



ESTIMATIVA DO ESTADO DO MAR POR INTERAÇÕES PASSIVAS COM O
RUÍDO AMBIENTE GERADAS PELO VENTO ASSOCIADA COM A ESCALA
DE VENTO BEAUFORT EM ÁGUAS RASAS

Diogo de Souza Taranto

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

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Marcos Nicolás Gallo

Rio de Janeiro
Junho de 2021

ESTIMATIVA DO ESTADO DO MAR POR INTERAÇÕES PASSIVAS COM O
RÚIDO AMBIENTE GERADAS PELO VENTO ASSOCIADA COM A ESCALA
DE VENTO BEAUFORT EM ÁGUAS RASAS

Diogo de Souza Taranto

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

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Marcos Nicolás Gallo

Aprovada por: Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Prof. Marcos Nicolás Gallo
Prof. Lussac Prestes Maia
Prof. Fábio Contrera Xavier

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JUNHO DE 2021

Taranto, Diogo de Souza

Estimativa do estado do mar por interações passivas com o ruído ambiente geradas pelo vento associada com a escala de vento Beaufort em águas rasas/Diogo de Souza Taranto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XIII, 71 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Marcos Nicolás Gallo

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

Referências Bibliográficas: p. 63 – 67.

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

Ele perguntou: "Por que vocês estão com tanto medo, homens de pequena fé?" Então ele se levantou e repreendeu os ventos e o mar, e fez-se completa bonança. Os homens ficaram perplexos e perguntaram: "Quem é este que até os ventos e o mar lhe obedecem?" Mateus 8:26 a 27.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que me concedeu o dom da vida e permitiu chegar até aqui. Agradeço a minha família, minha esposa Daiana pelo apoio incondicional em todos os momentos, as palavras seguras e a confiança passada neste momento, aos meus filhos Davi e Júlia a alegria do meu viver. Aos meus pais pelas orações nos momentos difíceis de toda a minha formação acadêmica.

Ao meu orientador professor Carlos Eduardo Parente que me conduziu com passos seguros nesta caminhada e sempre acreditou no projeto. Ao meu grande amigo Diego Gimenez que já havia velejado por essas águas e traçou uma derrota segura, contribuindo para uma boa navegação durante o período do curso.

À Marinha do Brasil que abriu essa oportunidade de realizar o curso e deu todas as condições para fazê-lo. Ao Eng. Orlando que contribuiu com sua capacidade técnica, e notável conhecimento em calibração de hidrofones. Ao Laboratório de Instrumentação Oceanográfica - LIOc pela ajuda no projeto, ao técnico Assis e a sua oficina pela dedicação na construção do Perfilador Acústico, ao amigo Henrique Pereira e ao seu veleiro Akanni pelos campos realizados. Ao CC(EN) Amilcar, grande companheiro nessa caminhada, pela ajuda no projeto. Ao Centro de Apoio de Sistemas Operativos - CASOP por ter confiado a vaga do curso. Ao Centro Tecnológico da Marinha no Rio de Janeiro que prestou todo o suporte necessário para conclusão do curso.

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

ESTIMATIVA DO ESTADO DO MAR POR INTERAÇÕES PASSIVAS COM O
RUÍDO AMBIENTE GERADAS PELO VENTO ASSOCIADA COM A ESCALA
DE VENTO BEAUFORT EM ÁGUAS RASAS

Diogo de Souza Taranto

Junho/2021

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Marcos Nicolás Gallo

Programa: Engenharia Oceânica

Apresenta-se, nesta dissertação de mestrado, uma técnica de estimativa do estado do mar por interações passivas com o ruído ambiente gerada pelo vento, associada com a escala de vento Beaufort em águas rasas. Constitui-se de uma metodologia usando as curvas propostas por Knudsen, para associar uma determinada banda de frequência captada por um hidrofone que pode auxiliar boias oceanográficas para coleta de dados acerca do estado de mar e velocidade do vento, e também podem auxiliar submarinos que necessitam de informações sobre estado de mar para alimentar seus respectivos sistemas de combate. Os experimentos de campo realizados apresentaram boa correlação com as curvas de Knudsen para médias e altas frequências, possibilitando assim gerar um modelo que atendesse as especificidades da região explorada.

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

ESTIMATION OF THE STATE OF THE SEA BY PASSIVE INTERACTIONS
WITH AMBIENT NOISE GENERATED BY THE WIND ASSOCIATED WITH
THE BEAUFORT WIND SCALE IN SHALLOW WATER

Diogo de Souza Taranto

June/2021

Advisors: Carlos Eduardo Parente Ribeiro
Marcos Nicolás Gallo

Department: Ocean Engineering

This master's dissertation presents a technique for estimating the state of the sea through passive interactions with the ambient noise generated by the wind, associated with the Beaufort wind scale for shallow waters. This study consists of a methodology using the curves proposed by Knudsen, to associate a certain frequency band captured by a hydrophone that can assist oceanographic buoys to collect data about the state of the sea and wind speed, and can also assist submarines that need information about the state of the sea to feed data their respective combat systems. The field experiments performed showed good correlation with the Knudsen curves for medium and high frequencies, which made it possible to generate a model considering the specificities of the explored region.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo Geral	5
1.2 Objetivo Específico	5
2 Referencial Teórico	6
2.1 Natureza das ondas sonoras	6
2.1.1 Compressão e Rarefação	6
2.1.2 Pressão Sonora	8
2.1.3 Intensidade Acústica	12
2.1.4 Intensidade de Referência	13
2.1.5 Nível da Fonte Sonora	13
2.1.6 Perda por Transmissão	14
2.1.6.1 Perda por Divergência	14
2.1.6.2 Perda por Absorção	16
2.2 Ruído ambiente	17
2.2.1 Alguns Tipos de Ruído Ambiente	19
2.2.1.1 Ruído de Tráfego Marítimo	19
2.2.1.2 Ruído Sísmico	19
2.2.1.3 Ruído Biológico	19
2.2.1.4 Ruído Térmico	19
2.2.1.5 Ruído da Chuva	19
2.2.1.6 Ruído do Vento	20
2.3 Ruído próprio	20
2.4 Geração de ondas pelo vento	21
2.4.1 Teorias de Miles e Phillips	22
2.4.2 O Modelo de Pierson-Moskowitz de Mar Completamente Desenvolvido	23

2.4.3	O Espectro JONSWAP	25
2.4.4	Modelo Pierson-Moskowitz versus JONSWAP	27
3	Estado de Mar, Velocidade do Vento e Altura de Ondas	29
3.1	Correlação Vento <i>versus</i> Estado do Mar	29
3.1.1	Introdução	29
3.1.2	Interações passivas com a relação Sinal/Ruído geradas pelo Estado de Mar	30
3.2	Modelagem em Acústica	32
3.2.1	Modelo de Modos Normais	32
3.2.2	Modelo de Raios	33
3.2.3	Modelo Fast Field Program (FFP)	33
3.2.4	Modelo da Equação Parabólica (PE)	34
3.2.5	Modelo dos Elementos Finitos	34
3.3	Modelagem do Ruído Ambiente	35
3.3.1	Modelos de Estado de Mar em Função do Vento	35
3.4	Desenvolvimento de um modelo capaz de estimar altura de ondas	39
3.4.1	O Modelo Escolhido	39
3.4.2	Adequação para o modelo	42
4	Projeto para a Coleta de Dados em Águas Rasas	43
4.1	Perfilador Acústico de Queda Livre	43
4.1.1	Características do Perfilador Acústico de Queda Livre	43
4.2	Metodologia da Coleta dos Dados	48
4.2.1	Condições Iniciais	50
5	Análise dos resultados	54
5.1	Resultado do Experimento de Campo	54
5.1.1	Análise das curvas	54
5.1.2	Frequências até 1000 Hz	55
5.1.3	Frequências de 1000 a 7500 Hz	55
5.2	Comparação com as Curvas de Knudsen	57
5.3	Modelo para Águas Rasas	59
6	Considerações e Trabalhos Futuros	61
6.1	Conclusões	61
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	61
	Referências Bibliográficas	63

A	Considerações matemáticas acerca do Método dos Mínimos Quadrados	68
B	Dados de Referência	70

Lista de Figuras

1.1	Ilustração do experimento de Colladon e Sturm, retirado de [3]. . . .	2
1.2	Curvas de Wenz, retirado de [5].	3
2.1	Compressão e rarefação, adaptado de [4].	7
2.2	Propagação do Som, adaptado de [4].	7
2.3	Frente de onda plana. Fonte: https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica (2020).	8
2.4	Variação da temperatura, salinidade e pressão com a profundidade, respectivamente. Fonte: http://www.dosits.org/ (2020).	10
2.5	Perfil de velocidades para latitudes médias. Fonte: http://www.dosits.org/ (2020).	11
2.6	Velocidade do som ao longo do meridiano 30.50°W. Retirado de [2]. .	12
2.7	Divergência esférica (a) e cilíndrica (b), adaptado de [14].	15
2.8	Absorção do som, salinidade 35 ppt, temperatura 10°C e PH 7.8, adaptado de [18].	16
2.9	Curva de Wenz revitalizada por Brandley, retirado de [19].	18
2.10	Curvas de Knudsen, retirado de [6].	20
2.11	Zona de interação ar-mar, retirado de [5].	21
2.12	O espectro de Pierson-Moskowitz para diferentes velocidades do vento. Retirado de [4].	25
2.13	Evolução do espectro da onda correlacionada com o aumento da intensidade do vento, retirado de [24].	26
2.14	Comparação entre a forma do espectro de frequências dos modelos Pierson-Moskowitz(linha pontilhada) e JONSWAP(linha contínua), retirado de [23].	27
3.1	Exemplos de boias que podem apresentar imprecisões na coleta de dados gerados por diferentes fatores.	31
3.2	Curvas de Estado do Mar gerada a partir dos dados tabelados de Hodges[4].	39
3.3	Polinômios de terceiro e sexto graus para um estado de MAR 3 . . .	40

3.4	Curvas de Knudsen versus Modelo Polinomial	42
4.1	Spherical Transducer D70 [49].	44
4.2	Curva de sensibilidade, retirado de [51]	45
4.3	Protótipo do Perfilador Acústico de Queda Livre	46
4.4	Protótipo do Perfilador Acústico de Queda Livre no LabOceano	46
4.5	Curva de queda livre do Perfilador Acústico. No eixo vertical profundidade e no eixo horizontal tempo.	47
4.6	Curva do Perfilador Acústico em Queda Livre, Estático e Curva de Knudsen[6] para Mar Zero.	48
4.7	Local do experimento de campo realizado em 31 de Janeiro de 2021, figura adaptada do Google Maps.	49
4.8	Imagem ilustrativa da realização do experimento de campo.	50
4.9	Temperatura da superfície da água, sensor 1, da Boia RJ-3 durante campo em 31-01-2021. Fonte : http://www.simcosta.furg.br/home/ (2021).	51
4.10	Temperatura da superfície da água, sensor 2, da Boia RJ-3 durante campo em 31-01-2021. Fonte : http://www.simcosta.furg.br/home/ (2021).	51
4.11	Salinidade da água Boia RJ-3 durante campo em 31-01-2021. Fonte : http://www.simcosta.furg.br/home/ (2021).	52
4.12	Dados de vento obtidos pela boia RJ3 - SiMCosta para 31-01-2021.	53
5.1	Ruído Ambiente gerado pelo vento durante o experimento de campo realizado no Rio de Janeiro em 31 janeiro de 2021.	54
5.2	Curvas dos ruídos gerados pelos ventos até 1000 Hz.	55
5.3	Curvas dos ruídos gerados pelos ventos de 1000 a 7500 Hz.	56
5.4	Curvas de diferentes frequências correlacionadas com o aumento da velocidade do vento.	57
5.5	Ruído ambiente gerado pelo vento comparação das curvas de Knudsen[6] com os dados coletados.	58
5.6	Ruído ambiente gerado pelo vento para Estado de Mar 1/ 2/ 3 - Modelos para Estado de Mar 1/ 2/ 3.	60

Lista de Tabelas

2.1	Incremento na Temperatura, Profundidade e Salinidade. Adaptado de [4].	9
3.1	Escala de Vento Beufort - Centro de Hidrografia da Marinha	30
3.2	Relação de estado de mar, velocidade do vento e altura significativa de ondas	36
3.3	Nível de ruído gerado pelo vento, adaptado de [4]	38
3.4	Função correspondente para cada Estado de Mar	41
5.1	Coefficiente de correlação entre o modelo das curvas de Knudsen e as curvas obtidas com os dados coletados.	58
5.2	Função correspondente para cada Estado de Mar observado	59
B.1	Nível de ruído gerado pelo vento, adaptado de [4]	71

Capítulo 1

Introdução

Dos tempos mais remotos, a datar do início da história da humanidade e sua necessidade de organizar-se em sociedade, o mar representava um obstáculo a ser vencido. Controlar as linhas de comércio marítimo representava superioridade em transações comerciais, e em consequência, suscitava um poder naval que o acompanhasse, a fim de garantir seus objetivos comerciais [1].

Estudar o mar das suas diversas formas e aplicações foi o que desafiou, e desafia o ser humano há séculos, bem como a tentativa de compreender a maneira como o som “viajava” na água, e seu comportamento diferente ao da propagação no ar. Esses interesses proporcionaram grandes avanços em diversas áreas da ciência.

Uma das mais antigas narrativas sobre o tema, foi a do cientista e artista Leonardo Da Vinci, em 1490, propondo o que seria o primeiro modelo de sonar passivo. Sua proposição dizia que [2]:

“Se você parar com o seu navio no mar, introduzir a extremidade de um tubo na água e colocar o seu ouvido na outra extremidade do tubo, você ouvirá navios a grande distância de você.”

Posteriormente, em 1826, inspirados por Da Vinci, os cientistas Colladon e Sturm propuseram as primeiras medições da velocidade do som na água, utilizando um longo tubo para ouvir o som debaixo da água e registrando o tempo de viagem do som de um sino submerso no Lago de Genebra, Suíça, conforme ilustra a figura 1 [3].

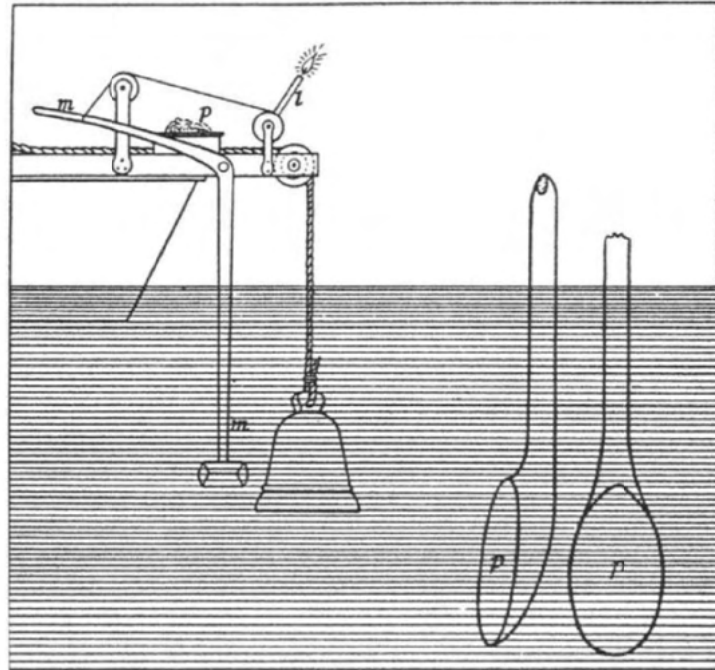


Figura 1.1: Ilustração do experimento de Colladon e Sturm, retirado de [3].

A partir de então, o tema passou a ser objeto de estudo de grandes físicos e matemáticos ao longo dos anos. Um grande avanço nos estudos da acústica ocorreu devido às duas Guerras Mundiais, principalmente em razão do uso das minas submarinas e no emprego de submarinos [3]. Entretanto, antes da Primeira Guerra Mundial, registros de patentes para detecção de icebergs, por meio de ecos de um sinal acústico emitido (sonar ativo), já apontavam resultados práticos para o estudo da acústica [3].

Precocemente, observou-se que o som captado por um hidrofone não era tão somente o som emitido, e que sinais diversos também percorreriam o mesmo caminho do sinal emitido na água. De tal forma, que esses elementos careceriam de estudos próprios. Assim, inseria-se um novo fator ao estudo da acústica submarina, o Ruído Ambiente.

Ruído é uma distribuição aleatória de energia dentro de uma faixa do espectro de frequências, e que geralmente prejudica a detecção do sinal de interesse. No oceano, esse ruído é atribuído à diversas fontes como turbulência, navegação, ação das ondas, agitação térmica, eventos sísmicos, chuva, animais marinhos e lençóis de gelo quebrando [4]. Todos esses eventos geravam sons característicos.

O estudo acerca do ruído ambiente começou a despertar interesse mais relevante durante Segunda Guerra Mundial devido à necessidade de conhecer o ambiente acús-

tico oceanográfico, principalmente portos e costas [5].

Em vista disso, pioneiramente, a Marinha dos Estados Unidos iniciou suas pesquisas em plena Segunda Guerra Mundial. Entretanto, o primeiro estudo, somente foi publicado por Knudsen et al. (1948)[6], e em seguida por Urick e Pryce (1954)[7] no pós-guerra. A pesquisa do tema recebeu grande notoriedade com Wenz (1962)[8].

O trabalho de Wenz (1962)[8] iniciou um renascimento do estudo do ruído ambiente como uma das mais interessantes áreas de pesquisa da oceanografia acústica. A dedicação ao seu trabalho [8], forneceu um espectro gráfico, ou esquemático, dos níveis de ruído omnidirecionais de frequências correspondentes [2], e que até os dias atuais é utilizado como modelo para diversos pesquisadores do tema.

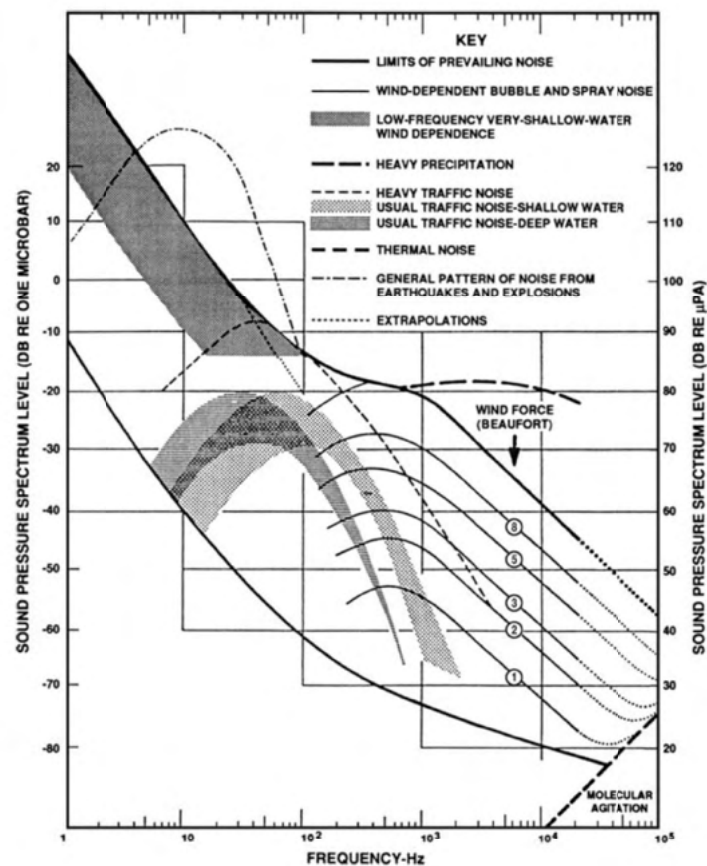


Figura 1.2: Curvas de Wenz, retirado de [5].

A representação gráfica acima, figura 1.2, identificou fontes de ruído ambiente e as consequentes fontes omnidirecionais, com seus respectivos níveis divididos em faixas

de frequências. O Esquema de Wenz identificou regiões dominadas pelos ruídos gerados pelo transporte marítimo, chuva, agitações sísmicas e ruídos térmicos. Já o ruído ambiente associado ao estado de mar foi parametrizado pela força do vento normalizada pela escala Beaufort, isso, medido a uma altura de 10 m, correspondente com a aparência do mar [5].

Nas décadas seguintes, fontes de ruídos transitórios (biológicos, máquinas e perfurações offshore)[5] também ganharam notoriedade. Pesquisadores como Urick (1984) e Walker (1963) trabalharam buscando compreender e divulgar o tema. Nesse propósito, em 1974, ocorreu a conferência “*Workshop on Low Frequency Propagation and Noise*” realizada por Bracket Hersey no Woods Hole Oceanographic Institution em Woods Hole, Massachusetts, U.S.A [5], promovendo o assunto, e abrindo as discussões para temas de pesquisas.

Em 1984, Urick [9] resumiu os principais artigos e textos contendo características do ruído ambiente da época, e publicou em uma literatura considerada por não classificada. Entretanto, afirmou existir uma ampla quantidade de literatura a ser consultada [5]. Nesta revisão, Urick comentou sobre as teorias de geração de som na superfície do mar, e as medidas das características espectrais temporais e espaciais, e ressaltou que os espectros idealizados sugeridos por ele, estavam de acordo com a proposta esquemática de Wenz (1962)[3].

Todavia, caracterizar a superfície do mar, a partir do ruído gerado pelo vento é uma perspectiva recente e que abarca ainda grandes possibilidades, como por exemplo, medir altura de ondas por meio do ruído gerado pelo vento.

Projetos como *Wind Observation Though Ambient Noise* (WOTAN) que determinaram a altura de ondas utilizando hidrofones [10], e o estudo apresentado pela *National Institute of Ocean Technology* da Índia que através de hidrofone na baía de Bengal conseguiram modelar os períodos de verão, inverno e monções apenas com os ruídos gerados pelo vento local [11], ou ainda, uma abordagem do ruído ambiente para uso militar como proposto por Torres e Costa [50], são apenas algumas das diversas possibilidades de pesquisa dessa área.

Um fator preponderante a ser considerado é o aspecto militar [12], o uso de sonares de superfície tornou-se um importante instrumento a ser usado contra submarinos. Em contrapartida, para um submarino distinguir, identificar e avaliar o ruído ambiente em uma área hostil, como por exemplo possuir as informações de estado de mar e altura de ondas, pode representar uma substancial diferença em acertar ou não o alvo, tendo em vista que, ao inserir em seu sistema de combate os dados de estado do mar com certo grau de exatidão, significa aumentar as probabilidades de impacto no lançamento de torpedos.

Assim, o presente trabalho visa analisar o ruído gerado pelo vento na superfície do oceano e suas correlações ao estado do mar para uma determinada região, com

intuito de gerar um modelo geral e específico, associados ao ruído gerado pelo vento e a sua intensidade, a fim de estimar o estado de mar. Para isso, alguns conceitos iniciais serão abordados com o propósito de facilitar o desenvolvimento do conteúdo proposto.

1.1 Objetivo Geral

Investigar as relações entre ruído ambiente gerado pelo vento local e associar ao estado do mar comparado à escala Beaufort de ventos.

1.2 Objetivo Específico

- Definir uma metodologia de análise do ruído ambiente *versus* frequência gerada com base nas curvas de Knudsen, a fim de estimar a altura das ondas.
- Investigar o ruído ambiente gerado pelo vento no litoral do Rio de Janeiro através de um perfilador acústico.
- Comparar os dados obtidos com o perfilador acústico ao das curvas de Knudsen, a fim de aperfeiçoar o método de estimativa de altura de ondas para uma dada região.

Capítulo 2

Referencial Teórico

2.1 Natureza das ondas sonoras

Acústica refere-se ao estudo do som, a saber sua produção, transmissão através de meios sólidos e fluidos, ou qualquer outro fenômeno gerado por sua propagação [13].

2.1.1 Compressão e Rarefação

Segundo Hodges [4] o parâmetro fundamental de uma onda acústica é a pressão, pois, quando moléculas de água ou ar são comprimidos ou separadas, exercem uma força restauradora que tende a resistir ao movimento.

As ondas longitudinais são compostas por compressões, onde as partes estão mais próximas do que o normal, e rarefação onde as partes estão mais distantes [4].

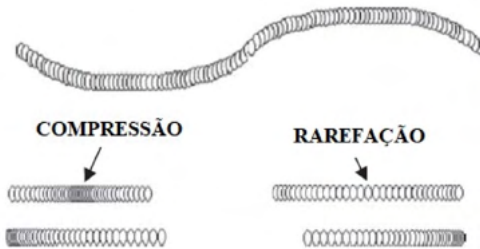


Figura 2.1: Compressão e rarefação, adaptado de [4].

Essa força será no sentido oposto como pressão ou força por unidade de área. A amplitude da onda será o pico de pressão alcançado em um ciclo. E, a perturbação do meio que se propaga é a distância entre moléculas. Esses fundamentos podem ser observados na figura 2.2

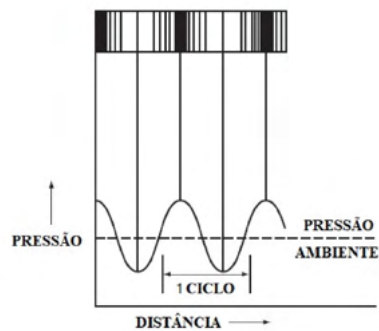


Figura 2.2: Propagação do Som, adaptado de [4].

Quanto a sua classificação, as ondas sonoras são apresentadas como longitudinais quando as partículas do meio se deslocam no mesmo sentido da propagação do som, e transversais, quando as partículas se deslocam perpendicularmente à propagação

do som [4]. Em um meio fluido, as ondas sonoras se propagam longitudinalmente devido ao fato de os fluidos não terem força de cisalhamento [4].

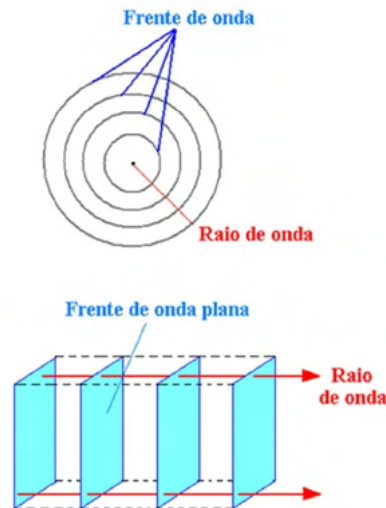


Figura 2.3: Frente de onda plana. Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica> (2020).

2.1.2 Pressão Sonora

De acordo com Waite[14] para que uma onda seja plana, a pressão deve mudar apenas na direção da propagação do som. Assim, a pressão é a mesma em todos os pontos em qualquer plano normal a essa direção. As frentes de onda são os planos normais separados por um comprimento de onda λ , sendo a pressão p nesse ponto máxima.

Para Hodges [4] um meio não dispersivo é aquele em que diferentes comprimentos de onda se propagam na mesma velocidade de fase, como por exemplo água, de tal forma que podemos esperar o mesmo tipo de relação entre o comprimento de onda e a frequência, assim como ocorre nas ondas eletromagnéticas.

De modo que a velocidade de propagação do som c é dada pela equação 2.1.

$$c = \lambda \cdot f \tag{2.1}$$

Onde:

λ = comprimento de onda, é a distância entre os pontos correspondentes em uma onda (pico a pico ou vale a vale); e

f = frequência.

A velocidade de propagação no mar das ondas sonoras é mais lenta quando comparadas às ondas eletromagnéticas próximo à superfície, e é de aproximadamente 1.500 m/s [4].

Uma notação simplificada é a representada pela expressão clássica da equação de Medwin [3][15], equação 2.2.

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

Onde c=velocidade do som (m/s), T=temperatura (°C), S=salinidade (ppm), z=profundidade (m).

Outras representações da velocidade do som, e por vezes não tão simplificada, mas com maior acurácia, também aparecem na literatura como a de Mackenzie [4][16].

Não obstante a equação a ser usada, ainda assim, é pertinente ressaltar a importância dos parâmetros de temperatura, salinidade e profundidade (pressão) para a velocidade do som, que podem ser observadas por meio da tabela 2.1 que foi adaptada de Hodges [4].

Tabela 2.1: Incremento na Temperatura, Profundidade e Salinidade. Adaptado de [4].

Incremento na velocidade alterando Temperatura, Salinidade e Profundidade	
+ 1°C na temperatura	+4.6m/s de incremento na velocidade para 0°C de temperatura +2.5 m/s de incremento na velocidade para 21.1°C de temperatura
+100 m na profundidade	+1.7 m/s de incremento na velocidade
+1 ppt(parte por trilhão)	+1.4 m/s de incremento na velocidade

O perfil da velocidade do som (PVS) está diretamente relacionado à variações de fatores como: temperatura, salinidade e pressão, conforme observa-se nas figuras 2.4 e 2.5, as quais demonstram um perfil típico de variação do som.

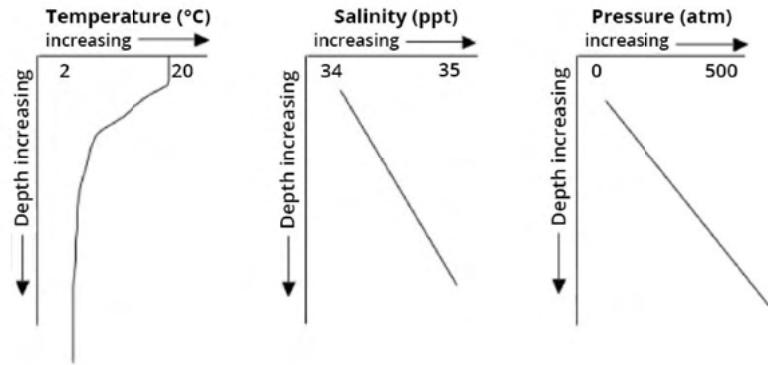


Figura 2.4: Variação da temperatura, salinidade e pressão com a profundidade, respectivamente. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2020).

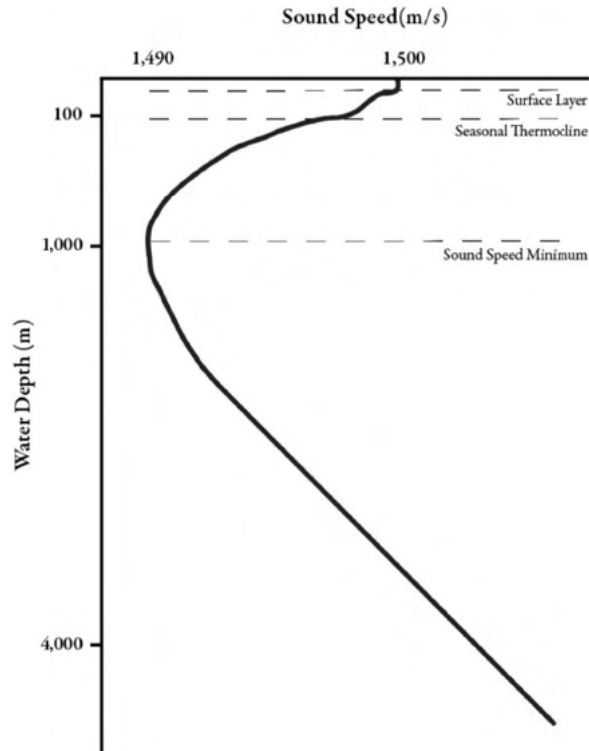


Figura 2.5: Perfil de velocidades para latitudes médias. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2020).

Nas figura 2.4 e 2.5, observando os 1.000 metros iniciais, temos a temperatura decrescendo e ficando aproximadamente constante para profundidades maiores que 1.000 metros. Já atentando para a salinidade, notamos uma baixa variação.

Analisando a curva da velocidade em comparação a curva de temperatura e salinidade, observamos que a velocidade é condicionada, principalmente, pela temperatura até aproximadamente 1.000 metros. Após essa profundidade a temperatura é praticamente constante, e a velocidade do som aumentará influenciada pelo aumento da pressão.

Esta subordinação é melhor observada quando analisamos o perfil mostrado na figura 2.6, a qual apresenta um perfil da velocidade do som que compreende do Atlântico Norte até o Atlântico Sul ao longo do meridiano 30.50°W [2].

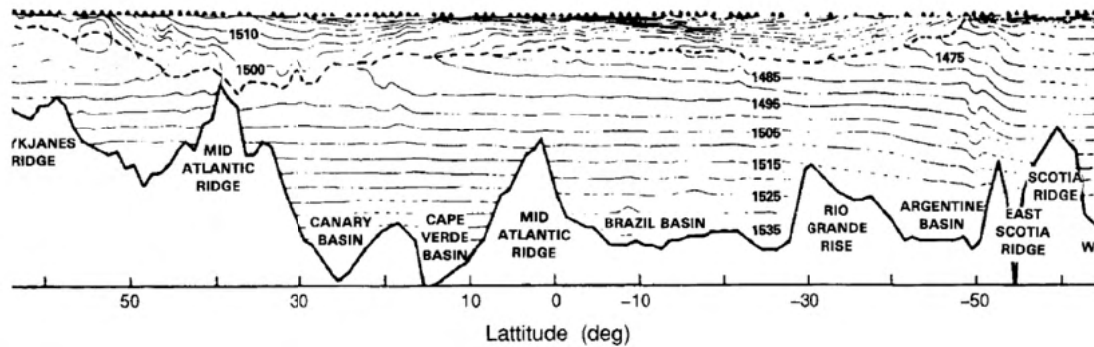


Figura 2.6: Velocidade do som ao longo do meridiano 30.50°W. Retirado de [2].

Cabe ressaltar, que velocidade do som não pode ser confundida com a velocidade da partícula, esta relaciona-se ao movimento oscilatório das partículas no sentido da propagação da onda, enquanto aquela refere-se ao movimento longitudinal da frente de ondas [14].

Assim, a pressão média para uma onda plana é definida pela equação 2.3 [14].

$$p = (\rho c)u \quad (2.3)$$

Onde:

p = pressão, dada em Pa (N/m^2);

u = velocidade da partícula (m/s);

c = velocidade do som (aproximadamente 1.500 m/s); e

ρ = densidade do fluido (aproximadamente $103 \text{ kg}/m^3$ para a água do mar).

Impedância acústica do meio fluido é expressa por $Z = \rho c$, cujo valor aproximadamente $1,5 \times 10^{-6} \text{ kg}/m^2$ para a água do mar.

2.1.3 Intensidade Acústica

As ondas acústicas carregam energia mecânica sob a forma de energia cinética das partículas e energia potencial das tensões do meio [14]. A energia cinética é

gerada a partir das partículas quando as mesmas vibram devido à propagação da onda.

A relação de potência por unidade de área, referentes às ondas acústicas, é dada por I intensidade, e relaciona-se diretamente com a pressão conforme equação 2.3 [14].

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.4)$$

2.1.4 Intensidade de Referência

Considerando uma onda acústica submarina, a intensidade de referência I_r é a intensidade de uma onda plana com pressão RMS, do inglês *root mean square*, igual a $1\mu\text{Pa}$ quando $p = 10^{-6} \text{ Pa}$ e $Z = 1,5 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$ [14], substituindo na equação 2.4 chegamos no valor da intensidade referência.

$$I_r = 0,67 \cdot 10^{-18} \text{ W/m}^2 \quad (2.5)$$

2.1.5 Nível da Fonte Sonora

Podemos relacionar uma fonte de onda acústica a uma distância padrão de 1 metro, I_1 , com a intensidade de referência I_r , equação 2.5, obtendo assim, o nível de fonte sonora (SL), equação 2.6.

$$SL = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_r} \right) \quad (2.6)$$

Para uma fonte de onda acústica omnidirecional com potência de saída P_{ot} em Watts, a intensidade da onda, I_1 a 1 metro da fonte, e sendo, omnidirecional considerando a área da esfera como $4\pi r^2$, temos que I_1 é de $(P_{ot}/12,6) \text{ W/m}^2$. Então, substituindo na equação 2.6, temos o nível da fonte (SL) omnidirecional em dB [14]. Dado pela equação 2.7.

$$SL = 10 \log P_{ot} + 170,8 \quad (2.7)$$

Na hipótese da fonte de onda acústica ser uma fonte direcional DI, onde DI é o Índice de Diretividade, o nível da fonte é dado pela equação 2.8 onde I_{dir} é a intensidade do sinal ao longo do eixo de propagação e I_{omni} a intensidade omnidirecional da projeção [14].

$$DI = 10 \log \left(\frac{I_{dir}}{I_{omni}} \right) \quad (2.8)$$

Dessa forma, obtemos o SL para uma fonte direcional, equação 2.9 [14].

$$SL = 10 \log P_{ot} + 170,8 + DI \quad (2.9)$$

2.1.6 Perda por Transmissão

Perda por Transmissão, ou *Transmission Loss* (TL) do inglês, é a quantificação do decaimento de energia de uma onda acústica entre dois pontos [12]. É definido como 10 vezes o log (base 10) da razão entre a intensidade de referência I_{ref} , medida a 1 metro da fonte, e a intensidade (I) do ponto observado, sendo expresso em decibéis (dB) [17].

$$TL = 10 \log \left(\frac{I_{ref}}{I} \right) \quad (2.10)$$

Muitos são os fenômenos acústicos que podem contribuir com a perda na propagação. Dentre esses, Jensen et al. [2] cita a divergência (esférica e cilíndrica) e a absorção como os de maior relevância.

2.1.6.1 Perda por Divergência

A perda por divergência pode ser melhor compreendida por duas análises geométricas, a saber: Esférica e cilíndrica [12].

A divergência esférica, figura 2.7 (a). Ocorre quando a fonte está localizada em um ambiente ilimitado e sem perdas. Assim, a potência (Π) é irradiada igualmente em todas as direções, que ao atravessar as esferas de raios crescentes ao redor da fonte, não irá mudar com o alcance [14]. Portanto, como potência = intensidade X área, temos:

$$\Pi = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2 = \dots = 4\pi r^2 I_r \quad (2.11)$$

Onde: Π = potência; r = raio; e I_r = intensidade.

Se $r_1=1$ m, podemos reescrever como:

$$TL = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_r} \right) = 10 \log r^2 = 20 \log r \quad (2.12)$$

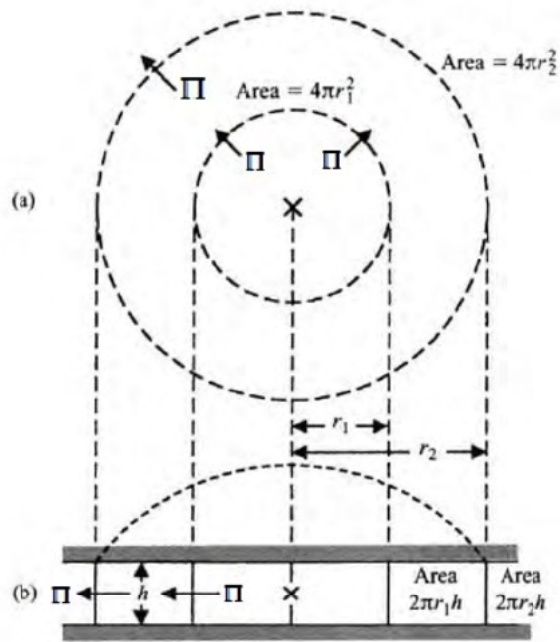


Figura 2.7: Divergência esférica (a) e cilíndrica (b), adaptado de [14].

Já a divergência cilíndrica, figura 2.7 (b), ocorre quando a fonte é delimitada por planos paralelos e separados h metros. Assim, a potência que é invariável, atravessa superfícies cilíndricas de raios crescentes ao redor da fonte[14].

$$\Pi = 2\pi h_1 I_1 = 2\pi h_2 I_2 = \dots = 2\pi h I_r \quad (2.13)$$

Se $r_1=1$ m, podemos reescrever como:

$$TL = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_r} \right) = 10 \log r \quad (2.14)$$

2.1.6.2 Perda por Absorção

Quando a onda sonora atravessa a água do mar, dois mecanismos principais contribuem para a perda da energia [14]. O primeiro é a viscosidade que está presente na água doce e água salgada, e que requer energia para romper o movimento das moléculas do meio, e sua contribuição é proporcional ao quadrado da frequência na água do mar. Outro fenômeno associado à perda de energia da onda sonora é a relaxação molecular, que é a redução de moléculas para íons induzidos pela pressão do som. Em frequências muito altas (acima de 500 kHz) mudanças de pressão são rápidas demais para que o relaxamento ocorra, e portanto, a energia é absorvida. O relaxamento do sulfato de magnésio ($MgSO_4$) é dominante sobre a faixa de frequência de 2 a 500 kHz. O ácido bórico contribui para um relaxamento abaixo de 2 kHz [14].

Para Etter[17], na prática os efeitos de absorção e atenuação são considerados em conjunto. Assim, Fisher e Simmons (1977)[18] resumiram esses efeitos graficamente na figura 2.8.

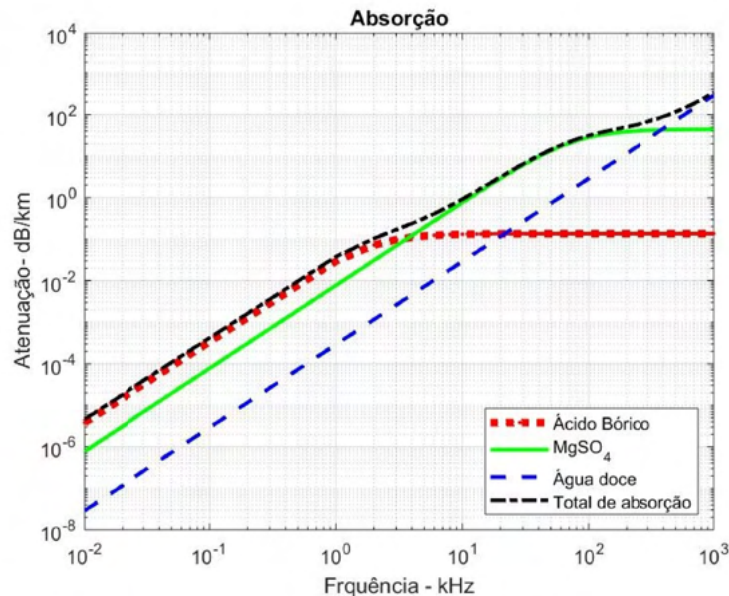


Figura 2.8: Absorção do som, salinidade 35 ppt, temperatura 10°C e PH 7.8, adaptado de [18].

Etter[17][54] aponta ainda, em outros trabalhos de pesquisas realizadas, que a absorção é regionalmente dependente principalmente devido a dependência do pH

do relaxamento do ácido bórico, e que modelos devem ser adaptados de acordo com as características locais.

2.2 Ruído ambiente

Ruído ambiente é toda perturbação de pressão captada por um transdutor de um sistema acústico que não seja identificada como favorável ao funcionamento desse sistema [2] [4].

Segundo Jensen et. al.[2], no ambiente acústico submarino para fins de estudo, o ruído foi classificado em dois tipos: fontes de ruído natural e fontes de ruído antropogênico.

Os ruídos antropogênicos são provenientes de fontes artificiais, e ocorrem principalmente nas áreas de costa, normalmente oriundos de navios e plataformas para extração de petróleo [2]. Há também, os de interesse militar como os sonares e explosivos. Dragagens, levantamento sísmico entre outros, também estão nesta classificação.

As fontes de ruído naturais são geradas por ruídos: de chuva, vento, quebra de gelo, biológicos, sísmicos e agitação térmica [5]. Em geral, nas baixas frequências aparecem menores de 10Hz, e nas altas frequências acima de 300Hz [2].

O nível de ruído ambiente, medido em dB, é definido como a intensidade medida por um hidrofone omnidirecional quando comparada com a intensidade de uma onda plana com pressão rms de $1\mu\text{Pa}$.

A representação de Wenz (1962) [8][19], figura 2.7, apresenta o espectro de ruído para diferentes fontes. Dentre os quais, o ruído gerado pelo vento apresenta grande predomínio, e será amplamente abordado por este trabalho nos capítulos seguintes.

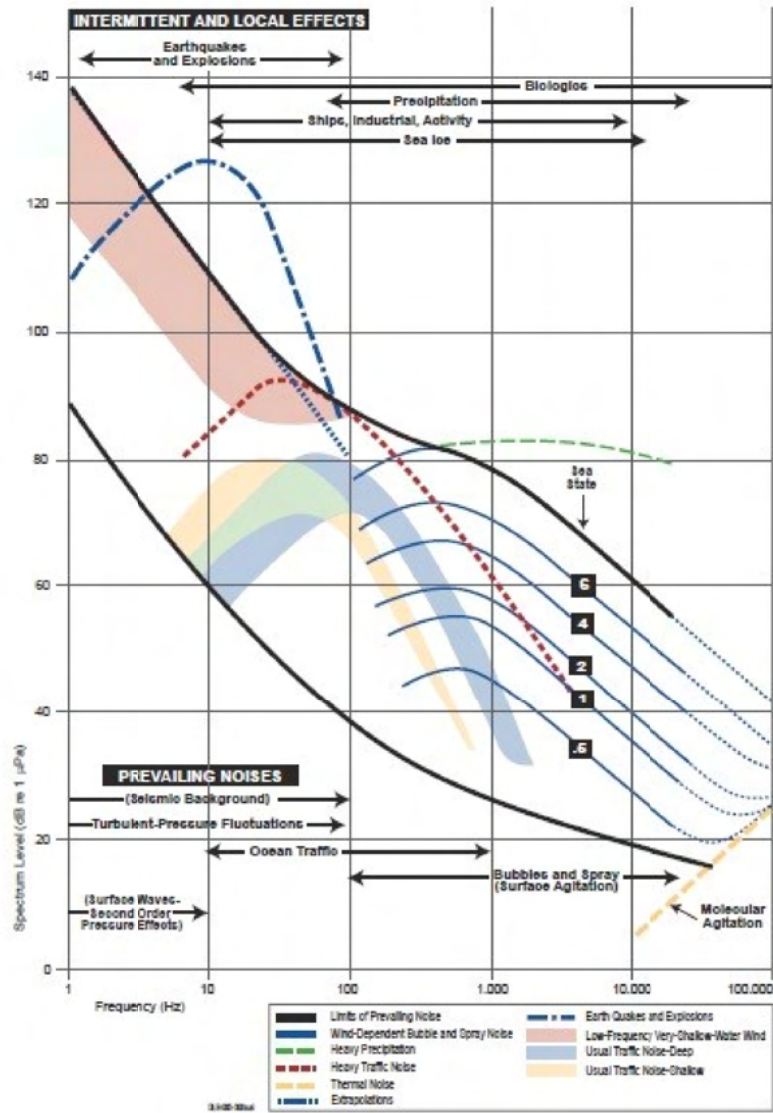


Figura 2.9: Curva de Wenz revitalizada por Brandley, retirado de [19].

2.2.1 Alguns Tipos de Ruído Ambiente

2.2.1.1 Ruído de Tráfego Marítimo

Em geral, é o principal contribuidor para o ruído dos oceanos [20], dominam uma faixa de ruído ambiente entre 10 Hz a 500Hz proveniente do tráfego marítimo a longas distâncias [4]. Origina-se, principalmente em uma embarcação, pela cavitação das hélices. As pás agitam o líquido a sua volta criando bolhas de ar, bolhas essas que implodem e explodem, causando assim, um ruído com espectro de frequência de banda larga [4].

Há também a contribuição dada pelos equipamentos que ao entrarem em funcionamento vibram em determinadas frequências, e essas vibrações propagam-se pela estrutura da embarcação, e por conseguinte, para o mar. Além disso, temos também o ruído produzido pelo fluxo hidrodinâmico do casco [20].

2.2.1.2 Ruído Sísmico

O planeta está em constante atividade sísmica [4]. Processos como cisalhamento e divergências de placas tectônicas e vulcões são fontes do ruído sísmico [8][20]. Os ruídos gerados a partir das atividades microsísmicas dominam a banda de frequência abaixo de 1 Hz [4].

2.2.1.3 Ruído Biológico

O ruído biológico é produzido por uma variedade de vida marinha [14]. Animais marinhos, incluindo mamíferos, peixes e invertebrados produzem som com frequência específica [20]. A faixa de frequência do som produzido por animais marinhos está entre 500 Hz e 20 kHz [14].

2.2.1.4 Ruído Térmico

O ruído térmico aparece como resultado da agitação das moléculas da água [5]. E, produzem as pressões de flutuação na face dos hidrofones [8][14]. Normalmente ocupam uma banda de frequência superior a 50kHz [4].

2.2.1.5 Ruído da Chuva

Muitos fatores podem determinar a radiação do ruído da chuva, como apontado no estudo clássico de Franz [5][21]. O ruído proveniente do impacto da chuva na superfície do oceano é gerado por três mecanismos: o impacto da gota da chuva na superfície, seguido pela oscilação da superfície provocada pelo impacto inicial e a oscilação do ar que foi arrastado para baixo da superfície [4][9].

2.2.1.6 Ruído do Vento

É o ruído gerado pelo vento incidente na superfície do mar. Seu estudo remonta à Segunda Guerra Mundial quando Knudsen [6] classificou o estado de mar em sete níveis correlacionado com a escala Beaufort de ventos [22].

A figura 2.6 apresenta a relação entre a intensidade (dB re $1\mu\text{Pa}$) e a frequência (Hz) do ruído do estado do mar para cada nível, relacionada por Knudsen [6].

O presente trabalho propõe-se a discutir nos capítulos seguintes os aspectos pertinentes ao estado de mar e seu ruído característico, a fim de propor um modelo com capacidade de estimar a altura de ondas.

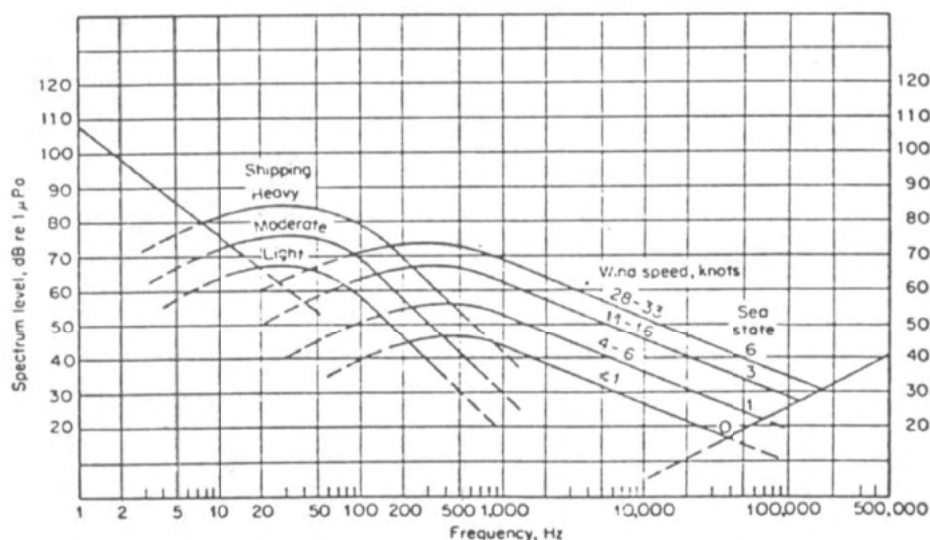


Figura 2.10: Curvas de Knudsen, retirado de [6].

2.3 Ruído próprio

Segundo Hodges[4] é um ruído gerado por fontes nas imediações do hidrofone, e podem não ser perceptíveis em um campo acústico distante.

Não é apenas o ruído associado à plataforma e seus equipamentos, mas contempla além do ruído irradiado da plataforma o ruído gerado pela estrutura, ruído do fluxo de água passando pelo hidrofone, ruído eletrônico, ou ainda, qualquer interferência acústica desconhecida produzida pela plataforma.

2.4 Geração de ondas pelo vento

Para compreender um pouco melhor o ruído gerado pelo vento, faz-se necessário identificar como são formadas as ondas e a maneira como foi discutido pela literatura ao longo do tempo. Uma abordagem de alguns aspectos preliminares, como o estado do mar e como se desenvolvem, será necessário para diferenciar o que vem a ser mar completamente desenvolvido (*swell*) e mar em desenvolvimento (*wind sea*) [23][24].

A transferência de energia das ondas de superfície poderá ser melhor compreendida, partindo de uma superfície do mar sem nenhuma perturbação ($\text{mar}=0$). Ao atuar uma força na superfície em uma, ou algumas direções, há trocas de energias causando agitações/perturbação. Figura 2.11.

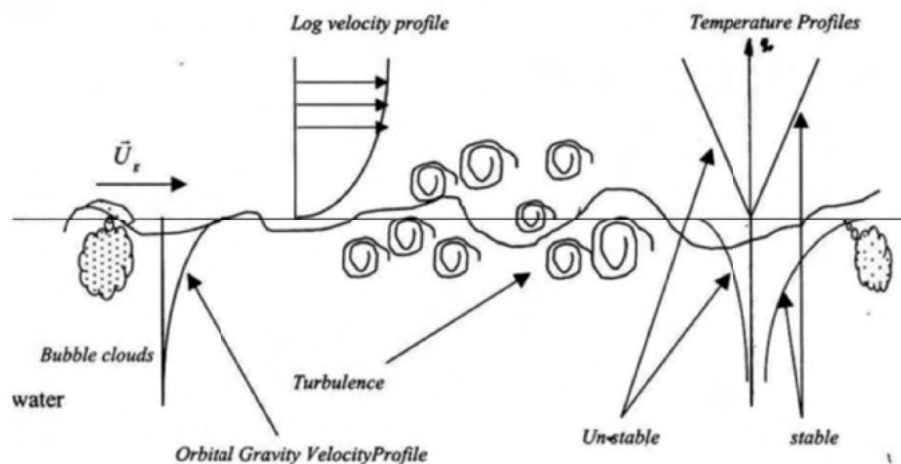


Figura 2.11: Zona de interação ar-mar, retirado de [5].

A intensidade do vento sobre a superfície do mar altera o equilíbrio inicial dando origem às ondas, isto pode ser atribuído pela troca de energia e por pequenas perturbações por pontos de diferenças de pressão na superfície, tendendo a diminuir em um ponto e aumentando em outro. Sua altura será pequena como seu comprimento, contudo, com a ação contínua e a intensidade do vento a altura e o período aumentam. Essa interação pode ser expressa sob a forma de energia [23][25].

A transferência de energia gerada pelo vento trará aspectos relevantes para seu cálculo como: direção, altura, velocidade, período/frequência. Entretanto, ondas

possuem energias de outros fenômenos associados [23].

De acordo com Young [23], a equação da transferência de energia é determinada pelos diferentes processos físicos, e é descrita pela equação 2.15.

$$S_{total} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_b + \dots \quad (2.15)$$

Onde, S_{in} : Energia transferida pela atmosfera e pelo vento; S_{nl} : Energia transferida por interações não lineares entre componentes espectrais; S_{ds} : Dissipação de energia devido ao “white-capping”; e S_b : Dissipação devido ao efeito do fundo.

Na equação de transferência de energia podem ocorrer outros processos físicos que adicionem ou subtraíam energia, aumentando ou diminuindo a equação 2.15 [23]. Contudo, os aspectos descritos acima são os de maior energia associada, gerando modelos matemáticos satisfatórios.

2.4.1 Teorias de Miles e Phillips

No final da década de 50, duas teorias foram publicadas explicando a transferência de energia da atmosfera no desenvolvimento de ondas na superfície. Essas teorias foram explanadas por John W. Miles (1957)[25] e Owen M. Phillips (1957)[26]. Miles mais focado ao processo de desenvolvimento das ondas com o fluxo de vento na superfície, enquanto Phillips concentrou esforços no estudo da frequência e na amplitude gerada pela variação da pressão do vento na superfície do oceano [23].

As ondas dependem de alguns fatores como: o vento e suas variações, a área sob a qual atuam, a profundidade e geometria da costa da região [27]. O vento ao atuar na superfície livre do oceano fará pequenas alterações no campo de pressão, gerando uma variedade de espectros de frequências naquela região. Ocorre então, uma transferência de energia do vento para a superfície do mar [28].

O desenvolvimento das ondas depende do tamanho da pista (*fetch*) e do tempo duração em que atua o vento [23]. Após um certo período de tempo as ondas continuam seu desenvolvimento em altura através de processos não-lineares. A transferência de energia está diretamente correlacionada com o *fetch*, termo originalmente em inglês, pois quanto maior for a pista, a direção e a intensidade do vento, mais estável será o processo. Assim, a energia transferida no processo vento-mar tenderá a um equilíbrio, e o mar será considerado totalmente desenvolvido, pois não ocorrerá aumento da energia da onda [23].

Para compreender o que é mar em desenvolvimento limitado pela pista e limitado pelo tempo, devemos analisar a formação de uma pista, que é a ação do vento incidindo sobre uma superfície perpendicular ao longo de uma linha da costa longa e reta, durante um determinado tempo e em águas profundas, sem variações significativas de intensidade e direção [23]. Durante esse processo caracteriza-se o mar

local “*Wind Sea*”.

2.4.2 O Modelo de Pierson-Moskowitz de Mar Completamente Desenvolvido

Ondas no oceano são geradas pelo vento, exceto Tsunamis [4]. A teoria de distribuição de frequência das ondas do mar totalmente desenvolvido, elaborada por Pierson e Moskowitz(1964)[27], apontava para uma análise de dados feitos por sensores instalados em navios britânicos na região do Oceano Atlântico Norte [23]. A comparação ocorreu em três etapas [4].

A primeira etapa era compreendida pela comparação de dados obtidos de ondas com a atuação de ventos com intensidade que poderiam variar entre 20 a 40 nós, medidos pelos sensores instalados a bordo [27]. A perturbação do vento produzia flutuações aleatórias de pressão, causando pequenas ondas com alguns centímetros de tamanho [4].

A segunda etapa, constitui-se em analisar a forma do espectro de frequência de ondas do campo, formado no oceano, através da teoria formulada por Kitaigorodskii (1961)[29], em que são utilizadas unidades adimensionais para obter a forma do espectro de frequências das ondas do mar completamente desenvolvido [27].

Vale ressaltar que nesta coleta de dados de vento, foram obtidos em altura de 19,5 metros devido ao local em que estavam posicionados os anemômetros nos navios. Essa altura de medição era maior que a padrão de coleta do perfil de velocidade de ventos (10 metros) o que teve que ser futuramente corrigido para não prejudicar a análise [4][23].

Finalmente, as interações entre ondas produziam ondas com comprimentos longos. Essa interação transferia energia de ondas curtas gerada pelo processo anterior, Miles [25], para ondas com frequências ligeiramente inferiores às do pico do espectro de ondas [4].

O trabalho de Pierson Moskowitz [27] aponta para Kitaigorodskii (1961)[29], o espectro de energia das ondas poderia ser expresso em função de somente quatro variáveis, como descrito na forma da equação abaixo [27]:

$$S(f) = F(f, g, U_*, X) \quad (2.16)$$

Onde, na equação f = frequência, g = gravidade, U_* = velocidade de fricção e X = tamanho da pista.

Como não há uma dificuldade prática de obter o valor de U_* a partir de medições realizadas no mar, pelos sensores instalados nos navios, o valor foi substituído por U que representa a velocidade do vento a uma altura padrão da superfície do mar, obtida através dos anemômetros dos navios de pesquisa [27]. Logo, a equação foi

substituída por:

$$S(f) = F(f, g, U, X) \quad (2.17)$$

Então, para um espectro de energia adimensional do campo de ondas foi utilizado em função dos coeficientes adimensionais de energia, frequência, pista e duração. Após uma meticulosa série de análises comparando os diversos dados obtidos das ondas, o trabalho de Pierson-Moskowitz [27] chegou à formulação do espectro de frequências pela equação a seguir:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\beta(\frac{\omega_0}{\omega})^4} \quad (2.18)$$

A equação acima foi expressa em termos de $\omega = 2\pi f$, ω_0 e dois parâmetros adimensionais α e β . Sendo $\alpha = 0,0081$ e $\beta = 0,74$, $\omega_0 = g/U$ em que U é a velocidade coletada pelos navios [27]. Substituindo esses dados na equação acima, poderemos reescrever de um modo compilado em função da frequência f , na forma:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-0.74(\frac{g}{2\pi U f})} \quad (2.19)$$

A teoria desenvolvida por Pierson-Moskowitz expressa na equação acima e os resultados da coleta de dados, de seus experimentos, verificaram que conforme aumenta a velocidade do vento e sua atuação sobre o campo de ondas, o espectro tende a ficar cada vez mais estreito com o pico de energia concentrando-se nas baixas frequências na situação em que o mar encontra-se totalmente desenvolvido.

A figura 2.12 aponta o espectro de Pierson-Moskowitz para diferentes velocidades do vento correspondentes ao estado de mar de 1 - 6 [4].

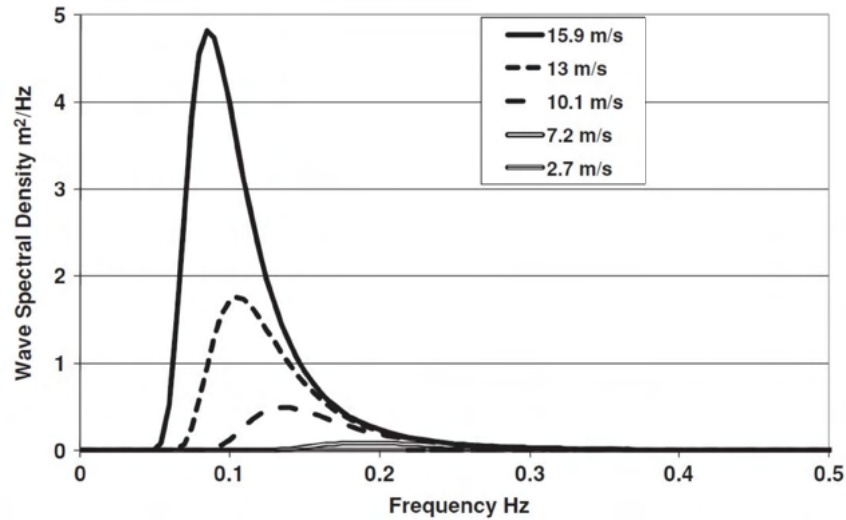


Figura 2.12: O espectro de Pierson-Moskowitz para diferentes velocidades do vento. Retirado de [4].

2.4.3 O Espectro JONSWAP

Durante os anos de 1968 e 1969, o projeto conhecido como Joint North Sea Wave Project, JONSWAP, foi usado para medir as ondas do Mar do Norte que era feito através de treze estações posicionadas com sensores ao longo de um perfil de costa de 160 km. Adicionalmente havia a capacidade de medição: das correntes, das marés, da diferença de temperatura entre o mar e da atmosfera próxima ao mar e da turbulência gerada. O propósito era poder determinar a função do balanço de energia do espectro de onda, analisar o desenvolvimento das ondas sobre a atuação de um campo de ventos estacionários no oceano e a atenuação dos marulhos em locais de profundidades finitas [23][24].

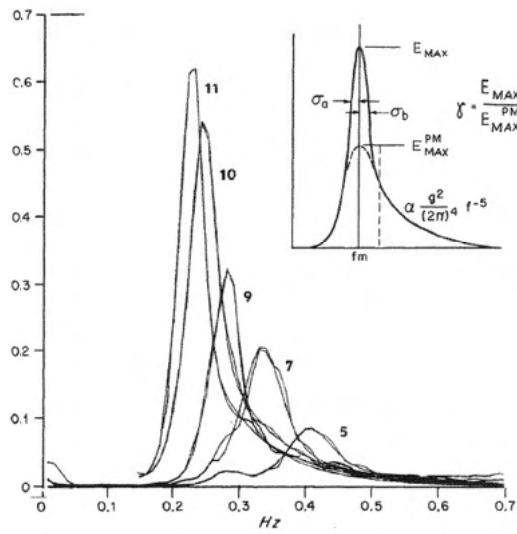


Figura 2.13: Evolução do espectro da onda correlacionada com o aumento da intensidade do vento, retirado de [24].

A forma do espectro de frequências se estabelece com um pico pronunciado, e há um deslocamento do espectro em direção às baixas frequências. Esses feitos de pequenos deslocamentos podem ser observados devido a processos de transferência de energia como os não-lineares onda-onda, à advecção e à dissipação [24].

2.4.4 Modelo Pierson-Moskowitz versus JONSWAP

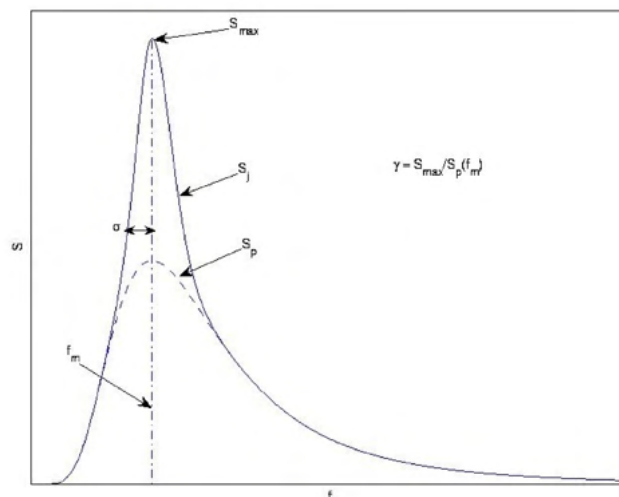


Figura 2.14: Comparação entre a forma do espectro de frequências dos modelos Pierson-Moskowitz(linha pontilhada) e JONSWAP(linha contínua), retirado de [23].

Ocorre uma clara distinção das fases de desenvolvimento das ondas para a fase de mar completamente desenvolvido. A teoria de Pierson-Moskowitz para o mar desenvolvido aponta para condições de vento constante e de período de longa duração. O estágio de desenvolvimento das ondas chega a harmonia quando a transferência de energia para o mar se equilibra com os processos dissipativos, gerando um deslocamento do espectro para baixas frequências.

A formulação JONSWAP analisada por Hasselmann (1973)[24] aponta para a evolução do desenvolvimento das ondas em um local de pista limitada. E, através da análise de informações coletadas pelos sensores, ao longo de um perfil de 160 km, o estudo analisa a evolução das ondas de acordo com o tamanho da pista e a intensidade do vento.

O fator de destaque, foi conseguir alcançar os mesmos resultados do modelo Pierson-Moskowitz, mas com uma quantidade maior de energia na faixa da frequência de pico. Esse resultado deve-se ao crescimento da energia no espectro das ondas a processos de interações não-lineares.

Além das observações de Hasselmann [24], feitas ao modelo JONSWAP, que apresentou processos não-lineares no espectro de energia, pode-se constatar que

durante o processo de desenvolvimento do mar, o espectro de frequências tende a diminuir a largura, até a ocorrência da concentração de energia maior para o de uma frequência menor, e com menor dispersão, resultando na situação limite de mar completamente desenvolvido.

Desta forma, por este trabalho objetivar a análise do mar local, o espectro JONSWAP apresenta resultados preferíveis para comparar o ruído ambiente local gerado pelo vento, com as respectivas densidades espectrais de seu modelo, do que o modelo Pierson-Moskowitz. A abordagem do mar local ocorrerá na comparação com dados do experimento de campo presentes no capítulo 5.

Capítulo 3

Estado de Mar, Velocidade do Vento e Altura de Ondas

3.1 Correlação Vento *versus* Estado do Mar

3.1.1 Introdução

Com a intensificação do comércio marítimo pela Inglaterra no século XIX, garantir a segurança da navegação, a fim de permitir o transporte de carga e de pessoas pelos oceanos, tornava-se imprescindível. Assim, associar ventos e mensurar as alturas das ondas para os navegadores tornaria-se algo vital.

Fruto de observações de Sir. Francis Beaufort (1805) do “vento em um homem de guerra”, a Marinha Real Britânica, em 1838, torna obrigatória o uso de uma escala organizada para que marinheiros observem o mar, e adequem melhor sua navegação de acordo com o tamanho das ondas. Contudo, apenas em 1912 a *Commission for Weather Telegraphy* acresceu a velocidade do vento na então escala Beaufort de Ventos [4].

Tabela 3.1: Escala de Vento Beaufort - Centro de Hidrografia da Marinha

Beaufort Número	Intensidade (nós)	Descrição do Estado de Mar
0	<1	Calmaria
1	1 – 3	Bafagem
2	4 – 6	Aragem
3	7 – 10	Fraco
4	11 – 16	Moderado
5	17 – 21	Fresco
6	22 – 27	Muito Fresco
7	28 – 33	Forte
8	34 – 40	Muito Forte
9	41 – 47	Duro
10	48 – 55	Muito Duro
11	56 – 63	Tempestuoso
12	>63	Furacão

Fonte : https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2035/escala_beaufort.pdf (2020)

Com o desenvolvimento das minas acústicas e o uso dos submarinos como arma de guerra fez-se necessário conhecer o ambiente acústico. À vista disso, durante o período da Segunda Guerra Mundial, a Marinha dos Estados Unidos iniciou um projeto de pesquisas que foi publicado em 1948, após o término do conflito, por Knudsen [6][22].

Knudsen propusera uma correlação direta associada ao ruído gerado pelo vento na superfície com o estado de mar, figura 2.10. Sua proposta utilizou-se da escala de Vento Beaufort [6], que apresenta uma descrição do Estado de Mar em função da velocidade do vento.

3.1.2 Interações passivas com a relação Sinal/Ruído geradas pelo Estado de Mar

Fazer medições das condições climáticas da superfície em regiões oceânicas é relativamente difícil, e ainda assim, esses dados são necessários para muitos tipos de estudos climáticos e de processo de interação oceano atmosfera [30]. A interação estado do mar versus ruído gerado, pode ter um significativo interesse civil e militar. Sensores passivos podem estimar ondas, sem a necessidade de estarem presentes na superfície.

As boias oceanográficas, e também navios, podem distorcer os ventos que os anemômetros tentam registrar, por diferentes fatores. Além do que, anemômetros montados em boias podem ser facilmente danificados ou roubados, como no exemplo da figura 3.1, ocasionando imprecisão dos dados obtidos.

Desta forma, a fim de não comprometer a informação obtida por meio dos dados de uma boia oceanográfica, pode ser utilizada a comparação de dados de anemômetro com o uso de hidrofones. Tal método é relevante, pois possibilita uma verificação, e uma posterior comparação entre os dados registrados pelo anemômetro com o ruído associado ao estado mar captado pelo hidrofone. Alguns trabalhos de pesquisa como o projeto WOTAN [10], Ranji et al. [11] e de Nystuen [30] apontaram bons resultados com a aplicação desta proposta, ou seja, mensurar velocidade do vento a partir do ruído gerado pelo próprio.



Figura 3.1: Exemplos de boias que podem apresentar imprecisões na coleta de dados gerados por diferentes fatores.

Outro aspecto a ser considerado é o militar, pois em operações navais torna-se essencial o conhecimento e o domínio dos fenômenos naturais e antropogênicos que envolvam o ruído ambiente, a fim de ampliar os subsídios na tomada de decisões no teatro de operações navais.

Desse modo, podemos ressaltar os submarinos como os maiores interessados em conhecer o ruído ambiente de sua área de operação. O sistema de combate a bordo dessas embarcações necessitam ser alimentados com informações a cerca do estado de mar, a fim de aumentar a probabilidade do acerto do tiro torpédico, ou ainda, aprimorar a solução de marcação e distância de um contato.

Entretanto, para um submarino retornar à superfície, ou expor seu periscópio para a coleta de informações do estado de mar, com o objetivo de subsidiar com

dados o sistema de combate, expor-se pode não ser a melhor decisão a ser tomada pelo comandante, pois, sua maior arma é a ocultação, e revelar-se em um cenário hostil poderia ser fatal.

Nesse contexto, torna-se imprescindível poder avaliar e obter as condições do estado de mar sem perder sua principal vantagem tática, a ocultação, em uma zona de atuação classificada como desfavorável ao submarino.

Um recurso que poderia auxiliar na avaliação do estado de mar, e ainda com o submarino permanecendo submerso, seria utilizar-se dos sensores passivos de bordo, e de um processamento voltado para um modelo de estimativa de estado de mar, empregando as técnicas apontadas neste trabalho.

Neste ponto, cabe ressaltar que considerando o aspecto reservado por se tratar de equipamento militar, não há literatura para referenciar sobre técnicas de classificação de estado de mar empregadas por submarinos.

3.2 Modelagem em Acústica

Um dos objetivos da ciência é desenvolver meios de previsão confiáveis para guiar decisão e ação Ziman [31]. Isto é alcançado por meio de algoritmos para compressões de observações, e através de leis físicas [17].

Para Etter [17] um modelo é a forma matemática de representar fenômenos naturais. Entretanto, o mesmo afirma que um modelo perfeito é aquele que representa perfeitamente a realidade. Na prática, no entanto, um modelo tão perfeito não alcançaria seu objetivo, pois seria tão complexo como o problema que está tentando representar. Assim, reduzimos a componentes que conseguimos gerenciar [17].

Em acústica, na detecção de alvos submarinos, busca-se o sinal emitido em uma relação sinal/ruído > 1 . Todavia, abordaremos uma relação de interesse no ruído, a saber o gerado pelo vento. Diferentes técnicas e modelos foram propostos na comunidade acústica submarina na tentativa de melhor representar o ruído ambiente [2][17].

Em vista disso, Jensen et. al. [2] para solucionar o problema da equação da onda, apresenta cinco possibilidades de modelos: Modos Normais (NM), Traçado de Raios, *Fast Field Program* (FFP), Equação Parabólica (PE) e Elementos Finitos (FE).

3.2.1 Modelo de Modos Normais

Os modos normais (NM) são derivados da equação de Helmholtz, assumindo inicialmente uma suposição estrita de um meio estratificado horizontalmente [4].

Os modos de vibração são, aproximadamente, semelhantes aos modos de uma

corda vibratória. As “frequências” da vibração dão à horizontal, sentido longitudinal de vibração da corda, números de onda associados à propagação modal. O campo acústico completo é então construído pela soma das contribuições de cada um dos modos ponderados de acordo com a profundidade da fonte [2].

Assim, para esse modelo são aplicados conceitos de um oceano ideal, limitado por uma superfície livre e um fundo perfeitamente rígido, em um meio totalmente homogêneo, modelo de Perekis [2][32]. Cada modo tem uma velocidade de grupo única e ângulo de propagação correspondente, e pode ser decomposto como produto de uma função de alcance e uma função de profundidade [4].

Por apresentar uma necessidade de informações sobre: superfície, estrutura do fundo do mar, densidade de fluidos e várias velocidades sonoras para diferentes camadas do fluido, pode não representar de forma adequada um modelo computacional para ruído ambiente.

3.2.2 Modelo de Raios

Originalmente, o modelo de raios surgiu da óptica em que foi usado para entender a propagação da luz, mesmo antes das equações mais fundamentais desta serem conhecidas (equações de Maxwell) [2]. A acústica de raios é baseada partindo do pressuposto de que o som se propaga ao longo de raios normais à frente de onda [33].

Desse modo, o som gerado a partir de uma fonte pontual com velocidade de som constante às frentes de onda, irá formar superfícies concêntricas, e o som seguirá caminhos de linhas retas que irradiam para fora da fonte. E, se a velocidade do som não é constante, os raios seguirão caminhos curvos, e não mais retos [33].

Hoje a teoria dos raios é importante em praticamente todas as áreas de propagação de ondas, incluindo óptica, eletromagnetismo e sísmica [2]. Possui como característica o uso de assíntota para alta frequência, representando uma vantagem computacional para processar em banda larga de frequências. Além disso, os métodos da teoria dos raios são amplamente utilizados nas modelagens de ruído ambiente em que a velocidade é um fator crítico e a incerteza dos fatores ambientais impõe restrições muito mais severas à precisão atingível [2].

3.2.3 Modelo Fast Field Program (FFP)

Igualmente conhecido como Integração do Número de Onda, o modelo FFP usa a mesma abordagem do NM para separar os parâmetros da equação da onda. No entanto, aplica uma função de Hankel diferente do NM. Além disso, uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) é usada para avaliar o resultado de FFP [34].

Todavia, quando dependente de distâncias tem apresentado uma baixa performance computacional, uma vez que requer usar métodos como: elementos finitos ou de contorno para solução [17][35].

3.2.4 Modelo da Equação Parabólica (PE)

O trabalho pioneiro sobre equações de ondas parabólicas remonta a meados da década de 1940, quando Leontovich e Fock [36] aplicaram um método de equações parabólicas(PE) ao problema da propagação de ondas de rádio na atmosfera. Desde então, equações parabólicas têm sido usadas em vários ramos da física [2].

O método da equação parabólica foi introduzido na acústica submarina no início dos anos 70 por Hardin e Tappert [37], que criaram uma solução numérica eficiente baseado em transformadas rápidas de Fourier [2].

A solução do modelo de PE assume a característica de que a energia está viajando em ângulos rasos, e não há presença de retroespalhamento. A definição de ângulos rasos era “cerca de 20°” no momento do primeiro uso de PE [4].

Uma vez feita a suposição de ângulo raso, a equação de Helmholtz pode ser escrita em um forma fácil de resolver, ampliando a solução (ou seja, se soubermos a pressão do campo em todas as profundidades em uma faixa, podemos calcular o campo de pressão em todas as profundidades tendo um maior alcance) com um dos vários algoritmos disponíveis [4].

O método tornou-se a técnica mais usual da teoria das ondas para resolver problemas de propagação da acústica oceânica [2]. Para Jensen et al. [2] esse desenvolvimento é claramente refletido no considerável número de publicações que apareceram, relacionadas tanto para novos desenvolvimentos teóricos quanto para o uso real dos códigos de PE para estudar situações complexas de propagação no oceano.

3.2.5 Modelo dos Elementos Finitos

Nos modelos apresentados anteriormente, aparecem as técnicas de solução numérica mais comumente aplicadas na modelagem de propagação acústica. Uma ou mais destas abordagens são numericamente eficientes para a maioria dos problemas que ocorrem em acústica. No entanto, a eficiência numérica dessas abordagens é obtida sacrificando a generalidade através das várias suposições e aproximações aplicadas [2].

Logo, alguns fenômenos importantes da propagação acústica não eram abordados, ou eram de forma mais simples. Como por exemplo, a reverberação, o espalhamento e os sinais de baixa e média frequência [2].

Assim, o uso de técnicas de elementos finitos na computação acústica para propagação foi estudada como parte de um probabilístico computacional intensivo, cujo

objetivo principal era desenvolver modelos para propagação dos momentos do campo acústico nas regiões onde os limites do oceano eram superfícies aleatórias [17].

3.3 Modelagem do Ruído Ambiente

O ruído ambiente gerado por processos aleatórios na superfície dos oceanos sempre foi um objeto de intensa pesquisa na comunidade acústica. Isto é devido ao fato que a superfície do oceano é sempre uma fonte predominante de ruído em um ambiente oceânico, com sua origem decorrente de ondas, de ventos, interações entre ondas, processos marítimos, etc. [38].

Os modelos computacionais iniciais de ruído ambiente empregaram a Teoria dos Raios por causa de sua eficiência, disponibilidade e facilidade de interpretação, sempre com bons resultados para as altas frequências [5]. As contribuições de Cron e Sherman (1962)[39] e Talham(1964)[40], na análise teórica, levaram a expressões para correlação espacial, e de direcionalidade vertical do ruído ambiente gerado pela superfície, em ambientes independentes de seu alcance [5].

Posteriormente, a abordagem de Kuperman e Ingenito (1980)[41] para ruído ambiente centrada na teoria dos modos normais, expandia a visão de Cron e Sherman [39] para as baixas frequências [5].

Já as frequências mais altas, acima de 1 kHz, motivaram uma série de modelos de ruído, como o *Fast Ambient Noise Model* de Cavanagh [42][5]. Aliado a isso, o avanço computacional proporcionou códigos mais eficientes na Teoria de Raios como propôs Harrison no modelo CANARY [43]. Ou como Kuperman e Perkins [44] aprimoraram o modelo que usava teoria dos modos normais e desenvolveram um modelo em três dimensões do ruído ambiente.

Uma visão abrangente e comparativa de diferentes métodos de modelagens do ruído ambiente, entre ruído gerado pelo vento e ruído associado ao tráfego marítimo, foi esplanada no trabalho apresentado por Hanson [45].

Diversos tipos de modelagem para o ruído ambiente foram propostos como bem exemplificado no livro do Carey e Evans [5]. À medida que as técnicas de modelagem continuam a proliferar dentro da comunidade acústica, torna-se mais difícil fazer um balanço dos vários modelos já existentes, antes de lançar um novo esforço para desenvolver ainda mais modelos [17].

3.3.1 Modelos de Estado de Mar em Função do Vento

Apesar das curvas de Knuden [6] terem sido formadas de maneira empírica, alguns modelos matemáticos foram propostos na tentativa de melhor representar o fenômeno acústico, dentre esses podemos citar Crouch e Burt [46], Cato [47],

Kuperman e Ferla [48].

Hodges [4] cita que há ainda um modelo proposto pela Marinha dos Estados Unidos, em seu Departamento de Hidrografia (USHO), que utiliza equações que atendem de forma satisfatória as curvas referentes ao estado de mar [4]. Seu modelo é representado pela equação 3.1 e 3.2 onde: SS é o estado de mar e WS a velocidade do vento em nós

Sendo o Estado do mar < 2 , temos:

$$W_s = -1,92 + 3.25SS \quad (3.1)$$

caso contrário, temos:

$$W_s = -2,7 + 5.5SS \quad (3.2)$$

Dessa forma, evidenciando resultados aceitáveis quando comparados ao *World Meteorological Organization* (WMO), que fazem referência ao trabalho clássico de Wenz [8]. Os valores são explicitados na tabela 3.2 abaixo, e foram retirados de Hodges [4].

Tabela 3.2: Relação de estado de mar, velocidade do vento e altura significativa de ondas

	WMO				USHO			
	Velocidade do vento		Altura significativa de onda		Velocidade do vento		Altura significativa de onda	
Estado de mar	nós	m/s	pés	m	nós	m/s	pés	m
0	1.5	0.75	0	0	0.5	0.25	0	0
1	5.0	2.5	0.5	0.15	2.0	1.0	0.5	0.15
2	8.5	4.4	1.5	0.46	5.0	1.5	2.0	0.6
3	13.5	6.9	3.0	0.91	8.5	4.5	4.0	1.2
4	19.0	9.8	6.0	1.8	19.0	9.8	6.5	3.9
5	24.5	12.6	10.5	3.2	34.0	17.5	10.0	3.0
6	37.5	19.3	16.5	5.0	44.0	22.6	16.0	4.9
7	51.5	26.5	25	7.6	51.5	26.5	30.0	9.2
8	59.5	30.6	37.5	11.4	56.5	30.6	>40	>12.2
9	>64	>32.9	>45	>13.7	>64	>32.9	>40	>12.2

Os espectros idealizados sugeridos por Urick [9] estavam de acordo com a proposta esquemática de Wenz [8], conhecida como “*rule of fives*”. Que corresponde a uma ampla faixa de frequências entre 500 Hz e 5 kHz dos níveis do espectro do ruído

ambiente. Diminuindo 5 dB por oitava com frequência aumentando de 5 dB com cada duplicação da velocidade do vento, para a faixa entre de 2,5 a 40 nós [5]. E, ainda indica o nível do espectro a 1 kHz em águas profundas sendo igual a 25 dB; e para águas rasas quando a velocidade do vento é de 5 nós, com 5 dB maior [5]. “*rule of fives*” é expressa por Carey e Evans [5] da seguinte forma:

$$NL(f, U) = 25 - 10\log(f^{\frac{5}{3}}) + 10\log\left(\frac{U}{5}\right)^{\frac{5}{3}} \quad (3.3)$$

Onde, f= frequência kHz, U= vento em nós, NL= Ruído gerado pelo vento em dB.

Nessas aproximações matemáticas, que hoje podem ser resolvidas por algoritmos computacionais, chegamos cada vez mais próximo do real fenômeno acústico. Hodges [4] apresenta em seu livro dados tabelados de frequência versus nível de ruído obtidos originalmente, de forma empírica, da curva de Knudsen [6], conforme podemos observar na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Nível de ruído gerado pelo vento, adaptado de [4]

Frequência (Hz)	SS0	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6
1,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
1,25	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
1,60	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
2,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
2,50	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
3,20	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
4,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
5,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
6,40	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
8,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
10,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
12,50	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
16,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
20,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
25,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
32,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
40,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
50,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
64,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
80,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
100,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
125,00	50,90	57,60	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
160,00	50,80	57,50	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
200,00	50,60	57,30	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
250,00	50,20	57,00	62,10	65,00	66,70	68,40	70,90
320,00	49,70	56,60	61,90	64,90	66,70	68,40	70,90
400,00	49,00	56,00	61,50	64,70	66,60	68,40	70,90
500,00	48,20	55,40	61,10	64,40	66,40	68,20	70,80
640,00	47,30	54,70	60,50	63,90	66,00	67,90	70,50
800,00	46,10	53,80	59,70	63,20	65,40	67,40	70,00
1000,00	44,80	52,90	58,80	62,40	64,70	66,70	69,40
1250,00	43,40	51,80	57,80	61,50	63,80	65,80	68,50
1600,00	41,60	50,40	56,50	60,20	62,60	64,60	67,30
2000,00	39,80	49,00	55,20	58,90	61,30	63,30	66,00
2500,00	38,10	47,40	53,70	57,40	59,80	61,80	64,40
3200,00	36,20	45,60	51,90	55,70	58,00	60,00	62,60
4000,00	34,30	43,70	50,00	53,80	56,20	58,10	60,70
5000,00	32,60	42,00	48,30	52,10	54,40	56,40	59,00
6400,00	30,80	40,20	46,40	50,20	52,60	54,50	57,10
8000,00	28,90	38,30	44,50	48,30	50,70	52,70	55,30
10000,00	27,10	36,50	42,80	46,60	48,90	50,90	53,50
12500,00	25,40	34,80	41,00	44,80	47,20	49,10	51,70
16000,00	23,40	32,80	39,10	42,90	45,20	47,20	49,80
20000,00	21,70	31,10	37,30	41,10	43,50	45,40	48,00
25000,00	19,90	29,30	35,60	39,40	41,70	43,70	46,30
32000,00	18,10	27,50	33,70	37,50	39,90	41,90	44,50
40000,00	16,20	25,60	31,90	35,70	38,00	40,00	42,60
50000,00	14,40	23,80	30,10	33,90	36,30	38,20	40,80
64000,00	12,60	22,00	28,30	32,10	34,40	36,40	39,00
80000,00	10,70	20,10	26,40	30,20	32,60	34,50	37,10
100000,00	9,00	18,40	24,60	28,40	30,80	32,80	35,40

3.4 Desenvolvimento de um modelo capaz de estimar altura de ondas

De todos os modelos discutidos anteriormente, o que apresentou-se mais fidedigno às curvas de Knudsen [6], para uma dada finalidade que é estimar a altura de ondas, foram os dados tabelados de Hodges [4]. Assim como, para os trabalhos de Santos [49] e Torres e Costa [50] este foi o caminho mais adequado a ser seguido, partindo da premissa de estimar as alturas de ondas. Podemos observar sua representação pela figura 3.2.

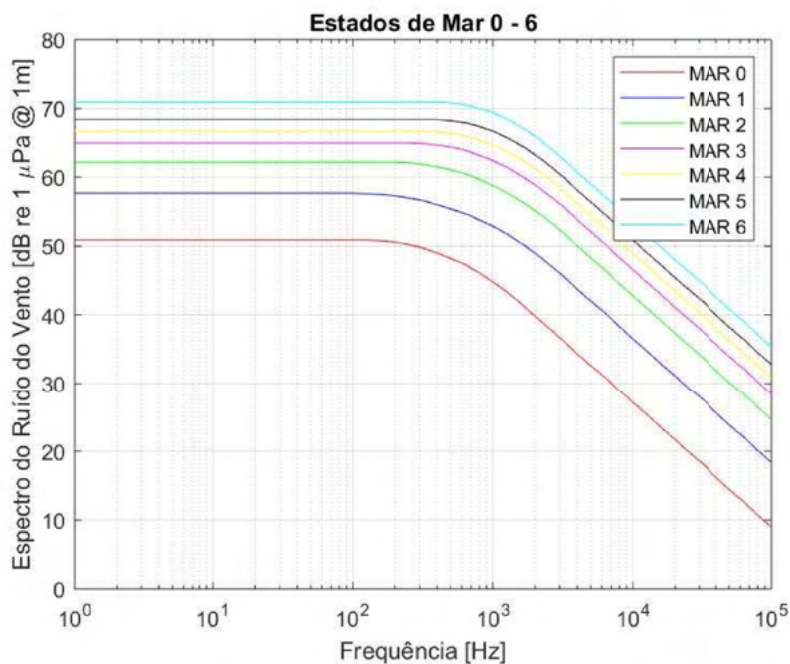


Figura 3.2: Curvas de Estado do Mar gerada a partir dos dados tabelados de Hodges[4].

3.4.1 O Modelo Escolhido

Utilizando os dados de Hodges [4] foi possível gerar as curvas da figura 3.2. Entretanto, para fins de estimativa de um modelo próprio, foi necessário adequar curvas para os pontos dos dados de Hodges [4]. Para isso, surgiu a ideia de utilizar o método dos mínimo quadrados (MMQ) para chegar em um polinômio que pudesse representar cada uma das curvas.

Foram necessários ajustes para um modelo paramétrico que relacionasse os dados de saída aos dados de entrada, com um ou mais coeficientes. Neste caso foram

utilizados seis coeficientes.

Assim, o polinômio será representado pela expressão dada pela equação 3.4, em que f significa frequência:

$$\gamma = a_0 + a_1f + a_2f^2 + a_3f^3 + a_4f^4 + a_5f^5 + a_6f^6 \quad (3.4)$$

O erro médio quadrático para o ponto de dados é definido como a diferença entre o valor de resposta observado e o valor de resposta ajustado, e é identificado como o erro associado aos dados [50], que corresponde à diferença entre os dados medidos por Hodges e os obtidos pela aproximação de um polinômio de sexto grau para esses valores.

No trabalho de Torres e Costa [50] optou-se por um polinômio de terceiro grau. Entretanto, para os estado de mar avaliados de 0 - 6, o erro médio quadrático foi mais alto usando um polinômio de terceiro grau do que com o uso de um polinômio do sexto grau. Na figura 3.6 podemos observar o ocorrido para um estado de mar 3.

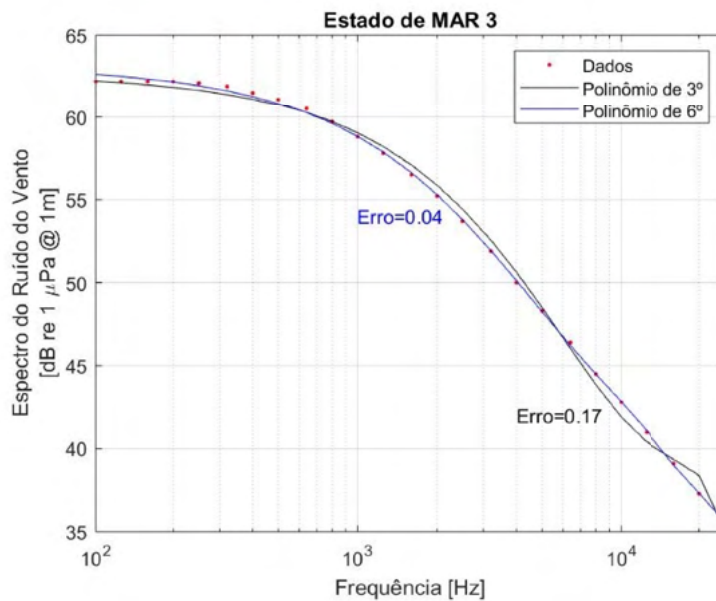


Figura 3.3: Polinômios de terceiro e sexto graus para um estado de MAR 3

Podemos observar como será representada a matriz. O desenvolvimento dos cálculos podem ser observados no apêndice A.

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f_1 & f_1^2 & f_1^3 & f_1^4 & f_1^5 & f_1^6 \\ 1 & f_2 & f_2^2 & f_2^3 & f_2^4 & f_2^5 & f_2^6 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & f_n & f_n^2 & f_n^3 & f_n^4 & f_n^5 & f_n^6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_6 \end{pmatrix}$$

O resultado do processo de adaptação é uma aproximação em que cada estado de mar terá uma função específica como aponta a tabela 3.4, os dados utilizados de frequência foram de 100Hz a 25.000Hz, e podem ser visualizados no apêndice B.

Tabela 3.4: Função correspondente para cada Estado de Mar

Estado de Mar	Altura das Ondas* (m)	Velocidade do Vento* (m/s)	Função Polinomial para cada Estado de Mar	Erro Quadrático Médio
0	0	0.75	$0.66z^6 - 7.63z^5 + 31.91z^4 - 59.02z^3 + 47.23z^2 - 19.29z + 25.75$	0.01638
1	0.15	2.5	$0.49z^6 - 5.67z^5 + 24.04z^4 - 45.66z^3 + 39.12z^2 - 19.44z + 35.74$	0.00487
2	0.46	4.4	$0.35z^6 - 4.18z^5 + 18.11z^4 - 35.88z^3 + 33.72z^2 - 19.99z + 42.46$	0.02727
3	0.91	6.9	$0.28z^6 - 3.36z^5 + 14.85z^4 - 30.45z^3 + 30.60z^2 - 20.21z + 52.24$	0.04880
4	1.8	9.8	$0.22z^6 - 2.74z^5 + 12.43z^4 - 26.51z^3 + 28.48z^2 - 20.45z + 49.06$	0.06447
5	3.2	12.6	$0.20z^6 - 2.51z^5 + 11.51z^4 - 24.98z^3 + 27.62z^2 - 20.54z + 56.54$	0.07850
6	5.0	19.3	$0.19z^6 - 2.38z^5 + 11.01z^4 - 24.20z^3 + 27.24z^2 - 20.63z + 51.10$	0.08720

*Valores usados da *World Meteorological Organization* -WMO [4]

$$z = \frac{F - \kappa}{\sigma} \quad (3.5)$$

Onde F é a frequência, $\kappa=4877.8$, $\sigma=6818.2$, e z é dado pela equação 3.5.

No exemplo abaixo, figura 3.4, podemos observar as curvas de Knudsen para diferentes estados de mar com as curvas obtidas através da tabela 3.4.

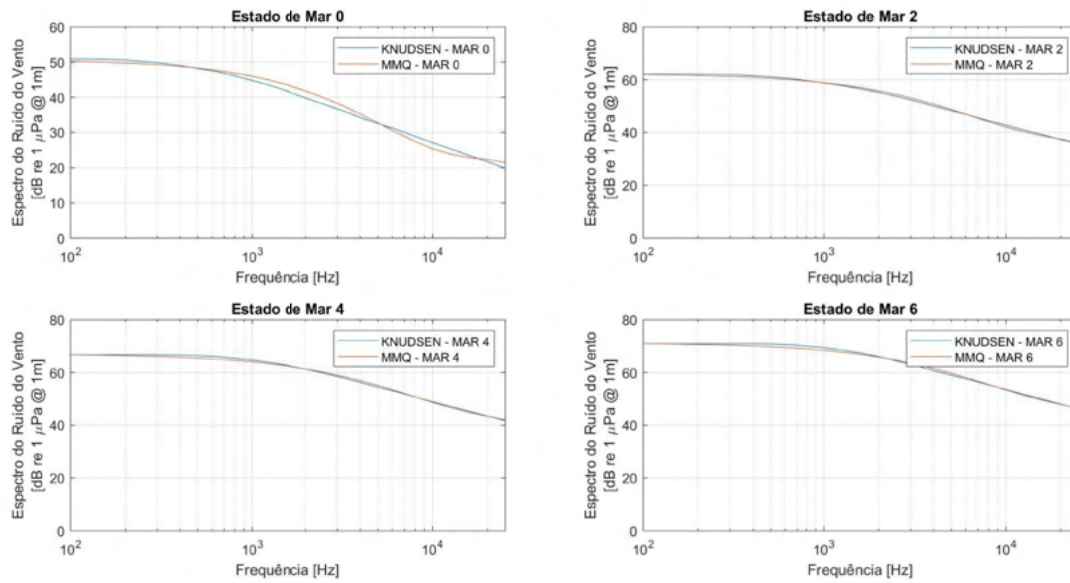


Figura 3.4: Curvas de Knudsen versus Modelo Polinomial

3.4.2 Adequação para o modelo

Assim como nos trabalhos de Urick [7], Wenz [8] e Ramji et al. [11], somente após a comparação dos dados de uma dada localidade poderá ser ponderado realizar ajustes nas curvas. Assim sendo, nos capítulos seguintes serão discutidas e aperfeiçoadas as curvas de ruído/frequência para uma região específica.

Capítulo 4

Projeto para a Coleta de Dados em Águas Rasas

4.1 Perfilador Acústico de Queda Livre

Com o objetivo de coletar dados de uma determinada região, e com a escassez de informações acústicas de nossas águas, quando comparado a outros oceanos, surgiu a necessidade de obtenção de dados locais.

Diante de tal desafio, o Laboratório de Instrumentação Oceanográfica - LIOc coordenado pelo Professor Carlos Eduardo Parente, idealizou um instrumento de queda livre, e *self-contained*, que fosse capaz de medir o ruído ambiente e que operasse até 200 m de profundidade, gravando o ruído ambiente ao longo da coluna de água, e, principalmente, explorando as características da paisagem acústica da plataforma continental brasileira.

Além disso, que pudesse ser utilizado como um instrumento de apoio para medições de ruídos irradiados por navios em raias acústicas, ou outros equipamentos que alterem a paisagem acústica, como por exemplo plataformas de exploração de petróleo, sonares ativos, dragagens, e etc.

4.1.1 Características do Perfilador Acústico de Queda Livre

Para concepção deste projeto era necessário considerar algumas necessidades prementes, como observar as curvas de Wenz, figura 2.5, e determinar um mínimo a ser captado pelo hidrofone. Assim sendo, o estado de mar zero estaria compreendido entre 20 e 40 dB re $1\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ nas frequências de 1 a 10 kHz. E uma resposta em frequência de 10 Hz a 25 kHz, com uma taxa de amostragem de 50 kHz, atenderiam as demandas de dados para a pesquisa.

Inicialmente o LIOc possuía 2 opções de hidrofones a saber:

- Frequência de Ressonância em 70 kHz:

- Spherical transducer D70 (NEPTUNE SONAR *LIMITED*®)

Frequência de Ressonância em 140 kHz:

- Spherical transducer D140 (NEPTUNE SONAR *LIMITED*®)

Logo, como a frequência máxima do sinal a ser adquirido é de 25 kHz, optou-se pelos D70, figura 4.1, que possuem resposta “mais plana” em baixas frequências que os D140, de acordo com o manual do fabricante [51].

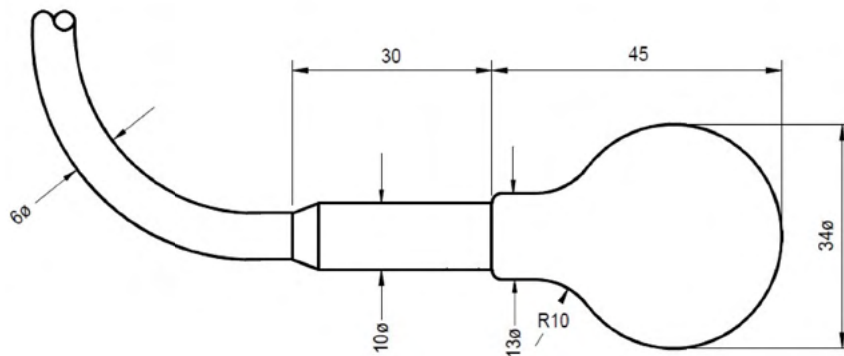


Figura 4.1: Spherical Transducer D70 [49].

O gravador escolhido foi o TASCAM *DR – 40X*® que atende prontamente a missão do projeto. Com algumas das características a seguir: taxa de amostragem e a faixa de frequência (máxima de 96 kHz @ 24 bits, estéreo) gravado em formato WAV em cartão SD. Autonomia nominal de 17 horas contínuas de gravação; com filtros passa-alta de 40, 80, 120 e 220 Hz [52]; e, um cartão de memória de alto desempenho com capacidade de memória de 128 GB.

Analisando o valor de fundo de escala do gravador no volume máximo de captação

$$FS = 5,7 V_{pp} = 2,0 V_{RMS} \quad (4.1)$$

Cálculo do erro de quantização, considerando a gravação a 24 bits, ocorre uma mínima tensão possível de ser lida dada pela equações 4.2 e 4.3

$$Erro = \frac{2V_{RMS}}{2^{24} - 1} = 1,19 \cdot 10^{-7} V_{RMS} \quad (4.2)$$

$$Erro(dB) = 20 \log(1,19 \cdot 10^{-7}) = -138,5 \text{ dBV}_{RMS} \quad (4.3)$$

Por intermédio da informação presente no manual do fabricante [51], figura 4.2, em relação à curva de resposta passiva do transdutor, podemos observar a sensibilidade do hidrofone.

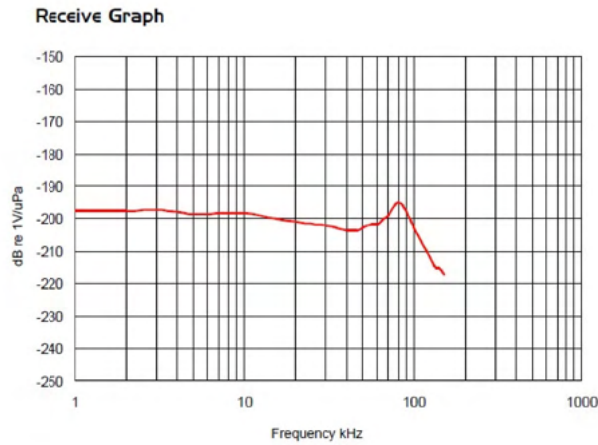


Figura 4.2: Curva de sensibilidade, retirado de [51]

Então, podemos identificar sinais com limiar de detecção (DT), no mínimo de:

$$DT = -138,5 + 200 = 61,5 \text{ dB} \quad (4.4)$$

Como essa sensibilidade estaria acima do estado de mar zero, 20 a 40 dB nas frequências de 1 a 10 kHz, surgiu, então, a necessidade de usar um pré-amplificador conectado diretamente ao hidrofone. Após alguns testes o pré-amplificador escolhido, e disponível, foi o de 60 dB, tornando possível captar o estado de mar zero, como mostra a equação 4.5.

$$DT = -138,5 - 60 + 200 = 1,5 \text{ dB} \quad (4.5)$$

O vaso de armazenamento do conjunto foi um cilindro de aproximadamente 79 mm de diâmetro e 290 mm de altura.



Figura 4.3: Protótipo do Perfilador Acústico de Queda Livre

Adaptações foram feitas na estrutura a fim de melhorar a hidrodinâmica, e reduzir o ruído gerado pelo fluxo de água que passa pela carenagem do equipamento, *flow noise*. Além disso, possui uma hélice com três pás a qual possibilita uma velocidade constante de queda, e ainda, aletas estabilizadoras no corpo do Perfilador evitam o giro em torno do seu próprio eixo.

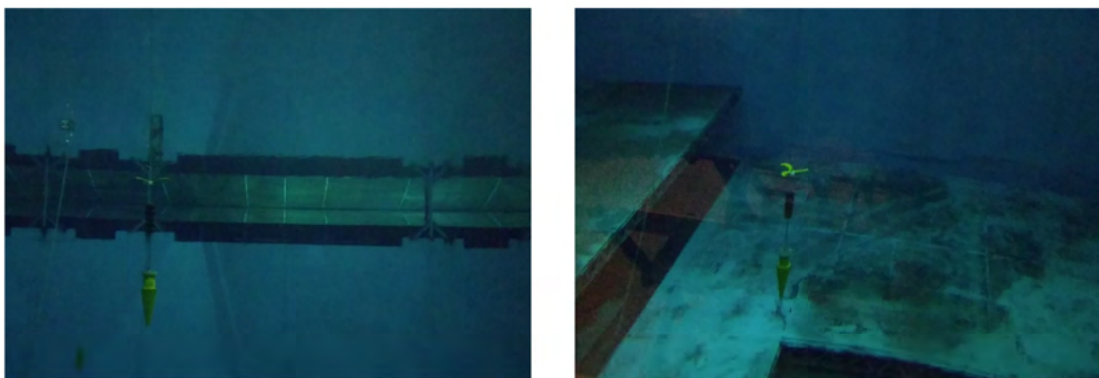


Figura 4.4: Protótipo do Perfilador Acústico de Queda Livre no LabOceano

Uma das suas vantagens é a viabilidade de ser operado a partir de pequenas embarcações, necessitando, somente de duas pessoas para realizar o lançamento. Conta com a possibilidade de acoplar um sensor de temperatura para determinar o perfil da velocidade do som - PVS.

Desacoplado da embarcação do lançamento, e sendo a queda por ação da gravidade, sua aceleração ocorre até que as forças de resistências se igualem ao seu peso, o que ocorre no primeiro metro de sua queda, passando então, a cair com velocidade constante, velocidade terminal, e aceleração praticamente nula, como apontado por C. Ribeiro[53].

Ensaio no LabOceano, e no mar, apontaram uma velocidade de queda de aproximadamente 1,0 m/s, tornando satisfatório o seu tempo de descida para análise acústica. E, por meio do sensor *RBR*®, acoplado ao Perfilador, foi possível uma melhor análise da velocidade de queda, conforme indica a figura 4.5.

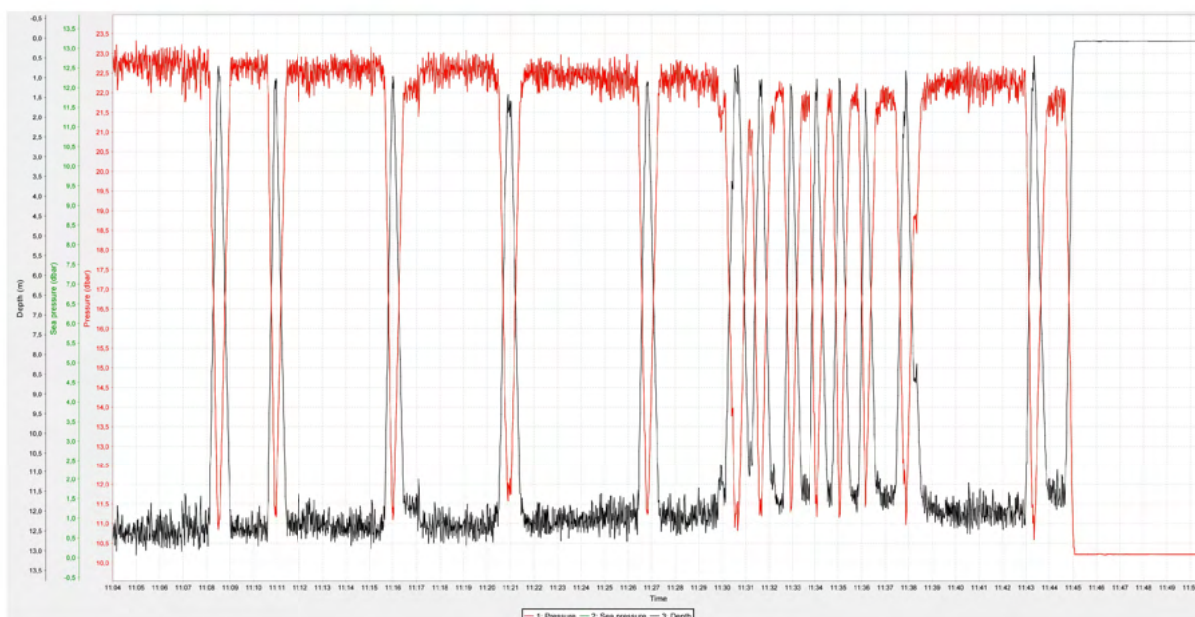


Figura 4.5: Curva de queda livre do Perfilador Acústico. No eixo vertical profundidade e no eixo horizontal tempo.

A fim de assegurar uma correta coleta de dados, o instrumento foi calibrado pelo Departamento de Sistemas Acústicos do Instituto de Pesquisas da Marinha do Brasil, localizado no Rio de Janeiro.

A medição de ruído próprio do equipamento ocorreu no LabOceano-COPPE. Contudo, o ruído do tanque na sua condição silenciosa é superior ao ruído próprio do Perfilador Acústico.

Observando as curvas das medições realizadas, figura 4.6, verifica-se que para frequências menores que 1500 Hz o ruído próprio do tanque do LabOceano não permitiu concluir se o ruído próprio do Perfilador Acústico irá, ou não, influenciar significativamente nas medições de campo.

Entretanto, mesmo sendo o tanque do LabOceano de características acústicas, para as baixas frequências, ruidoso, ainda assim, tal fato não compromete o desem-

penho do equipamento para as médias e altas frequências, haja vista o ruído do tanque está abaixo da curva de Knudsen [6] para mar zero, conforme é mostrado na Figura 4.6.

Não obstante, podemos ainda correlacionar para um tanque de condições acústicas ideais, para o experimento do Perfilador Acústico, uma relação de 7 dB a menos para o teste estático quando comparado ao teste dinâmico, queda livre [4].

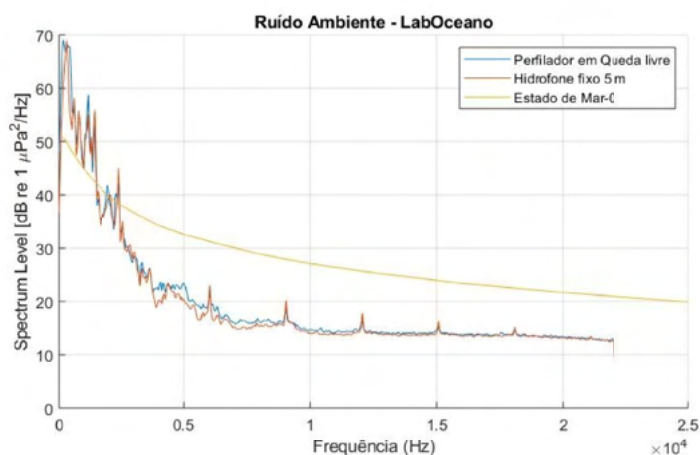


Figura 4.6: Curva do Perfilador Acústico em Queda Livre, Estático e Curva de Knudsen[6] para Mar Zero.

Outrossim, cabe ressaltar, que podemos inferir que pela curva estática ser equivalente a curva dinâmica, figura 4.6, podemos concluir que o ruído próprio do equipamento não foi superior ao ruído do tanque.

4.2 Metodologia da Coleta dos Dados

O hidrofone apresentou uma resposta plana para a sensibilidade -199,68 dB para a faixa de 1 a 22 kHz, o formato da gravação utilizado foi a extensão .wav em 24 bit, com um ganho do pré-amplificador de 60 dB, e utilizou-se um filtro passa alta de 220 Hz.

Parte dos dados analisados foram coletados durante o dia 31 de janeiro de 2021 das 07:00 às 15:00 horas, nas proximidades da ilha Rasa-RJ, LAT 22 59.76°S e

LONG 043 09.60°W. Foram realizados experimentos de campo a bordo do veleiro Akanni.



Figura 4.7: Local do experimento de campo realizado em 31 de Janeiro de 2021, figura adaptada do Google Maps.

Durante a campanha foram realizadas medições estáticas e dinâmicas com o Perfilador Acústico, os resultados apresentados são de medições estáticas. As medições estáticas ocorreram a 15 metros (h), e a profundidade local era cerca de 30 metros (H), conforme ilustra a figura 4.8.

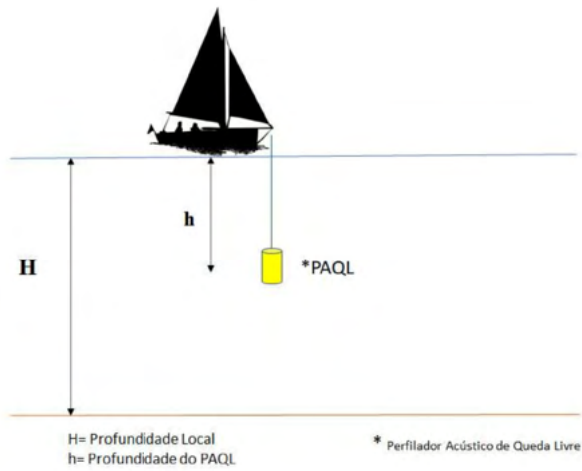


Figura 4.8: Imagem ilustrativa da realização do experimento de campo.

As condições ambientais dos dias foram registradas pela boia meteoceanográfica RJ-3 do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira - SiMCosta.

4.2.1 Condições Iniciais

Para o dia do experimento de campo alguns dos fatores que compõem a velocidade do som foram extraídos da boia RJ-3 do SiMCosta, e é possível analisá-los nas figuras a seguir.

Em relação à temperatura da superfície da água existiam dois sensores coletando dados da boia, como podemos observar na figura 4.9 e 4.10.

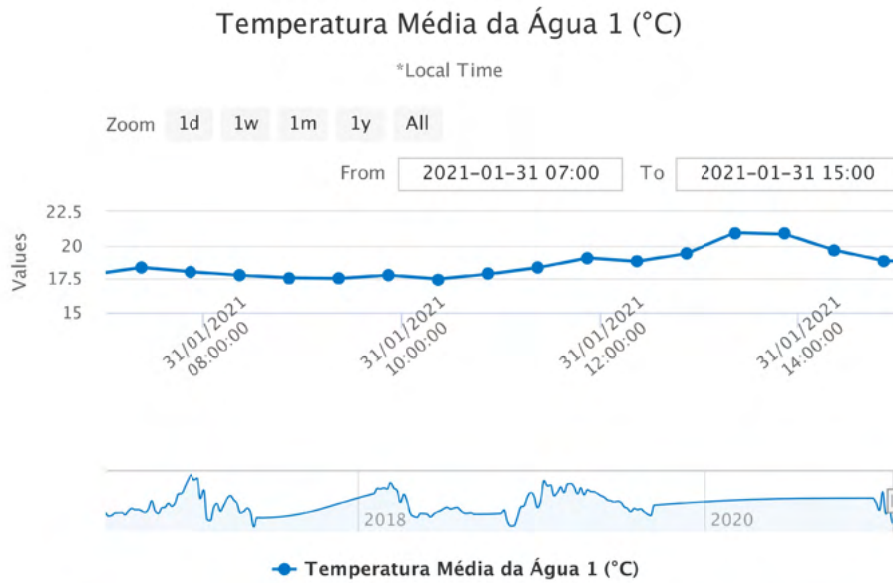


Figura 4.9: Temperatura da superfície da água, sensor 1, da Boia RJ-3 durante campo em 31-01-2021. Fonte : <http://www.simcosta.furg.br/home/> (2021).

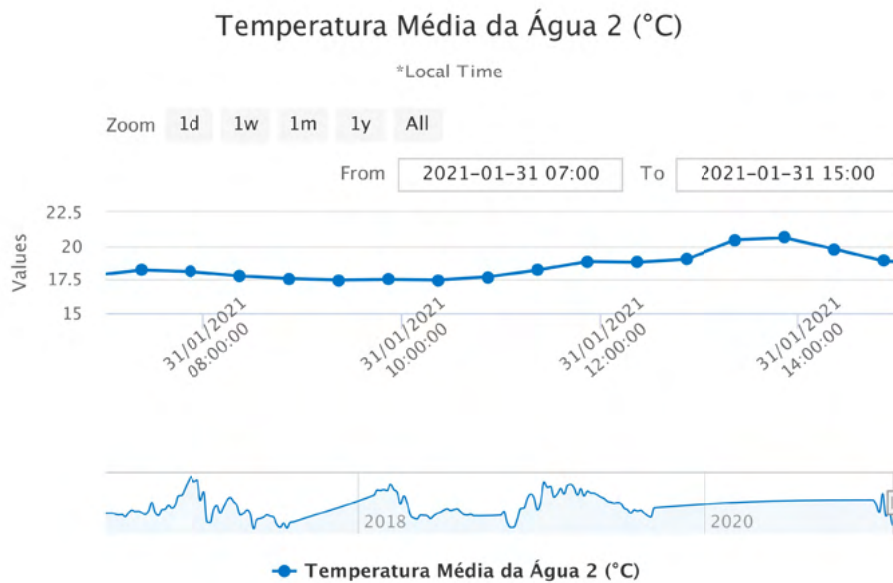


Figura 4.10: Temperatura da superfície da água, sensor 2, da Boia RJ-3 durante campo em 31-01-2021. Fonte : <http://www.simcosta.furg.br/home/> (2021).

Para os horários da coleta dos dados relativos ao vento local captado pelo Perfilador Acústico, a salinidade não apresentou uma variação significativa a ponto de alterar o resultado do experimento.

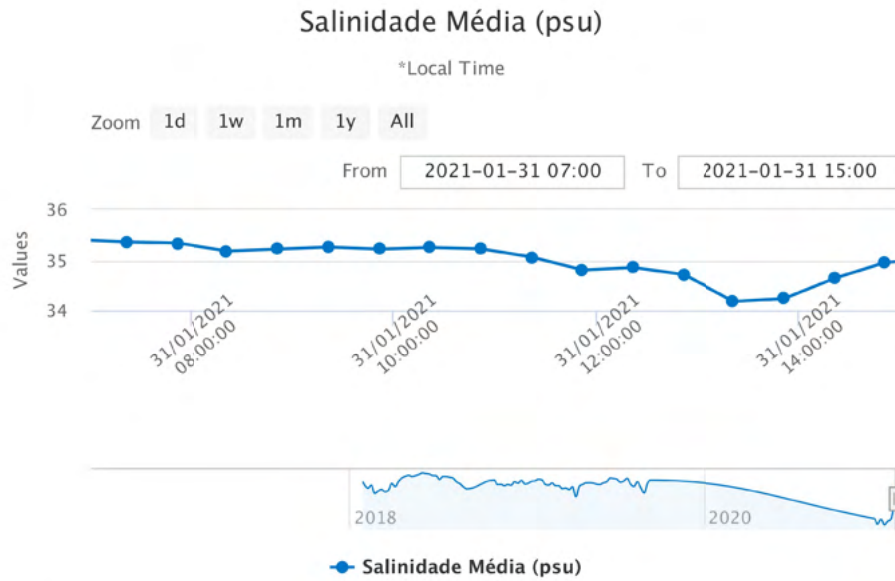


Figura 4.11: Salinidade da água Boia RJ-3 durante campo em 31-01-2021. Fonte : <http://www.simcosta.furg.br/home/> (2021).

Como observado no dia do experimento de campo, e posteriormente constatado pelo Sistema Alerta RIO - Dados Pluviométricos - Copacabana e Rocinha, não houve a ocorrência de precipitação no local durante a campanha.

Os dados das condições do vento foram coletados da boia RJ-3 SiMCosta, e estão representados na figura 4.12.

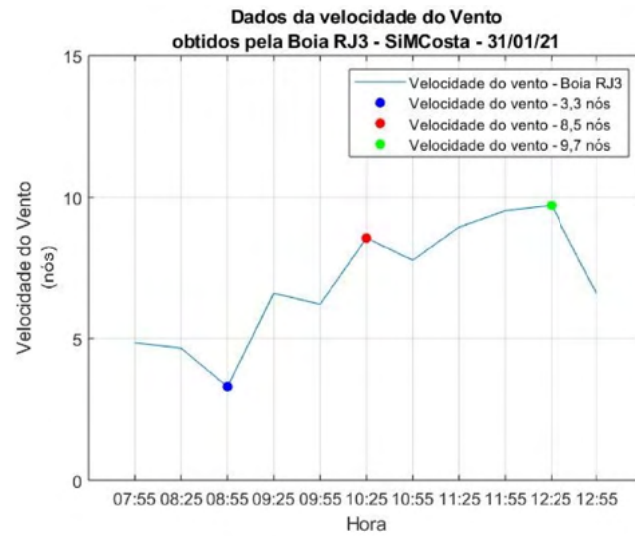


Figura 4.12: Dados de vento obtidos pela boia RJ3 - SiMCosta para 31-01-2021.

Os resultados e comparações serão discutidos no capítulo 5.

Capítulo 5

Análise dos resultados

5.1 Resultado do Experimento de Campo

5.1.1 Análise das curvas

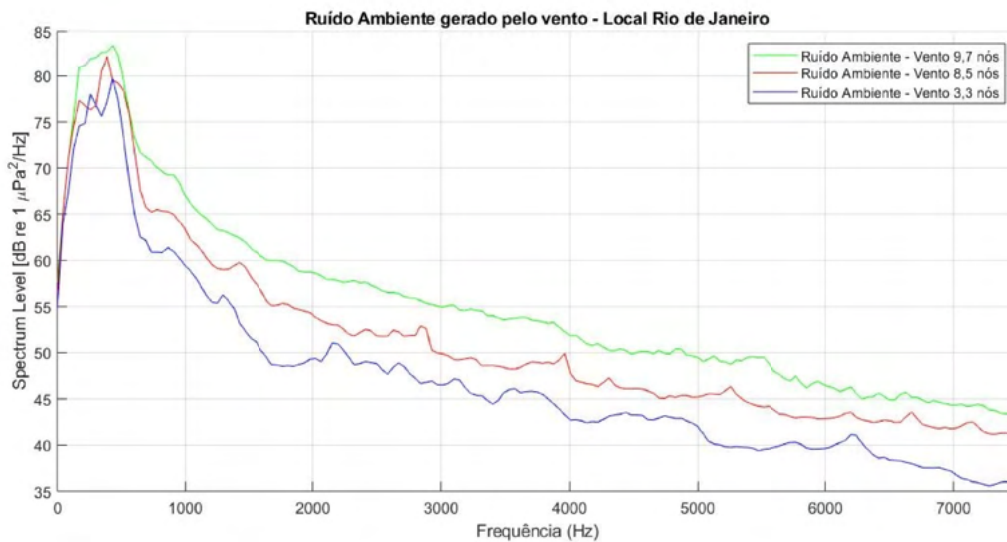


Figura 5.1: Ruído Ambiente gerado pelo vento durante o experimento de campo realizado no Rio de Janeiro em 31 janeiro de 2021.

Para uma melhor análise das curvas, oriundas das medições estáticas, as frequências serão divididas em duas partes. A primeira compreenderá até a frequência de 1000 Hz, e a segunda será para as frequências de 1000 a 7500 Hz.

5.1.2 Frequências até 1000 Hz

Para baixas frequências, menores que 1 kHz, era esperada uma grande influência do tráfego marítimo, conforme propôs G. M. Wenz[8]. Nessa faixa notamos pela figura 5.2 um aumento do ruído ambiente para as frequências menores de 700 Hz.

Esse efeito justifica-se não apenas pelo intenso tráfego marítimo de toda a região das proximidades do porto do Rio de Janeiro, como também pela proximidade da área de costa.

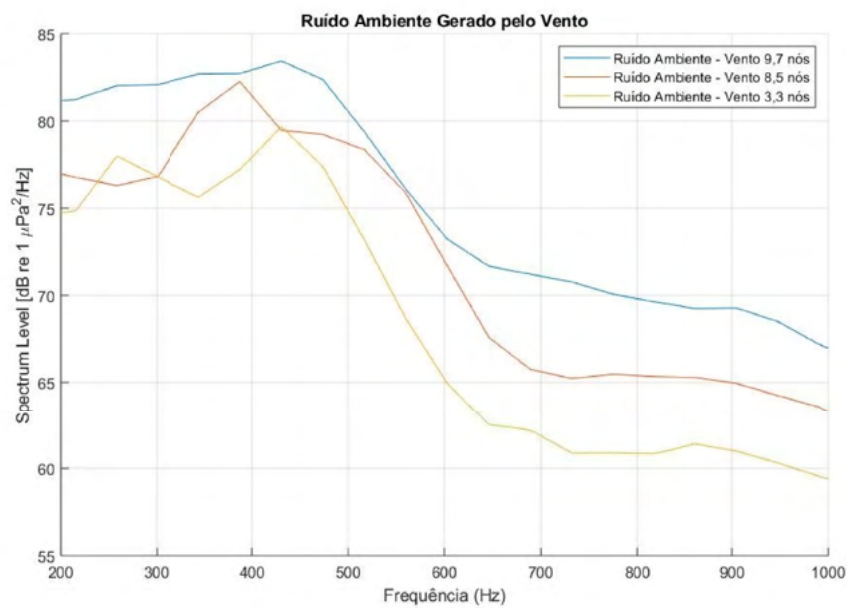


Figura 5.2: Curvas dos ruídos gerados pelos ventos até 1000 Hz.

5.1.3 Frequências de 1000 a 7500 Hz

Para essa faixa de frequências, onde não ocorre uma influência significativa do tráfego marítimo [8], podemos observar na figura 5.3 que quanto maior for a velocidade do vento, maior será o ruído gerado, assim como investigado por Knudsen [6].

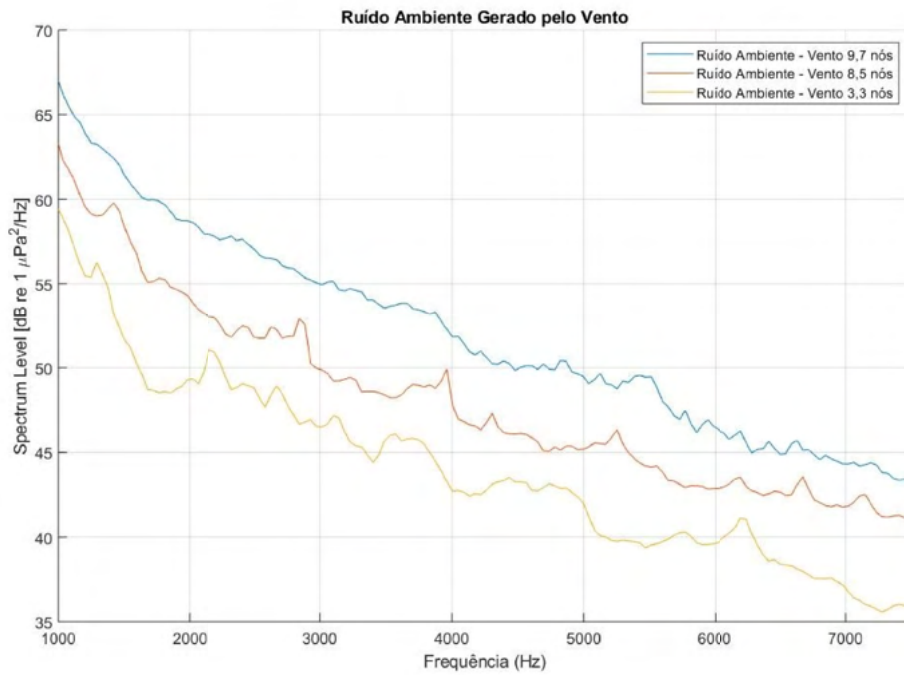


Figura 5.3: Curvas dos ruídos gerados pelos ventos de 1000 a 7500 Hz.

É possível observar na figura 5.4 que o aumento da velocidade do vento aumenta o ruído nas diferentes frequências. E, quanto mais altas forem as frequências associadas ao vento, menores serão os ruídos correlacionados. Neste caso, as baixas frequências tendem a ser mais ruidosas, principalmente, em dos função do fatores águas rasas e proximidade do porto do Rio de Janeiro.

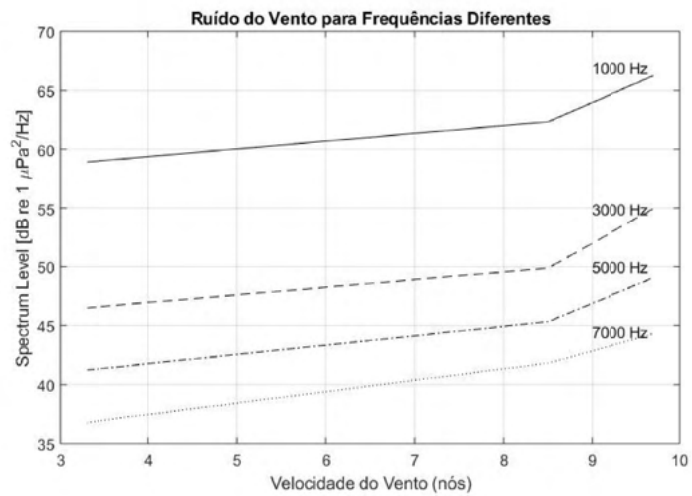


Figura 5.4: Curvas de diferentes frequências correlacionadas com o aumento da velocidade do vento.

5.2 Comparação com as Curvas de Knudsen

Podemos observar na figura 5.5 o modelo das curvas de knudsen e o das curvas geradas pelo ruído da intensidade do vento coletados no experimento de campo para a faixa de frequências entre 200 a 7500 Hz.

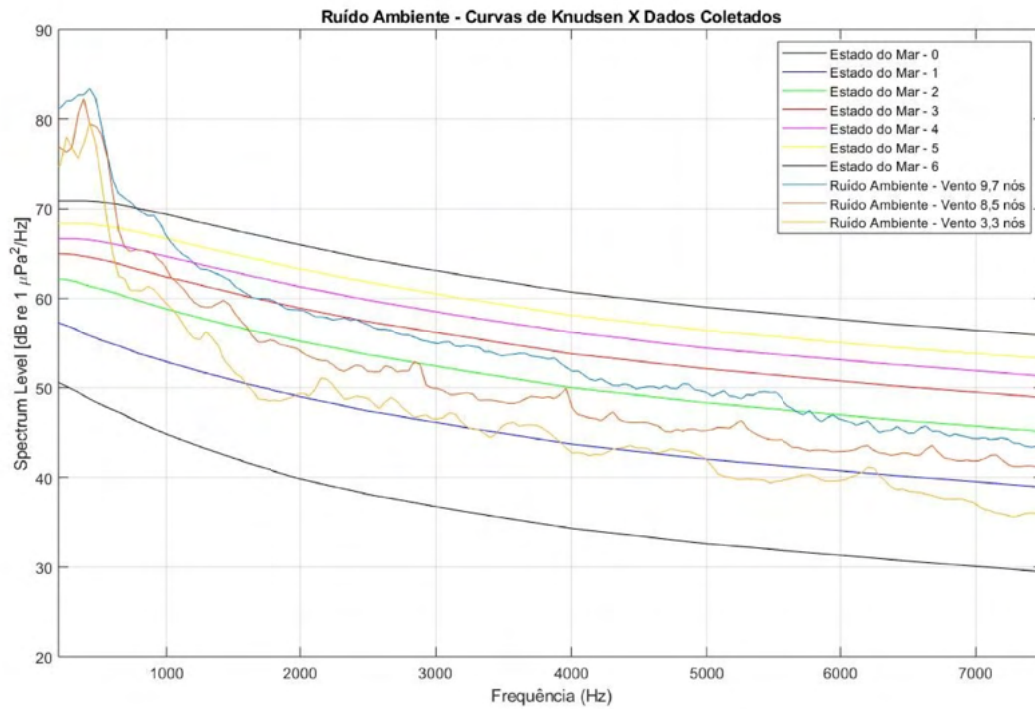


Figura 5.5: Ruído ambiente gerado pelo vento comparação das curvas de Knudsen[6] com os dados coletados.

Os resultados apresentaram boa correlação para a faixa de frequência entre 1000 a 7500 Hz, quando comparadas ao modelo proposto por Knudsen, conforme aponta o coeficiente de correlação entre o modelo das curvas de Knudsen e as curvas obtidas com os dados coletados, conforme expresso na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Coeficiente de correlação entre o modelo das curvas de Knudsen e as curvas obtidas com os dados coletados.

Estado de Mar de acordo com o modelo das curvas de Knudsen	Intensidade do vento de acordo com os dados coletados (nós)	Coeficiente de correlação
MAR 1	3,3	0,9961
MAR 2	8,5	0,9898
MAR 3	9,7	0,9828

Para frequências menores que 1000 Hz, como já era esperado, devido à pouca profundidade e o intenso tráfego marítimo local, as frequências mais baixas evidenciaram ruídos mais elevados.

5.3 Modelo para Águas Rasas

Antes de iniciarmos a modelagem, é pertinente neste ponto ressaltar que um dos objetivos desse trabalho é poder estimar o estado de mar pela ação do ruído gerado pelo vento local. Sendo assim, modelos que não demandem grandes recursos computacionais e tenham boa velocidade de resposta são mais desejáveis à modelos precisos que custem maior capacidade computacional e tempo de resposta.

Por meio da análise dos dados coletados dos ruídos ambientes gerados pelos ventos para a faixa de frequências de 1000 a 7500 Hz, obtém-se, por intermédio de uma regressão linear, uma curva que se ajuste para cada velocidade de vento, correspondendo assim a um estado de mar da localidade explorada.

Tabela 5.2: Função correspondente para cada Estado de Mar observado

Estado de Mar	Altura das Ondas(m)*	Velocidade do Vento(nós)*	Função correspondente para o Estado de Mar 1 a 3	Coefficiente de Determinação- R^2
1	0,15	1,4 - 4,8	$-0,0031x + 65$	0,9713
2	0,46	5,0 - 8,5	$-0,0028x + 59$	0,9190
3	0,91	8,6 - 13,2	$-0,0028x + 56$	0,9307

*Valores adaptados da *World Meteorological Organization-WMO* [4]

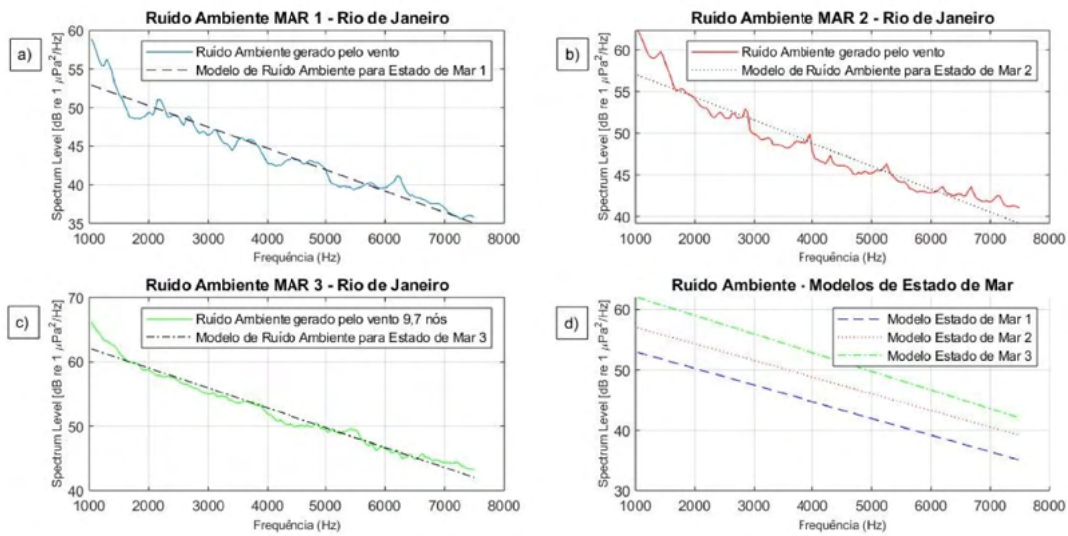


Figura 5.6: Ruído ambiente gerado pelo vento para Estado de Mar 1/ 2/ 3 - Modelos para Estado de Mar 1/ 2/ 3.

De forma mais cautelosa, e por não ter até o presente momento dados sólidos de Estado de Mar maiores que 3, para o mesmo local explorado, neste trabalho optou-se por uma postura mais conservadora, e decidiu-se por não prever um modelo para maiores velocidades do vento, com base apenas nas estimativas dos estados de mar anteriores, em virtude de não poder prever o Coeficiente de Determinação- R^2 associado à curva real observada em experimento de campo.

Capítulo 6

Considerações e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Devido à escassez de dados para o litoral brasileiro, aliado à dificuldade de coleta e as despesas envolvidas no processo, o Perfilador Acústico de Queda Livre é uma opção viável e de baixo custo.

Como averiguado no capítulo anterior, os resultados preliminares são promissores, uma vez que os testes iniciais apontaram de forma favorável a utilização do equipamento na medição do ruído ambiente. O aumento da velocidade do vento esteve diretamente associado com o acréscimo do ruído gerado, tal como observou Knudsen [6].

Os fatores águas rasas e a proximidade do porto do Rio de Janeiro foram perceptíveis, mas não comprometeram o resultado. Contudo, diferentes condições ambientais e regionais ainda devem ser exploradas, a fim de aperfeiçoar o modelo de representação do espectro de mar local para o estado de mar da costa do Rio de Janeiro, e de todo o litoral brasileiro.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A viabilidade e a multiplicidade de novos projetos correlacionados ao projeto Perfilador Acústico de Queda Livre e suas aplicações podem gerar novas possibilidades de pesquisas, tais como:

- Incorporar um sensor de temperatura para obtenção de perfis de propagação do som, e conhecendo-se o perfil de temperatura com a profundidade poder estimar a salinidade local, ou ainda, inserir um sensor de condutividade para determinar a salinidade e obter o perfil acústico local;
- Alimentar os sistemas de combate de submarinos com dados a cerca do estado do mar, obtidos por metodologias similares às aplicadas neste trabalho, a fim de

melhorar a probabilidade de acerto do tiro torpédico, ou ainda, subsidiar a tomada de decisão durante um retorno à cota periscópica;

- Correlacionar índice pluviométrico ao ruído gerado pela chuva para determinada localidade;
- Medir o ruído irradiado de navios navegando nas proximidades da costa brasileira, principalmente na plataforma continental brasileira;
- Usar em medições de ruído irradiado na Raia Acústica de Arraial do Cabo-RJ, e em uma raia acústica móvel;
- Usar o Perfilador Acústico como um array vertical de abertura sintética; e
- Usar o Perfilador na localização de mamíferos, a partir da gravação de sinais ao longo da queda.

Referências Bibliográficas

- [1] BRASIL. *Introdução à História Marítima Brasileira*. Rio de Janeiro, Serviço de Documentação da Marinha, 2006.
- [2] JENSEN, F. B., A., W., KUPERMAN, et al. *Computational Ocean Acoustics*. 2 ed. New York, USA, Springer, 2011.
- [3] CLAY, C. S., MEDWIN, H. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. 1 ed. San Diego, CA, USA, Academic Press, 1998.
- [4] HODGES, R. P. *Underwater Acoustics: analysis, design and performance of sonar*. 2 ed. West Sussex, United Kingdom, Wiley, 2010.
- [5] CAREY, W. M., EVAINS, R. B. *Ocean Ambient Noise*. 1 ed. North Stonington, USA, Wiley, 2011.
- [6] KNUDSEN, V. . “Underwater Ambient Noise”, *Journal of Marine Research*, 1948.
- [7] URICK, R. J., PRYCE, A. W. *A Summary of Underwater Acoustic Data*. Office of Naval Research, 1954.
- [8] WENZ, G. M. “Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources”, *The Journal of The Acoustical Society of America*, 1962.
- [9] URICK, R. J. *Ambient Noise In The Sea*. Washington, D.C. 20362, USA, Naval Sea Systems Command, 1984.
- [10] SVEIN VAGLE, WILLIAM G. LARGE, D. M. F. “An Evaluation of the WOTAN Technique of Inferring Oceanic Winds from Underwater Ambient Sound”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990.
- [11] RAMJI, S., LATHA, G., RAJENDRAN, V., et al. “Wind dependence of ambient noise in shallow water of Bay of Bengal”, *Applied Acoustics 69 (2008) 1294–1298*, 2007.

- [12] URICK, R. J. *Principles of Underwater Sound*. 3 ed. Washington, D.C, USA, McGraW Hill, 1983.
- [13] RAICHEL, D. R. *The science and applications of acoustics*. 1 ed. Fort Collins, USA, pringer Science and Business Media, 2006.
- [14] WAITE, A. D. *Sonar for Practising Engineers*. John Wiley and Sons Incorporated, 2002.
- [15] MEDWIN, H. "Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters", *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1975.
- [16] MACKENZIE, K. V. "Discussion of sea water sound-speed determinations", *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1981.
- [17] ETTER, P. C. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. 3 ed. London, Spon Press, 2003.
- [18] FISHER, F. H., SIMMONS, V. P. "Sound Absorption in Sea Water", *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1977.
- [19] BRADLEY, D. L., STERN, R. *Underwater Sound and the Marine Mammal Acoustics Enviroment- A Guide to Fundamental Principles*. U. S. Marine Mammal Commission, 2008.
- [20] NRC. *Ocean Noise and Marine Mammals by Committee on Potential Impacts of Ambient Noise in the Ocean on Marine Mammals*. The Nacional Academies Press, 2003.
- [21] FRANZ, G. J. "Splashes as Sources of Sound in Liquids", *The Journal of The Acoustical Society of America*, 1958.
- [22] BURDIC, W. S. *Underwater Acoustic System Analysis*. 2 ed. New Jersey, Prentice Hall, 1991.
- [23] YOUNG, I. R. *Wind Generated Ocean Waves*. 2 ed. Oxford, UK, Elsevier, 1999.
- [24] HASSELMANN, K., ET. AL. *Measurements of Wind Wave Growth and Swell Decay During The Joint North Sea Wave Project JONSWAP*. Hamburg, Deutsches Hydrographics Institut, 1973.
- [25] MILES, J. W. *On the Generation of Surface Waves by Shear Flows*. Los Angeles, Department of Engineering, University of California, 1957.

- [26] PHILLIPS, O. M. *On the Generation of Waves by Turbulent Wind*. Cambridge, St. John's College, 1957.
- [27] PIERSON, W. J., MOSKOWITZ, L. "A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodski", *Journal of Geophysical Research*, 1964.
- [28] KERMAN, B. R. *Sea Surface Sound Natural Mechanisms of Surface Generated Noise in the Ocean*. Toronto, Canada, Atmospheric Environment Service, 1987.
- [29] KITAIGORODSKI, S. A. "Applications of the Theory of Similarity to the Analysis of Wind-Generated Wave Motion as a Stochastic Process", *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*.
- [30] NYSTUEN, J. A., BARRY, M. "Using ambient sound to passively monitor sea surface processes". In: *Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC)*, Bali, Indonesia, pp. 3–6, 2002.
- [31] ZIMAN, J. *Reliable knowledge An Exploration of the Grounds for Belief in Science*. 3 ed. New York, Cambridge University Press, 1996.
- [32] DE SOUSA COSTA, E., MEDEIROS, E. B. "Numerical Modeling and Simulation of Acoustic Propagation in Shallow Water", *Mecánica Computacional*, 2010.
- [33] HOVEM, J. M. *Ray Trace Modeling of Underwater Sound Propagation - Reliable knowledge An Exploration of the Grounds for Belief in Science*. IntechOpen, 2013.
- [34] HUANG, J. *Simulation and Modeling of Underwater Acoustic Communication Channels With Wide Band Attenuation and Ambient Noise*. Tese de Mestrado, Carleton University, 2010.
- [35] DE SOUSA, A. V. G. *Estimação de Distância de Fontes Sonoras no Mar Com-Técnicas Acústicas Passivas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- [36] LEONTOVICH, M. "Fock Parabolic Equation Method in Problems of Short-Wave Diffraction by Prolate Bodies", *Journal of Mathematical Sciences*, 2013.

- [37] HARDIN, R., TAPPERT, F. “Applications of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations”, *Society for Industrial and Applied Mathematics SIAM Review*, , n. 15, pp. 423, 1973.
- [38] LIU, J. Y., HUANG, C. F. “Surface Generated Noise in an Ocean Waveguide With a transition Layer of Continuously Varying Density and Sound Speed”, *Journal of Computational Acoustics*, 1999.
- [39] CRON, B. F., SHERMAN, C. H. “Spatial-Correlation Functions for Various Noise Models”, *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1962.
- [40] TALHAM, R. J. “Ambient-Sea-Noise Model”, *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1964.
- [41] KUPERMAN, W. A., INGENITO, F. “Spatial Correlation of Surface Generated Noise in a Stratified Ocean”, *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1980.
- [42] CAVANAGH, R. C., RENNER, W. W. “Vertical directionality and depth dependence of averaged acoustic signals and noise”, *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1980.
- [43] HARRISON, C. H. “CANARY: A Simple Model of Ambient Noise and Coherence”, *Applied Acoustics*, 1997.
- [44] PERKINS, J. S., KUPERMAN, W. A., ET. AL. “Modeling Ambient Noise in Three-Dimensional Ocean Environments”, *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1993.
- [45] HAMSON, R. M. “The Modelling of Ambient Noise due to Shipping and Wind Sources in Complex Environments”, *Applied Acoustics*, 1997.
- [46] CROUCH, W. W., BURT, P. J. “The Logarithmic Dependence of Surface-Generated Ambient-Sea-Noise Spectrum Level on Wind Speed”, *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1971.
- [47] CATO, D. H., TAVENER, S. “Ambient Sea Noise Dependence on Local, Regional and Geostrophic Wind Speeds: Implications for Forecasting Noise”, *Applied Acoustics*, 2009.
- [48] KUPERMAN, W., FERLA, M. C. “A shallow water experiment to determine the source spectrum level of wind-generated noise”, *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1985.

- [49] SANTOS, A. D. *Simulado de Ruído Ambiente Acústico Submarino Para Sistema Sonar*. Tese de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, 2017.
- [50] TORRES, C., COSTA, C. “Underwater Ambient Noise – An Estimation Methodology”. In: *Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings*, 2019.
- [51] SONAR, N. *Spherical Transducers Model D/70*. <http://www.neptune-sonar.co.uk/wp-content/uploads/2016/03/Model-D70.pdf>.
- [52] *TASCAM DR-40X Linear PCM Recorder*. TEAC Corporatin, <https://tascam.com/us/product/dr-40x/download>, 2019.
- [53] RIBEIRO, C. E. P. *Instrumentos de Queda Livre Para Medição de Parâmetros Oceanográficos*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1977.
- [54] FRANCOI, R. E., GARRISON, G. R. “Sound Absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption”, *The Journal of The Acoustical Society of América*, 1982.

Apêndice A

Considerações matemáticas acerca do Método dos Mínimos Quadrados

No capítulo 3 foi necessário adequar pontos da curva, para retorno de um polinômio. E o recurso usado foi o método dos mínimos quadrados.

Assim, o polinômio será representado pela expressão dada pela equação 3.4 , em que f significa frequência e γ o nível de ruído.

$$\gamma = a_0 + a_1f + a_2f^2 + a_3f^3 + a_4f^4 + a_5f^5 + a_6f^6 \quad (\text{A.1})$$

Para iniciar a resolução usaremos uma matriz com dados de Hodges do Apêndice B

Resolvendo a matriz:

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f_1 & f_1^2 & f_1^3 & f_1^4 & f_1^5 & f_1^6 \\ 1 & f_2 & f_2^2 & f_2^3 & f_2^4 & f_2^5 & f_2^6 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & f_n & f_n^2 & f_n^3 & f_n^4 & f_n^5 & f_n^6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_6 \end{pmatrix}$$

Onde: \mathbf{a} é um vetor de coeficiente dos polinômios, \mathbf{F} é a matriz que tem como linhas o valor das frequências, e γ é o vetor com valores conhecidos de ruído ambiente.

Para resolução será utilizado uma matriz transposta a F

$$F^T \gamma = F^T F a \quad (\text{A.2})$$

Isolando os coeficientes temos:

$$a = (F^T F)^{-1} F^T \gamma \quad (\text{A.3})$$

Assim, o resíduo pode ser expresso por:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n [\gamma 1 - (a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + a_3 f^3 + a_4 f^4 + a_5 f^5 + a_6 f^6)]^2 \quad (\text{A.4})$$

Usando de recursos computacionais, neste caso o MATLAB, para resolver uma matriz de dimensões 6×25 , resultando na tabela 3.4.

Apêndice B

Dados de Referência

A tabela abaixo apresenta a relação entre frequência e nível do ruído ambiente usado como referência neste trabalho. A tabela foi adaptada de [4].

Tabela B.1: Nível de ruído gerado pelo vento, adaptado de [4]

Frequência (Hz)	SS0	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6
100,00	50,90	57,70	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
125,00	50,90	57,60	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
160,00	50,80	57,50	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
200,00	50,60	57,30	62,20	65,00	66,70	68,40	70,90
250,00	50,20	57,00	62,10	65,00	66,70	68,40	70,90
320,00	49,70	56,60	61,90	64,90	66,70	68,40	70,90
400,00	49,00	56,00	61,50	64,70	66,60	68,40	70,90
500,00	48,20	55,40	61,10	64,40	66,40	68,20	70,80
640,00	47,30	54,70	60,50	63,90	66,00	67,90	70,50
800,00	46,10	53,80	59,70	63,20	65,40	67,40	70,00
1000,00	44,80	52,90	58,80	62,40	64,70	66,70	69,40
1250,00	43,40	51,80	57,80	61,50	63,80	65,80	68,50
1600,00	41,60	50,40	56,50	60,20	62,60	64,60	67,30
2000,00	39,80	49,00	55,20	58,90	61,30	63,30	66,00
2500,00	38,10	47,40	53,70	57,40	59,80	61,80	64,40
3200,00	36,20	45,60	51,90	55,70	58,00	60,00	62,60
4000,00	34,30	43,70	50,00	53,80	56,20	58,10	60,70
5000,00	32,60	42,00	48,30	52,10	54,40	56,40	59,00
6400,00	30,80	40,20	46,40	50,20	52,60	54,50	57,10
8000,00	28,90	38,30	44,50	48,30	50,70	52,70	55,30
10000,00	27,10	36,50	42,80	46,60	48,90	50,90	53,50
12500,00	25,40	34,80	41,00	44,80	47,20	49,10	51,70
16000,00	23,40	32,80	39,10	42,90	45,20	47,20	49,80
20000,00	21,70	31,10	37,30	41,10	43,50	45,40	48,00
25000,00	19,90	29,30	35,60	39,40	41,70	43,70	46,30