambiente de águas rasas usando o método das imagens, considerando o coeficiente de reflexão no fundo fluido. Adicionalmente, foram utilizados dados experimentais de corridas de um navio, com o intuito de determinar o SL para diferentes distâncias do hidrofone, por meio da soma entre o SPL e a perda na transmissão (TL, *transmission loss*) encontrada na simulação.

No trabalho apresentado por Ainslie & Wood (2022), os autores introduziram uma técnica destinada a estimar o SL de embarcações de superfície a partir de medições do SPL em ambientes de águas rasas. Eles desenvolveram uma fórmula que consiste em somas de números reais utilizando o método das imagens, incluindo somas semi-coerentes. Essa simplificação foi alcançada ao modelar a embarcação

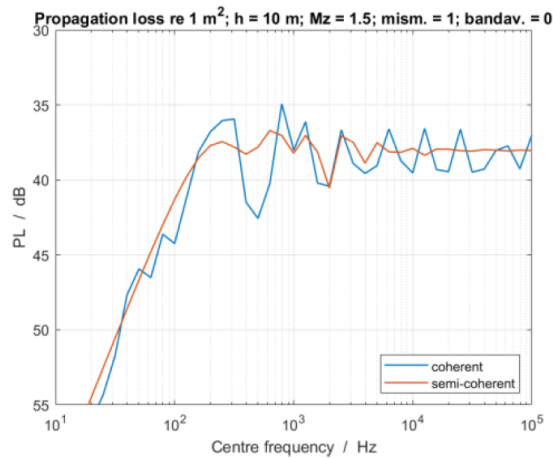
como uma fonte sonora próxima à superfície do mar, dentro de um padrão de interferência do efeito LM, que é integrado analiticamente ao longo da frequência. A curva da perda na propagação semi-coerente é mostrada, em vermelho, na Fig. 1.2a.

Na pesquisa desenvolvida em MacGillivray *et al.* (2023), os autores mostraram a viabilidade de obter estimativas reproduzíveis do SL da embarcação em águas rasas, somando o SPL com a TL. Além disso, eles testaram quatro abordagens utilizando dados experimentais, e confirmaram a possibilidade de obter estimativas reproduzíveis do SL da embarcação em águas rasas, comparáveis a de medições em águas profundas. Sendo assim, os autores alcançaram uma estimativa robusta com o método de correção empírico denominado método do ângulo crítico do fundo do mar (SCA, *seabed critical angle method*), que inclui em sua fórmula um termo de interferência de superfície e um termo de interferência no fundo, dependente do ângulo crítico. A curva da perda na propagação empírica do método de correção SCA é mostrada, em vermelho tracejado, na Fig. 1.2b.

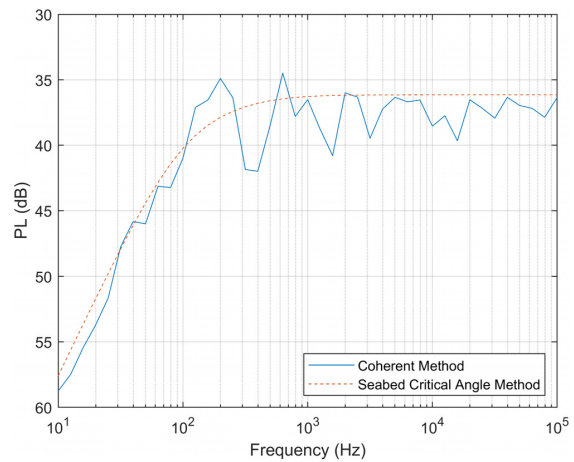
Figura 1.2: Curvas de PL.

(a) Método de correção de Ainslie & Wood.

(b) Método de correção SCA.



Fonte: Retirado de Ainslie & Wood (2022).



Fonte: Retirado de MacGillivray *et al.* (2023).

Nos estudos analisados, os métodos propostos para estimar o SL envolvem a soma do SPL com a TL calculada por meio de expressões práticas e simplificadas. Em todos os trabalhos analisados, as soluções não tratavam a atenuação na água e as interações com o fundo elástico, incluindo tanto das ondas de cisalhamento quanto de compressão, podendo impactar negativamente no cálculo do campo de pressão calculado. Complementando esses estudos e visando aprimorar as técnicas existentes, esta pesquisa propõe a implementação de diversas abordagens de correção, seguida da análise do desempenho das mesmas por meio de comparações entre o SL estimado e o SL obtido, inicialmente com dados simulados e posteriormente,

com dados experimentais coletados em Arraial do Cabo. Esses dados experimentais incluem a transmissão e recepção de uma sequência de sinais de banda larga, além de gravações do ruído irradiado por embarcações na região. Além disso, uma versão modificada do método das imagens é desenvolvida neste trabalho, a qual considerará as interações com o fundo elástico e a atenuação na água. Adicionalmente, um modelo de propagação acústica, baseado na teoria de raios, será utilizado como método de correção e seus resultados também serão comparados com os métodos empíricos presentes na literatura pesquisada.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é obter o SL de uma embarcação por diferentes métodos de correção e comparar com dados experimentais coletados. Para tal, os objetivos específicos são:

- Estudar e implementar os principais métodos de correção de ruído irradiado por embarcação, presentes na literatura;
- Implementar a modelagem de banda larga baseada em modelagem da propagação acústica;
- Implementar um método de correção, considerando as interações com o fundo elástico e a atenuação na água;
- Criar um ambiente de simulação para executar testes e análise preliminar dos métodos de correção utilizando dados sintéticos, por meio da modelagem de um ambiente com incertezas; e
- Realizar a análise do desempenho dos diferentes métodos utilizando dados experimentais.

1.5 Estrutura do documento

A presente dissertação está organizada em seis capítulos, cada um abordando aspectos relacionados à medição do ruído irradiado por uma embarcação.

No Cap. 2, é realizada uma revisão bibliográfica, destacando os principais conceitos, como definição de som, densidade espectral de potência, bandas de frequência proporcionais, geometria empregada para medição, caracterização de um canal oceânico de águas rasas, a teoria de raios e o método das imagens.

O Cap. 3 concentra-se na apresentação da metodologia utilizada na pesquisa, descrevendo os métodos de correção disponíveis na literatura, detalhando

o desenvolvimento tanto da versão modificada do método das imagens quanto da modelagem de banda larga utilizando o Traceo. Também são abordadas a técnica utilizada para avaliar o desempenho das abordagens e o método para aplicação das correções.

No Cap. 4, são descritas as características físicas e ambientais da região onde os experimentos foram conduzidos, incluindo as configurações e parâmetros adotados durante as atividades experimentais. O Cap. 5 apresenta os resultados e discussões. Finalmente, o Cap. 6 consolida as principais conclusões deste estudo e propõem sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo descreve os conceitos empregados nesta dissertação referentes a propagação acústica submarina e a medição de ruído irradiado. Iniciando na Seção 2.1, são apresentadas as definições de som, pressão sonora, densidade espectral de potência e as bandas de frequência proporcionais. A Seção 2.2 introduz conceitos relacionados à propagação acústica no oceano, descreve a geometria empregada para a medição do som emitido por uma fonte próxima à superfície e analisa os efeitos causados pelas interferências da reflexão na superfície do mar. A caracterização de um canal oceânico de águas rasas é discutida na Seção 2.3. Por fim, as Seções 2.4 e 2.5 são introduções à teoria de raios e ao método das imagens, respectivamente.

2.1 Som e pressão sonora

O som está associado a flutuações de pressão provocadas por vibrações que foram transmitidas a um meio, sendo assim, trata-se de um efeito mecânico que precisa de um meio material para se propagar (URICK, 1983). O campo sonoro de um fluido é definido pela relação entre a pressão acústica p e o tempo t , essa relação pode variar na amplitude e duração, sendo assim, é comum utilizar diversas médias que aproximadamente quantificam a magnitude do som e seu conteúdo de frequência. Assim, a função $p(t)$ pode ser descrita como uma combinação de várias formas de onda $p_n(t)$ com frequências constantes (PIERCE, 2019)

$$p(t) = \sum_{n=1}^N p_n(t), \quad (2.1)$$

$$p_n(t) = P_n \cos(\omega_n t - \phi_n) = \text{Re}\{\hat{p}_n e^{-j\omega_n t}\}, \quad (2.2)$$

onde P_n é o módulo da amplitude, f_n é a frequência, $\omega_n = 2\pi f_n$ é a frequência angular, ϕ_n é a fase constante e $\hat{p}_n = P_n e^{j\phi_n}$ é a amplitude complexa.

2.1.1 Medidas quantitativas do som

Um sinal aleatório é descrito em termos de probabilidade e médias estatísticas, sendo caracterizado por meio de quatro tipos de funções estatísticas. Essas incluem valores quadráticos médios e variância, distribuições de probabilidade, funções de correlação e funções de densidade espectral. Para muitos fenômenos físicos aleatórios de interesse na engenharia, é possível tratar esses sinais como aproximadamente estacionários, desde que a duração do sinal seja significativamente maior do que o período da menor componente de frequência de interesse (NORTON; KARCZUB, 2003).

2.1.2 Funções de probabilidade

O valor esperado ou médio $E[x(t)]$ de uma função $x(t)$, é dado por (NORTON; KARCZUB, 2003)

$$E[x(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx, \quad (2.3)$$

onde T é o intervalo de tempo médio, $p(x)$ representa a função densidade de probabilidade, a qual descreve a probabilidade de uma variável aleatória cair no intervalo de x a $x + dx$. Para um processo estacionário aleatório a variável x torna-se invariante no tempo, sendo assim $E[x(t)] = E[x]$, e valor quadrático médio $E[x^2]$, é o valor médio de x^2 definido por (NORTON; KARCZUB, 2003)

$$E[x^2] = \frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx, \quad (2.4)$$

Além disso, define-se a variância σ^2 como (NORTON; KARCZUB, 2003)

$$\sigma^2 = E[x^2] - E[x]^2, \quad (2.5)$$

onde σ é o desvio padrão.

2.1.3 Funções de correlação

A função de autocorrelação $R_{xx}(\tau)$ para um sinal aleatório, $x(t)$, fornece a dependência da variável x em algum instante de tempo t para outro momento $t + \tau$ (PIERCE, 2019)

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau) dt, \quad (2.6)$$

A função de correlação cruzada $R_{xy}(\tau)$ entre dois sinais aleatórios estacionários, $x(t)$ e $y(t)$ diferentes, é definida como (NORTON; KARCZUB, 2003)

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t + \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt, \quad (2.7)$$

2.1.4 Nível de pressão sonora

A medida do som mais importante é a pressão sonora média quadrática p_{rms} (RMS, *root mean square*) (JACOBSEN *et al.*, 2011). Considerando um intervalo de tempo médio T suficientemente grande, a média temporal dos valores quadráticos é calculada por (PIERCE, 2019)

$$p_{rms}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_c - T/2}^{t_c + T/2} p^2(t)dt \right\}, \quad (2.8)$$

onde t_c é qualquer tempo central escolhido arbitrariamente do intervalo de média. Embora amplitudes de pressão sonora possam ser medidas em termos de qualquer unidade física de pressão, o nível de pressão sonora (*sound pressure level*) L_p tem as unidades de decibéis (dB) e é definido variando linearmente como o logaritmo na base 10 da pressão média quadrada (PIERCE, 2019)

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right), \quad (2.9)$$

onde o denominador representa uma pressão de referência que é considerada como $p_{ref} = 1\mu\text{Pa}$ em acústica submarina (KINSLER *et al.*, 2000). Para diferentes fontes, a soma de níveis de pressão sonora é uma adição linear de p^2 (NORTON; KARCZUB, 2003)

$$p_T^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2, \quad (2.10)$$

Com isso

$$L_{pT} = 10 \log_{10} \left(\frac{p_T^2}{p_{ref}^2} \right). \quad (2.11)$$

Em se tratando dos níveis em decibéis, a soma deverá ser realizada com base na proporção. Assim, para calcular corretamente a média dos L_p s, a seguinte expressão é necessária (HOWARD; CAZZOLATO, 2014)

$$\bar{L}_p = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{p,i}/10} \right). \quad (2.12)$$

2.1.5 Análise no domínio da frequência

A transformada de Fourier é fundamental para decompor um sinal no domínio do tempo em suas componentes de frequência, uma vez que ela permite expressar um sinal como uma soma ou integral de senos e cossenos com diferentes frequências (OPPENHEIM, 2010). O espectro de pressão sonora $P(f)$ é a transformada de Fourier de $p(t)$ (AINSLIE; HALVORSEN; ROBINSON, 2021)

$$P(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2.13)$$

2.1.6 Densidade espectral de potência

A densidade espectral de potência (PSD, *power spectral density*), é uma função que descreve a distribuição da potência de um sinal em diferentes frequências. É definida como a transformada de Fourier de $R_{xx}(\tau)$ (ABRAHAM, 2019)

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (2.14)$$

onde $R_{xx}(\tau)$ representa a função de autocorrelação do sinal aleatório $x(t)$.

A média da pressão sonora ao quadrado em uma banda de frequência com largura Δf e centrada na frequência f pode ser representada como um nível de densidade espectral de potência, fazendo referência a p_{ref}^2/f_{ref} , onde f_{ref} é igual a 1 Hz. A unidade para a densidade espectral é Pa^2/Hz , e a expressão correspondente em decibéis (dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) é conhecida como *sound pressure spectral density*, e é calculada como (AINSLIE; HALVORSEN; ROBINSON, 2021)

$$L_{p,f} = 10 \log_{10} \left(\frac{\Delta \overline{p^2} / \Delta f}{p_{ref}^2 / f_{ref}} \right). \quad (2.15)$$

2.1.7 Bandas de frequência proporcionais

As bandas de oitava são usadas em diversas aplicações, incluindo, música, acústica e outras áreas relacionadas (DANIEL, 2006). As escalas logarítmicas são comumente usadas devido a percepção humana do som, que avalia o volume relativo de dois sons com base na proporção de suas intensidades e consegue interpretar uma faixa de frequências no intervalo de 20 Hz a 20 kHz (KINSLER *et al.*, 2000).

Para fins analíticos o espectro audível é dividido em 10 bandas de oitava com frequências centrais $f_c = 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000$ e 16.000 Hz, e as bandas de um terço de oitava são formadas subdividindo cada banda de oitava em três partes (DANIEL, 2006).

Em aplicações de acústica, incluindo o controle de ruído, é comum empregar um sistema de divisão frequencial em terços de oitavas. Esse sistema se baseia no fato de que $2^{10/3}$ é aproximadamente 10, ou seja, dez terços de oitavas quase equivalem a uma década. Dado o valor arredondado, as frequências centrais das bandas padrão de terço de oitava são escolhidas de forma que a frequência central na década superior seja 10 vezes a frequência da inferior (PIERCE, 2019).

Tabela 2.1: Frequências centrais, 1/3 de oitava.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_c = 10^{n/10} \approx$	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10

Fonte: Adaptado de Pierce (2019).

A frequência central f_c de qualquer banda é definida como a média geométrica

$$f_c = \sqrt{f_l f_u}, \quad (2.16)$$

onde f_l é a frequência inferior e f_u é a frequência superior. As bandas de oitava têm a razão de frequência logarítmica com base 2, onde a frequência do limite superior é o dobro da frequência do limite inferior da banda. Um terço de oitava representa uma oitava dividida em três partes iguais (AINSLIE; HALVORSEN; ROBINSON, 2021).

As frequências centrais das bandas de um terço de oitava padrão podem ser calculadas com a fórmula (COMMISSION *et al.*, 2014; PIERCE, 2019)

$$f_c = 10^{n/10} \quad (\text{Hz}), \quad (2.17)$$

onde n é um número inteiro.

A frequência inferior para um terço de oitava será (PIERCE, 2019)

$$f_l = 2^{-1/6} f_c, \quad (2.18)$$

a frequência superior (PIERCE, 2019)

$$f_u = 2^{1/6} f_c, \quad (2.19)$$

e a largura de banda

$$\Delta f = (2^{+1/6} - 2^{-1/6}) f_c. \quad (2.20)$$

O nível da fonte (*source level*) L_S muitas vezes é dado em bandas de 1/3 de oitava, em termos do nível do espectro da fonte. O nível da banda de 1/3 de oitava

pode ser obtido integrando-se na banda de frequência (LIEFVENDAHL; FEYMARK; BENSOW, 2015),

$$SL(f)[1/3 \text{ Oitava dB re 1m, } 1 \mu\text{Pa}] = 10 \log_{10} \int_{f_i}^{f_u} 10^{S(f)/10} df. \quad (2.21)$$

2.2 Propagação acústica no oceano

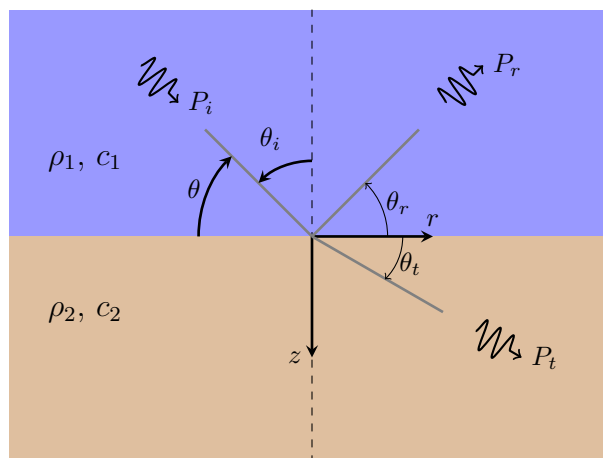
A dificuldade para medir o ruído irradiado de uma embarcação em uma raia acústica é causada principalmente, pelas características do canal de propagação que proporcionam perda de energia e incertezas na geometria de medição que influenciam no sinal gravado pelo receptor (MACGILLIVRAY *et al.*, 2023).

A caracterização do ambiente oceânico pode ser uma tarefa complexa que requer consideração de diversos elementos. Portanto, o aprimoramento da modelagem demanda a inclusão de variáveis como perdas, fronteiras, diferentes camadas do fundo marinho e a análise da propagação através delas. Além disso, é necessário levar em conta a variação das características de propagação em relação ao alcance e profundidade, bem como avaliar a rugosidade das superfícies, a dependência temporal e outros componentes aleatórios (ABRAHAM, 2019).

2.2.1 Reflexão de ondas

O ângulo rasante (*grazing angle*) θ mostrado na Fig. 2.1 é o complementar do ângulo de incidência θ_i (calculado entre a normal da fronteira que divide os dois fluidos) (JENSEN *et al.*, 2011).

Figura 2.1: Interface entre dois meios e o ângulo rasante θ .



Fonte: Adaptado de Jensen *et al.* (2011).

Quando uma onda incide na interface entre dois meios, parte de sua energia é refletida e parte é transferida para o outro meio (RODRÍGUEZ, 2021).

2.2.2 Efeito Lloyds-mirror

O padrão de interferências resultante do efeito *Lloyds-mirror* (LM) é criado por uma fonte pontual próxima a uma superfície lisa. Neste padrão, a trajetória da onda refletida pode ser representada por uma fonte de imagem posicionada acima da superfície. Devido à diferença significativa entre a impedância acústica da água e a impedância acústica do ar, ocorre a inversão de fase durante a reflexão. O cálculo do coeficiente de reflexão de *Rayleigh* na superfície \mathcal{R}_s , utilizando as impedâncias da água e do ar, é realizado com a Eq. 2.22 com a finalidade de mostrar a inversão de fase da onda durante a reflexão para qualquer ângulo de incidência (KINSLER *et al.*, 2000).

$$\mathcal{R}_s(\theta) = \frac{z_2/z_1 - \cos\theta_t/\cos\theta_i}{z_2/z_1 + \cos\theta_t/\cos\theta_i} \approx -1, \quad (2.22)$$

onde $z_1 = 1,54 \times 10^6$ Pa.s/m é a impedância acústica da água do mar, $z_2 = 415$ Pa.s/m é a impedância acústica do ar, θ_t é o ângulo de transmissão e θ_i é o ângulo de incidência. A impedância acústica $z = \rho c$, onde ρ é a densidade do meio. Para a interface água-ar $z_2 \ll z_1$, o que leva a fração $z_2/z_1 \approx 0$ (KINSLER *et al.*, 2000).

Portanto, as ondas chegam no receptor com efeito de interferência construtiva quando a pressão é máxima e sofrem interferência destrutiva quando a pressão é mínima (JENSEN *et al.*, 2011). A Fig. 2.2 mostra um campo de propagação com duas contribuições, o caminho direto R_1 e o caminho com reflexão na superfície R_2 . As expressões para estes dois caminhos são descritas nas Eqs. 2.23 e 2.24 (JENSEN *et al.*, 2011).

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z_r - z_s)^2}, \quad (2.23)$$

$$R_2 = \sqrt{r^2 + (z_r + z_s)^2}, \quad (2.24)$$

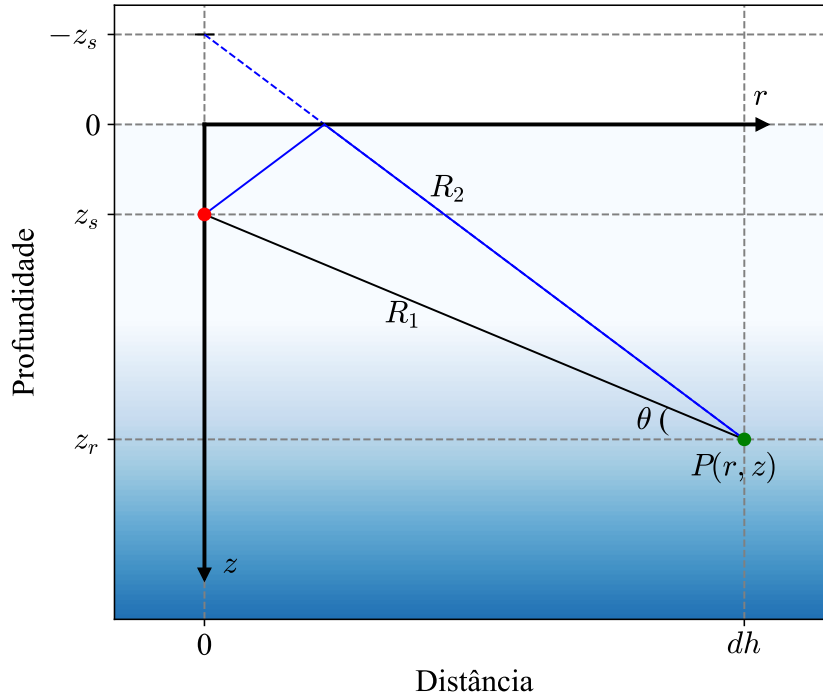
onde z_r e z_s correspondem a profundidade do receptor e da fonte, respectivamente.

O campo de pressão total $p(r, z)$ será (JENSEN *et al.*, 2011)

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{ikR_2}}{R_2}, \quad (2.25)$$

onde k é o número de onda acústico

Figura 2.2: Geometria do efeito Lloyds-mirror. O ponto em vermelho representa a fonte, enquanto o ponto em verde representa o receptor. R_1 é a trajetória direta entre a fonte e o receptor, enquanto R_2 representa a trajetória refletida na superfície. $P(r, z)$ refere-se ao campo de pressão resultante considerando ambas as contribuições, z_r corresponde à profundidade do receptor e z_s à profundidade da fonte.



Fonte: Adaptado de Jensen *et al.* (2011).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.26)$$

e λ é o comprimento de onda

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.27)$$

onde c é a velocidade de propagação do som no meio. O ângulo rasante θ é definido por:

$$\theta = \arctan\left(\frac{z_r - z_s}{dh}\right), \quad (2.28)$$

onde dh é a distância entre a fonte e o receptor (JENSEN *et al.*, 2011).

Assim, em um campo de propagação com duas contribuições, conforme apresentado na Fig. 2.2, apenas dois caminhos chegam no receptor, dessa maneira o sinal medido será (ABRAHAM, 2019):

$$y(t) = a_1 p_0(t - \tau_1) + a_2 p_0(t - \tau_2), \quad (2.29)$$

onde a_i e τ_i são, respectivamente, a amplitude e o atraso.

A interferência de duas ondas com mesmo comprimento de onda depende da diferença de fase $\phi = \Delta R.k$ entre elas, causada pela variação no comprimento do caminho ΔR . A interferência construtiva ocorre quando ϕ é um múltiplo inteiro de 2π e a interferência destrutiva ocorre quando ϕ é um múltiplo ímpar de π (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013).

Se $p_0(t)$ é periódico e a diferença de atraso do caminho for um múltiplo inteiro do período do sinal, isso resulta em interferência destrutiva. Adicionalmente, no caso de um sinal senoidal, os caminhos se somam de maneira construtiva quando a diferença de atraso corresponde a um período completo mais metade desse período (ABRAHAM, 2019).

A função de transferência para o efeito LM é obtida a partir da transformada de Fourier de 2.29 como (ABRAHAM, 2019)

$$H(f) = \frac{Y(f)}{P_0(f)} = a_1 e^{j2\pi f \tau_1} - a_2 e^{j2\pi f \tau_2} \quad (2.30)$$

onde os atrasos e amplitudes do caminho dependem do alcance e da profundidade do receptor. Considerando a velocidade de propagação do som na água constante,

$$\tau_1 = \frac{R_1}{c}, \quad (2.31)$$

$$\tau_2 = \frac{R_2}{c}, \quad (2.32)$$

e considerando a propagação esférica,

$$a_1 = \frac{1}{R_1}, \quad (2.33)$$

$$a_2 = \frac{1}{R_2}. \quad (2.34)$$

A perda na transmissão (TL) é (ABRAHAM, 2019)

$$TL = -20 \log_{10} |H(f)|. \quad (2.35)$$

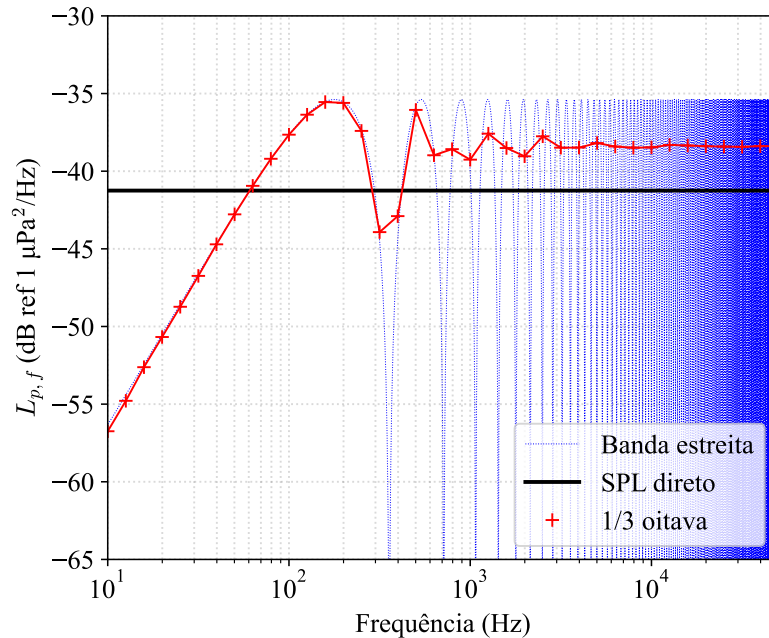
2.2.3 Consequências do efeito Lloyds-mirror na medição

Na pesquisa conduzida por Audoly & Meyer (2017), os autores discutiram as consequências do efeito LM na medição. Para isso, realizaram uma simulação considerando apenas a interação do som com a superfície, em um guia de ondas ideal com velocidade do som na água do mar constante. Nessa simulação, o *sound*

pressure spectral density $L_{p,f}$ em banda estreita (NB, *narrow band*) foi calculado utilizando a Eq. 2.25, aplicando um vetor de frequências discretas entre 10 Hz a 50 kHz. O $L_{p,f}$ em banda larga (BB, *broad band*) também foi calculado para frequências centrais de 1/3 de oitava da banda.

A Figura 2.3 mostra o $L_{p,f}$ obtido nessa simulação em função da frequência, sendo em azul a banda estreita e em vermelho a banda larga, para um receptor localizado a 100 m e ângulo de inclinação de 30° . A linha preta representa o $L_{p,f}$ de caminho direto com espalhamento esférico. Para a curva de banda estreita, a medida que a frequência aumenta, ocorre um aumento nas interferências. Portanto, em se tratando de correções, os padrões recomendam o uso dos níveis da banda de um terço de oitava. Para frequências até aproximadamente 200 Hz, ambos os gráficos são semelhantes, entretanto, em frequências mais altas, a diferença entre o $L_{p,f}$ de banda estreita e o de banda larga é notada, sendo cerca de 3 dB, em contraste com os 6 dB de diferença entre os valores de pico do $L_{p,f}$ de banda estreita em relação ao de banda larga (AUDOLY; MEYER, 2017).

Figura 2.3: Curvas de *sound pressure spectral density* $L_{p,f}$ em função da frequência, a curva sólida em preto é o caminho direto, em azul banda estreita e em vermelho banda larga.



Fonte: Adaptado de Audoly & Meyer (2017).

Adicionalmente, em Audoly & Meyer (2017), os autores simularam variações na geometria de medição, utilizando os parâmetros listados na Tabela 2.2, com o propósito de investigar os efeitos da interferência de superfície no $L_{p,f}$.

Os resultados dessas simulações são apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5, na forma de curvas de *sound pressure spectral density* $L_{p,f}$ em função da frequência para

Tabela 2.2: Parâmetros geométricos para as simulações.

dh (m)	z_r (m)	z_s (m)	θ (°)
100	31	4	15
100	62	4	30
100	104	4	45
100	60	2	30
100	66	8	30
200	120	4	30
300	177	4	30

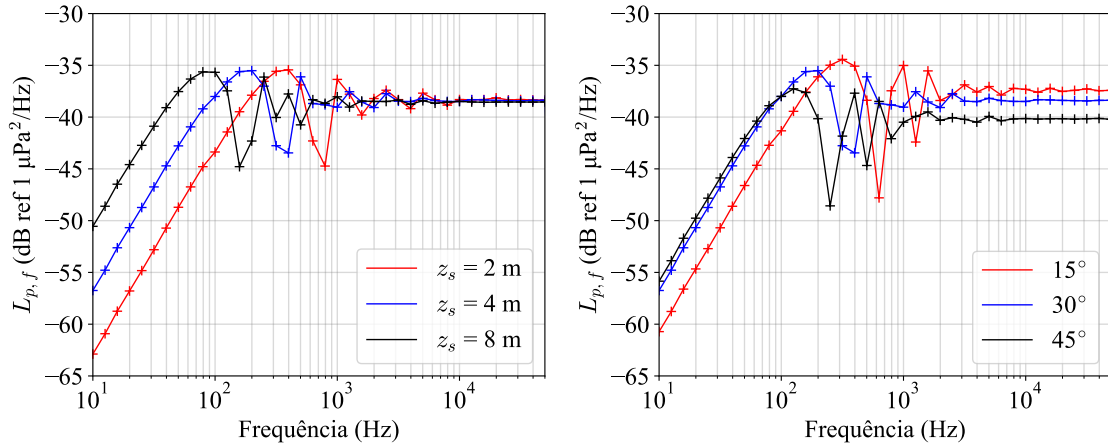
Fonte: Adaptado de Audoly & Meyer (2017).

banda larga. As curvas obtidas mostram os deslocamentos em amplitude e frequência resultantes das mudanças nos parâmetros geométricos. Conforme mostrado na Fig. 2.4, o aumento na (a) profundidade da fonte ou (b) no ângulo de inclinação resulta em um deslocamento em frequência para a esquerda na curva de $L_{p,f}$.

Figura 2.4: Curvas de *sound pressure spectral density* $L_{p,f}$ versus frequência.

(a) Variando a profundidade da fonte.

(b) Variando o ângulo de inclinação.



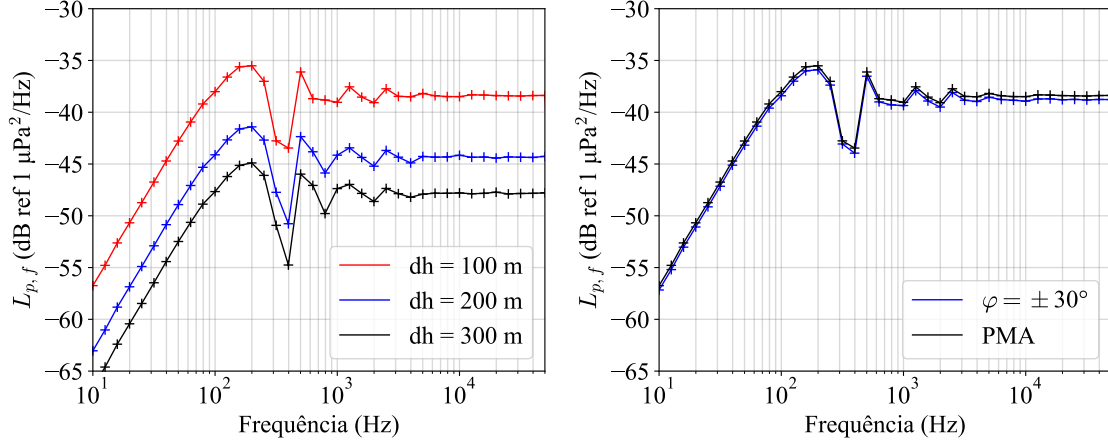
Fonte: Adaptado de Audoly & Meyer (2017).

Por outro lado, a Fig. 2.5 mostra, em (a), que um aumento na distância entre fonte e receptor diminui o $L_{p,f}$. Além disso, as curvas apresentadas em (b) indicam que, para o cálculo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, a medição do $L_{p,f}$ no ponto de maior aproximação (PMA) é comparável à média calculada dentro de uma janela de $\pm 30^\circ$.

A Figura 2.6 descreve a vista superior da trajetória percorrida por uma embarcação durante a medição do URN. Os pontos P_1 e P_2 indicam o início e fim da corrida, respectivamente. O ângulo φ é o azimute, ele representa a janela de medição centrada no PMA do hidrofone H , para cada passagem. Assim, de acordo com o trabalho, essa discrepância mínima entre as curvas viabiliza a realização da

Figura 2.5: Curvas de *sound pressure spectral density* $L_{p,f}$ versus frequência.

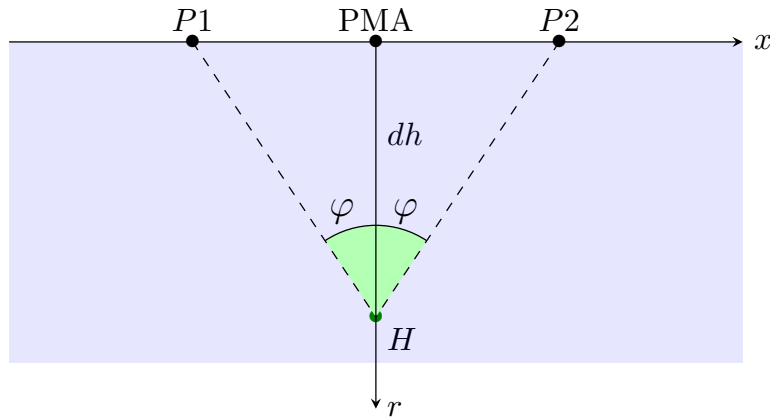
- (a) Variando a distância entre fonte-receptor. (b) Valor calculado no PMA e em uma janela de $\varphi = \pm 30^\circ$.



Fonte: Adaptado de Audoly & Meyer (2017).

análise somente no PMA (AUDOLY; MEYER, 2017).

Figura 2.6: Vista superior da trajetória percorrida por uma embarcação durante a medição do URN, o ponto P_1 indica o início e o ponto P_2 simboliza o fim da corrida, φ é o azimute e o ponto H em verde representa o hidrofone.



Fonte: Adaptado de Wilson & Rice (2007).

2.3 Caracterização do canal

Neste estudo, a técnica de transmissão sequencial de pulsos foi empregada para estimar as matrizes de resposta ao impulso e da função de espalhamento Doppler do canal, com o objetivo de expressar a variação do canal ao longo do tempo.

As variações temporais do canal são causadas principalmente pela propa-

gação de caminhos múltiplos e pela mudança na frequência devida ao movimento, onde o deslocamento Doppler é diretamente proporcional a velocidade e direção do transmissor ou receptor (RAPPAPORT, 2009). As características de um canal podem ser descritas usando funções de correlação e funções de densidade espectral de potência (WALREE, 2013).

2.3.1 Frequência de corte do canal

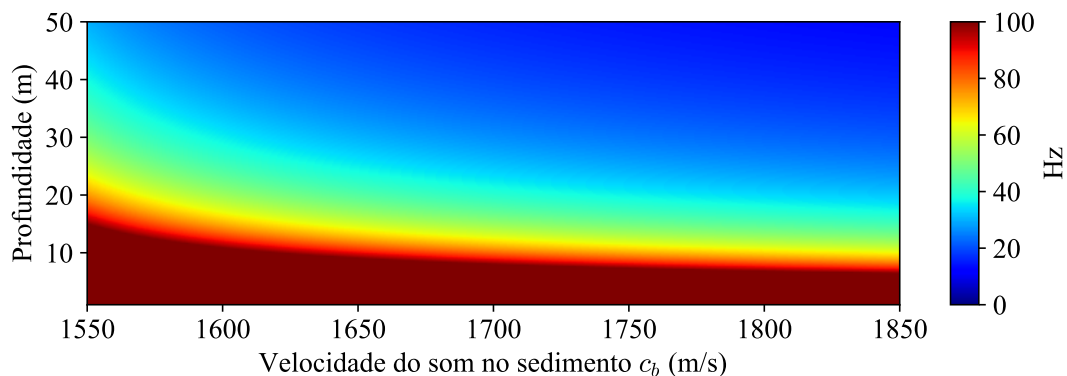
Em águas rasas, a proximidade do fundo aumenta as interações do som com essa fronteira, resultando em aumento da perda por absorção no fundo em função principalmente do ângulo de incidência e das propriedades do fundo do mar (JENSEN *et al.*, 2011).

A frequência de corte f_{corte} estabelece um valor mínimo abaixo da qual o canal de águas rasas deixa de atuar como guia de ondas, fazendo com que a energia irradiada pela fonte se propague diretamente para o fundo (JENSEN *et al.*, 2011),

$$f_{corte} = \frac{c_w}{4D\sqrt{1 - (c_w/c_b)^2}}.$$

O mapa de cores da Figura 2.7 mostra a frequência de corte do canal f_{corte} calculada em função da profundidade do mar D variando de 0 a 50 m, para velocidades de propagação do som no fundo c_b entre 1550 a 1850 m/s e considerando a velocidade de propagação do som na água $c_w = 1500$ m/s.

Figura 2.7: Frequência de corte do canal para diferentes profundidades e velocidades de propagação do som no fundo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta figura, é possível concluir que em regiões com maior profundidade do mar D ou maior velocidade de propagação do som no fundo c_b , há uma possibilidade da propagar ondas com frequências mais baixas no canal.

2.3.2 Resposta ao impulso do canal de caminhos múltiplos

Em águas rasas, um sinal transmitido segue vários caminhos e chega no receptor atenuado e acompanhado de ecos, cujo atraso depende da geometria de cada caminho (BOAYUE, 2013). A sondagem do canal tem o objetivo de estimar a resposta ao impulso $\hat{h}(t, \tau)$ em função do tempo t e do atraso τ . Essa resposta é obtida por meio da transmissão sequencial de pulsos, onde o pulso pode ser um sinal modulado em frequência linear (LFM, linear frequency-modulated).

O sinal LFM pode ser escrito como (HARRISON, 2022)

$$s(t) = \exp \left[j2\pi \left(f_0 t + \frac{B}{2\tau_p} t^2 \right) \right], \quad (2.36)$$

onde f_0 é a frequência inicial, que varia em função do tempo. A inclinação (Hz/s) da frequência é a divisão da largura da banda B pela largura do pulso τ_p . A fase é dada por

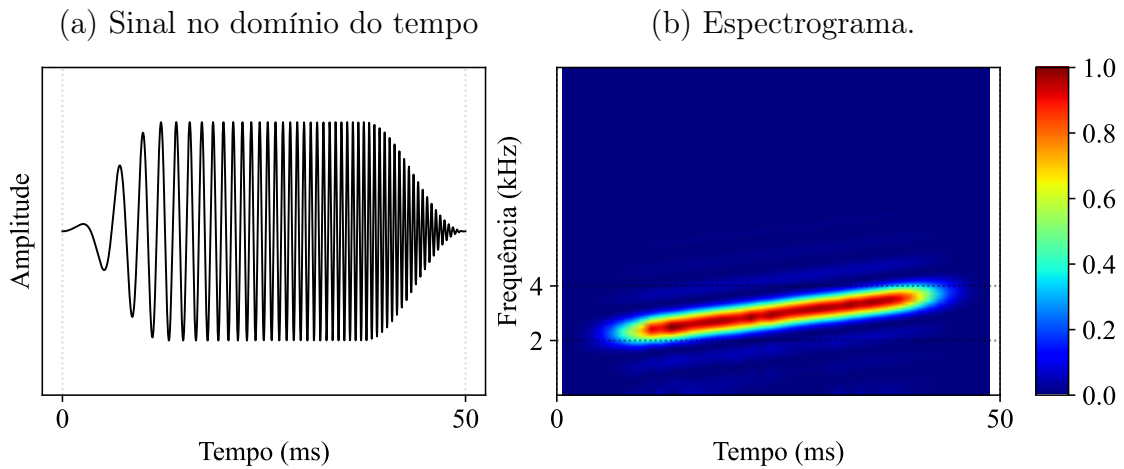
$$\phi(t) = 2\pi \left(f_0 t + \frac{B}{2\tau_p} t^2 \right) \quad (2.37)$$

A frequência instantânea é a derivada da fase em relação ao tempo (HARRISON, 2022)

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = f_0 + \frac{B}{\tau_p} t, \quad (2.38)$$

A Fig. 2.8 exibe um sinal LFM com frequência inicial $f_0 = 2.000$ Hz, largura de banda $B = 2.000$ Hz e largura do pulso $\tau_p = 50 \times 10^{-3}$ s.

Figura 2.8: Sinal LFM sintético.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados gravados são processados por correlação com o pulso de transmissão e empilhados formando uma matriz (WALREE, 2013).

No contexto de sistemas lineares, a resposta ao impulso $h(t)$ pode ser estimada a partir da correlação cruzada $R_{yx}(\tau)$ entre um sinal de entrada $x(t)$ conhecido e a saída $y(t)$ correspondente (TURIN, 1960; LINFIELD; HUBBARD; PRATT, 1976). Essa saída é uma versão deslocada e atenuada do sinal original contaminada por um ruído $n(t)$ dada pela integral de convolução (CARDOSO, 2014)

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)x(t - \tau)d\tau + n(t) \quad (2.39)$$

$$R_{yx}(\tau) = R_{xy}(-\tau) = E \left\{ \left[\int_{-\infty}^{+\infty} h(t)x(t - \tau)d\tau + n(t) \right] [x(t - \tau)] \right\}$$

$$R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)E[x(t - \tau)x(t - \tau)]d\tau + E[n(t)x(t - \tau)] \quad (2.40)$$

Considerando que o processo é estacionário $E[x(t - \tau)] = E[x] = k$ e que $x(t)$ e $n(t)$ não são correlacionados (NORTON; KARZUB, 2003)

$$R_{yx}(\tau) = h(t) \int_{-\infty}^{+\infty} E[x(t)x(t - \tau)]d\tau \quad (2.41)$$

Em uma situação específica em que $x(t)$ é um sinal LFM, sua autocorrelação se torna nula para valores de $\tau \neq 0$, o que é equivalente a um impulso unitário (CARDOSO, 2014)

$$R_{xx}(-\tau) = E[x(t)x(t - \tau)] = \delta(\tau) \quad (2.42)$$

$$R_{yx}(\tau) = h(t) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau)d\tau \quad (2.43)$$

$$\hat{h}(t) = R_{yx}(\tau) \quad (2.44)$$

2.3.3 Efeito Doppler

O fenômeno Doppler está associado à mudança na frequência de uma onda devido ao movimento relativo entre uma fonte e um receptor (RODRÍGUEZ, 2021). Se tanto a fonte como o receptor estão em movimento, a frequência observada no receptor f_r , é dada por (HODGES, 2011)

$$f_r = f_o \frac{c - \nu_r}{c - \nu_s} \quad (2.45)$$

onde, c é a velocidade do som no meio, f_o é a frequência da fonte, ν_s é a velocidade relativa da fonte (positiva se em direção ao receptor) e ν_r é a velocidade em relação a fonte.

A mudança na frequência é definida como (HODGES, 2011)

$$f_d = f_o \frac{\nu_s - \nu_r}{c - \nu_s}. \quad (2.46)$$

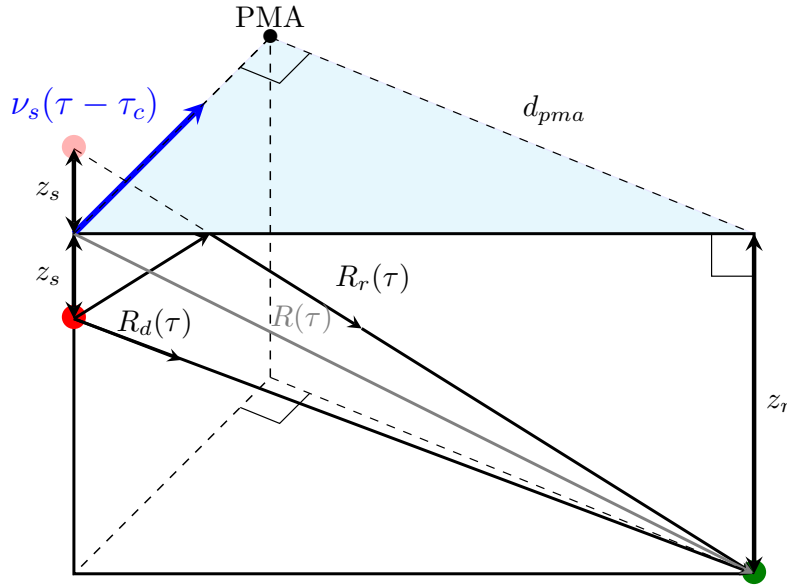
Para velocidades muito pequenas em relação à velocidade do som,

$$f_d = f_o \frac{\Delta\nu}{c}, \quad (2.47)$$

onde $\Delta\nu$ é a velocidade relativa, considerada positiva quando a fonte se aproxima do receptor (HODGES, 2011).

Na Figura 2.9 é exibido um modelo simplificado descrito em Lara *et al.* (2020), considerando dois caminhos entre a fonte e o receptor, direto R_d e o refletido R_r , ambos influenciados pela mudança de frequência devido ao efeito Doppler.

Figura 2.9: Geometria da trajetória da fonte com efeito Doppler.



Fonte: Adaptado de Lara *et al.* (2020).

O ponto vermelho representa a fonte, o ponto verde o receptor e o ponto preto o PMA. A velocidade da fonte é ν_s , τ_c é o atraso quando a fonte está no PMA e d_{pma} é a distância no PMA (TONG *et al.*, 2013).

O raio $R(\tau)$ em cinza é a distância da superfície até o receptor,

$$R(\tau) = \sqrt{\nu_s^2(\tau - \tau_c)^2 + d_{pma}^2 + z_r^2}. \quad (2.48)$$

O atraso $\tau = t - R(\tau)/c$, é a relação entre t e τ associada ao tempo que o

sinal leva para se propagar da fonte ao receptor. Conforme mencionado por Lara *et al.* (2020), é possível determinar a mudança de frequência devido ao efeito Doppler por meio do cálculo da frequência instantânea usando a frequência original da fonte f_o e a derivada do atraso com relação ao tempo,

$$f(t) = f_o \frac{d\tau}{dt}. \quad (2.49)$$

Portanto, na Eq. 2.49, é apresentada uma relação diretamente proporcional entre a frequência instantânea e a variação do atraso em relação ao tempo (LARA *et al.*, 2020).

2.3.4 Função de espalhamento Doppler

A função de espalhamento Doppler é uma representação matemática ou gráfica da forma como as ondas sonoras são espalhadas por objetos em movimento no ambiente marinho. Quando um som incide em um objeto móvel, tal como um cardume de peixes ou uma embarcação, ocorre um desvio na frequência do som refletido devido ao efeito Doppler (WALREE, 2013).

O espalhamento Doppler permite avaliar a influência do guia de ondas na largura espectral do sinal recebido. Um espalhamento Doppler pequeno revela uma variação gradual do canal ao longo do tempo, enquanto um grande valor de espalhamento Doppler resulta em uma variação rápida do canal ao decorrer do tempo (BOAYUE, 2013).

A função de espalhamento de atraso Doppler é a transformada de Fourier da resposta ao impulso variável no tempo (BELLO, 1963; WALREE, 2013)

$$\hat{S}(\nu, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{h}(t, \tau) \exp(-2\pi j\nu t) dt = \int_0^{NT} \hat{h}(t, \tau) \exp(-2\pi j\nu t) dt, \quad (2.50)$$

onde, ν é a mudança na frequência, N é o número de pulsos, T o comprimento e $k \in [N/2, -N/2 + 1, \dots, N/2 - 1]$ corresponde a mudança na frequência $\nu(k) = k/(NT)$ (WALREE, 2013).

A soma do atraso produz uma estimativa do espectro Doppler de potência (WALREE; JENSERUD; SMEDSRUD, 2008; WALREE, 2013)

$$\hat{P}(\nu) = \int_0^T |\hat{S}(\tau, \tau)|^2 d\tau. \quad (2.51)$$

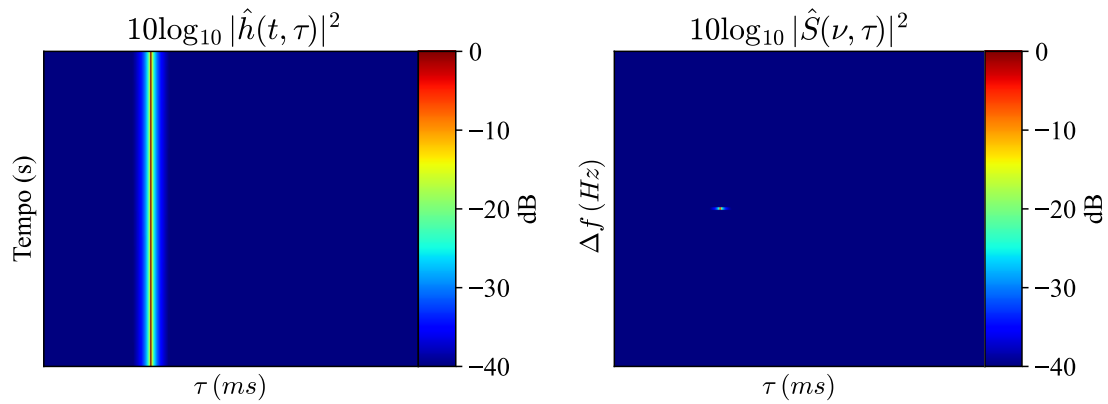
E pode ser integrado para produzir uma estimativa do perfil de atraso de potência (WALREE, 2013)

$$\hat{P}(\tau) = \int_0^{NT} |\hat{h}(t, \tau)|^2 dt = \int_{-1/(2T)}^{1/(2T)} |\hat{S}(\nu, \tau)|^2 d\nu. \quad (2.52)$$

A Fig. 2.10 representa a simulação de um canal estático. A esquerda, na Fig. 2.10a observa-se que os valores máximos da resposta ao impulso variável no tempo ocorrem para o mesmo atraso τ . A direita, na Fig. 2.10b a função de espalhamento de atraso Doppler indica que o canal praticamente não apresentou variação ao longo do tempo.

Figura 2.10: Canal estático simulado.

- (a) Resposta ao impulso variável no tempo. (b) Função de espalhamento Doppler.

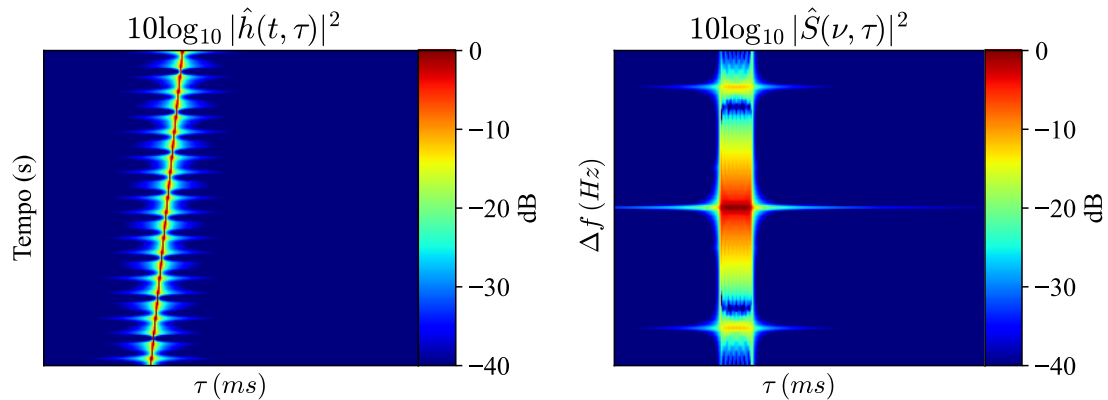


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 2.11 representa um canal simulado para uma fonte movendo-se com velocidade constante.

Figura 2.11: Canal simulado para uma fonte com velocidade constante.

- (a) Resposta ao impulso variável no tempo. (b) Função de espalhamento Doppler.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A esquerda, na Fig. 2.11a observa-se que os valores máximos da resposta

ao impulso variável ao longo do tempo seguem uma reta inclinada entre os atrasos τ_1 e τ_2 . A direita, na Fig. 2.11b a função de espalhamento de atraso Doppler indica que o canal variou ao longo do tempo.

2.4 Teoria de raios

Os modelos de traçados de raios permitem calcular amplitudes e tempos de percurso dos raios como parâmetros de saída, sendo considerados ideais para o cálculo do campo gerado por uma fonte de banda larga de frequências. Esses parâmetros definem a resposta ao impulso do canal, permitindo sua convolução com a função de entrada, resultando em uma estimativa de perda em relação à frequência com custo computacional reduzido (KÜSEL; SIDERIUS, 2019). A teoria de modos normais em águas rasas representa uma abordagem fisicamente aplicável, no entanto, com algumas limitações na precisão ou na velocidade de execução, causadas pelo aumento da frequência ou da profundidade (ETTER, 2018).

Neste trabalho, o modelo de propagação acústica utilizado é baseado na teoria de raios, a qual propõem um solução para a equação de Helmholtz (JENSEN *et al.*, 2011):

$$\nabla^2 P(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} P(\mathbf{r}, \omega) = 0, \quad (2.53)$$

onde $P(\mathbf{r}, \omega)$ é o campo de pressão, que para uma aproximação de ondas planas pode ser descrito como:

$$P(\mathbf{r}, \omega) = A(\mathbf{r})e^{-j\omega\tau(\mathbf{r})}, \quad (2.54)$$

onde A é a amplitude, $\omega\tau(\mathbf{r})$ é a fase e $\mathbf{r} = (r, z)$ é a posição no sistema de coordenadas cilíndricas. Ao aplicar o Laplaciano no campo de pressão da Eq. 2.54 e em seguida substituir o resultado na Eq. 2.53 resulta em (RODRÍGUEZ, 2021):

$$e^{-j\omega\tau}[\nabla^2 A - A\omega^2|\nabla\tau|^2 - j(2\omega\nabla A \cdot \nabla\tau + A\omega\nabla^2\tau)] + \frac{\omega^2}{c^2} A e^{-j\omega\tau} = 0, \quad (2.55)$$

onde a parte real é a equação Eikonal:

$$\frac{1}{c^2} - |\nabla\tau|^2 + \frac{1}{\omega^2} \frac{\nabla^2 A}{A} = 0, \quad (2.56)$$

e a parte imaginária a equação de transporte:

$$2\nabla\tau \cdot \nabla A + A\nabla^2\tau = 0. \quad (2.57)$$

A Equação 2.57 é usada para o cálculo das amplitudes ao longo da trajetória.

Uma simplificação usada na equação Eikonal é a aproximação de alta frequência (RODRÍGUEZ, 2010):

$$\left| \frac{\nabla^2 A}{A} \right| \ll \frac{\omega^2}{c^2}, \quad (2.58)$$

sendo assim, a Eq. 2.56 pode ser reescrita como:

$$|\nabla \tau| = \frac{1}{c}. \quad (2.59)$$

Embora a aproximação de alta frequência possa levar a resultados menos precisos em comparação com outros modelos de soluções da equação da onda, os modelos de raios permanecem relevantes, principalmente em aplicações onde existem incertezas ambientais, variações significativas na batimetria e casos em que o custo computacional é um fator crítico (JENSEN *et al.*, 2011).

O modelo de raios resolve primeiro a equação Eikonal por integração numérica, aplicando as condições iniciais de ângulo de lançamento, posição da fonte e velocidade do som na posição da fonte. Em seguida, a determinação da amplitude dos raios ocorre ao resolver a equação de transporte. As perdas por absorção e nas reflexões são tratadas de forma separada. Os mecanismos de perda são incluídos ao corrigir a amplitude, levando em consideração a atenuação volumétrica e o decaimento total devido às reflexões nas interfaces do meio (RODRÍGUEZ, 2010).

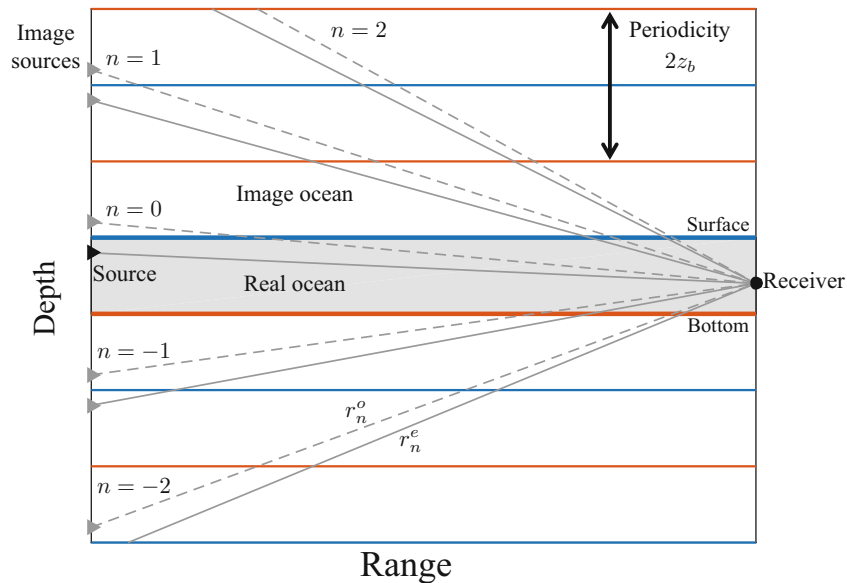
2.5 Método das imagens

O método das imagens é utilizado neste trabalho, como base teórica para obter uma estimativa da TL entre a fonte e o receptor. Este método combina as soluções do campo de pressão direto entre a fonte e o receptor com o campo produzido pelas fontes de imagem resultantes das reflexões nas fronteiras. Este método pode ser usado para descrever a resposta ao impulso em um guia de ondas oceânico ideal, onde as propriedades são independentes do alcance, apresentando uma velocidade constante na coluna d'água e limites perfeitamente refletivos. A resposta ao impulso para este canal de múltiplos caminhos é a soma da resposta de cada caminho de propagação entre a fonte e o receptor (JENSEN *et al.*, 2011; ABRAHAM, 2019).

A Figura 2.12 exibe um diagrama do método das imagens, destacando a disposição das fontes em oceanos de imagem refletidos acima e abaixo do oceano real.

As fontes estão nas profundidades $2nz_b \pm z_0$ para todos os inteiros n onde z_b é a profundidade do fundo e z_0 é a profundidade da fonte. As distâncias r_n^0

Figura 2.12: Método de imagens aplicado a um ambiente de isovelocidade em águas rasas.



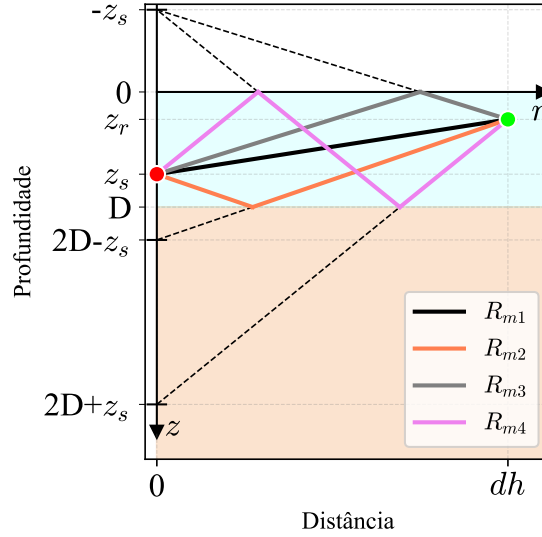
Fonte: Retirado de Abraham (2019).

entre as n fontes de imagem e o receptor, calculada em função do alcance r e da profundidade z , é representada pelas linhas cinzas tracejadas para os caminhos que têm um número ímpar de reflexões, resultando inversão de fase. Por outro lado, as distâncias r_n^e representadas pelas linhas cinzas sólidas têm um número par de reflexões (ABRAHAM, 2019).

As múltiplas reflexões do som entre a superfície e o fundo do mar exige a consideração de um conjunto infinito de fontes de imagem (JENSEN *et al.*, 2011). A Fig. 2.13 esquematiza o MI aplicado a um guia de ondas ideal, caracterizado por sua profundidade D constante. dh , z_r e z_s correspondem a distância, profundidade do receptor e profundidade da fonte, respectivamente.

No diagrama apresentado, quatro trajetórias potenciais entre a fonte (indicada pelo ponto vermelho) e o receptor (representado pelo ponto verde) são traçadas. O caminho direto em preto, denotado por R_{m1} , é acompanhado por trajetórias adicionais: R_{m2} em laranja, com reflexão apenas no fundo; R_{m3} em cinza, com uma reflexão na superfície; e R_{m4} em violeta, incluindo reflexões tanto na superfície quanto no fundo. Estas trajetórias são determinadas pela seguinte expressão (JENSEN *et al.*, 2011; BREKHOVSKIKH, 2012)

Figura 2.13: Três primeiras soluções de fonte de imagem para um guia de ondas ideal. Em preto o caminho direto, em laranja o caminho com reflexão no fundo, em cinza o caminho com reflexão na superfície e em violeta o caminho com reflexão na superfície e no fundo.



Fonte: Adaptado de Jensen *et al.* (2011).

$$\begin{aligned}
 R_{mn} &= \sqrt{r^2 + z_{mn}^2}, \\
 z_{m1} &= 2Dm - z_s + z_r, \\
 z_{m2} &= 2D(m+1) - z_s - z_r, \\
 z_{m3} &= 2Dm + z_s + z_r, \\
 z_{m4} &= 2D(m+1) + z_s - z_r.
 \end{aligned} \tag{2.60}$$

O ângulo de incidência θ_{mn} (ver Fig. 3.2) é calculado a cada iteração da seguinte maneira

$$\theta_{mn} = \arctan\left(\frac{r}{z_{mn}}\right). \tag{2.61}$$

O campo de pressão $P(f, z, r)$ no receptor com a contribuição das fontes de imagem mostradas na Fig. 2.13 pode ser aproximado com a Eq. (2.205) de Jensen *et al.* (2011):

$$P(r, z) = -\frac{U(f)}{4\pi} \sum_{m=0}^{\infty} (R_s R_f)^m \left[\frac{e^{jkR_{m1}}}{R_{m1}} + R_s \frac{e^{jkR_{m2}}}{R_{m2}} + R_f \frac{e^{jkR_{m3}}}{R_{m3}} + R_s R_f \frac{e^{jkR_{m4}}}{R_{m4}} \right], \tag{2.62}$$

onde,

$$R_s = -1, \text{ e} \quad R_f = \frac{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 - \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 + \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}. \quad (2.63)$$

Capítulo 3

Método Proposto

No presente capítulo, é apresentada a metodologia para correção do ruído irradiado empregado nesta pesquisa. A metodologia foi testada em um ambiente simulado e utilizando dados experimentais. Inicialmente, a Seção 3.1 aborda conceitos sobre a medição do ruído irradiado submarino por embarcações e descreve os métodos de correção disponíveis na literatura. Posteriormente, a Seção 3.2 detalha o desenvolvimento da versão modificada do método das imagens. A Seção 3.3 aborda a modelagem de banda larga utilizando o Traceo. A Seção 3.4 apresenta a técnica utilizada para avaliar o desempenho dos métodos de correção. Por fim, a Seção 3.5 descreve o método para aplicação dos métodos de correção disponíveis na literatura, discutidas na Seção 3.1, bem como aqueles apresentados nas Seções 3.2 e 3.3 deste capítulo.

3.1 Medição do ruído irradiado submarino

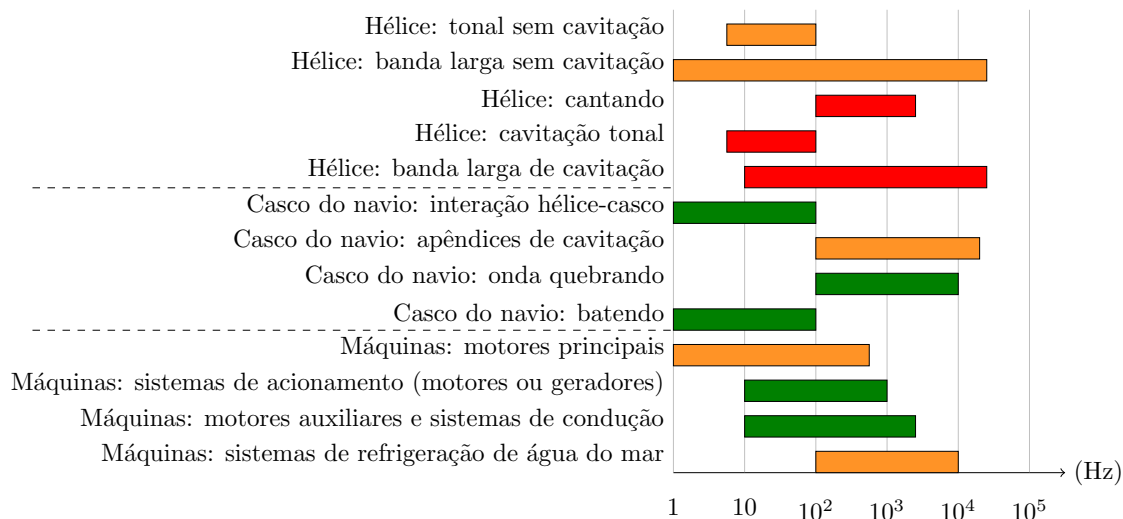
Nesta Seção são descritos os métodos de correção disponíveis na literatura que foram utilizados durante a pesquisa. Esses métodos estão detalhados nas subseções seguintes.

Três categorias principais de fontes de ruído contribuem para o espectro de SL de um navio, incluindo o ruído de máquinas, gerado pela planta principal e auxiliar de bordo; o ruído do fluxo, associado ao movimento do líquido em torno do casco do navio; e o ruído da hélice, relacionado aos fenômenos que ocorrem devido à sua operação (ROSS, 1979; CRUZ *et al.*, 2021).

A Fig. 3.1 exhibe as principais fontes do URN em termos de faixa de frequência e contribuição. A cor vermelha indica contribuição alta, laranja indica contribuição média e verde indica contribuição baixa. Observa-se que o ruído gerado pela hélice, principalmente quando ocorre cavitação, é a principal fonte de contribuição para o URN. A cavitação resulta na criação de bolhas, que, ao colapsarem, geram um espectro de ruído, compreendendo desde alguns Hz até mais de 100 kHz. Por-

tanto, os navios emitem ruído numa ampla faixa de frequências, caracterizada por componentes tonais, de banda estreita e de banda larga. Normalmente, a intensidade máxima é encontrada nas baixas frequências (ROSS, 1979; BERTSCHNEIDER *et al.*, 2014; CRUZ *et al.*, 2021).

Figura 3.1: Fontes do URN, em termos de faixa de frequência e contribuição. Em vermelho alta contribuição, em laranja contribuição média e em verde contribuição baixa.



Fonte: Adaptado de Cruz *et al.* (2021).

Embora o espectro do ruído emitido por embarcações se estenda por uma faixa tão ampla, este estudo concentrou-se no intervalo em que as fontes apresentam maior contribuição, compreendido entre 10 Hz e 10 kHz.

Para determinar quanto ruído as embarcações produzem, é necessário utilizar métodos de medição bem definidos, a fim de garantir a consistência nas medições do SL (COWARD, 2013). Adicionalmente é importante garantir que a metodologia e a configuração de medição sejam tecnicamente robustas e práticas, permitindo que os usuários finais realizem medições no mar (AINSLIE *et al.*, 2022).

O SL de um navio é uma medida sonora no campo afastado e, ao mesmo tempo, deve estar suficientemente próxima da fonte para evitar os efeitos de propagação. Estes dois requisitos são incompatíveis pois o campo afastado contém uma contribuição do som refletido na superfície do mar (AINSLIE, 2010).

A metodologia dessa dissertação demanda a medição do SPL à medida que uma embarcação passa por um hidrofone. Posteriormente, conforme descrito na Eq. 3.1, é necessário somar a TL para considerar a atenuação do som entre a fonte e o receptor. Uma vantagem deste método é a sua aplicabilidade em águas rasas. No entanto, sua eficácia está sujeita ao valor atribuído à profundidade da fonte e à precisão do modelo de TL utilizado (AINSLIE, 2010). Uma estimativa da TL pode ser obtida através da aplicação de modelos numéricos de propagação acústica ou

por meio de abordagens simplificadas disponíveis na literatura (MACGILLIVRAY *et al.*, 2023).

$$SL = SPL + TL. \quad (3.1)$$

Nas subseções a seguir, serão apresentadas algumas abordagens de estimativas da TL disponíveis na literatura e implementadas para comparação de desempenho apresentado na Seção 3.4 deste capítulo. Os parâmetros de entrada dessas abordagens envolvem a geometria e as propriedades do guia de ondas, enquanto as saídas consistem em curvas de TL em função da frequência, calculadas em frequências centrais de um terço de oitava no intervalo de 10 Hz e 10 kHz.

3.1.1 Perda por espalhamento esférico (ESF)

De acordo com a Norma ISO 17208-1 International Organization for Standardization (2016), para o nível de ruído irradiado (RNL, *radiated noise level*) a única correção aplicada ao SPL é referente a perda por espalhamento esférico (ESF)

$$RNL = SPL + 20 \log_{10} \left(\frac{r}{r_{ref}} \right), \quad (3.2)$$

onde, r é a distância do centro acústico do navio até o receptor, e r_{ref} é uma distância de referência, 1 m.

3.1.2 Método das imagens de Pang *et al.* (PY)

A Eq. 3.3 descreve o método das imagens de Pang *et al.* (PY), onde P_{PY} é o campo de pressão para uma fonte a distância r_0 com os coeficientes de reflexão na superfície R_s e o coeficiente de reflexão no fundo R_f (PANG *et al.*, 2020)

$$P_{PY} = \frac{q_0 e^{-jk(f)r_0}}{4\pi r_0} + \sum_{n=1}^{\infty} q_0 \left[\frac{R_s^{m_1(n)} R_f^{m_2(n)} e^{-jk(f)r_u(n)}}{4\pi r_u(n)} + \frac{R_s^{m_2(n)} R_f^{m_1(n)} e^{-jk(f)r_d(n)}}{4\pi r_d(n)} \right]. \quad (3.3)$$

Onde, $r_u(n)$ é a distância para a n -ésima fonte de imagem de superfície para o receptor e $r_d(n)$ é a distância para a n -ésima fonte de imagem do fundo para o receptor. O coeficiente de reflexão na superfície é considerado $R_s = -1$ e R_f da Eq. 3.4 depende do ângulo de incidência inferior $\theta_d(n)$ do caminho da fonte da imagem inferior até posição de recepção. ρ_0 é a densidade da água, c_0 é a velocidade do som da água, ρ_b é a densidade do fundo, c_b é a velocidade do som no fundo e q_0 é o sinal de entrada.

$$R_f(n) = \frac{\rho_b c_b \cos(\theta_d(n)) - \rho_0 c_0 \cos(\theta_t(n))}{\rho_b c_b \cos(\theta_d(n)) + \rho_0 c_0 \cos(\theta_t(n))} \quad (3.4)$$

O ângulo de transmissão $\theta_t(n)$ é dado pela Eq. 3.5

$$\theta_t(n) = \arcsin \left[\sin(\theta_d(n)) \frac{c_b}{c_0} \right] \quad (3.5)$$

$$TL_{PY} = -20 \log_{10} |P_{PY}| \quad (3.6)$$

3.1.3 Método das imagens de Ainslie & Wood (AW)

A Eq. 3.7 descreve o cálculo do fator de propagação do método das imagens de Ainslie & Wood (AW). Neste método, para cada trajeto de um raio indo para baixo a partir da fonte até o receptor, após passar por n reflexões no fundo e m reflexões na superfície, existe um caminho oposto que começa indo para cima, com $n + 1$ reflexões na superfície e m reflexões no fundo (AINSLIE; WOOD, 2022).

$$F_{semi} = \sum_{m=0}^M \left(R_{m-}^m \frac{\gamma(\theta_{m-})}{dh_{m-}^2} + R_{m+1}^{m+1} \frac{\gamma(\theta_{m+})}{dh_{m+}^2} \right) \quad (3.7)$$

onde R é o coeficiente de reflexão do fundo do mar e dh a distância entre a fonte e o receptor.

$$\gamma(\theta) = 2 - \frac{\sin(2\pi f_2 T(\theta)) - \sin(2\pi f_1 T(\theta))}{\pi(f_2 - f_1)T} \quad (3.8)$$

$T(\theta)$ é o atraso de tempo entre o caminho direto e o refletido pela superfície.

$$dh_{m\pm} = r \sec \theta_{m\pm} \quad (3.9)$$

$$M = \text{ceil} \left(\frac{\tan \psi}{2D} r_{max} \right), \quad (3.10)$$

onde ψ é o ângulo crítico do fundo do mar e r_{max} distância máxima de interesse e D é a profundidade do mar.

$$\psi = \arccos(c_w/c_b) \quad (3.11)$$

$$T(\theta) = (2d/c_w) \sin \theta, \quad (3.12)$$

onde d é a profundidade da fonte e c_w é a velocidade do som na água.

$$\theta_{m\pm} = \arctan \frac{2mD + D \pm h}{dh} \quad (3.13)$$

onde h é a altura do receptor em relação ao fundo.

O coeficiente de reflexão é calculado por (AINSLIE, 2010),

$$R(\theta) = \frac{\zeta(\theta) - 1}{\zeta(\theta) + 1} \quad (3.14)$$

$$\zeta(\theta) = w \frac{\tan \theta}{\tan \theta_{sed}} \quad (3.15)$$

$$w = \frac{\rho_{sed}}{\rho_w} \quad (3.16)$$

onde, ρ_w é a densidade da água e ρ_{sed} é a densidade do fundo.

$$\theta_{sed} = \arccos \left(\nu \frac{\cos \theta}{1 + i\varepsilon} \right), \quad (3.17)$$

$$\nu = \frac{c_{sed}}{c_w}, \quad (3.18)$$

onde, c_w é a velocidade do som na água e c_{sed} é a velocidade do som no fundo. O parâmetro ε está relacionado ao coeficiente de atenuação do sedimento β_{sed} (em decibéis por comprimento de onda) (AINSLIE, 2010):

$$\varepsilon = \frac{\log_e(10)}{40\pi} \beta_{sed}. \quad (3.19)$$

Por fim, as Eqs. 3.7 e 3.20 representam o método AW

$$TL_{AW} = 10 \log_{10} (F_{semi}^{-1}) \quad (3.20)$$

3.1.4 Método empírico de Meyer & Audoly (MA)

O método empírico de Meyer & Audoly (MA) é uma equação prática aplicável a fundo considerado macio ou duro, conforme a correção é descrita pela Eq. 3.21. A formulação foi desenvolvida como um filtro passa-alta de segunda ordem com frequência de transição entre os comportamentos de baixa e alta frequência, baseada em resultados de curvas de simulação numérica para diferentes tipos de fundo. A constante ε assume o valor 1 para fundo macio ou 2 para fundo duro, dh é a distância entre a fonte e o receptor na superfície, D é a profundidade local, c_w é a velocidade do som na água, z_s é a profundidade da fonte e r a distância entre fonte e receptor (MEYER; AUDOLY, 2020).

$$\Delta L_{MA} = 10 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon K}{\frac{f_0^2}{f^2} + \frac{if_0}{0.75f} - 1} \right), \quad (3.21)$$

$$K = 2 \max \left(\sqrt{\frac{dh}{D}}, 1 \right), \quad (3.22)$$

$$f_0 = \frac{c_w}{2\pi z_s} \sqrt{K}. \quad (3.23)$$

$$TL_{MA} = 20 \log_{10}(r) - \Delta L_{MA} \quad (3.24)$$

3.1.5 Método empírico *Seabed Critical Angle* (SCA)

O método empírico do ângulo crítico do fundo do mar, *seabed critical angle* (SCA) é uma combinação de espalhamento esférico em curta distância e espalhamento cilíndrico em longa distância, que considerada o ângulo crítico ψ do fundo do mar, definido na Eq. 3.11 e a profundidade do mar D . O SL calculado pelo método do ângulo crítico do fundo do mar é composto por um termo de correção para a interferência entre o caminho direto e a reflexão da superfície (σ_1) e um termo para a interferência entre o caminho direto e a reflexão no fundo do mar (σ_ψ). As Eqs. 3.29 e 3.25 representam o método SCA, para distância r entre fonte e receptor, θ ângulo abaixo da superfície do receptor, z_s é a profundidade da fonte e k o número de onda acústico (MACGILLIVRAY *et al.*, 2023).

$$F_{SCA} = \frac{\sigma_1 + \frac{\psi r}{D} \sigma_\psi}{r^2}, \quad (3.25)$$

$$\sigma_1 = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4\eta \sin^2 \theta} \right)^{-1}, \quad (3.26)$$

$$\sigma_\psi = \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4\eta \sin^2 \psi} \right)^{-1}, \quad (3.27)$$

onde,

$$\eta = k^2 z_s^2. \quad (3.28)$$

$$TL_{SCA} = 10 \log_{10} \left(\frac{F_{SCA}^{-1}}{r_0^2} \right), \quad r_0 = 1\text{m}. \quad (3.29)$$

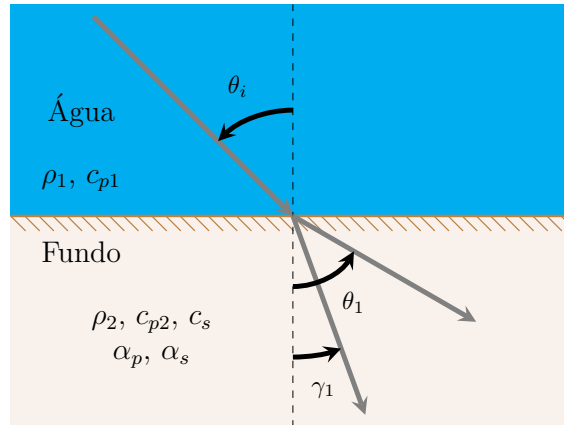
3.2 Método das imagens modificado

O método das imagens de Jensen *et al.* (2011), designado neste trabalho como JEN, é utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento da versão modificada empregada nesta pesquisa, pois inclui coeficiente de reflexão no fundo elástico R_f e a atenuação na água do mar I_{mn} .

É importante ressaltar que uma reflexão perfeita, onde o coeficiente de reflexão R_f é calculado com a Eq. 2.63, não ocorre em fundos mais realistas (JENSEN *et al.*, 2011). Além disso, o cálculo do ângulo de transmissão θ_t (ver Fig. 2.1) utilizando a Lei de Snell, conforme descrito na Eq. 3.5, é viável apenas para pequenos ângulos de incidência.

Por isso, o método das imagens modificado leva em conta a reflexão da onda em um fundo elástico, resultando na excitação da propagação das ondas longitudinal e transversal, conforme ilustrado na Fig. 3.2. Conseqüentemente, essa modificação permite contabilizar parâmetros do fundo sólido referentes aos coeficientes de atenuação e velocidade de propagação no sedimento, tanto das ondas de cisalhamento quanto de compressão. Uma vantagem adicional desse método consiste em empregar uma expressão que possibilita calcular o coeficiente de reflexão no fundo $\mathcal{R}_f(\theta_i)$ para qualquer ângulo de incidência, tornando o modelo mais abrangente a uma variedade de situações.

Figura 3.2: Reflexão de uma onda no fundo elástico. A onda incidente pode excitar no fundo a propagação das ondas longitudinal e transversal.



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2021).

Uma expressão para o coeficiente de reflexão no fundo $\mathcal{R}_f(\theta_i)$ é definida por (RODRÍGUEZ, 2021)

$$\mathcal{R}_f(\theta_i) = \frac{C(\theta_i) \cos \theta_i - 1}{C(\theta_i) \cos \theta_i + 1}, \quad (3.30)$$

onde

$$C(\theta_i) = A_1 \left(A_2 \frac{1 - A_7}{\sqrt{1 - A_6^2}} + A_3 \frac{A_7}{\sqrt{1 - A_5/2}} \right),$$

$A_1 = \rho_2/\rho_1$ é a razão das densidades, $A_2 = \tilde{c}_{p2}/c_{p1}$ é a razão entre a velocidade da onda de compressão no fundo e a velocidade de propagação do som na água, $A_3 = \tilde{c}_{s2}/c_{p1}$ é a razão entre a velocidade da onda de cisalhamento e a velo-

cidade de propagação do som na água, $A_4 = A_3 \sin \theta_i$, $A_5 = 2A_4^2$, $A_6 = A_2 \sin \theta_i$ e $A_7 = A_5(2 - A_5)$ (RODRÍGUEZ, 2021). A atenuação da onda de compressão e a atenuação da onda de cisalhamento são definidas pelas variáveis α_p e α_s , respectivamente.

$$\tilde{c}_{p2} = c_{p2} \frac{1 - i\tilde{\alpha}_{cp}}{1 + i\tilde{\alpha}_{cp}^2},$$

$$\tilde{c}_{s2} = c_{s2} \frac{1 - i\tilde{\alpha}_{cs}}{1 + i\tilde{\alpha}_{cs}^2},$$

$$\tilde{\alpha}_{cp} = \frac{\alpha_{cp}}{40\pi \log e},$$

$$\tilde{\alpha}_{cs} = \frac{\alpha_{cs}}{40\pi \log e},$$

Adicionalmente, no método proposto é acrescentada a atenuação na água com base no modelo simplificado de *Thorp*, o qual descreve a dependência da atenuação com a frequência através da expressão (JENSEN *et al.*, 2011; RODRÍGUEZ, 2021)

$$\alpha(f) \approx 3,3 \times 10^{-3} + \frac{0,11f^2}{1 + f^2} + \frac{44f^2}{4100 + f^2} + 3 \times 10^{-4}f^2, \quad (3.31)$$

onde f é a frequência em kHz.

A atenuação sonora na água do mar, causada pelos efeitos de absorção e espalhamento, faz com que parcela da energia acústica seja transferida para o oceano durante a propagação. Na água salgada, os principais mecanismos de atenuação estão relacionados aos relaxamentos químicos dos componentes do sal marinho (JENSEN *et al.*, 2011).

A Eq. 3.32 determina a intensidade da onda I_{mn} com relação a intensidade inicial I_0 (RODRÍGUEZ, 2021)

$$I_{mn} = I_0 10^{-\alpha(f)R_{mn}/10}, \quad (3.32)$$

onde R_{mn} é a distância e α é o coeficiente de atenuação (dB/km).

Por fim, a equação completa para o método das imagens modificado, resulta na resposta em frequência do canal

$$H(f, z, r) = \frac{P(f, z, r)}{U_0(f)} = \sum_{m=0}^{\infty} (R_s R_f)^m \times \left[I_{m1} \frac{e^{jkR_{m1}}}{R_{m1}} + I_{m2} R_s \frac{e^{jkR_{m2}}}{R_{m2}} + I_{m3} R_f \frac{e^{jkR_{m3}}}{R_{m3}} + I_{m4} R_s R_f \frac{e^{jkR_{m4}}}{R_{m4}} \right]. \quad (3.33)$$

Sendo assim, a TL é dada pela expressão

$$TL_{JEN} = -20 \log_{10} |H(f, z, r)|. \quad (3.34)$$

3.3 Modelagem de banda larga usando o Traceo

Com o propósito de comparar com as demais abordagens, foi implementada uma modelagem de banda larga utilizando o modelo de raios TRACEO (TRA) (RODRÍGUEZ, 2008). Este modelo foi escolhido em virtude da ausência de informações suficientes sobre as múltiplas camadas do fundo marinho e o custo computacional reduzido em ambientes variáveis com a distância. Nesse contexto, optou-se pela configuração de saída utilizando amplitudes e atrasos (ADR, Amplitudes and Delays, utilizando o método de Regula Falsi), pois esses parâmetros são considerados ideais para calcular o campo gerado por uma fonte de banda larga, uma vez que definem a resposta ao impulso do canal (CIR, *channel impulse response*) (KÜSEL; SIDERIUS, 2019).

De acordo com a teoria de raios, a CIR pode ser representada como a soma de sucessivas chegadas dos raios, limitada pelas propriedades físicas do canal, como atenuação e perda no fundo (DUROFCHALK; SABRA, 2020). Portanto, a forma geral para a solução da equação de onda é determinada a partir das amplitudes e fases dos autorraios em uma faixa finita de frequências (DEAVENPORT; GILCHREST; THOMSON, 2019). Para uma frequência arbitrária f a resposta de frequência do canal pode ser expressa em termos dos caminhos das ondas da seguinte forma (DEAVENPORT; GILCHREST; THOMSON, 2019)

$$H(f, z, r) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(-j2\pi f \tau_n + j\phi_n), \quad (3.35)$$

onde N é o número de autorraios, A_n é a amplitude, τ_n é o atraso no tempo de percurso do n -ésimo caminho dos autorraios e ϕ_n é a mudança de fase associada às interações de fronteira ou cáusticas.

A estratégia é obter a saída ADR com o modelo, para uma frequência relativamente alta, previamente escolhida e pertencente a banda de frequências do intervalo de análise. Em seguida, a resposta em frequência contabiliza a soma das atenuações e os tempos de percurso para todo o espectro de interesse. A partir desta resposta, a estimativa da TL é calculada da seguinte maneira

$$TL_{Traceo} = -20 \log_{10} |H(f, z, r)|. \quad (3.36)$$

3.4 Validação dos métodos de correção

O desempenho dos métodos de correção descritos nas seções anteriores foi quantificado calculando estatísticas das diferenças residuais entre os níveis medidos e seus valores de referência. Os resíduos dos níveis foram calculados como a seguinte diferença (MACGILLIVRAY *et al.*, 2023):

$$e_i(f) = |L_{S,i}(f) - L_{S,ref}(f)| \quad (3.37)$$

onde $L_{S,i}(f)$ é o nível para medição i na frequência f , calculada usando qualquer um dos métodos de correção, e $L_{S,ref}(f)$ é o nível de referência. No contexto dos níveis em decibéis, é importante lembrar que a subtração $L_{S,i}(f) - L_{S,ref}(f)$ representa uma proporção, conforme a igualdade $\log a - \log b = \log(a/b)$.

As estatísticas dos resíduos foram coletadas dentro das três faixas de frequência a seguir:

- 10 a 100 Hz;
- 100 a 1.000 Hz; e
- 1.000 a 10.000 Hz.

O erro médio absoluto (MAE, mean absolute error) representa a média dos resíduos absolutos, calculado utilizando a Eq. 2.12, resultando na seguinte expressão:

$$MAE = 10 \log_{10} \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N 10^{e_i(f)/10} \right). \quad (3.38)$$

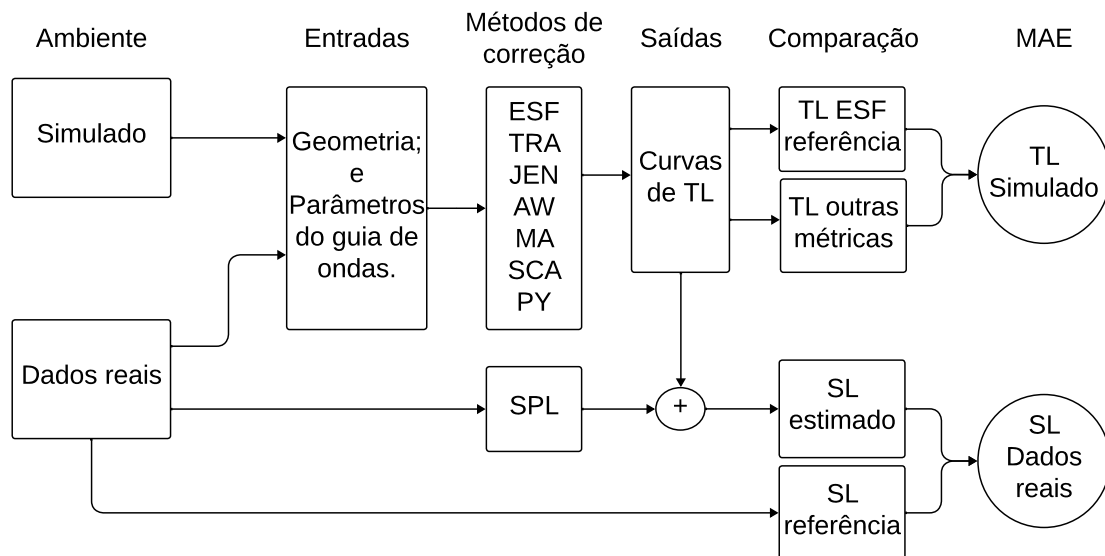
3.5 Análise da acurácia dos métodos de correção

Esta seção descreve o método para aplicação das abordagens de correção discutidas. Este método foi testado em um ambiente simulado, além de ser aplicado a dados experimentais coletados. Os parâmetros de entrada das abordagens envolvem geometria e propriedades do guia de ondas, enquanto as saídas consistem em curvas de TL em função da frequência, calculadas em frequências centrais de um terço de oitava da banda entre 10 Hz e 10 kHz.

O fluxograma apresentado na Fig. 3.3 mostra os passos até a validação das abordagens, através do cálculo do erro médio absoluto, tanto no ambiente simulado quanto para os dados experimentais coletados.

A configuração do ambiente desejado define os parâmetros de entrada para as abordagens. Em seguida, são produzidas as saídas na forma de estimativas de TL. Estas estimativas são utilizadas para a comparação de acordo com o ambiente

Figura 3.3: Fluxograma mostrando os passos para calcular o erro médio absoluto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

escolhido, resultando no MAE. No ambiente simulado, as abordagens foram validadas através da comparação entre a TL esférica, adotada como referência, e as curvas de TL obtidas com as demais abordagens. Por outro lado, para validar os resultados referentes aos dados experimentais coletados, foi comparado o SL de referência e o SL estimado pela soma entre o SPL medido e a TL obtida por cada uma das abordagens.

As abordagens empregadas nesta metodologia incluem a perda por espalhamento esférico (ESF), definida na Seção 3.1.1, a modelagem de banda larga utilizando o Traceo (TRA), descrita na Seção 3.3, o método das imagens modificado (JEN), apresentado na Seção 3.2, o método das imagens de Ainslie & Wood (AW), descrito na Seção 3.1.3, o método das imagens de Pang *et al.* (PY), apresentado na Seção 3.1.2, e os métodos empíricos do ângulo crítico do fundo do mar (SCA) e de Meyer & Audoly (MA), descritos nas Seções 3.1.5 e 3.1.4, respectivamente.

Capítulo 4

Ambiente simulado e descrição dos experimentos

Este capítulo aborda as características físicas e parâmetros utilizados no ambiente de simulação e a descrição da região onde foram realizados os experimentos.

É desejável que as estimativas de SL sejam pouco afetadas pelas incertezas nas condições ambientais e na geometria fonte-receptor. Um método de correção que consiga lidar com essas incertezas pode ser preferido, mesmo que sua precisão seja menor quando testada em condições de medição bem definidas. É de se esperar que nenhum método se destaque em todos os ambientes. No entanto, um método de correção robusto deve ter um desempenho satisfatório em uma ampla variedade de condições de medição (MACGILLIVRAY *et al.*, 2023).

Os métodos de correção descritos no Cap. 3 foram inicialmente testados em um ambiente simulado, no qual foram introduzidas modificações na geometria e nas propriedades do fundo. Os resultados das simulações foram analisados em relação a um guia de ondas sem fronteiras, caracterizado unicamente por perdas decorrentes do decaimento geométrico esférico. Posteriormente, foram realizados três experimentos distintos, cujas comparações foram feitas com os dados experimentais coletados.

No primeiro experimento, foram abordados os diversos caminhos de propagação, a TL e o espalhamento Doppler do guia de ondas, utilizando transmissões e recepções de sinais LFM com um projetor acústico estático. No segundo experimento, as transmissões e recepções foram realizadas em distâncias variáveis entre a fonte e o receptor, enquanto o projetor acústico era rebocado por uma embarcação. Durante essas transmissões, a embarcação permaneceu estacionária sob máquinas, derivando simplesmente à mercê do vento e da corrente, e o ruído por ela irradiado também foi objeto de análise.

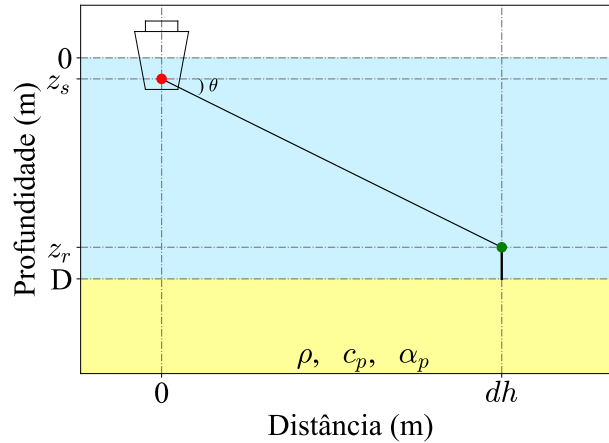
Por fim, no terceiro experimento, foram utilizados dados de assinatura acústica de navios da Marinha do Brasil (MB) para avaliação da correção proposta.

4.1 Ambiente simulado

Com o objetivo de proceder uma avaliação preliminar da metodologia apresentada no Cap. 3 utilizando diferentes parâmetros, foi estabelecido um ambiente de simulação para realizar testes. Foram realizadas alterações tanto nos parâmetros geométricos, quanto nos parâmetros do fundo.

A Figura 4.1 exibe um diagrama da configuração do ambiente simulado, D é a profundidade do local, z_s é a profundidade da fonte, z_r é a profundidade do receptor, dh é a distância para o hidrofone na superfície, θ é o ângulo de inclinação da fonte para o receptor, ρ , c_p e α_p são densidade, velocidade de propagação do som no sedimento e coeficiente de absorção do som no fundo, respectivamente.

Figura 4.1: Diagrama da configuração do guia de ondas utilizado no ambiente simulado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os parâmetros utilizados nas simulações.

Tabela 4.1: Parâmetros do fundo para as simulações das métricas.

Fundo	ρ (kg/m^3)	c_p (m/s)	α_p (dB/ λ)
Areia fina	1.900	1.650	0,8
Areia	2.000	1.800	0,1
Areia grossa	2.100	1.950	0,5

Fonte: Adaptado de Jensen *et al.* (2011).

Tabela 4.2: Parâmetros geométricos utilizados na simulação dos métodos de correção.

dh (m)	D (m)	z_r (m)	z_s (m)
50	40	36	4

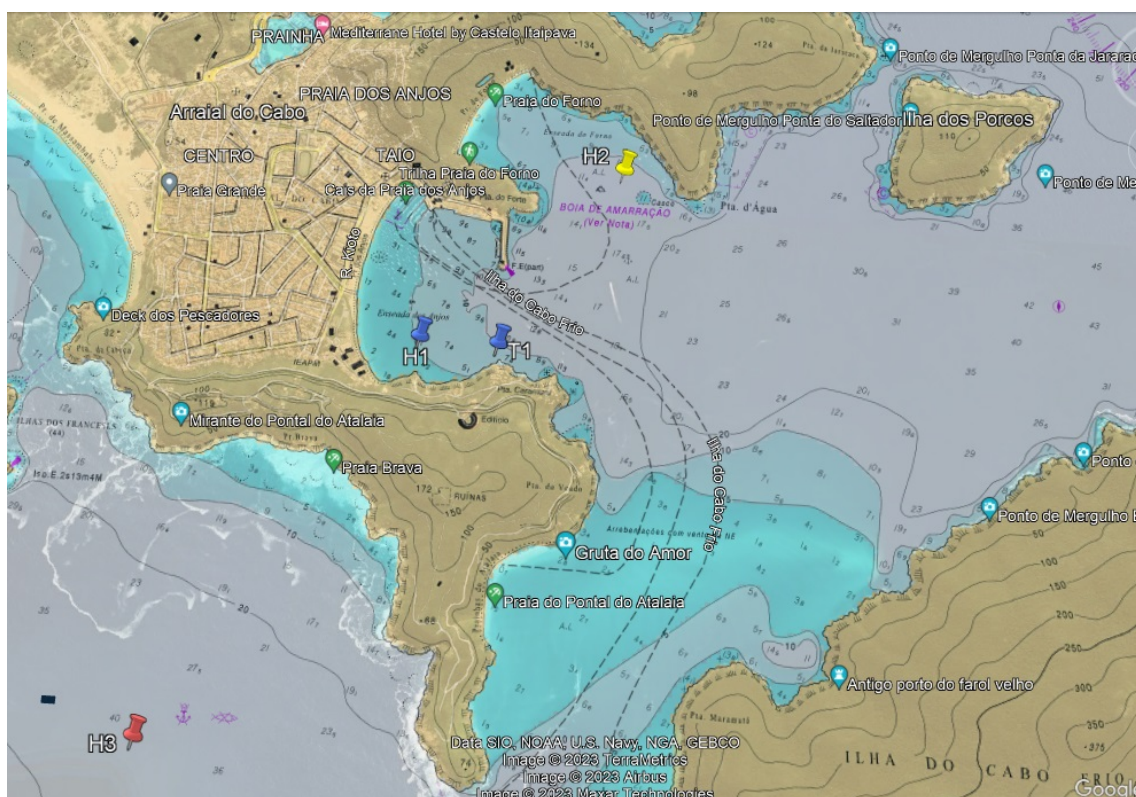
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos serão apresentados no capítulo seguinte, na forma de curvas de TL em função da frequência.

4.2 Área dos experimentos

Com o propósito de validar a metodologia com dados experimentais, foram realizados três experimentos em Arraial do Cabo, Rio de Janeiro. O primeiro experimento consistiu em transmitir e receber sinais LFM com o projetor acústico e o receptor estáticos. No segundo experimento, o projetor foi rebocado por uma embarcação pairando sob máquinas e derivando simplesmente pela ação do vento e corrente. E no terceiro experimento foram utilizados dados de assinatura acústica de navios da MB obtidos em corridas na Raia Acústica da MB. A Figura 4.2 mostra um extrato da carta náutica de Arraial do Cabo, Rio de Janeiro.

Figura 4.2: Área dos experimentos. Em azul, os pontos T1 (projetor) e H1 (hidrofone) do experimento estático na Enseada dos Anjos. Em amarelo, o ponto H2 representa o hidrofone utilizado no experimento na Enseada do Forno. E em vermelho, o ponto H3 é o hidrofone para gravação dos dados na Raia Acústica da MB nas proximidades da Praia Brava.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

Os pontos em azul T1 e H1 pertencem ao experimento estático na Enseada dos Anjos, o ponto em amarelo H2 é o hidrofone utilizado no experimento na Enseada

do Forno, e o ponto em vermelho H3 é o hidrofone para gravação dos dados na Raia Acústica da MB nas proximidades da Praia Brava. As coordenadas das estações e os dados dos equipamentos estão descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Coordenadas e dados das estações

Estação	latitude	longitude	profundidade (m)	sensibilidade (dB re 1V/ μ Pa)	ganho (dB)
T1 B.1	22°58'40.00"S	42° 0'49.00"O	7	-	-
H1	22°58'39.59"S	42° 1'03.36"O	3.5	-155	0
H2 A.2	22°58'08.69"S	42° 0'28.03"O	14	-200	0 – 35
H3 A.1	22°59'47.46"S	42° 1'47.57"O	42	-167	10

Fonte: Elaborado pelo autor. (*) Os parâmetros "sensibilidade" foram retirados dos manuais dos hidrofones.

4.2.1 Experimento na Enseada dos Anjos

O primeiro experimento foi realizado na Enseada dos Anjos e consistiu em transmitir e receber uma sequência de sinais LFM de acordo com os parâmetros indicados na Tabela 4.4, a fim de analisar os efeitos do canal e avaliar o desempenho dos métodos de correção em comparação aos dados medidos.

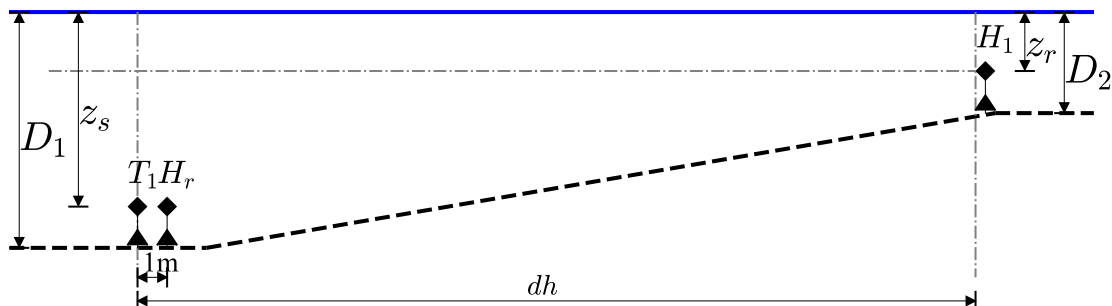
Tabela 4.4: Parâmetros do sinal LFM transmitido na estação estática.

f_0 (kHz)	B (kHz)	τ_p (s)	intervalo entre transmissões (s)
5	5	0,1	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Fig. 4.3 exibe um diagrama com a geometria dos experimentos, onde T_1 representa a posição da fonte acústica, H_r é a posição do hidrofone de referência e H_1 o hidrofone afastado.

Figura 4.3: Estações fixas de transmissão e recepção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A profundidade da fonte é z_s , D_1 é a profundidade no local da fonte, z_r é a profundidade do receptor, D_2 a profundidade no local do receptor e dh é a

distância entre a fonte e o receptor. O perfil das velocidades do som na coluna d'água foi considerado constante, em razão de não se esperar uma grande variação, sendo empregada a velocidade do som $c_w = 1.522$ m/s e a densidade da água $\rho_w = 1.026$ kg/m³ (KINSLER *et al.*, 2000). Aplicando-se perfis de velocidade ISO variando entre 1.500 m/s e 1.530 m/s, não foram constatadas alterações significativas nos resultados. Os parâmetros de entrada utilizados são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Parâmetros do ambiente de medições estáticas.

D_1 (m)	D_2 (m)	z_s (m)	z_r (m)	dh (m)	ρ (kg/ m ³)	c_p (m/s)	α_p (dB/ λ)
7,0	4,0	6,5	3,5	500	1.900	1.650	0,8

Fonte: Adaptado de Jensen *et al.* (2011).

Os sinais transmitidos por T_1 foram gravados simultaneamente por H_r e H_1 . Optou-se por essa medição simultânea em virtude do manual do projetor EDO 610E B.1 disponibilizar apenas o SL na frequência de 6.5 kHz ao invés de fornecer a curva de resposta em função da frequência. A Fig. 4.4a mostra o projetor acústico, enquanto a Fig. 4.4b ilustra a estrutura na qual o projetor e o hidrofone estavam instalados. Essas estruturas, foram utilizadas para transmissão e recepção dos sinais, entretanto, na estação de recepção somente o hidrofone H_1 foi utilizado.

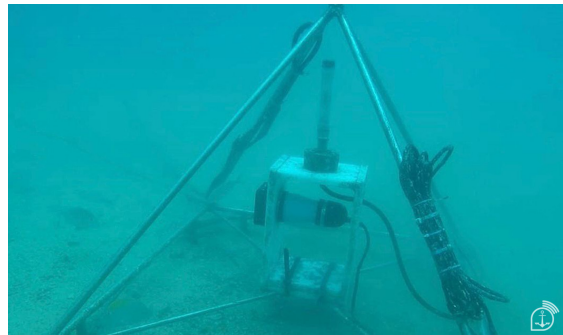
Figura 4.4: Estação fixa com projetor acústico e hidrofone.

(a) Projetor acústico EDO 610E.



Fonte: Retirado de Exelis (2011).

(b) Hidrofone e projetor.



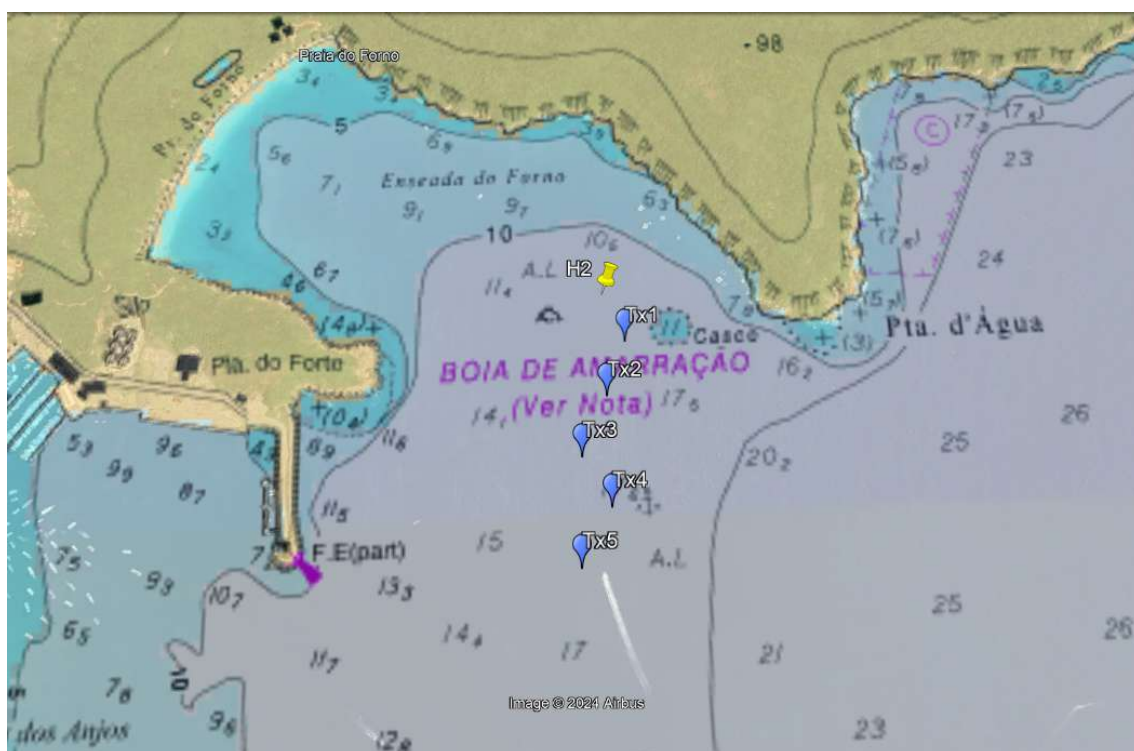
Fonte: Retirado de IEAPM (2024).

4.2.2 Experimento na Enseada do Forno

O segundo experimento foi realizado na Enseada do Forno, Arraial do Cabo - RJ. Esse experimento teve como objetivo caracterizar o canal de propagação e determinar o grau de incerteza geométrica causado pelo movimento da embarcação durante a medição. Para isso, a resposta ao impulso estimada $\hat{h}(t, \tau)$ e a função de espalhamento Doppler $\hat{S}(\nu, \tau)$ foram calculadas utilizando a transmissão e recepção

de sinais acústicos conhecidos. Além disso, o ruído irradiado pela embarcação Anchova foi gravado a fim de avaliar a TL ao longo do canal. Sinais acústicos foram transmitidos da embarcação Anchova da MB por meio de um projetor acústico posicionado a 7 m de profundidade em 5 estações distanciadas a 100 m de intervalo, conforme mostrado na Fig. 4.5.

Figura 4.5: Experimento na Enseada do Forno. O ponto H2 em amarelo representa a localização do dispositivo autônomo de gravação. Os pontos em azul, nomeados de Tx1 a Tx5, representam as posições da embarcação durante os eventos de transmissão.



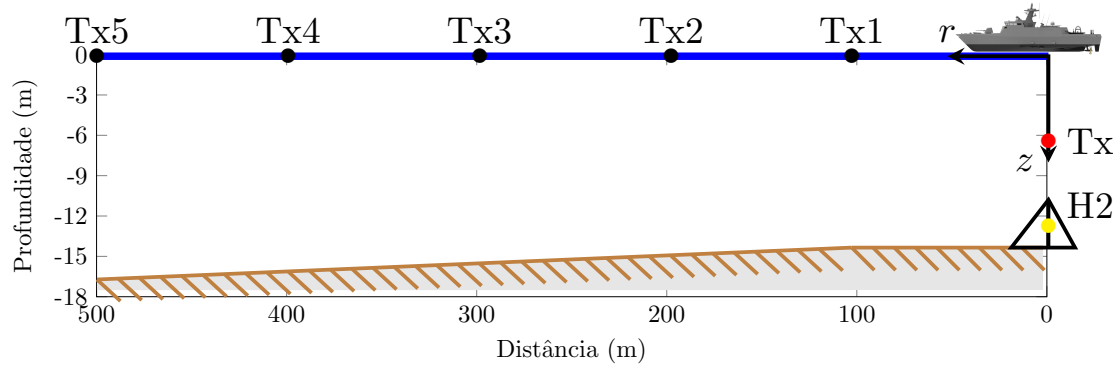
Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

Nessas estações, foi medido o perfil de velocidade do som, bem como as coordenadas geográficas utilizando um sistema de posicionamento global (GPS, *Global Positioning System*) portátil, durante a transmissão a embarcação permaneceu pairando sob máquinas.

A Figura 4.6 mostra o percurso seguido pela embarcação. O ponto H2, em amarelo, representa a localização do dispositivo autônomo de gravação, o ponto Tx, em vermelho, simboliza a fonte e os demais pontos, Tx1, Tx2,... Tx5, são as estações de transmissão do sinal LFM.

Os dados acústicos foram gravados por meio de 4 hidrofones montados em uma estrutura em formato de pirâmide, contendo um dispositivo autônomo de gravação, posicionado a uma profundidade de 14 m. As distâncias entre as estações de transmissão e os receptores, assim como, a profundidade local de cada ponto de

Figura 4.6: Configuração do experimento com embarcação. O ponto H2, em amarelo, representa o dispositivo autônomo de gravação, o ponto Tx , em vermelho, simboliza a fonte e os demais pontos, $Tx1$, $Tx2$,... $Tx5$, são as estações de transmissão do sinal LFM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

transmissão estão na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Distâncias entre as estações de transmissão e os receptores.

Estação	Distância (m)	Profundidade da fonte (m)	Profundidade local (m)
Tx1	100	7	15,7
Tx2	200	7	16,8
Tx3	300	7	16,8
Tx4	400	7	17,4
Tx5	500	7	17,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros do sinal LFM, utilizado em todos os eventos de transmissões, estão na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Parâmetros do sinal LFM transmitido da embarcação.

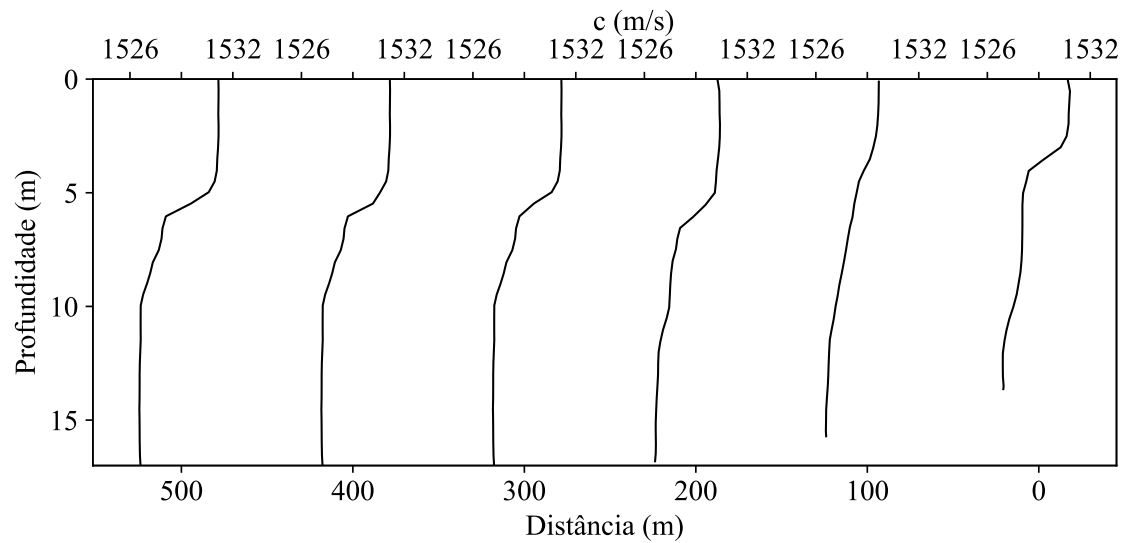
f_0 (kHz)	Largura da banda B (kHz)	τ_p (s)	intervalo entre transmissões (s)
2	2	0,05	0,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.7 exhibe os perfis de velocidades do som em relação às distâncias correspondentes as medições realizadas nas estações de $Tx1$ a $Tx5$. A variação na velocidade do som registrada na coluna d'água foi de aproximadamente 4 m/s e a densidade média da água medida nessas estações foi de $\rho_w = 1024,7 \text{ kg/m}^3$. As profundidades mínima e máxima medidas nas estações foram de 14 m e 17,4 m, respectivamente.

A Figura 4.8 mostra o projetor acústico Lubell *LL916C B.2* empregado na transmissão dos sinais.

Figura 4.7: Perfis de velocidades do som em relação à distância.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.8: Projetor Lubell LL916C.

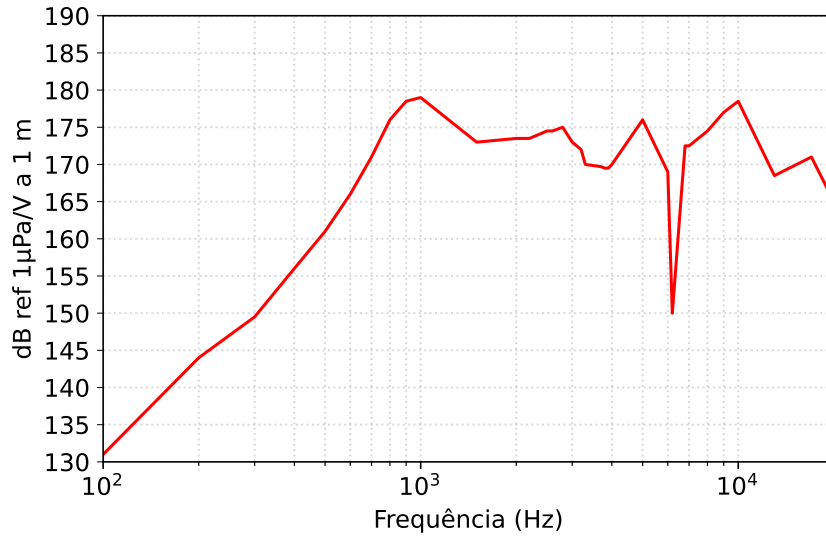


Fonte: Retirado de Lubell (2024).

Esse dispositivo é um transdutor piezoelétrico de pistão duplo do tipo ton-pilz, capaz de fornecer até 180 dB re $1 \mu\text{Pa}$ a uma distância de 1 m, na frequência de 1 kHz. Além disso, ele opera em uma faixa de frequência que varia de 200 Hz a 23 kHz conforme a curva mostrada na Fig. 4.9.

A relação entre a pressão sonora e a tensão de entrada é denominada como

Figura 4.9: TVR em relação à frequência do projetor Lubell LL916C.



Fonte: Adaptado de Lubell (2024).

a resposta de tensão de transmissão (TVR, *transmitting voltage response*), expressa em unidades de Pa.m/V. Essa medida representa a intensidade sonora gerada a uma distância de 1 m do transdutor por 1 V de tensão de entrada em função da frequência (SOZER, 2006).

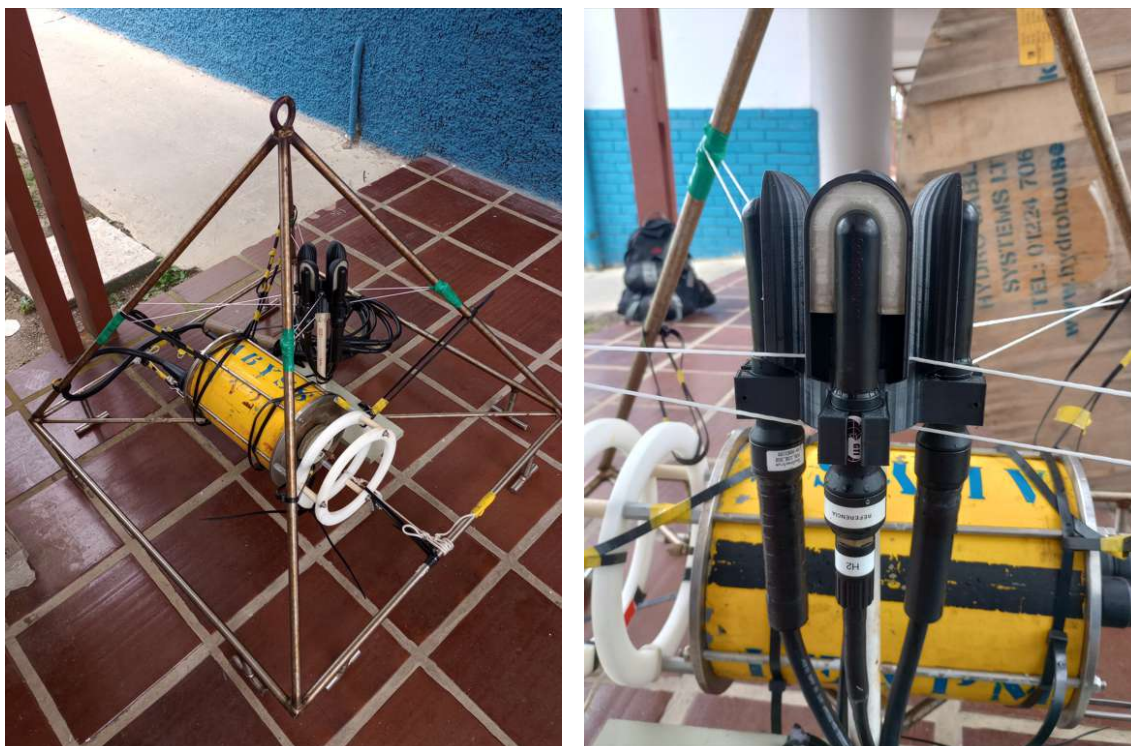
O SL do projetor acústico foi determinado utilizando a TVR e a tensão aplicada ao projetor. No experimento, a tensão aplicada no amplificador do projetor foi $V_{rms} = 200$ mV, sendo assim, o SL, é calculado em decibel, dB, relativamente a pressão acústica de referência de $1 \mu\text{Pa}$, à distância de 1 m de uma fonte pontual, pela expressão

$$SL = TVR + 20 \log_{10}(V_{rms}) \quad (4.1)$$

O dispositivo autônomo de gravação utilizado é mostrado na Fig. 4.10. Ele foi equipado com um processador, memória e baterias para cumprir a tarefa de coleta de dados submarinos. A taxa de amostragem foi definida como 50 kHz, resultando na gravação de ruídos irradiados em arquivos de dois minutos de duração. Os quatro hidrofones *GeoSpectrum M36-900* foram montados formando um ângulo de 90° , com uma distância aproximada de 0,5 m em relação ao fundo do mar, conforme mostrado nas Fig. 4.10a e 4.10b. Os abafadores dos hidrofones apresentados na Fig. 4.10b não foram aplicáveis no experimento desenvolvido. A finalidade deles era proporcionar direcionalidade a outro experimento realizado no mesmo dia.

Figura 4.10: Dispositivo autônomo de gravação.

(a) Pirâmide.

(b) Hidrofonos *GeoSpectrum M36-900*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrição da embarcação e condições de medição

A embarcação *Anchova* da MB utilizada durante os testes é mostrada na Figura 4.11. Suas especificações detalhadas estão disponíveis na Tabela 4.8.

Figura 4.11: Embarcação *Anchova*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.8: Especificações da embarcação.

Comprimento	12,7 m
Boca	3,5 m
Calado	0,98 m
Deslocamento	14 ton
Número de eixos / hélices	1
Número de pás da hélice	4
Tipo do motor	Diesel, 6 cilindros, 4 tempos

Fonte: Manual da embarcação.

Com a embarcação derivando simplesmente à mercê do vento e da corrente foram realizadas as medições do ruído irradiado do motor. As frequências geradas pelo motor principal variam regularmente devido à velocidade de rotação (PENG; FAN; WANG, 2018). Como a embarcação é movida por um motor diesel de seis cilindros e quatro tempos, a taxa de queima do motor diesel em função da rotação pode ser definida como

$$f_q = \frac{6n}{2 \times 60}, \quad (4.2)$$

onde n é o número de rotações por minuto (RPM) do motor, o fator de dois no denominador corresponde a uma queima de combustível a cada duas rotações para o motor de quatro tempos. A frequência de rotação do motor, definida na Eq. 4.2, foi utilizada para caracterizar o principal ruído irradiado da embarcação durante o experimento.

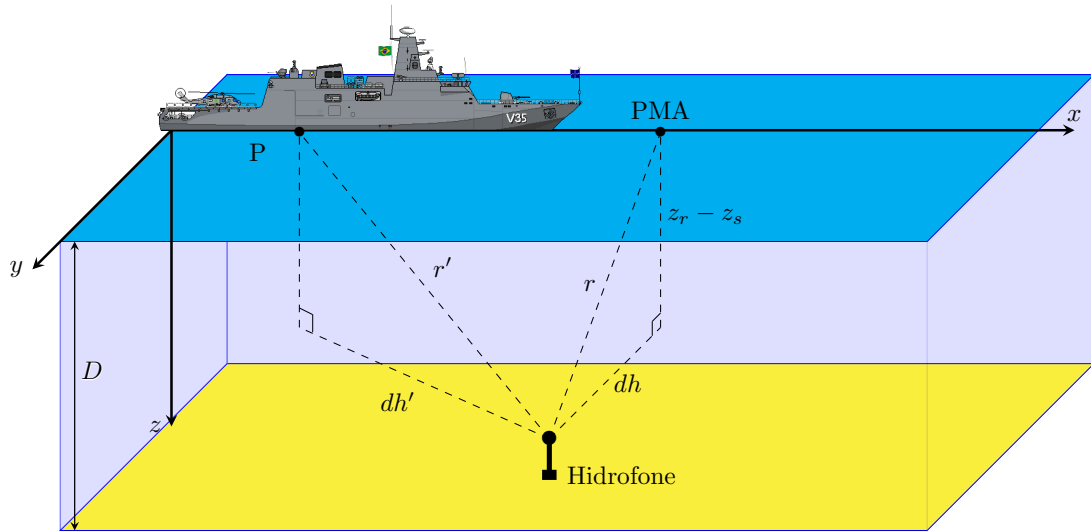
4.2.3 Dados da Raia Acústica

O terceiro experimento, foi realizado pelo Departamento de Medidas Acústica do Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP) e os dados gravados foram disponibilizados no contexto desta dissertação. Essas gravações foram realizadas em janeiro de 2023 nas proximidades da Praia Brava, em Arraial do Cabo, Rio de Janeiro (ver H3 na Fig. 4.2). Além das gravações, também foram fornecidas as informações sobre a geometria da medição, incluindo posição e profundidade do hidrofone e as coordenadas geográficas do navio ao longo da corrida.

Conforme descrito no Cap. 2, o fundo marinho tem grande influência na propagação acústica em águas rasas, em virtude das sucessivas interações com as fronteiras do guia de ondas. Os parâmetros do fundo utilizados são descritos na Tabela 4.1 e correspondem a um fundo de areia com densidade $\rho = 2.000 \text{ kg/m}^3$, velocidade compressional $c_p = 1.800 \text{ m/s}$ e atenuação $0,1 \text{ dB}/\lambda$. Embora o perfil de velocidade do som na água do mar nesse ambiente não seja isotrópico, utilizou-se essa hipótese considerando sua pequena influência, assumindo $c_w = 1522 \text{ m/s}$.

A Figura 4.12 mostra o diagrama da corrida de um navio. O ponto P é uma posição arbitrária no eixo x da trajetória e o PMA ocorre quando a distância dh entre o navio e o hidrofone é mínima. Nesse experimento, o navio se deslocava em uma linha isobatimétrica de 42 metros.

Figura 4.12: Raia Acústica.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2019).

O navio foi considerado como uma fonte pontual omnidirecional com certa intensidade, emitindo a uma profundidade equivalente a dois terços do calado (AUDOLY; RIZZUTO, 2015; PENG; FAN; WANG, 2018). Portanto, o ponto da fonte foi definido como 4 m de profundidade abaixo da superfície. O hidrofone, por sua vez, foi posicionado a uma profundidade de 36 m.

Foram selecionadas duas corridas de um mesmo navio, entretanto com regime de máquinas distintos, conforme descrito na Tabela 4.9. Para cada corrida, foram analisados oito trechos da gravação com duração de 1 s, correspondentes as dh de 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 e 500 m.

Tabela 4.9: Parâmetros das corridas.

Corrida	Velocidade média (m/s)	dh no PMA (m)
1	6,0	63
2	6,2	55

Fonte Elaborado pelo autor.

Conforme proposto por Pang *et al.* (2020), os níveis da fonte e o fator de perda na propagação podem ser determinados por meio de uma regressão utilizando os níveis de pressão sonora em diversas distâncias, desde que a fonte sonora permaneça estacionária. Tendo como base o mesmo princípio, torna-se possível escrever expressões para o SL nos pontos escolhidos, da seguinte forma

$$\begin{cases} SL_{PMA} &= SPL_{PMA} + TL_{PMA}, \\ SL_P &= SPL_P + TL_P \end{cases} \quad (4.3)$$

A primeira equação representa o cálculo no PMA e a segunda em um ponto arbitrário. A subtração dessas equações resulta em

$$SL_{PMA} - SL_P = SPL_{PMA} - SPL_P + TL_{PMA} - TL_P, \quad (4.4)$$

considerando a fonte sonora estacionária, o SL será o mesmo em diferentes pontos da corrida, sendo assim

$$SPL_{PMA} = SPL_P + TL_P - TL_{PMA}. \quad (4.5)$$

A Eq. 4.5 descreve uma estimativa para o SPL no PMA, porém calculada com o SPL medido em qualquer ponto e somando-se as TLs determinadas para cada abordagem de correção. Conseqüentemente, a referência para análise será a medição do SPL no PMA. A diferença média absoluta, em dB, entre os níveis medido e estimado no PMA, foram computadas para as faixas de frequências 10 a 100 Hz, 100 a 1.000 Hz e 1.000 a 10.000 Hz em função da distância.

Para obter a densidade espectral de potência (PSD), o sinal gravado foi processado utilizando o método de Welch, um periodograma adaptado que é amplamente empregado (WELCH, 1967; PENG; FAN; WANG, 2018).

4.3 Parâmetros do processamento de sinais

O processamento dos dados acústicos (gravados arquivos no formato .wav) foi realizado pelo método *Welch*, utilizando a transformada rápida de *Fourier* (FFT) com 8.192 pontos, 50 % de sobreposição e a janela *flattop*, com o objetivo de melhorar a precisão da amplitude, indicando com mais precisão o nível do pico (HEINZEL; RÜDIGER; SCHILLING, 2002). Por outro lado, nos sinais LFM transmitidos foram aplicadas as janelas *Tukey*. Esta janela possui um parâmetro que permite ajustar a proporção entre a parte plana e a parte suavizada, reduzindo, assim, os efeitos de transições bruscas em amplificadores (ABRAHAM, 2019). A frequência de amostragem (f_s) dos experimentos da Enseada dos Anjos e da Enseada do Forno foi de 50 kHz, enquanto que na Raia Acústica foi adotada a $f_s = 48$ kHz.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Este capítulo tem como objetivo avaliar o desempenho dos métodos apresentados no Cap. 3 quando aplicados aos ambientes descritos no Cap. 4. Para analisar as correções foram utilizados um ambiente simulado e dados experimentais coletados provenientes de transmissões de sinais LFM, ruído irradiado por embarcação e ruído irradiado por navio da MB. No ambiente simulado, o desempenho é avaliado pela média aritmética das diferenças entre cada TL estimado e o TL obtido com a perda por espalhamento esférico, nos demais ambientes é calculada a diferença entre os SLs utilizando dados experimentais coletados.

No decorrer deste capítulo, será empregado o mesmo código de cores para os métodos de correção. Sendo cinza correspondente a perda por espalhamento esférico (ESF), em roxo o método das imagens de Pang *et al.* (PY), em pontilhado azul escuro o método das imagens modificado (JEN), em vermelho o método das imagens de Ainslie & Wood (AW), em laranja a modelagem de banda larga feita com o Traceo (TRA), em azul o método empírico do ângulo crítico do fundo do mar (SCA) e em verde o método empírico de Meyer & Audoly (MA).

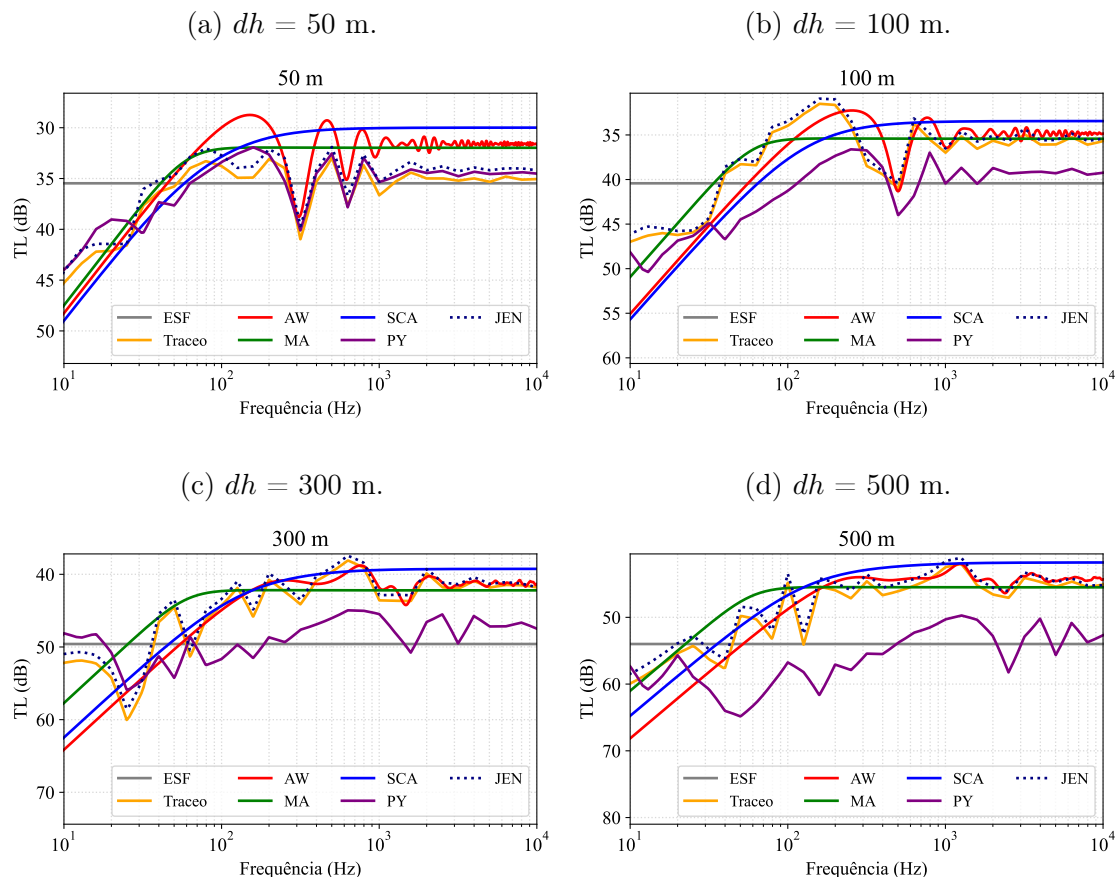
5.1 Ambiente simulado

Neste ambiente foi analisada a influência dos parâmetros geométricos e do fundo nas curvas de TL em função da frequência.

Conforme descrito no capítulo anterior, a Tabela 4.2 apresenta a geometria inicial utilizada nas simulações. A cada simulação um incremento de 50 m foi aplicado a variável de entrada dh até alcançar 500 m. Em seguida, será apresentado uma comparação entre os métodos de correção descritos no Cap. 3, em relação ao método ESF e utilizando o MAE por faixas de frequências e distâncias. Por fim, a alteração nos parâmetros do fundo foi aplicada, conforme especificado na Tabela 4.1.

A Figura 5.1 exibe as curvas de TL, em função da frequência para as abordagens apresentadas no Cap. 3, em escala logarítmica, calculadas nas distâncias de 50 m (Fig. 5.1a), 100 m (Fig. 5.1b), 300 m (Fig. 5.1c) e 500 m (Fig. 5.1d), com as frequências centrais de 1/3 de oitava da banda definidas nas Equações 2.17, 2.18 e 2.19.

Figura 5.1: Curvas de TL versus frequência calculadas para frequências centrais de 1/3 de oitava.



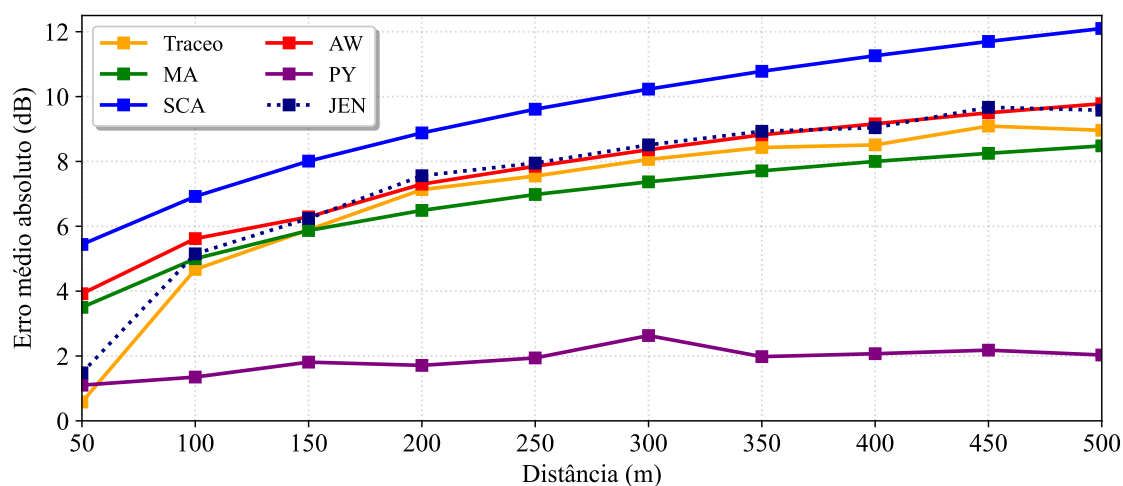
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando por base a distância dh de 50 m e a faixa de frequência de 10 Hz a 100 Hz, pode ser observado que com exceção do decaimento geométrico esférico as demais abordagens apresentam curvas com inclinações semelhantes que se iniciam com valores de TL em aproximadamente 46 dB até cerca de 33 dB. Isso pode ser explicado pela forma como essas abordagens calculam a perda em função da frequência, resultando na inclinação quando z_s é menor que o comprimento de onda, diferentemente do método ESF que calcula a perda em relação a distância sem levar em conta a faixa de frequência. Na faixa de 100 a 1.000 Hz, os métodos das imagens e a modelagem com o Traceo, manifestam um comportamento oscilatório com amplitude superior a ESF, com diferenças que ultrapassam 4 dB. Embora a

TL dessas abordagens seja calculada como uma média em níveis de 1/3 de oitava da banda, as oscilações representam a transição que ocorre quando z_s se aproxima do comprimento de onda. Por esse motivo, somente acima de 1.000 Hz, os gráficos tendem a estabilizar em um valor de amplitude, momento em que z_s se torna maior que o comprimento de onda. Conseqüentemente, um aumento em z_s resulta em um deslocamento em frequência para a esquerda na curva de TL, enquanto uma diminuição em z_s resulta em um deslocamento para a direita. Por outro lado, as expressões das abordagens MA e SCA tratam de maneira simplificada a região de transição, dado que são desenvolvidas de maneira empírica com base em resultados de simulações numéricas e equações analíticas, respectivamente. Desse modo, acima de 100 Hz, os resultados demonstram que essas abordagens tendem a seguir uma reta horizontal, com um desvio de aproximadamente 3 a 5 dB na amplitude. Acima de 1.000 Hz, a modelagem com o Traceo e os métodos das imagens JEN e PY demonstram menores diferenças para a abordagem ESF, enquanto, os desvios das abordagens SCA, MA e AW aumentam. Portanto, nessa faixa, observa-se um contraste, onde três abordagens indicam que o comportamento do fenômeno se assemelha à perda esférica, enquanto as outras três se distanciam desse padrão. No entanto, conforme será demonstrado pelos resultados a seguir, o contraste só ocorre a 50 m de distância.

A Figura 5.2 apresenta a diferença média, expressa em decibéis (dB), entre as curvas de TL dos métodos de correção, tendo como referência a TL esférica.

Figura 5.2: Diferença média absoluta em função da distância entre as abordagens em relação a ESF na faixa de frequências de 10 Hz a 10 kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses cálculos foram realizados para distâncias variando de 50 a 500 metros, na faixa de frequências de 10 Hz a 10 kHz levando em consideração os parâmetros específicos da areia detalhados na Tabela 4.1. Em termos gerais, observa-se que as

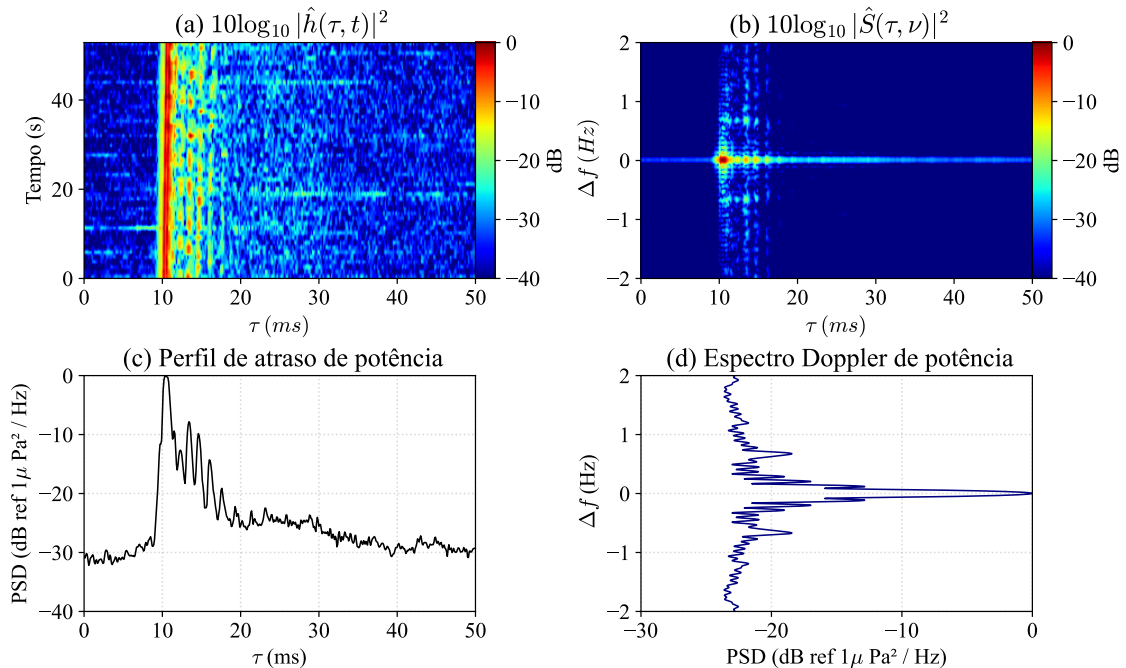
diferenças aumentam proporcionalmente com o incremento da distância, exceto no caso do método das imagens PY, que mantém um comportamento semelhante a ESF à medida que a distância se amplia. Esta análise permanece aplicável ao modificar os demais parâmetros do fundo especificados na Tabela 4.1.

Durante as simulações, as alterações nos parâmetros geométricos resultaram em deslocamentos nas curvas de TL, tanto em termos de intensidade quanto de frequência, com maior evidência nas abordagens Traceo, PY e JEN. A análise das variáveis z_s e z_r é comparável àquela discutida na seção 2.2.3, onde a Fig. 2.4 (a) descreve a profundidade da fonte z_s , enquanto a Fig. 2.4 (b) avalia o ângulo de inclinação, correspondente a profundidade do receptor z_r . Além disso, as profundidades do local $D = 20, 40$ e 60 m foram utilizadas. À medida que a profundidade variava, o comportamento das métricas e do MAE por faixas de frequências e distâncias assemelhava-se ao apresentado nas Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente.

5.2 Experimento na Enseada dos Anjos

Neste experimento, foram calculadas a matriz de resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ estimada e a função de espalhamento Doppler $\hat{S}(\nu, \tau)$, utilizando os dados experimentais coletados, conforme mostra a Fig. 5.3.

Figura 5.3: (a) Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e (b) função de espalhamento Doppler $\hat{S}(\tau, \nu)$ estimadas através de sinais transmitidos. (c) O perfil de atraso de potência e (d) o espectro Doppler de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

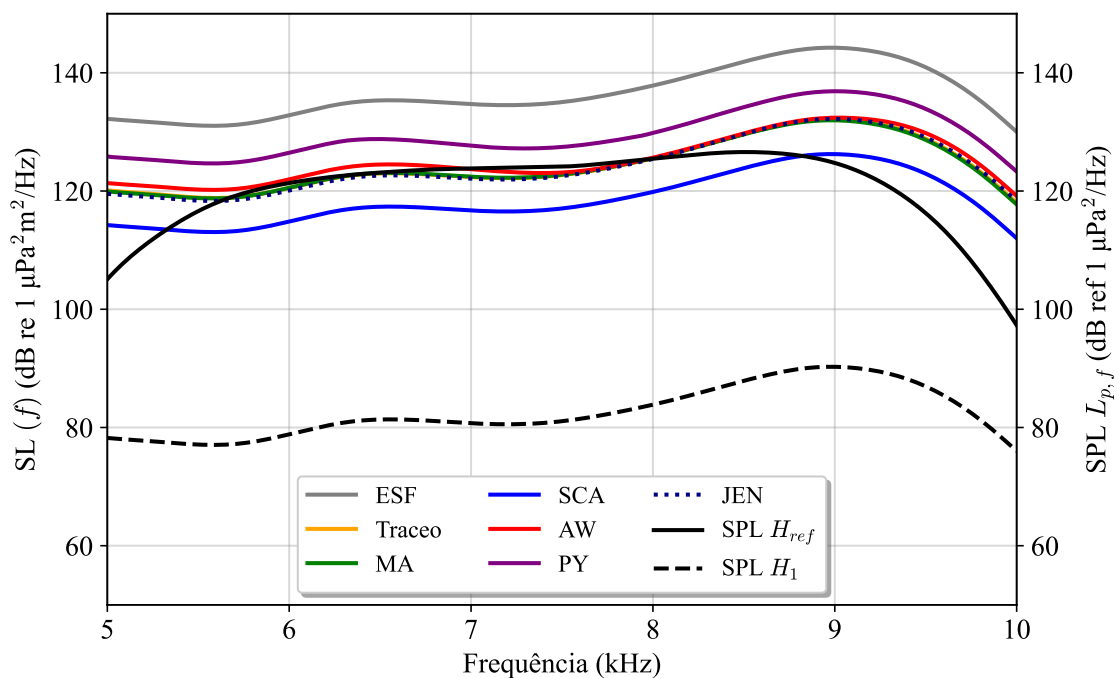
A Figura 5.3 exibe, em (a), a resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e, em (b), a função de espalhamento Doppler $\hat{S}(\nu, \tau)$ estimadas por meio da transmissão e recepção de sinais LFM (ver Tabela 4.4). Em (c), é mostrado o perfil de atraso de potência, enquanto em (d), o espectro Doppler de potência. No lado esquerdo da figura, (a) e (c) correspondem ao efeito dos caminhos múltiplos, em que as chegadas diretas estão acompanhadas de ecos com cerca de 10 dB a menos de energia. No lado direito da figura, (b) e (d) simbolizam o pequeno desvio Doppler, que pode ser explicado pelo movimento das ondas e os mecanismos de dispersão presentes no volume de água.

Adicionalmente, o desempenho dos métodos de correção empregados foi avaliado com relação aos dados experimentais coletados, por meio do desvio entre as curvas de SL estimadas pelos métodos de correção, no intervalo de 5 a 10 kHz.

5.2.1 Correções de SL utilizando o sinal LFM

Utilizando os parâmetros de entrada descritos na Tabela 4.5 foram obtidas as curvas de SL, traçadas em escala linear, em função da frequência para os métodos de correção apresentados no Cap. 3, conforme exibido na Fig. 5.4.

Figura 5.4: Curvas de SL em função da frequência. A curva sólida em preto corresponde ao SPL registrado no hidrofone de referência, a curva tracejada em preto é o SPL medido no hidrofone afastado, em cinza ESF, em roxo PY, em pontilhado azul escuro JEN, em vermelho AW, em laranja Traceo, em azul SCA e em verde MA. O eixo vertical da direita representa o SPL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, e o eixo vertical da esquerda representa o SL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2/\text{Hz}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

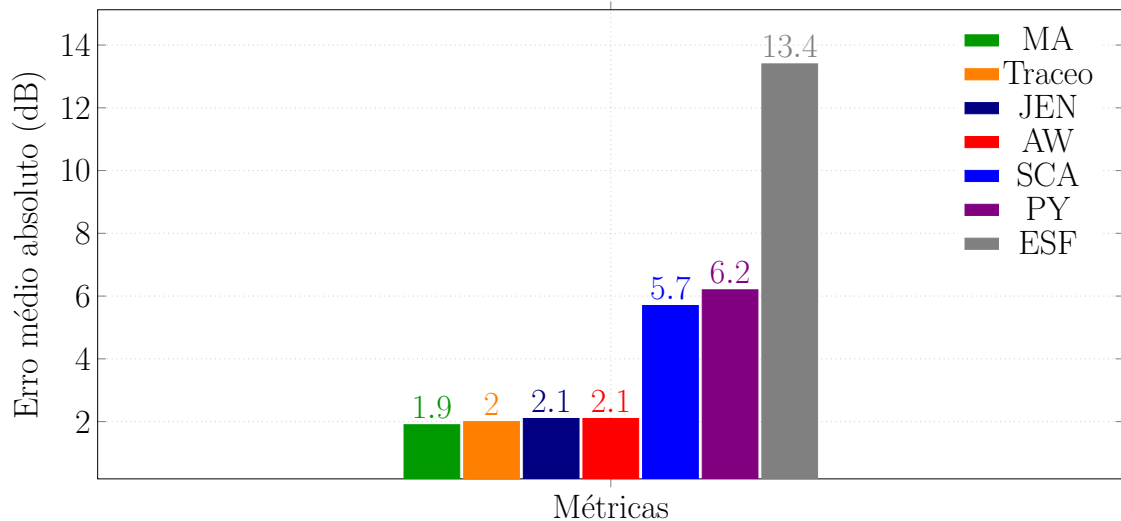
A curva sólida em preto corresponde ao $SL(f)$, resultado do processamento dos sinais gravados à distância de aproximadamente 1 m da fonte com o hidrofone de referência H_r , a curva tracejada em preto é o SPL obtido com os dados acústicos do hidrofone afastado H_1 . As demais linhas representam as estimativas de SL obtidas com os métodos de correção, em cinza a perda por espalhamento esférico (ESF), em roxo o método das imagens de Pang *et al.* (PY), em pontilhado azul escuro o método das imagens modificado (JEN), em vermelho o método das imagens de Ainslie & Wood (AW), em laranja a modelagem de banda larga feita com o Traceo (TRA), em azul o método empírico do ângulo crítico do fundo do mar (SCA) e em verde o método empírico de Meyer & Audoly (MA). As diferenças médias mais significativas, em decibéis, entre o SL estimado por cada método de correção e o SL calculado com os dados experimentais coletados, são observadas nas faixas de 5 a 6 kHz e 9 a 10 kHz. Acima de 6 kHz, as estimativas de cada método demonstram um aumento proporcionalmente da intensidade com a frequência, alcançando o valor máximo em aproximadamente 9 kHz, onde, o efeito da janela é evidenciado. Para curva em preto, o efeito da janela aplicada ao sinal é pronunciado também em aproximadamente 5 kHz.

As abordagens PY e ESF exibiram maior distinção dos valores medidos. Por outro lado, a abordagem SCA demonstrou uma estimativa de nível da fonte inferior às demais. Por fim, as comparações feitas com as estimativas obtidas com MA, Traceo, AW e JEN expressaram os resultados mais precisos e um comportamento similar.

Alguns fatores precisam ser mencionados com relação ao sinal medido no hidrofone de referência, incluindo os efeitos do campo próximo e as reflexões na superfície e no fundo. Isso leva à conclusão de que o sinal gravado não representa completamente o som do projetor acústico T1. Ainda assim, a configuração do experimento foi uma maneira encontrada para estimar uma curva de SL (f) para o projetor. Na tentativa de minimizar o efeito da janela, foram calculadas as diferenças médias entre o SL estimado por cada método e o SL medido com os dados experimentais coletados, em uma faixa de frequências de 5,5 a 9 kHz, conforme exibido na Fig. 5.5. Dessa forma, os resultados mais precisos permaneceram para os métodos de correção MA, Traceo, AW e JEN. A superioridade no desempenho desses métodos em comparação com o método ESF pode ser atribuída ao campo de interferências produzido como resultado da alta frequência empregada, onde o comprimento de onda do sinal transmitido era muito menor do que a profundidade da fonte. Além disso, a distância entre a fonte e o receptor era muito maior do que a profundidade do local, o que intensificou as interações do som com o fundo. Nesse contexto, o espalhamento esférico resultou em uma estimativa de TL muito acima daquela encontrada com as demais abordagens, como consequência por desconside-

rar as interações nas fronteiras do guia de ondas.

Figura 5.5: Gráfico em barras com o erro médio absoluto, em dB, entre os SL estimado por cada abordagem e o SL estimado com os dados experimentais coletados, na faixa de frequências entre 5,5 a 9 kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Experimento na Enseada do Forno

Neste experimento, inicialmente foram calculadas as matrizes de resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e das funções de espalhamento Doppler $\hat{S}(\nu, \tau)$, utilizando a transmissão e recepção de sinais LFM. Em seguida, procedeu-se à comparação das curvas de SL estimadas pelas métricas, com os dados experimentais coletados. Por fim, será apresentada uma análise sobre a medição do ruído da embarcação Anchova.

As distâncias entre a fonte e o receptor variaram entre 100 a 500 m, com intervalos aproximados de 100 m. Referente ao cálculo das previsões, foram utilizados os parâmetros geométricos do ambiente, disponíveis na Tabela 4.6, bem como os perfis de velocidade do som medidos descritos na seção 4.2.2. Os detalhes referentes aos parâmetros do sinal LFM podem ser consultados na Tabela 4.7.

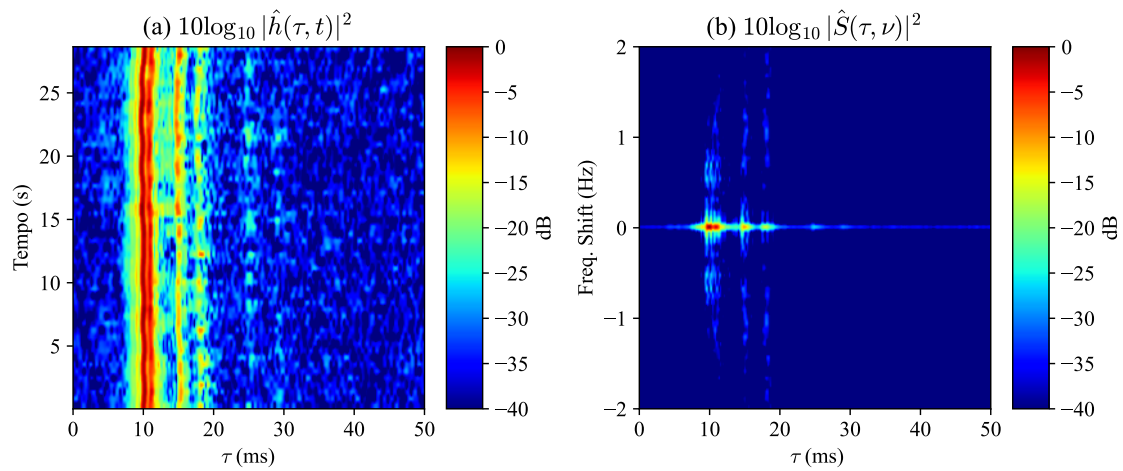
5.3.1 Resposta ao impulso estimada com o sinal LFM

Os dados experimentais coletados foram utilizados para calcular os atrasos temporais na matriz de resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e a mudança na frequência resultante do estado do mar e do movimento relativo entre a embarcação e o receptor. Esse movimento cria um ambiente de incertezas na geometria, o que é desejável para a avaliação do desempenho dos métodos de correção durante a me-

dição. Assim, as Fig. 5.6 a Fig 5.10 exibem os mapas de cores referentes a resposta ao impulso do canal (CIR) (a) e a função de espalhamento Doppler (b).

No evento de transmissões realizado na estação Tx1, a 100 m do receptor, a embarcação estava em uma região abrigada da ação do vento, entretanto sofreu uma pequena variação na posição causada pela corrente, isso resulta em um pequeno espalhamento Doppler conforme mostra a Fig. 5.6.

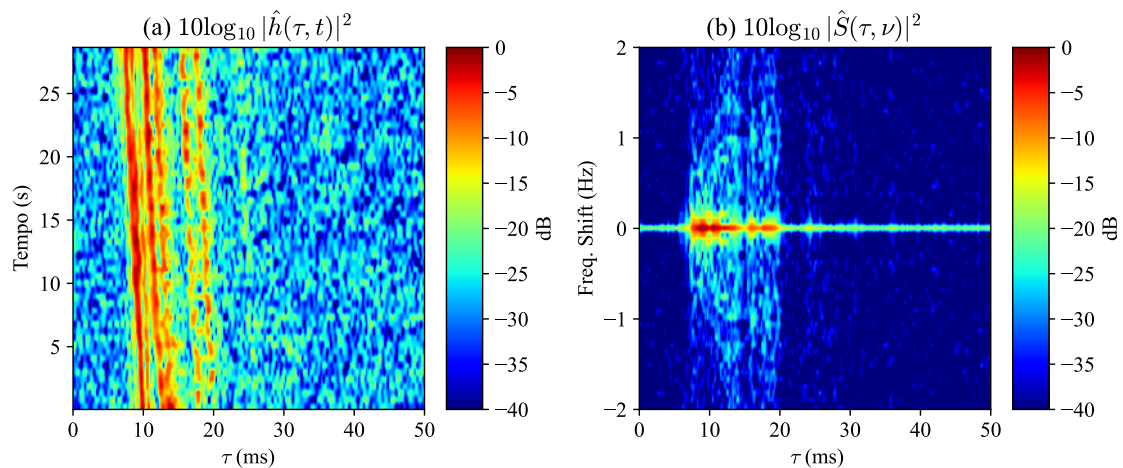
Figura 5.6: Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 100 m de distância entre fonte e receptor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No evento de transmissões realizado na estação Tx2, a embarcação encontrava-se sujeita à ação do vento, posicionada a uma distância de 200 m do receptor e movendo-se em direção a este último. A Fig. 5.7 mostra à esquerda a redução no atraso τ ao passar do tempo e à direita o espalhamento Doppler.

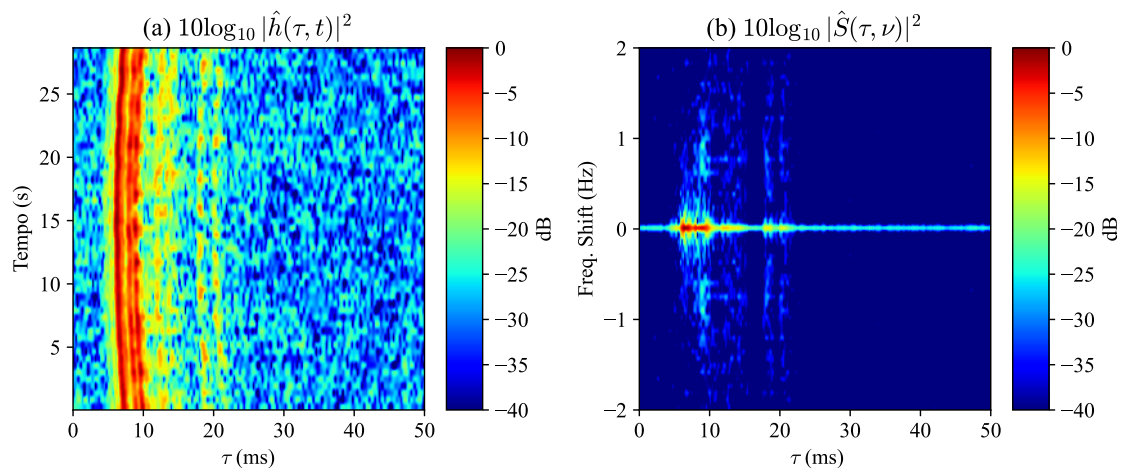
Figura 5.7: Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 200 m de distância entre fonte e receptor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No evento de transmissões realizado na estação Tx3, a 300 m do receptor, a embarcação primeiro se aproximou e, em seguida, se afastou do receptor, sendo assim, é observado um pequeno espalhamento Doppler, conforme mostrado na Fig. 5.8.

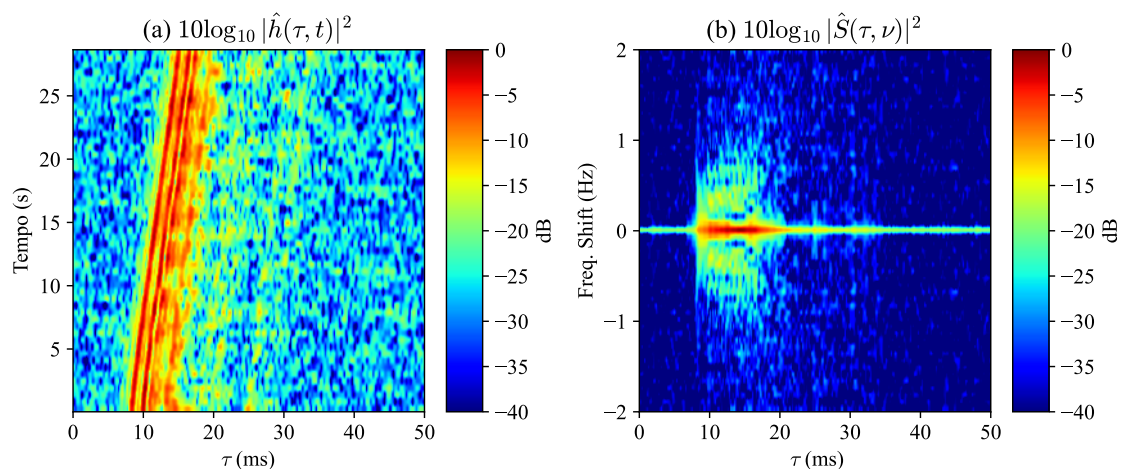
Figura 5.8: Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 300 m de distância entre fonte e receptor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

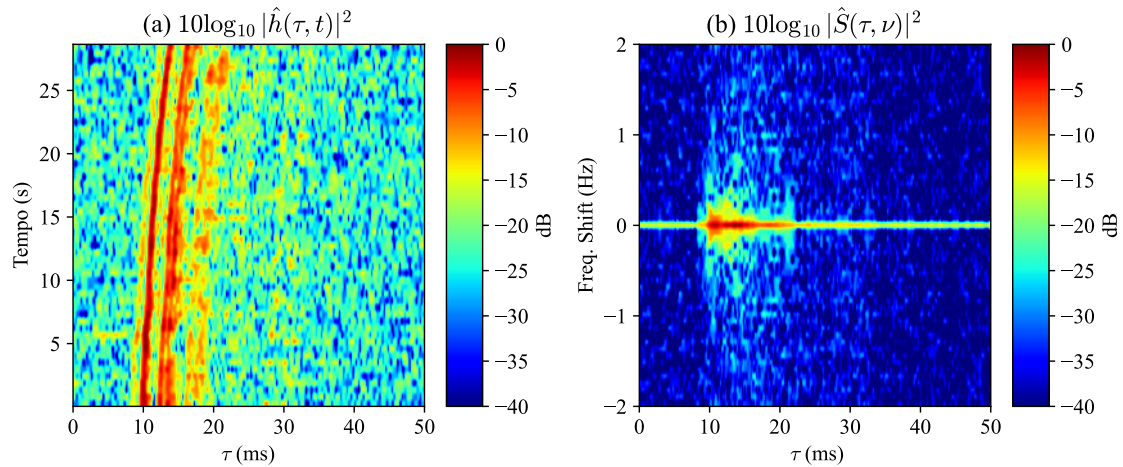
Nos eventos de transmissões realizados nas estações Tx4, a 400 m do receptor, e Tx5, a 500 m do receptor, a embarcação se afastou do receptor, resultando no aumento do atraso ao longo do tempo. Os resultados referentes a essas estações são mostrados nas Fig. 5.9 e 5.10, respectivamente. .

Figura 5.9: Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimados através de sinais transmitidos a 400 m de distância entre fonte e receptor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.10: Resposta ao impulso do canal $\hat{h}(t, \tau)$ e função de espalhamento estimada através de sinais transmitidos a 500 m de distância entre fonte e receptor.

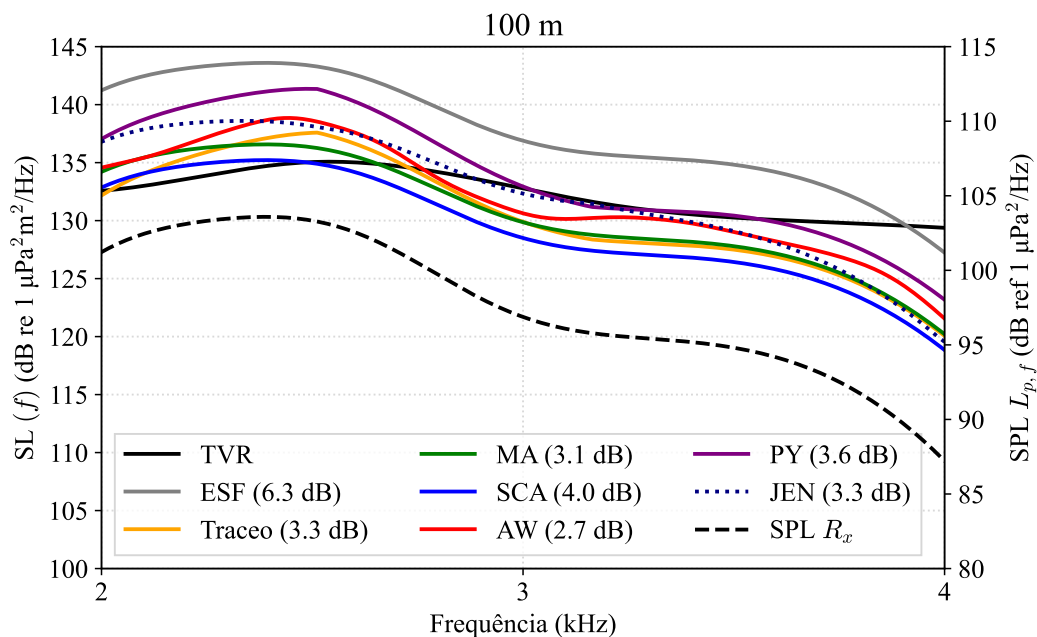


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Correções de SL utilizando o sinal LFM

As curvas de $SL(f)$ estimadas com os métodos de correção apresentados no Cap. 3 foram calculadas somando o SPL medido à TL, para as distâncias aproximadas variando entre 100 a 500 m, com intervalos de 100 m. A Fig. 5.11 mostra as estimativas de SL, na faixa de frequências de 2 a 4 kHz, obtidas pelos métodos a uma distância aproximada de 100 m.

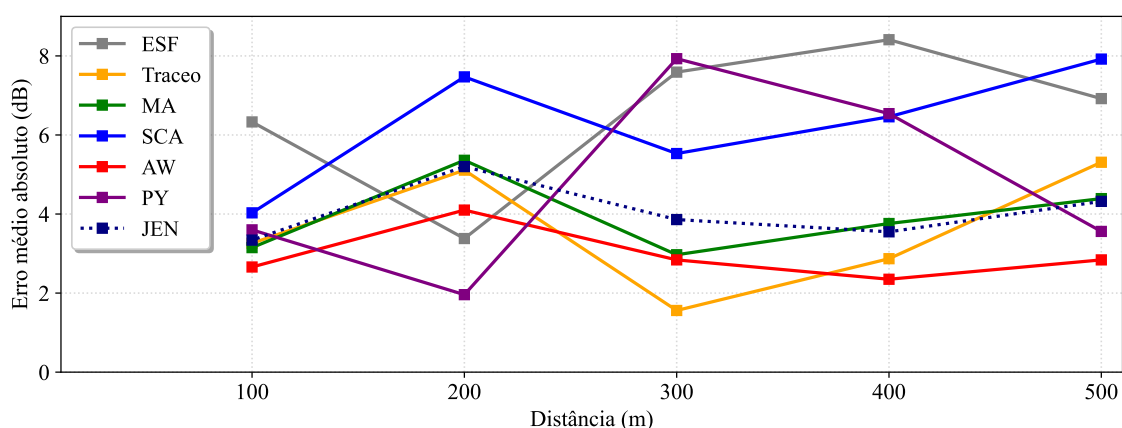
Figura 5.11: Curvas de $\hat{S}L(f)$, $dh = 100$ m. Entre parênteses o erro médio absoluto na faixa de 2 a 4 kHz. O eixo vertical da direita representa o SPL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, e o da esquerda representa o SL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2/\text{Hz}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva sólida em preto corresponde ao SL calculado com a Eq. 4.1, baseada na curva TVR do projetor acústico e a tensão de entrada aplicada. A curva tracejada em preto corresponde ao SPL registrado no hidrofone. A fim de avaliar o desempenho dos métodos de correção em um ambiente de incertezas geométricas, as diferenças entre o SL baseado na curva TVR e as estimativas de SL obtidas com os métodos de correção foram calculadas para cinco distâncias individuais. O valor médio dos desvios é exibido, em função da distância, na Fig. 5.12.

Figura 5.12: Erro médio absoluto em relação as distâncias para o experimento da Enseada do Forno.

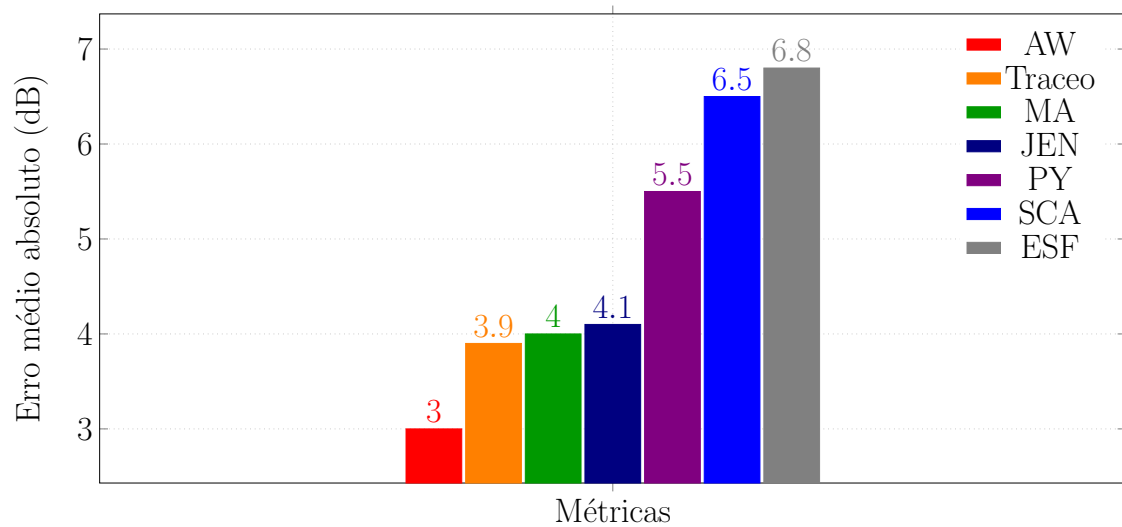


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se nessa figura um comportamento comparável das abordagens AW, Traceo, MA, JEN e SCA, sendo crescente até 200 m, decrescente entre 200 a 300 m e novamente crescente entre 300 a 500 m, com os menores desvios ocorrendo nas estações de 100 e 300 m, coincidentes com as estações de menor desvio nas funções de espalhamento Doppler. As estações com 400 e 500 m de distância apresentaram um erro incoerente com os desvios Doppler registrados. Uma possível razão para o maior erro associado à estação 500 m, onde o desvio Doppler tem intensidade menor do que o desvio referente à estação a 400 m de distância são as incertezas do posicionamento GPS no início da transmissão. Por outro lado, as curvas de ESF e PY apresentam comportamentos semelhantes entre si, com as inclinações opostas àquelas exibidas pelas demais métricas.

A Figura 5.13 mostra uma análise comparativa das métricas em relação ao TVR, sendo calculado o erro médio absoluto para cinco distâncias individuais. Embora o desempenho de PY com relação à distância tenha sido oposto as outras abordagens que alcançaram os melhores resultados, ainda assim, o seu desempenho médio foi mais preciso do que SCA.

Figura 5.13: Desempenho médio das abordagens durante o experimento da Enseada do Forno.

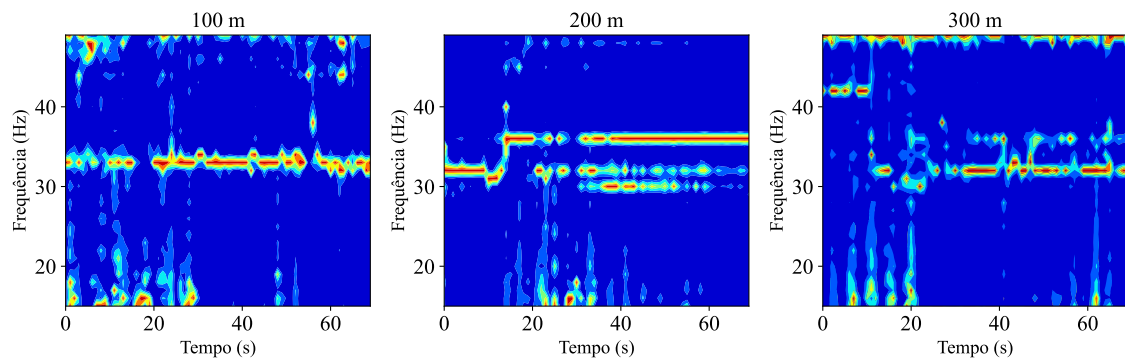


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3 Correções de SL utilizando uma embarcação

Nas estações de transmissão, a embarcação permaneceu com motor em marcha lenta (*ralenti*) e desacoplado do eixo propulsor, operando a rotação de cerca de 700 RPM, o equivalente a frequência fundamental de 35 Hz. A Fig. 5.14 apresenta espectrogramas do sinal gravado e filtrado, às distâncias de 100, 200 e 300 m do receptor, em intervalos de 60 s. Referente as estações localizadas a 400 e 500 m de distância, os resultados não são apresentados uma vez que os sinais adquiridos estavam com baixa relação sinal ruído (SNR, *signal-to-noise ratio*), elevado espalhamento doppler e devido a presença de embarcações em trânsito, mais próximas do receptor do que a embarcação Anchova.

Figura 5.14: Espectrogramas do ruído irradiado pela embarcação nas posições Tx1 (100 m), Tx2 (200 m) e Tx3 (300 m).

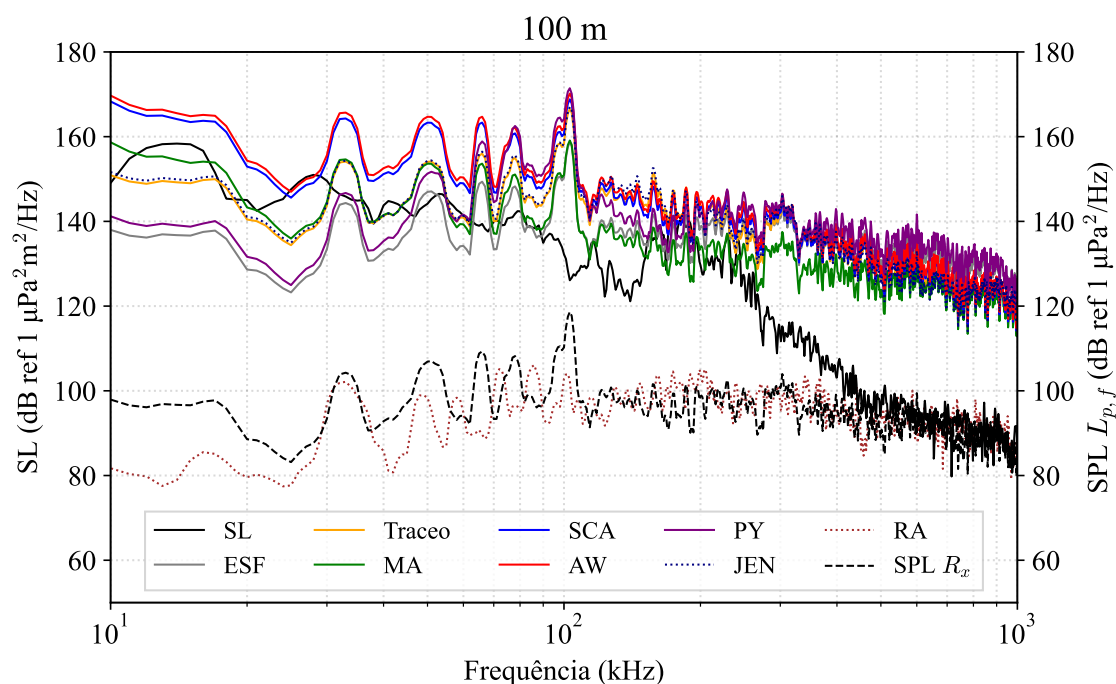


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.15 exhibe as curvas de SL, em escala logarítmica, calculadas

para banda estreita, a cada 1 Hz, na faixa de frequências entre 10 Hz a 1.000 Hz. A linha sólida em preto representa o SL medido a aproximadamente 1 m da embarcação, enquanto a linha tracejada em preto simboliza o SPL medido a uma distância aproximada de 100 metros. O nível de ruído ambiente é representado pela linha pontilhada marrom e as demais linhas representam os métodos de correção. O ruído da embarcação com maior intensidade está concentrado até 100 Hz devido ao regime de máquinas adotado. Portanto, a partir de 100 Hz, observa-se uma redução na intensidade da curva do SL, aproximando-a da curva do SPL, o que resulta em um aumento na diferença nas estimativas de correção de SL apresentadas pelos métodos de correção.

Figura 5.15: Curvas de SL calculadas para NB em função da frequência. A linha sólida preta representa o SL medido próximo à embarcação (aproximadamente 1 m) e a linha tracejada preta é o SPL registrado no hidrofone a uma distância de aproximadamente 100 m. O nível de ruído ambiente (RA) é representado pela linha pontilhada marrom e as demais linhas representam os métodos de correção. O eixo vertical da direita representa o SPL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, e o da esquerda representa o SL, em dB ref $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2/\text{Hz}$.

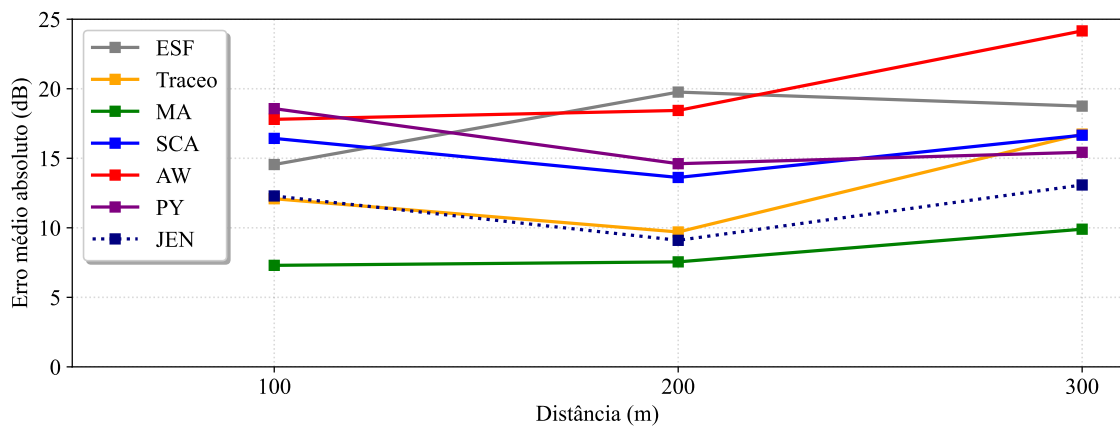


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na Fig. 5.15, observa-se que o nível do SL medido é mais elevado na faixa de frequência até 400 Hz, enquanto que o nível do SPL é levemente mais alto até 100 Hz. Assim, comparando com o ruído ambiente temos o SNR do SL mais elevado até 400 Hz e o SNR do SPL mais elevado até aproximadamente 100 Hz. Acima de 100 Hz, as estimativas se distanciaram consideravelmente do valor de referência. Consequentemente, a SNR mais alta da primeira faixa de frequências

implica que os resultados desse intervalo sejam considerados mais relevantes. Sendo assim, os erros médios absolutos dos métodos de correção em relação aos dados experimentais coletados foram calculados na faixa de frequências de 10 Hz a 100 Hz e em distâncias de 100, 200 e 300 metros, conforme apresentado na Fig. 5.16. Nessa faixa, as estimativas mais precisas foram alcançadas pelas abordagens MA, JEN, Traceo e SCA tendo as abordagens AW e ESF apresentado as estimativas com maior erro, referente a 18 dB e 21 dB, respectivamente.

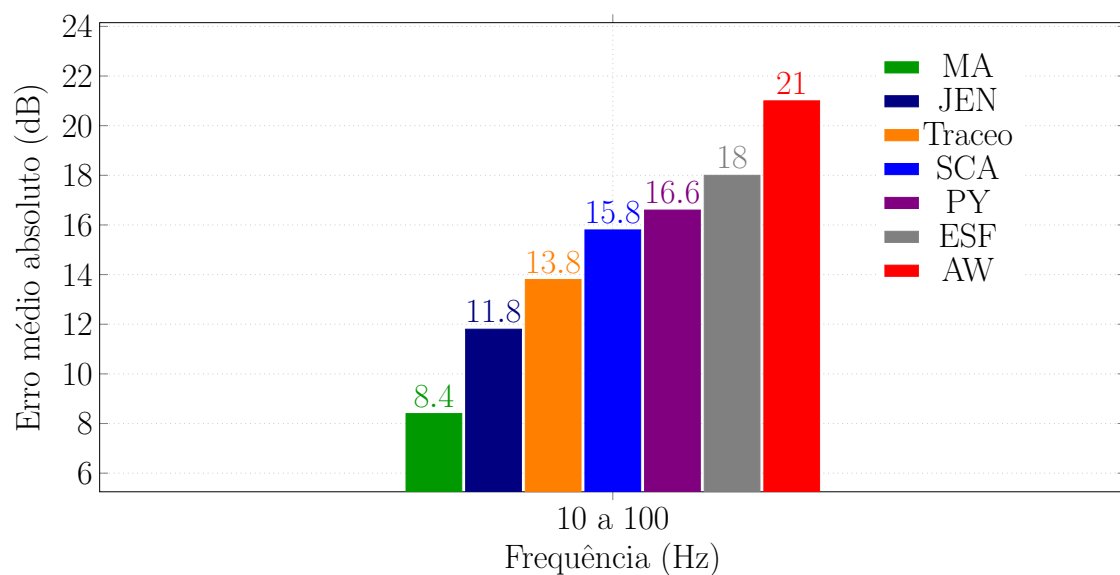
Figura 5.16: Erro médio absoluto em função da distância para banda estreita na faixa de frequências de 10 Hz a 100 Hz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação dos métodos de correção foi realizada também utilizando o erro médio absoluto obtido nas três distâncias, conforme mostrado na Fig. 5.17.

Figura 5.17: Erro médio absoluto considerando as três distâncias na faixa de frequências de 10 Hz a 100 Hz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

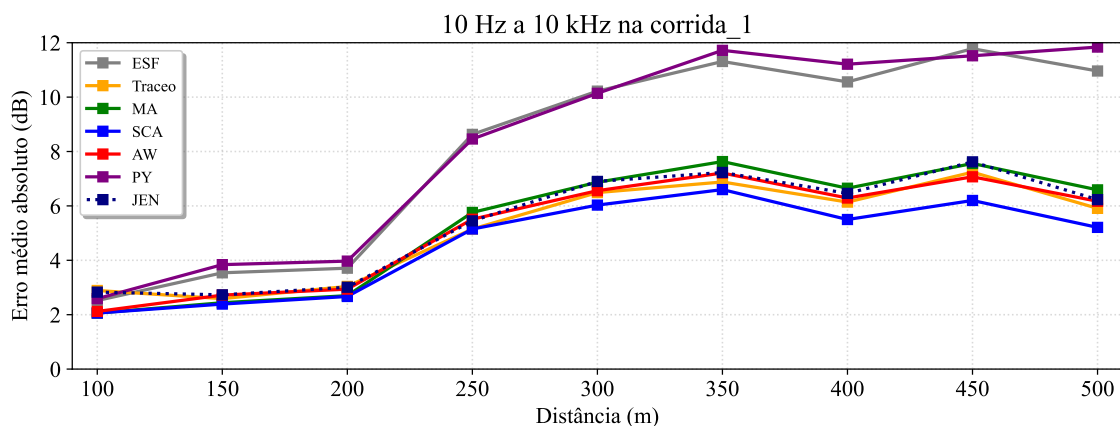
Mesmo considerando a faixa de frequências que concentra o ruído produzido pelo motor da embarcação, os resultados estimados pelos métodos de correção se distanciaram do resultado obtido por uma medição próxima à embarcação, estabelecida como referência. Possíveis razões para esse fato podem estar associadas ao campo próximo. Ainda assim, os métodos MA, JEN e Traceo alcançaram os resultados mais precisos. O método AW, que durante o experimento no mesmo ambiente utilizando sinais LFM apresentou o resultado mais preciso, foi, no entanto, o que apresentou o maior erro neste experimento com ruído de embarcação.

5.4 Dados da Raia Acústica

Nesta seção, serão analisadas duas corridas de navios. Em cada corrida, o SPL foi registrado para dh variando de 100 a 500 m com intervalos de 50 m, e as diferenças entre o SPL estimado pela Eq. 4.5 e o SPL medido no PMA foram calculadas. Adicionalmente, esses desvios foram investigados na faixa de frequências de 10 Hz a 10 kHz. Os dados acústicos foram gravados com a frequência de amostragem $f_s = 48$ kHz e analisados em trechos de 1 segundo.

Os desvios entre os SPLs medidos e estimados, em relação ao PMA, utilizando os dados experimentais da corrida 1 (vide Tabela 4.9), são apresentados na Fig. 5.18, para a faixa de frequências de 10 Hz a 10 kHz, com relação à distância. As curvas mostram que os erros médios absolutos aumentam proporcionalmente à distância. Os métodos de correção SCA, AW, JEN, Traceo e MA apresentam os resultados mais precisos, variando de cerca de 2 dB a 100 m para 6 dB a 500 m de distância. Em contrapartida, os métodos de correção ESF e PY exibem um aumento mais acentuado no erro, começando em cerca de 2 dB a 100 m de distância e atingindo aproximadamente 12 dB a 500 m de distância.

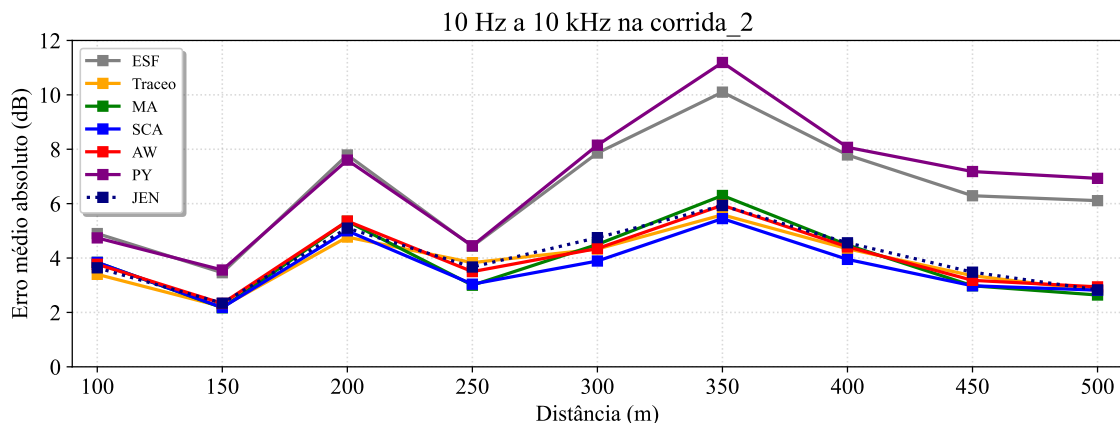
Figura 5.18: Corrida 1. Curvas do erro médio absoluto em função da distância.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sobre a segunda corrida, conforme mostra a Fig. 5.19 os erros médios absolutos apresentam variações proporcionais à distância, em torno de aproximadamente 6 dB para os métodos de correção ESF e PY, e de cerca de 4 dB para os métodos SCA, AW, JEN, Traceo e MA que novamente apresentam os resultados mais precisos.

Figura 5.19: Corrida 2. Curvas do erro médio absoluto em função da distância.

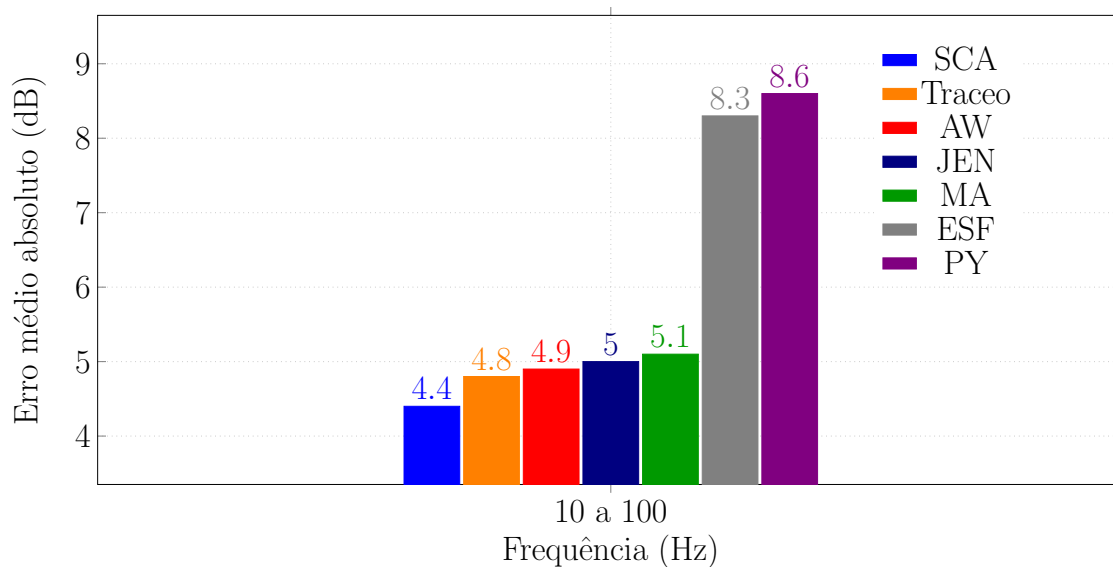


Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas de erro médio absoluto em função da distância obtidas com os métodos de correção apresentaram comportamento semelhante para os dados experimentais coletados em ambas as corridas, nas quais os métodos ESF e PY apresentaram os maiores erros. Os resultados médios calculados nos nove pontos de cada uma das duas corridas são apresentados na Fig. 5.20 para banda estreita. Os resultados mais precisos, nas faixas analisadas, foram obtidos com os métodos de correção SCA, Traceo, AW, JEN e MA, com diferenças inferiores a 1 dB.

Esses resultados revelaram as principais limitações ao utilizar os métodos de correção PY e ESF. Verificou-se que o erro calculado pela estimativa ESF apresenta a tendência em aumentar proporcionalmente à distância entre o navio e o receptor, possivelmente devido ao incremento das interações com a superfície e o fundo. Além disso, o desempenho do método de correção ESF foi mais afetado em frequências acima de 1.000 Hz. No entanto, o método ESF mostrou-se mais preciso do que o método PY. Uma possível explicação para o desempenho inferior do método PY está relacionada ao coeficiente de reflexão no fundo e a sua dependência com o ângulo de transmissão definido na Equação 3.5. Nessa equação, a principal limitação para encontrar o ângulo $\theta_t(n)$ é garantir que o valor absoluto da expressão $\sin(\theta_d)c_b/c_0$ esteja dentro do intervalo $[-1, 1]$. Isso impõe restrições principalmente no valor do ângulo θ_d uma vez que a razão c_b/c_0 geralmente é maior que 1.

Figura 5.20: Erro médio absoluto considerando as duas corridas.

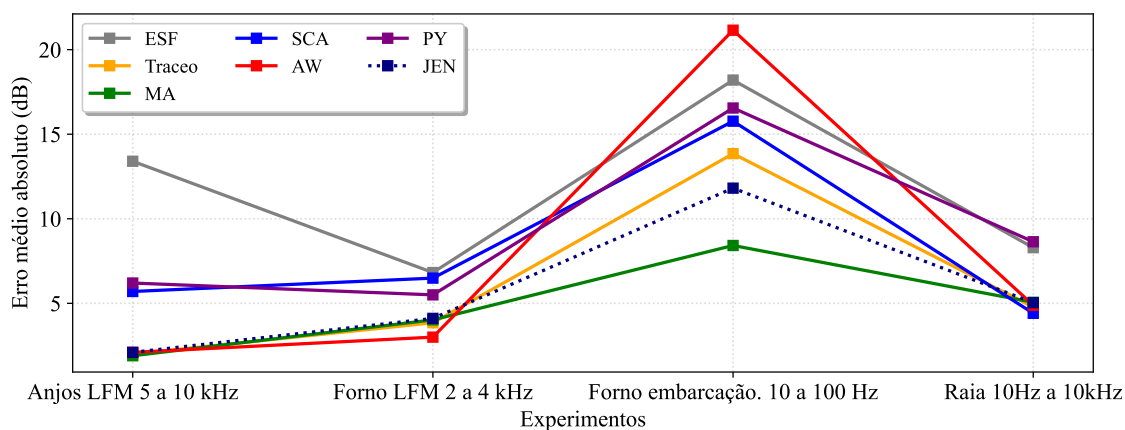


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Desempenho dos métodos de correção nos experimentos

O erro médio absoluto para cada experimento é apresentado na Fig. 5.21. A análise desta figura pode ajudar a identificar comportamentos recorrentes dos métodos de correção. Além disso, ao comparar a média geral de cada método em diferentes ambientes, é possível determinar quais ambientes apresentaram maiores desafios e quais métodos foram mais eficazes em lidar com a variedade das condições de medição.

Figura 5.21: Desempenho dos métodos de correção nos experimentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, os resultados indicam que o método de correção empírico

de Meyer & Audoly (MA) apresentou o melhor desempenho, seguido de perto pelo método das imagens modificado (JEN) e pela modelagem de banda larga com o Traco. O método das imagens de Ainslie & Wood (AW) demonstrou os resultados mais precisos durante a aplicação de sinais LFM na Enseada do Forno; entretanto, nesse mesmo ambiente, apresentou o maior erro no experimento com ruído de embarcação. Neste experimento, os resultados estimados pelos métodos de correção se distanciaram significativamente do resultado de referência, possivelmente devido aos efeitos do campo próximo.

Os resultados mais precisos do método empírico do ângulo crítico do fundo do mar (SCA) foram obtidos na Raia Acústica; porém, nos experimentos com sinais LFM, os resultados apresentaram menor precisão. O método de perda na propagação esférica (ESF) teve um desempenho inferior nos experimentos, pois desconsidera a frequência e as interações nas fronteiras. Por fim, o método das imagens de Pang *et al.* (PY) também apresentou um desempenho inferior, provavelmente devido à limitação na expressão do coeficiente de reflexão no fundo.

Capítulo 6

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A presente dissertação apresentou uma comparação e análise de desempenho entre diferentes metodologias para correção das interferências do ruído irradiado em um ambiente de águas rasas. Assim, foram implementados métodos que utilizam soluções analíticas e métodos empíricos de correção disponíveis na literatura. Adicionalmente, um modelo de propagação acústica TRACEO foi empregado como método adicional para cálculo das correções. Além disso, o método das imagens foi aperfeiçoado por meio da inclusão da reflexão da onda em um fundo elástico e atenuação na água com base no modelo simplificado de Thorp. Os métodos de correção foram avaliados utilizando um ambiente simulado para proceder uma avaliação preliminar. Posteriormente, os mesmos métodos foram validados utilizando dados coletados em um experimento estático na Enseada dos Anjos, dados coletados em experimento com uma embarcação e conjunto de fonte acústica e hidrofone realizado na Enseada do Forno e, por fim, com dados coletados na Raia Acústica do CASOP cedidos para este trabalho.

Inicialmente, os métodos de correção foram avaliados em um ambiente simulado com variações nos parâmetros geométricos e de fundo. Os resultados exibem as limitações do método de perda na propagação esférica (ESF) por realizar o cálculo de perda sem levar em conta as interações nas fronteiras e as diferentes componentes de frequência. Os resultados dos métodos de correção foram comparados com o decaimento geométrico esférico, mostrando um aumento nas diferenças, diretamente proporcional à distância, exceto para o método das imagens de Pang *et al.* (PY), mesmo ao modificar os parâmetros do fundo.

Em seguida, foi realizada a validação com dados experimentais coletados na Enseada dos Anjos, por meio da transmissão e recepção de sinais de banda larga utilizando o projetor e o receptor em estado estático. Os resultados demonstram que os métodos Meyer & Audoly (MA) e Traceo apresentaram uma melhoria na

acurácia superior a 10 dB quando comparados com o método ESF. Isso pode ser explicado pelo campo de interferências produzido devido à alta frequência utilizada e à geometria envolvida. Assim, o comprimento de onda do sinal transmitido era muito menor do que a profundidade da fonte, e além disso, a distância entre a fonte e o receptor era significativamente maior do que a profundidade do local, o que proporcionou sucessivas interações do som com o fundo.

Logo após, os dados experimentais foram coletados na Enseada do Forno, por meio de transmissões e recepções em distâncias variáveis com a fonte sendo rebocada por uma embarcação. Dentro desse contexto, a função de espalhamento Doppler foi empregada para verificar o movimento relativo entre a embarcação e o receptor. Esse movimento gera um ambiente de incertezas na geometria, o que se mostra adequado para a avaliação do desempenho dos métodos de correção durante a medição. Assim sendo, os resultados indicam um melhor desempenho para o método das imagens de Ainslie & Wood (AW) com erro médio absoluto (MAE) de 3 dB e Traceo com MAE de 3,9 dB, provavelmente devido à faixa de frequência correspondente à região de oscilações da perda na transmissão (TL) e à inclusão dos perfis de velocidade do som nos parâmetros de entrada. Por outro lado, foi observado um MAE de 6,5 dB para o método do ângulo crítico do fundo do mar (SCA). Uma possível razão para isso é que, em distâncias mais longas, o método SCA passa a considerar o espalhamento cilíndrico, fazendo com que a estimativa de TL se torne inferior à aquela obtida com as demais abordagens. Quanto ao ruído da embarcação, na faixa de frequências que concentra o ruído do motor, entre 10 e 100 Hz, os resultados indicaram uma melhoria de 6,2 dB no desempenho do método das imagens modificado (JEN) e de 9,6 dB do método MA em relação à abordagem ESF.

Por fim, foram utilizados dados fornecidos pelo CASOP, provenientes de duas corridas de um navio, nas quais o ponto de maior aproximação foi estabelecido como referência e o nível da fonte (SL) do navio foi considerado constante durante a corrida. Os resultados médios demonstraram uma melhoria de mais de 3 dB para as abordagens SCA, Traceo, AW, JEN e MA em relação à abordagem ESF. Os resultados indicaram, ainda, que a geometria de medição favoreceu a estimativa de TL dos métodos de correção, principalmente devido à maior profundidade local.

No geral, os resultados indicam que a transmissão de sinais durante a corrida pode contribuir para caracterizar o canal e avaliar a influência do guia de ondas no sinal recebido. Esses dados adicionais podem fornecer esclarecimentos complementares e aprimorar a medição do ruído irradiado por embarcações.

Como trabalhos futuros se sugere utilizar modelo de propagação acústica baseado na teoria de modos normais para realizar as correções, bem como utilizar fontes capazes de operar em frequências mais baixas.

Referências Bibliográficas

ABRAHAM, D. A. **Underwater Acoustic Signal Processing: Modeling, Detection, and Estimation**. [S.l.]: Springer, 2019.

AINSLIE, M. A. **Principles of sonar performance modelling**. Berlin: Springer, 2010. v. 707.

AINSLIE, M. A.; HALVORSEN, M. B.; ROBINSON, S. P. A terminology standard for underwater acoustics and the benefits of international standardization. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, IEEE, v. 47, n. 1, p. 179–200, 2021.

AINSLIE, M. A. *et al.* International harmonization of procedures for measuring and analyzing of vessel underwater radiated noise. **Marine Pollution Bulletin**, Elsevier, v. 174, p. 113124, 2022.

AINSLIE, M. A.; WOOD, M. A. Semi-coherent image method to estimate propagation loss in shallow water for measuring surface vessel source level. In: AIP PUBLISHING. **Proceedings of Meetings on Acoustics**. [S.l.], 2022.

ARAGÃO, R. J. C. de. Emprego de sistemas marítimos não tripulados (mus) na guerra antissubmarina. **Revista Passadiço**, v. 32, n. 39, p. 36–36, 2019.

ARAGÃO, R. J. C. de. O emprego do sistema sonar fotoacústico aerotransportado (pass) na guerra antissubmarino. **Revista Passadiço**, v. 34, n. 41, p. 50–50, 2021.

AUDOLY, C.; MEYER, V. Measurement of radiated noise from surface ships-influence of the sea surface reflection coefficient on the lloyd's mirror effect. **Acoustics 2017 Perth: Sound, Science and Society**, Australian Acoustical Society, 2017.

AUDOLY, C.; RIZZUTO, E. Ship underwater radiated noise patterns. **AQUO European Collaborative., Project, Deliverable D**, v. 2, 2015.

BELLO, P. Characterization of randomly time-variant linear channels. **IEEE transactions on Communications Systems**, IEEE, v. 11, n. 4, p. 360–393, 1963.

BERTSCHNEIDER, H. *et al.* Specialist committee on hydrodynamic noise. **Final report and recommendations to the 27th ITTC. Copenhagen, Sweden**, v. 45, 2014.

BOAYUE, A. **Characterization of Underwater Acoustic Communication Channels: Statistical Characteristics of the Underwater Multipath Channels**. Dissertação (Mestrado) — Institutt for elektronikk og telekommunikasjon, 2013.

BREKHOVSKIKH, L. **Waves in layered media**. [S.l.]: Elsevier, 2012. v. 16.

CARDOSO, S. V. **Sistema digital de telefonia acústica submarina**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

COMMISSION, I. E. *et al.* Iec 61260-1: 2014 electroacoustics—octave-band and fractional-octave-band filters—part 1: Specifications. **IEC: London, UK**, p. 88, 2014.

COWARD, S. **A method for remote sensing of acoustic ship noise**. Dissertação (Mestrado) — Institutt for elektronikk og telekommunikasjon, 2013.

CRUZ, E. *et al.* Study on inventory of existing policy, research and impacts of continuous underwater noise in europe. In: **EMSA report EMSA/NEG/21/2020**. Europe: WavEC Offshore Renewables and Maritime Research Institute, 2021.

DANIEL, R. R. The science and applications of acoustics. **CUNY Graduate Center and School of Architecture, Urban Design and Landscape Design The City College of the City University of New York (E-Books)**, download, v. 2, p. 2008, 2006.

DEAVENPORT, R. L.; GILCHREST, M. J.; THOMSON, D. J. Acoustic modelling of a transient source in shallow water. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 150, p. 227–235, 2019.

DUROFCHALK, N. C.; SABRA, K. G. Analysis of the ray-based blind deconvolution algorithm for shipping sources. **The Journal of the Acoustical Society of America**, AIP Publishing, v. 147, n. 3, p. 1927–1938, 2020.

ERBE, C. *et al.* The effects of ship noise on marine mammals—a review. **Frontiers in Marine Science**, Frontiers, v. 6, p. 606, 2019.

ETTER, P. C. **Underwater acoustic modeling and simulation**. Boca Raton, London, New York: CRC press, 2018.

EXELIS. **Mass Loaded Piston Transducer Model 610E**. 2645 South 300 West, Salt Lake City, UT 84115, U.S.A., 2011.

Google Maps. **Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, BR**. 2024. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.9925148,-42.0222381,12.75z?entry=ttu>>. Acessado em: 19 de fevereiro de 2024.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of physics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

HARRISON, L. A. A. **Introduction to Synthetic Aperture Radar Using Python and MATLAB®**. [S.l.]: Artech House, 2022.

HEINZEL, G.; RÜDIGER, A.; SCHILLING, R. Spectrum and spectral density estimation by the discrete fourier transform (dft), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows. **Teilinstitut Hannover, Albert-Einstein-Institut**, 2002.

HODGES, R. P. **Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar**. UK: John Wiley & Sons, 2011.

HOWARD, C. Q.; CAZZOLATO, B. S. **Acoustic Analyses using MATLAB® and ANSYS®**. [S.l.]: CRC press, 2014.

IEAPM. **Conheça a importância da comunicação acústica submarina**. 2024. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/ieapm>>. Accessed: 2024-07-21.

International Organization for Standardization. **ISO 17208-1:2016: Underwater acoustics—Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships—Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes**. Geneva, Switzerland: [s.n.], 2016. Available at: <<https://www.iso.org/standard/62408.html>>.

JACOBSEN, F. *et al.* **Fundamentals of acoustics and noise control**. [S.l.]: Note, 2011.

JENSEN, F. B. *et al.* **Computational ocean acoustics**. New York, NY: Springer, 2011.

KATSNELSON, B.; PETNIKOV, V.; LYNCH, J. **Fundamentals of shallow water acoustics**. [S.l.]: Springer, 2012. v. 1.

KINSLER, L. E. *et al.* **Fundamentals of acoustics**. USA: John wiley & sons, 2000.

KÜSEL, E. T.; SIDERIUS, M. Comparison of propagation models for the characterization of sound pressure fields. **IEEE Journal of oceanic engineering**, IEEE, v. 44, n. 3, p. 598–610, 2019.

LARA, G. *et al.* New insights into the design and application of a passive acoustic monitoring system for the assessment of the good environmental status in spanish marine waters. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 18, p. 5353, 2020.

LEAPER, R.; RENILSON, M.; RYAN, C. Reducing underwater noise from large commercial ships: current status and future directions. **Journal of Ocean Technology**, v. 9, n. 1, 2014.

LIEFVENDAHL, M.; FEYMARK, A.; BENSOW, R. Methodology for noise source modelling and its application to baltic sea shipping. In: **Deliverable D4. 1 of the BONUS SHEBA project, Technical Report**. Gothenburg, Sweden 2015: Chalmers, 2015. p. 161.

LINFIELD, R. F.; HUBBARD, R.; PRATT, L. **Transmission channel characterization by impulse response measurements**. [S.l.]: US Department of Commerce, Office of Telecommunications, [Institute for . . . , 1976. v. 76.

LUBELL. **Lubell Labs LL916, LL916H, and LL916C Pistonic Piezoelectric Underwater Speakers**. 2024. Disponível em: <<https://www.lubell.com/LL916.html>>. Acessado em: 19 de fevereiro de 2024.

MACGILLIVRAY, A. O. *et al.* Measuring vessel underwater radiated noise in shallow water. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 153, n. 3, p. 1506–1524, 2023.

MEYER, V.; AUDOLY, C. Accounting for sea floor properties in the assessment of underwater noise radiated from ships in shallow water. In: ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA. **Proceedings of Meetings on Acoustics ICUA**. [S.l.], 2020. v. 40, p. 070007.

NASCIMENTO, R. **Corveta Tamandaré Emgepron**. 2019. Disponível em: <<https://www.deviantart.com/nascimenttobr/art/Corveta-Tamandare-Emgepron-787085488>>. Acessado em: 18 de maio de 2024.

NORTON, M. P.; KARZUB, D. G. **Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers**. [S.l.]: Cambridge university press, 2003.

OPPENHEIM, A. V. **Sinais e sistemas**. [S.l.]: Prentice-Hall, 2010.

- PANG, Y. *et al.* Propagation loss analysis using ship radiated noise in shallow water. In: AIP PUBLISHING. **Proceedings of Meetings on Acoustics**. [S.l.], 2020.
- PENG, Z.; FAN, J.; WANG, B. Analysis and modelling on radiated noise of a typical fishing boat measured in shallow water inspired by aquo project's model. **Archives of Acoustics**, Polska Akademia Nauk. Czytelnia Czasopism PAN, v. 43, n. 2, p. 263–273, 2018.
- PIERCE, A. D. **Acoustics: an introduction to its physical principles and applications**. [S.l.]: Springer, 2019.
- RAPPAPORT, T. S. Comunicações sem fio. **Princípios e Práticas**, v. 2, 2009.
- RODRÍGUEZ, O. **Fundamentos de acústica submarina**. [S.l.]: Universidade do Algarve Editora, 2021.
- RODRÍGUEZ, O. C. The trace & traceo ray tracing programs. **SiPLAB Web page: www.siplab.fct.ualg.pt/models.shtml**, Citeseer, 2008.
- RODRÍGUEZ, O. C. The traceo ray tracing program. **Universidade do Algarve-Signal Processing Laboratory**, 2010.
- ROSS, D. Mechanics of underwater noise. (**No Title**), 1979.
- SOZER, E. M. **Underwater Acoustics: A Brief Introduction**. [S.l.], 2006.
- TONG, J. *et al.* Target tracking using acoustic signatures of light-weight aircraft propeller noise. In: IEEE. **2013 IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing**. [S.l.], 2013. p. 20–24.
- TRAMUJAS, R. **Projeto de um sistema acústico de baixo custo para a medição de ruídos irradiados por navios e submarinos**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- TURIN, G. An introduction to matched filters. **IRE transactions on Information theory**, IEEE, v. 6, n. 3, p. 311–329, 1960.
- URICK, R. J. **Principles of Underwater Sound**. 3. ed. USA: McGraw-Hill Book Company, 1983.
- WALREE, P. A. V. Propagation and scattering effects in underwater acoustic communication channels. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, IEEE, v. 38, n. 4, p. 614–631, 2013.

WALREE, P. A. V.; JENSERUD, T.; SMEDSRUD, M. A discrete-time channel simulator driven by measured scattering functions. **IEEE journal on selected areas in communications**, IEEE, v. 26, n. 9, p. 1628–1637, 2008.

WELCH, P. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. **IEEE Transactions on audio and electroacoustics**, IEEE, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967.

WILSON, J. K.; RICE, J. A. **Maritime surveillance using a wideband hydrophone**. Tese (Doutorado) — Naval Postgraduate School, 2007.

XAVIER, F. C. **Um estudo sobre o uso de interferometria acústica aplicada à caracterização do ruído de banda larga de navios**. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

Apêndice A

Características dos hidrofones

A.1 ITC 8073

Special Purpose Preamplified Hydrophone

(Model Number ITC-8073)

The ITC-8073 is a toroidal beam hydrophone featuring a voltage preamplifier encapsulated in polyurethane. The supply voltage is +12 Vdc with 11mA current.

Specifications

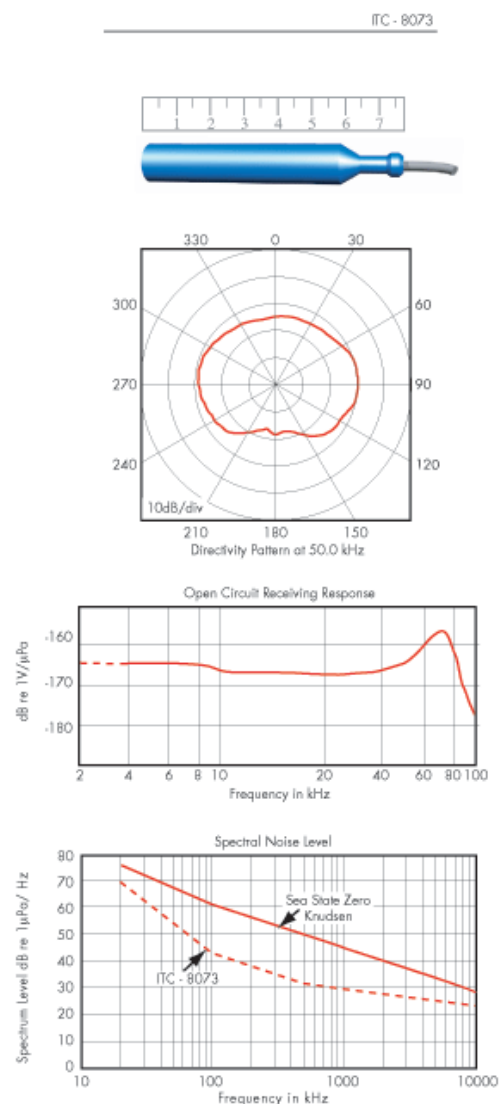
Type	Hydrophone w/ Preamplifier	-
Resonance Frequency	55	kHz
Depth	1100	meters
Envelope Dimensions	1.62D x 7.75L	inches
Midband OCV	-167	db/1V/ μ Pa
Suggested Band	.005 - 70	kHz
Beam Width	90	deg -3dB at fr
Beam Type	Spherical	-

This product's specifications are for illustrative purposes only.

Displayed specifications are typical at 22°C and are subject to change without notice.

Download PDF file from [here](#).

Contact ITC about this product



A.2 GeoSpectrum M36



GeoSpectrum Technologies Inc.
Customizing Detection

M36-100

The M36-100 is a wide-band omni-directional hydrophone designed for marine observation. It comes with a pre-amplified output of 0 to 35 dB (selectable on order) with current or voltage signalling.



Characteristics	
Nominal Voltage Sensitivity (without preamp)	-200 dBV re 1 μ Pa @ 20°C
Size	7.8" length, 1.3" max OD
Depth Rating	2500 m
Storage and Operating Temperatures	-40 to +70°C
Acceleration Sensitivity	<1.5 mbar/g, in air, any axis
Labelling	Calibration parameters, serial number, date
Connector	MCBH-8M
Pre-Amplifier	
Preamp signalling	Current, single ended voltage or, differential voltage (selectable on order)
Gain	0 – 35 dB (selectable on order)
Input Voltage	6.8 VDC nominal 4.5 – 30 VDC operating range
Band Pass	5 Hz HPF, no LPF installed (unless otherwise specified)
IRN	<140 nV/ \sqrt Hz @10 Hz <4 nV/ \sqrt Hz @1 kHz
Current Draw	1.3 mA (at 6.8 VDC) 4.2 mA with current signalling preamp

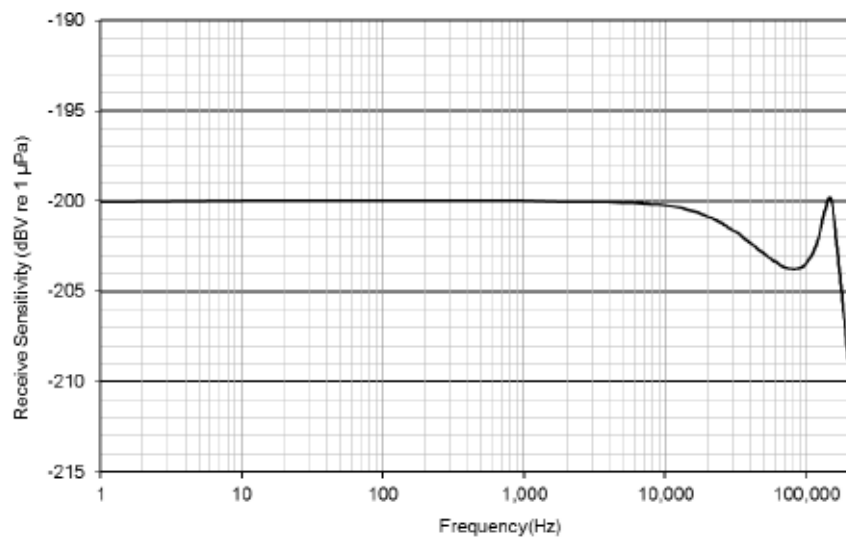
ADDRESS:
10 Akerley Blvd., Unit 19
Dartmouth, NS
Canada B3B 1J4

M36-100-07-18-v4

Phone: 902.406.4111
Fax: 902.435.8987
website: www.geospectrum.ca
e-mail: sales@geospectrum.ca



GeoSpectrum Technologies Inc.
Customizing Detection



M36 Frequency Response (without preamp)

ADDRESS:
10 Akersley Blvd., Unit 19
Dartmouth, NS
Canada B3B 1J4

M36-100-07-18-r4

Phone: 902.406.4111
Fax: 902.435.8987
website: www.geospectrum.ca
e-mail: sales@geospectrum.ca

Apêndice B

Características projetores acústicos

B.1 EDO 610E

ITT **EXELIS**

Mass Loaded
Piston Transducer

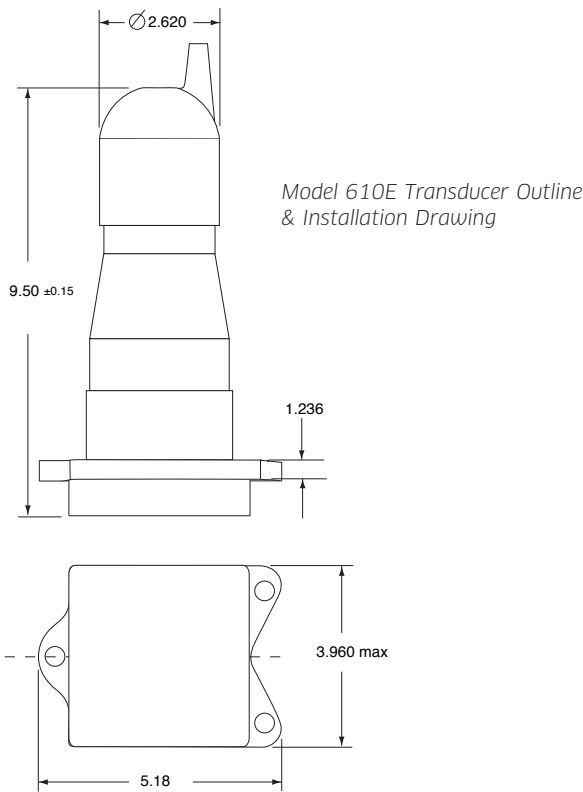
Model 610E



Mass Loaded Piston Transducer Model 610E

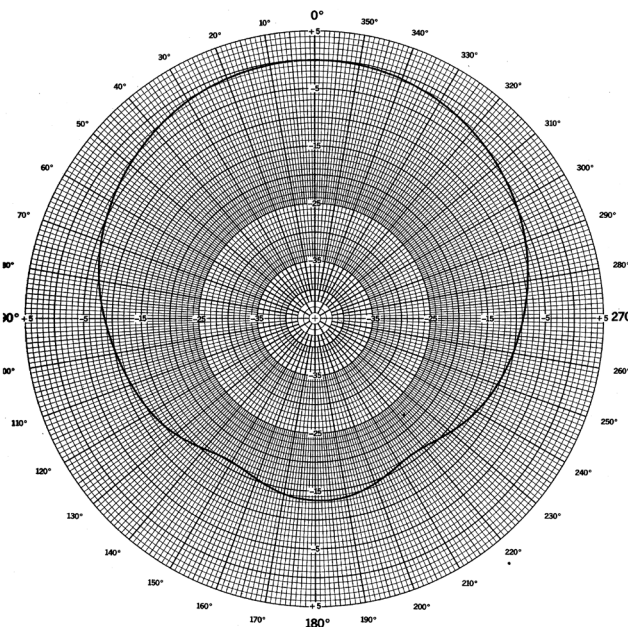
The Model 610E is the current version of the 7kHz mass-loaded piston transducer used in ITT Exelis' international hull mounted anti-submarine warfare (ASW) surface ship sonar.

The Model 610 transducer has been manufactured since 1982. This sonar and transducer is in service with the Italian and Brazilian navies, and has a well established record of highly reliable and effective performance. Model 610E manufacture is highly relevant to the TR-343 due to design and process similarities.



MODEL 610E SINGLE TRANSDUCER CHARACTERISTICS

Parameter	Nominal Value
Transducer Type	Individually Housed Tonpizl Element
Front Mass	Neoprene Booted Aluminum
Rear Mass	Epoxy Dip Coated Mild Steel (P/O Housing)
Cable Assembly	Neoprene Jacketed Vulcanized Boot
Cable Length	28 Feet ± 1 Foot
Front/Rear Mass Seal	Double CRES Bands (with epoxy adhesive)
Ceramic Stack	Modified US Navy Type III
Frequency of Operation	5-9 kHz Nominal (3-11 Extended Range)
Beam Pattern Type	Conical (Half Wave Resonator)
Beam Width @ 6.5 kHz	90 Degrees at -3 dB Points (Two Theta)
Back Response @ 6.5 kHz	Minus 15 dB re Main Lobe
Typical TR/Volt @ 6.5 kHz	136.0 dB re 1 uPa @ One Meter
Typical TR/Watt @ 6.5 kHz	175.0 dB re 1 uPa @ One Meter
Typical Impedance @ 6.5 kHz	7,600 Ohms
Typical Phase Angle @ 6.5 kHz	-13 degrees
Typical Efficiency @ 6.5 kHz	-2.2 dB (60 Percent)
Typical FFVS @ 6.5 kHz	-157.0 dB re 1V9olt/uPa
Dimensions	See Outline & Installation Drawing
Maximum Operating Depth	2,000 Feet (~1,000 PSI)
Maximum Power Input	~200 Watts (Application Dependent)
Maximum Duty Cycle	~10% (Application Dependent)



Model 610E Transducer Beam Pattern
Frequency 6.5 kHz

Exelis Inc.
2645 South 300 West
Salt Lake City, UT 84115
U.S.A.
Ph #: 801 486 7481
Email
as-slc.marketing@exelisinc.com

www.exelisinc.com

ITT EXELIS

Exelis is a trademark of Exelis Inc.
ITT is a trademark of ITT Manufacturing Enterprises, Inc., and is used under license.

Copyright © 2011 Exelis Inc.
BD788, Approved for Public Release
Copyright, ITT Exelis 2011



Cleared for open publication #04-S-1245

Specifications subject to change without notice. Revised Oct. 2010

B.2 Lubell 916C

Portable Acoustic Source Unit

The acoustic emission system is composed of various components (figure 7a): A portable computer where the acoustic signals are stored and sent using the onboard sound card; An audio amplifier; An impedance adapter for the Lubell LL916C underwater loudspeaker. The frequency response of the LL916C can be seen in figure 8 with a frequency range from 200Hz to 21kHz.

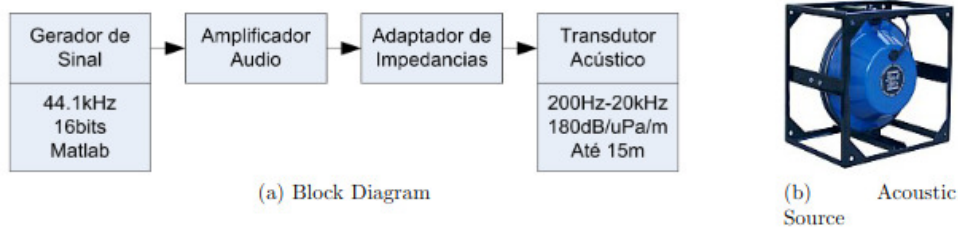


Figure 7: Emission System

Item	Description
Power Supply	25,9 V Li-Ion Battery or external 12V power supply
Autonomy	7 hours with battery/infinite when external power supply connected
Maximum Safe Output Voltage	20 Vrms
Maximum Input Voltage (MIC/AUX)	400 mVrms / 500 mVrms
Frequency Response	200Hz - 21KHz (-3dB)
Total Weight of Case	10kg
Box Dimension	45.9 x 32.7 x 17.1 (cm)
Acoustic Source Unit	Lubell LL916C
Max SPL Output Level	180dB re 1uPa @1m, 1kHz, 20 Vrms

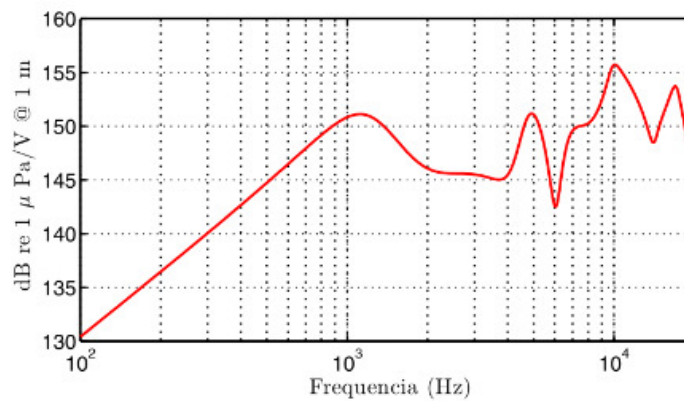


Figure 8: Lubell LL916C Frequency Response