



MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM ÁGUAS RASAS EM
APOIO À IMPLANTAÇÃO DE REDES DE COMUNICAÇÃO ACÚSTICA
SUBMARINA

Marcus Vinícius da Silva Simões

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Luiz Gallisa Guimarães
Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Rio de Janeiro
Março de 2018

MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM ÁGUAS RASAS EM
APOIO À IMPLANTAÇÃO DE REDES DE COMUNICAÇÃO ACÚSTICA
SUBMARINA

Marcus Vinícius da Silva Simões

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

Examinada por:

Prof. Luiz Gallisa Guimarães, D.Sc.

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.

Prof. Marcello Luiz Rodrigues de Campos, Ph.D.

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.

Prof. Alberto Garcia de Figueiredo Jr., Ph.D.

Prof. Alexandre de Freitas Azevedo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2018

Simões, Marcus Vinícius da Silva

Modelagem da Propagação Acústica em Águas Rasas em Apoio à Implantação de Redes de Comunicação Acústica Submarina / Marcus Vinícius da Silva Simões. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 86 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Luiz Gallisa Guimarães

Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 79 – 83.

1. Acústica Submarina. 2. Redes Acústicas Submarinas. 3. Modos. I. Guimarães, Luiz Gallisa *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*Aos meus pais, Cleto Beire
Simões (in memoriam) e Marília
da Silva Simões, pela educação e
exemplos de vida. Aos meus
filhos Bernardo, Pedro e Taís o
legado de que o limite dos seus
êxitos na vida só depende do
tamanho da sua determinação.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a algumas Instituições e pessoas que foram colaboradoras diretas para que este objetivo fosse alcançado, são elas:

- a **Marinha do Brasil, personificada em todos meus chefes, pares e subordinados**, pela oportunidade que me proporcionaram de um contínuo crescimento profissional. Espero continuar retribuindo a confiança depositada com trabalho e dedicação em prol de um Brasil melhor;

- a **Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, por meio do Programa de Engenharia Oceânica, PENO, e da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE**, pela oportunidade, e, em especial, ao seus **Professores Doutores, Carlos Eduardo Parente Ribeiro**, do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica, e **Marcello Luiz Rodrigues de Campos**, do Laboratório de Sinais, Multimídia e Telecomunicações, pelos ensinamentos passados e pela amizade cultivada;

- a **Doutora Eliane Gonzalez Rodriguez**, exemplo maior de conduta como servidora pública e, ainda maior, de dedicação à sua profissão, ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e à Marinha do Brasil. Obrigado Doutora pelo apoio, amizade e carinho com este seu eterno (in)subordinado. ;-)

- o **Professor Doutor Luiz Gallisa Guimarães**, pelos ensinamentos transmitidos que transformaram este velho marinheiro em um especialista em acústica computacional submarina mas, principalmente, pela perseverança, dedicação e paciência com este aluno durante a execução desta árdua tarefa de transformação. Lula, meu profundo reconhecimento, obrigado; :-)

- **aos meus filhos Bernardo, Pedro, Taís e minha esposa Isabel** pela compreensão durante os períodos de ausência familiar provocados pela concomitância do trabalho e dos estudos para o Doutorado. Mesmo diante das vicissitudes da vida fiquem certos do meu eterno amor e carinho por vocês.

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

MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM ÁGUAS RASAS EM
APOIO À IMPLANTAÇÃO DE REDES DE COMUNICAÇÃO ACÚSTICA
SUBMARINA

Marcus Vinícius da Silva Simões

Março/2018

Orientadores: Luiz Gallisa Guimarães

Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Programa: Engenharia Oceânica

Desde a década de 80, a comunicação digital submarina tem sido um dos principais tópicos no desenvolvimento da acústica subaquática. Além disso, a modelagem dos guias de ondas acústicas submarinos também tem sido objeto de pesquisa aproveitando-se, não só aumento do poder computacional disponível mas também do volume e da variedade de dados fornecidos pela nova geração de instrumentos para medição e monitoramento oceanográfico. Segundo Jensen, Kuperman, Porter, e Schmidt [1], os modelos de propagação acústica por modos normais, são mais afeitos para frequências abaixo de 1kHz com propagações em ambientes independentes da distância, ficando a teoria de raios para valores de frequências acima dessa com variações do ambiente dependentes da distância. Partindo dessa premissa, este trabalho propõe um modelo alternativo, usando as propriedades de acoplamento adiabático dos modos, estendendo o modelo clássico de guia de ondas em duas camadas (oceano e fundo) de Pekeris [2] para um de três camadas, com variantes para o tratamento dos modos que interagem com a superfície e com o fundo, considerando um canal adiabaticamente e temporalmente invariante. Buscando a validação do modelo proposto foram computados os resultados sintéticos para a perda de transmissão entre dois nós e comparados com as medidas *in situ* obtidas num experimento de campo, sob a condição de ressurgência plena na região, realizado para quatro diferentes visadas entre os pontos de enlace da rede proposta. Os resultados foram qualitativamente satisfatórios mas com valores absolutos para as perdas de transmissão necessitando de maior convergência com as medições *in situ*.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SHALLOW WATERS WAVEGUIDE ACOUSTIC FIELD MODELING PROPOSAL FOR UNDERWATER ACOUSTIC NETWORK SETUP

Marcus Vinícius da Silva Simões

March/2018

Advisors: Luiz Gallisa Guimarães

Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Department: Ocean Engineering

Since the 1980s, digital communication has been one of the major topics in underwater acoustics research. Furthermore, underwater waveguide modeling development has been also improved not only taking advantage of computational power available but also due to increasing data variety and volume provided by the new generation of data acquisition oceanographic instruments. According to Jensen, Kuperman, Porter, e Schmidt [1] normal mode acoustic propagation models are more accurate for frequencies below 1 kHz and propagations in range independent environments, with ray theory being applied for frequency values above 1 kHz and range dependent environments. The proposed model uses the adiabatic coupling properties of the modes, extending the classic two-layer waveguide model of Pekeris [2] to a three layers model with a different approach for surface and bottom interacting modes, considering an adiabatic and time invariant channel. In order to validate the model, the synthetic results computed on the measurement of transmission loss between two nodes were compared with measurements *in situ* obtained in a field experiment. The results are presented for four different paths among nodes of the proposed network with all of them under full upwelling condition on the experiment site. The synthetic results were qualitatively good but with absolute values for transmission loss requiring improvements on the convergence of synthetic and real *in situ* measurements.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Glossário	xiv
1 Considerações iniciais	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Motivações	2
1.4 Aplicações	3
1.5 Terminologia	5
1.6 Relevância do estudo	5
1.7 Revisão da literatura	6
1.8 Tópico em aberto no tema	7
1.9 Organização da tese	8
2 Alguns fundamentos sobre comunicação e redes acústicas subma- rinhas	9
2.1 Comunicação Acústica Submarina	9
2.1.1 Comunicação vertical e horizontal no oceano	9
2.1.2 Considerações sobre transdutores acústicos submarinos para comunicação	10
2.1.3 O canal acústico submarino	12
2.1.4 Perdas e eficiência da propagação:	18
2.1.5 A escolha da faixa de frequência para comunicação submarina	19
2.2 Notas sobre técnicas de processamento utilizadas na comunicação acústica submarina	19
2.3 Redes Acústicas Submarinas	22
2.3.1 Caracterização	22
2.3.2 Arquiteturas 2D/3D	24
2.3.3 O modelo OSI aplicado às RAS	26

3	Comissão RASSCOM'14	31
3.1	Objetivos	31
3.2	Plataformas e dados coletados	31
3.3	O ambiente das enseadas de Arraial do Cabo	32
3.3.1	Topologia e geometria entre nós (transmissor/receptor)	34
3.3.2	O canal acústico local	35
3.3.3	Batimetria	35
3.3.4	Ventos, superfície e condição de ressurgência:	37
3.3.5	Assoalho marinho, correntes, subfundo e superfície do mar:	38
3.4	Computando as perdas de transmissão	38
3.4.1	Objetivos	38
3.4.2	Configuração dos sinais	38
3.4.3	Estações de Transmissão e Recepção	39
3.4.4	A transmissão:	40
3.4.5	Processamento do sinal:	45
4	O modelo proposto (K2)	48
4.1	Considerações iniciais	48
4.2	Roteiro utilizado na solução proposta	49
4.2.1	Escolha da frequência máxima para a banda de comunicação	49
4.2.2	Premissas para solução da Equação da Onda	52
4.3	O modelo de Pekeris	59
4.3.1	Considerações iniciais.	59
4.4	Construindo o modelo proposto (K2)	63
4.5	Análise dos Resultados	66
5	Conclusões e trabalhos futuros	76
5.1	Conclusões	76
5.1.1	Sobre o desenvolvimento do modelo:	76
5.1.2	Sobre os resultados teóricos do modelo	76
5.1.3	Sobre a coleta de dados de campo (RASSCOM'14)	77
5.2	Trabalhos Futuros	77
	Referências Bibliográficas	79

Lista de Figuras

2.1	Cadeia de Transdução.	12
2.2	Perfil genérico da velocidade do som nos oceanos	15
2.3	Imagem do Equipamento Kongsberg TOPAS 40 com lâmina d'água de 15m e pacote sedimentar de 45m.	17
2.4	Perfil batimétrico da visada P1P5	18
2.5	RAS 2D Estática.	25
2.6	RAS 3D Semi-móvel.	25
2.7	RAS 3D Móvel ou dinâmica.	25
2.8	Estrutura OSI para camadas de redes.	26
2.9	Classificação do protocolos MAC segundo CLIMENT <i>et al.</i> [3]	29
2.10	Classificação do Protocolos de Roteamento segundo CLIMENT <i>et al.</i> [3]	30
3.1	SVP em P5 (esq) 12h:35m, (dir) 10h:49m	33
3.2	Topologia proposta para um RAS em Arraial do Cabo, RJ	34
3.3	Reunião de todos aos levantamentos batimétricos utilizados na geração do perfil de fundo das visadas	35
3.4	Perfil batimétrico da visada P1P4 (TX) para P5 (RX)	36
3.5	Perfis batimétricos das visadas P1P4 (TX) para P5 (RX)	36
3.6	Previsão de Maré para 09OUT18	36
3.7	Regime de ventos (direção e velocidade) no site do experimento RAS- SCOM'14	37
3.8	Esquema de recebimento e transmissão do teste RASSCOM'14.	39
3.9	TVR do arranjo vertical e linear de fontes tipo EDO 610	40
3.10	Configuração de feixes para um arranjo linear vertical de três trans- dutores omnidirecionais (Fig.: superior). Configuração de feixes para um arranjo linear vertical de três transdutores modelo EDO610E - (Usado na RASSCOM'14 - Fig.: inferior)	41
3.11	Histograma das perdas de transmissão TL atinentes a visada P1P5 e P4P5	42

3.12	OCCR (sensibilidade) em toda a faixa de operação do hidrofone of RESON TC 4032	43
3.13	Imprecisão das distâncias medidas entre TX e RX	45
3.14	Etapas de filtragem no Espectro Bilateral de Amplitude na faixa de 5 a 10kHz	45
3.15	Sinal LFM extraído do hidrofone 4032 (direita inferior)	46
3.16	Transformada de Hilbert aplicada no sinal LFM extraído do hidrofone RESON TC 4032	46
3.17	TL calculada em 23 m de profundidade no hidrofone RESON TC4032	47
4.1	Plotagem da frequência (kHz) versus SNR para $\mathbf{P=1 W}$, $k=1.5$, $s=$ 0.5 (atividade moderada de navios) e sem vento $w=0$	51
4.2	Plotagem da frequência (kHz) versus SNR para $\mathbf{P=10 W}$, com índice de espalhamento geométrico prático ($k=1.5$), atividade moderada de navios ($s=0.5$) e sem vento ($w=0$), com aumento da potência para 10 w (linhas vivas) para Potência = 1W (linhas esvanecidas), para as mesmas distâncias em um faixa de frequência diferente (10 a 14 kHz) da usada no experimento	52
4.3	Esquema de dedução da Equação da Onda Acústica Homogênea e Linearizada.	54
4.4	Tipos e técnicas de solução para Equação de Helmholtz.	56
4.5	Guia de Pekeris de Duas Camadas (GPDC).	60
4.6	Plano complexo do número de onda com o corte EJP, Polos (1, 2 e 3) e contornos de integração (C_∞, C_{EJP} e C) adaptado de SCHMIDT [4]	62
4.7	Guia de Pekeris de Duas Camadas (GPDC)	64
4.8	Modos cuja existência é possível em três guias distintos.	65
4.9	Ressonância de transmissão radial ou casamento da fase radial.	67
4.10	Acoplamento adiabático de Nodos.	68
4.11	TL com a fonte a meio da profundidade H.	68
4.12	TL para visada P15, Freq.:5.0 kHz, fonte a 10 m e Camada de Mistura a 12m	69
4.13	TL para visada P15, Freq.:5.0 kHz, fonte a meio da Termoclina e Camada de Mistura a 12m.	70
4.14	TL para visada P25, Freq.:7.5 kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura a 12m.	70
4.15	TL para visada P45, Freq.:10 kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura a 12m.	71
4.16	TL computada para visada P4P5, Dist.:1658m com freq.:10kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura com 13 m	72

4.17	Ampliação do resultado do modelo versus medições na visada P4P5, Dist.: 1658m, freq.:10kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura com 13m	73
4.18	Resultado do modelo versus medições na visada P1P5, Dist.: 2318m, freq.:5kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura com 13m	74
4.19	Resultado do modelo versus medições na visada P1P5, Dist.: 2316m, freq.:5kHz, fonte a meio da Camada efetiva e Camada de Mistura com 13m	75

Lista de Tabelas

2.1	Analogias de Ohm entre propriedades elétricas e acústicas.	12
2.2	Resumo das características do canal.	27

Glossário

- 2DRMS** Duas vezes a distância média quadrática. 87
- 3D** Em três (3) dimensões. 24
- ACAS** Águas Centrais do Atlântico Sul. 34
- AUV** Autonomous Underwater Vehicle. 3, 20
- Av.Pq.Diadorim** Aviso de Pesquisa Diadorim. 32, 41
- CAS** Comunicação Acústica Submarina. 2, 3, 7, 9, 21
- CFI** Ilha de Cabo Frio. 39
- DFE** Decision Feedback Equalizer. 7, 20
- FFT** Fast Fourier Transform - Transformada Rápida de Fourier. 21
- GPDC** Guia de Pekeris com Duas Camadas no Oceano. xi, 66, 67
- IIS** Interferência Intersimbólica - ISI Intersyabolic Interferece. 20
- ISI** Intersyabolic Interference. 9, 27
- ISO** International Organization for Standardization - Organização Internacional de Normatização. 26
- IT** Impedância Terminal. 11
- LLC** Logical Link Control - Camada para controle do enlace físico - *Link Control*. 28
- MAC** Medium Access Control - Camada de controle de acesso ao meio físico. 28
- N.A.** Nota do Autor. 86

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration of U.S Department of Commerce. 9

OCCR Open Circuit Current Response ou Sensibilidade. 12

OFDM Orthogonal Frequency Multiplex Modulation. 21

OSI Open Standart Interconnection - Modelos padrão de conexões em camadas para o desenvolvimento de protocolos da OSI. xv, 26, 27

PSK Modulação em Fase - Phase Shift Key. 20

RAS Redes Acústicas Submarinas. x, 1–3, 5–9, 13, 14, 19, 20, 22–26, 28, 29, 32, 33, 46, 51, 53, 77, 79

RASSCOM'14 Comissão para coleta de dados para instalação de uma Redes Acústica Submarina de Sensores e Comunicação, em Arraial do Cabo, RJ, em 09OUT2014. 14, 32

RAT Ressonância Adiabática de Transmissão. 68

RD Range Dependent - Dependente da Distância. 57, 62

RI Range Independent - Independente da Distância. 57, 61, 62

RX Ponto de Recepção. 20, 21, 32

SNR Relação Sinal vs Ruído (Signal/Noise Ratio). 10, 18, 20, 33, 53, 79

SPL Sound Pressure Level. 46

SVP Perfilador Acústico de Velocidade do Som - Sound Speed Profiler. 39

TAS Transdutor Acústico Submarino. 10

TL Transmission Loss. x, xi, 32, 33, 40, 42, 44, 46, 48, 53, 67, 68, 70

TX Ponto de Transmissão. 14, 20, 21, 32

U14-Av.Pq.Asp. Moura Aviso de Pesquisa Asp.Moura. 32, 41

VAS Veículo Autônomo Submarino. 1–3, 22, 24

ângulo de ataque É o ângulo formado entre a horizontal e a normal a frente de onda, é matematicamente complementar ao ângulo de incidência. 17

Capítulo 1

Considerações iniciais

1.1 Introdução

Desde o final da década de 70, a comunicação digital tem sido um dos tópicos relevantes nos estudos da acústica subaquática. As aplicações e a utilidade da comunicação sem fio e em redes, desenvolvidas desde as décadas de 70/80, foram transportadas para o meio subaquático, principalmente os oceanos, fonte de riquezas e recursos.

Paralelamente, a modelagem do campo acústico submarino vem sendo refinada por vários grupos de pesquisa, aproveitando-se não só do aumento do poder computacional disponível mas também do volume e da variedade de dados fornecidos pelas novas gerações de instrumentos de medição e sensoriamento oceanográfico.

As Redes Acústicas Subaquáticas/Submarinas (RAS) por sua vez têm sido tema de estudos nas duas últimas décadas, alavancadas pelos avanços na comunicação digital no meio acústico subaquático (HEIDEMANN *et al.* [5], LLOR e MALUMBRES [6], SOZER *et al.* [7]) e pelo aporte de recursos oriundos da demanda crescente da indústria *off shore*. Amparada pelo desenvolvimento das redes sem fio eletromagnéticas (redes *wifi*), pelo aumento da capacidade computacional e redução das dimensões da eletrônica embarcada e pelo aperfeiçoamento de transdutores acústicos submarinos aplicados à comunicação submarina, as RAS se apresentam como um novo nicho nas atividades subaquáticas, a saber: comando e controle de Veículos Autônomos Submarinos (VAS), comunicação entre sensores e a superfície, coleta de dados e monitoramento ambiental, defesa de área dentre outras aplicações civis e militares foram atingidas e geraram mais demanda por essa tecnologia, fazendo dela, hoje, uma das principais áreas de pesquisa na tecnologia submarina. Buscaremos neste trabalho revisar brevemente o estado da arte dessa tecnologia, seus problemas e possíveis aplicações, bem como tentar contribuir com uma nova abordagem para melhoria da comunicação entre nós (ponto a ponto) e sua aplicação em uma RAS.

1.2 Objetivo

Segundo JENSEN *et al.* [1], os modelos de propagação acústica por modos normais são mais afeitos a frequências abaixo de 1kHz, com propagações em ambientes independentes da distância, ficando preferencialmente para soluções via teorias de raios, equações parabólicas, elementos finitos e diferenças finitas o estudo da propagação acústica em frequências acima dessa. Este trabalho propõe um modelo alternativo para a premissa acima, usando as propriedades de acoplamento adiabático dos modos, estendendo o modelo clássico de guia de ondas em duas camadas (oceano e fundo) de PEKERIS [2] para um de três camadas, com variantes para tratamento dos modos que interagem com a superfície e com o fundo, considerando os guias de onda temporalmente invariantes. Essa alternativa visa auxiliar o ajuste da geometria "ponto a ponto" e da topologia fixa em três dimensões, inicialmente na escolha da posição geográfica do ponto (2D) e, continuamente, na definição da profundidade (1D) do transdutor do nó¹, visando propiciar o melhor enlace e disponibilidade do canal para o funcionamento da rede. O modelo foi desenvolvido com base nas premissas do invariante adiabático, (LANDAU e LIFSHITZ [8]), acoplamento de modos entre guias de ondas (JENSEN *et al.* [1]) e invariabilidade temporal do canal acústico submarino comparada com o tempo de transmissão. Partiu-se do modelo de PEKERIS [2] mas adotou-se um oceano de três camadas, utilizando a frequência máxima prevista² para as condições oceanográficas atuantes no guia de ondas existente no interior da topologia de rede adotada.

1.3 Motivações

Científica.

Construção de um modelo de predição acústica e a análise de seus resultados sintéticos confrontados com as medições *in situ*, no âmbito do projeto de uma RAS, para funcionamento em um ambiente de águas muito rasas (entre 10 e 40m) existente no sítio de Enseadas de Arraial do Cabo, RJ, onde os parâmetros oceanográficos físicos (temperatura e velocidade do som), geológicos (batimetria e tipo de fundo e subfundo) e a paisagem acústica (ruído ambiental submarino biológico, natural e antropogênico) foram coletados para o projeto de implantação da Rede.

Prática.

A comunicação acústica submarina (CAS) via técnicas digitais de transmissão

¹O autor assume aqui a capacidade do nó de ajustar o transdutor em profundidade. Essa opção não está comercialmente disponível mas é utilizada em VAS que navegam guiados por RAS ou pontos de controle na superfície

²Adaptada do trabalho de STOJANOVIC [9]

e a composição de redes de comunicação são tecnologias da década de 80 (QUAZI e KONRAD [10]), em especial dentro de um ambiente de nós conectados em redes sem fio. Os desafios tecnológicos impostos demandam a conexão de diversos campos do conhecimento, nomeadamente: acústica submarina, principalmente a física do som na água e modelagem computacional, oceanografia acústica; eletrônica; engenharia acústicas (transdutores e arranjos); oceanografia nas quatro vertentes (física, química, biológica e geológica); telecomunicações (comunicações digitais); processamento de sinais (acústicos e de comunicação); e computação, neste último campo, principalmente em redes de computadores e desenvolvimento de software.

No Brasil, alguns trabalhos para modelagem do canal, KUCHPIL [11] e FERREIRA [12], estudo de viabilidade, DOS SANTOS e RUBINSTEIN [13], e implantação de uma RAS (VIEIRA *et al.* [14] e RIBEIRO [15]) deram início às pesquisas, sem contudo estabelecer, dentro de suas instituições, uma linha de pesquisa permanente na área de comunicações e redes submarinas.

Assim, a utilização da CAS e das RAS em águas profundas tem se demonstrado promissora, não só pelas novas descobertas científicas em águas profundas (ventos hidrotermais, novas formas de bioma e outros) mas, principalmente, pela exploração de minerais (nodos polimetálicos) e hidrocarbonetos, na qual o sensoriamento, o comando e controle de equipamentos à cabo tornam-se inviáveis. Em águas rasas, a motivação alterna-se entre o caráter militar e civil com diversas aplicações como controle de área, sensoriamento contínuo, comunicação e, finalmente, o mais promissor campo para sua aplicação e uso, qual seja, o comando e controle de veículos autônomos submarinos (VAS, em inglês, Underwater Autonomous Vehicles - AUV)³ que podem aglutinar várias das tarefas individuais programadas ou controladas remotamente.

1.4 Aplicações

Militares

Segundo ETTER [16] a ênfase na pesquisa militar para emprego das forças submarinas e antisubmarinas trocou de objetivo estratégico, alterando-se de águas profundas para águas rasas, principalmente, no aumento da performance dos sonares nas regiões costeiras, tradicionalmente muito mais complicadas acusticamente em comparação com as relativamente bem comportada propagação em águas profundas.

Esse novo ambiente com multireflexões, consideravelmente mais ruído, com atuação preponderante do fundo e subfundo marinho, torna o desafio de predição e

³Cabe aqui diferenciar os termos em inglês. Os UUV(Unmanned Underwater Vehicle) é o conjunto de AUVs e ROVs (Remote Operated Vehicles), esse último com controle por cabo.

modelagem muito maior. Essa necessidade de alteração de foco de desenvolvimento para defesa submarina encorajou a transferência da tecnologia sonar e de modelagem para as aplicações civis, fornecendo um estímulo significativo a acústica ambiental (ETTER [16]).

Contudo esse desenvolvimento no meio civil proporcionou novos sistemas militares de emprego específico como, por exemplo, para as atividades de proteção de portos, contra-minagem, comunicação digital, levantamentos de emprego militar para aproximação e desembarque em praias e mapeamento de fundo de alta precisão.

Civis

No meio civil, essa transferência de tecnologia oriunda do meio militar americano beneficiou o campo da acústica ambiental, aumentando a exploração dos oceanos através de métodos acústicos. ETTER [16] exemplifica esta transferência com a utilização de complexos modelos de predição para acústica submarina sendo adaptados e/ou utilizados em experimentos de inversão acústica submarina ⁴ para sensoria-mento dos oceanos.

Além da modelagem computacional acústica, estão aqui relacionadas as principais áreas de emprego civil da tecnologia:

1. Monitoramento;
2. Disastres naturais;
3. Ajuda a Navegação;
4. Comunicação acústica submarina;
5. Navegação, acompanhamento e controle de veículos submarinos e de pessoas (mergulhadores autônomos);
6. Montagem de redes de sensores submarinos (oceanográficos, biológicos, químicos e biológicos), para:
 - Acompanhamento da climatologia local;
 - Controle de poluição;
 - Prevenção de disastres naturais;
 - Monitoramento de "cabeças de poço"(indústria *off shore*);
 - Monitoramento da paisagem acústica submarina; e
 - Monitoramento da biota subaquática;

⁴Área da acústica submarina que busca identificar os parâmetros do meio conhecendo os sinais de saída e de chegada

7. Inversão acústica para detecção e acompanhamento de feições oceanográficas;
e
8. Interação, acompanhamento e estudo da vida marinha;

1.5 Terminologia

1. Nomenclatura em inglês e português

Para todas as definições e termos técnicos buscou-se a adequada tradução para o português ou o uso do termo consagrado na literatura já traduzida com seus respectivos acrônimos. Contudo para os termos cujos acrônimos são consagrados na literatura internacional, manteve-se o termo em inglês para facilidade de compreensão. Como exemplo, apresento a tradução de *Sound Velocity Profile* para Perfil de Velocidade do Som cujo acrônimo foi mantido o do inglês SVP por ser amplamente utilizado ao invés do em português PVS, pouco conhecido. Todos os termos técnicos já consagrados seguiram a mesma regra e foram explicitados no texto.

2. Subaquática ou submarina ?

Deve-se inicialmente fazer menção à especificidade do termo rede acústica submarina (RAS), ou seja, uma rede instalada dentro da massa líquida dos oceanos, mares e baías, sendo mais restritivo que seu genérico, subaquática, este abrangendo a comunicação em qualquer corpo d'água como piscinas, rios, mares, lagos, etc. As diferenças práticas são poucas, mas existem, principalmente em função dos valores encontrados para temperatura, salinidade e pressão que têm impacto no cálculo da velocidade do som na água. Como trataremos somente da comunicação em redes nos mares e oceanos, o autor optou pelo termo restritivo *submarina*.

1.6 Relevância do estudo

O tema central deste trabalho, qual seja, modelagem acústica submarina de um canal de comunicação para aplicação em RAS, é por si só um tema ainda em desenvolvimento no cenário mundial (BAGGEROER [17], CHITRE *et al.* [18], [19] *et al.*). Os temas subsidiários, comunicação acústica submarina e redes acústicas submarinas ainda não são temas dominados e continuam no portfólio de grandes agências nacionais e internacionais de fomento (XIE e GIBSON [20]), atestando sua relevância principalmente para a indústria *off shore*. O trabalho visa ainda colaborar para o desenvolvimento de um modelo autóctone de previsão acústica para

comunicação submarina em apoio à implantação de RAS. Ademais, poderá ainda ser fomentador de tecnologia nacional de ponta (MODEMS acústicos) e estimulador de uma linha de pesquisa em acústica computacional submarina.

1.7 Revisão da literatura

Ressurgência:

A ressurgência em Arraial do Cabo é um dos fenômenos mais estudados da oceanografia Brasileira. Desde que o Alm. Paulo Moreira suspeitou da presença da ressurgência naquela região na década de 60, o fenômeno vem sendo estudado por diversos cientistas. IKEDA *et al.* [21], TORRES JUNIOR [22], ELIAS [23], CAMPOS *et al.* [24] são alguns dos cientistas, de gerações distintas, que abordaram o problema. Contudo, apesar dos mecanismos de início já estarem bem conhecidos, sua variabilidade temporal e alguns efeitos na biota, algumas questões ainda restam, como: acoplamento entre os modelos meteorológicos, oceanográficos e acústicos em macro, meso, e micro escala, o papel do meandramento da corrente do Brasil (predição e impacto na ressurgência) além de outros temas. Assim, o aporte observacional dos métodos acústicos, especificamente com uma RAS, pode contribuir para a melhor compreensão e predição do fenômeno em micro e meso escala.

Modelos de previsão do campo acústico:

O problema de determinação do campo acústico num guia de ondas no oceano em águas rasas foi inicialmente abordado por PEKERIS [2], ficando relativamente adormecido até a década de 60 quando WILLIAMS [25] e BREKOVSKIKH [26] ampliaram a abordagem do problema aumentando o número de camadas de diferentes densidades ao longo do guia. Por sua vez URICK [27] ataca novamente o problema dos modos de propagação em seu trabalho, onde paralelamente EWING *et al.* [28] buscam a solução para o cômputo dos resíduos nos métodos de transformadas de integral. Pelos anos 60 os estudos de FRANCOIS e GARRISON [29] resolvem o problema da absorção do som na água do mar, em paralelo com FISHER e SIMMONS [30] que resumem e complementam o trabalho sobre absorção. Ainda nos anos 60, WILSON [31] equaciona empiricamente a velocidade do som na água. Nos anos 70, WILLIAMS [25] sumariza o trabalho de modelagem até aquele momento e com o uso dos computadores a modelagem ganha novo impulso, aonde se destacam pela contribuições BUCKINGHAM [32], PORTER [33], FRISK [34] com modelo de Raios, Modos, Parabólicos em 3D. HARDIN e TAPPERT [35] introduziram o método de equações parabólicas baseado na teoria da transformadas rápidas de Fourier (FFT). Cabe ressaltar, que em 1969 BERGMANN [36] republicou a compilação do relatório técnico da Divisão 6 (Sub-surface warfare) que descreve todo o

esforço de guerra americano em acústica, fazendo deste volume uma referência. Modernamente, KATSNELSON e PETNIKOV [37], JENSEN *et al.* [1], ETTER [16], BREKHOVSKIKH e LYSANOV [38], BUCKINGHAM [32], CLAY e MEDWIN [39], MEDWIN e CLAY [40], SCHMIDT [4] vem contribuindo para o desenvolvimento e a abordagem teórica para modelagem em águas rasas, em 3D com as mais diferentes técnicas analíticas e numéricas.

Redes e comunicação acústica submarina:

No início da década de 80, os primeiros sistemas digitais foram introduzidos e, até 2012, quatro grandes revisões foram feitas sobre o tema segundo BAGGEROER [17]. Essas revisões demonstram bem a evolução sobre o tema e indicam claramente as tecnologias que surtiram algum efeito nessa evolução. A primeira, de 1984, mencionando experimentos com a modulação MFSK incoerente que, até o presente, é usada na grande maioria dos MODEMS acústicos submarinos comerciais. A segunda, em 1996, enfatizando a introdução de método de fase incoerente usando equalização adaptativa. Houve aqui uma tentativa clara de utilização da modulação de fase mas com sucesso relativo. Já a equalização adaptativa vem sendo implementada em diversos cenários com relativo sucesso, principalmente, com as técnicas de DFE, *sparse equalization*, *turbo equalization*, *blind equalization* e outras ([18]). A terceira revisão, aborda telemetria acústica (fora do nosso foco) e a quarta de CHITRE *et al.* [18] estuda comunicação acústica submarina e RAS. LLOR e MALUMBRES [6], insere, os modelos físicos na performance dos protocolos, PROAKIS *et al.* [41] abordam o tema especificamente em águas rasas, e XIE e GIBSON [20] discutem protocolos próprios para as RAS. Finalmente, FELEMBAN *et al.* [42] fazem um levantamento extenso sobre as aplicações e usos das RAS, deixando claro o crescimento da tecnologia no meio civil.

1.8 Tópico em aberto no tema

Dentre os diversos tópicos em aberto no assunto RAS, temos as seguintes áreas e seus respectivos tópicos:

- Acústica Computacional Submarina (ACS)
 - Modelagem estatística do canal;
 - Modelagem multicamadas;
 - Modelos em 3D; e
 - Acoplamento com modelos oceanográficos (micro escala).
- Comunicação Acústica Submarina (CAS)

- Modulação adaptativa;
 - Estimação do canal;
 - MIMO (*Multiple input/output channels*);
 - Comunicação multiusuário;
 - Comunicação em ambientes hostis;
 - Compressão de dado (*data compression*); e
 - Equalização adaptativa do canal.
- Redes Acústicas Submarina (RAS)
 - Aferição de capacidade de rede;
 - Layout de Rede - alocação e reuso de recursos;
 - Protocolos de rede - todas as camadas;
 - Critérios de otimização (retardo, confiabilidade, eficiência energética, taxa de tráfego (*throughput*));
 - Requisitos de performance;
 - Padrões de tráfego;
 - Simulação na água; e
 - Integração com outras redes.

1.9 Organização da tese

Buscando manter, na medida do possível, um compromisso didático-temporal com os temas aqui estudados e os resultados relevantes obtidos, optamos por organizar os capítulos da tese na seguinte ordem:

1. Capítulo 1 : Considerações iniciais.
2. Capítulo 2 : Alguns fundamentos sobre comunicação e redes acústicas submarinas.
3. Capítulo 3 : Comissão RASSCOM'14.
4. Capítulo 4 : Modelo proposto: fundamentos teóricos e resultados.
5. Capítulo 5 : Conclusões e trabalhos futuros.
6. Apêndice.

Capítulo 2

Alguns fundamentos sobre comunicação e redes acústicas submarinas

Esta seção tem por objetivo apresentar tópicos considerados relevantes nas áreas de comunicação acústica submarina (CAS) e redes acústicas submarinas (RAS) bem como expor alguns dos desafios científicos e tecnológicos que os temas apresentam. Ademais, ressaltamos aspectos julgados relevantes no projeto, construção e aplicação da comunicação e de uma RAS.

2.1 Comunicação Acústica Submarina

2.1.1 Comunicação vertical e horizontal no oceano

A comunicação acústica num canal vertical apresenta características muito mais favoráveis se comparada com a horizontal, vejamos: normalmente a vertical ocorre em distâncias muito menores¹, de poucos metros até uma média (incluindo plataforma continental, talude e assoalho oceânico) de aproximadamente 3.700m²; apresenta um número reduzido de multicaminhamentos ou mesmo inexistente (fronteira horizontal é considerada infinita); apresenta um nível de ruído reduzido e relativamente constante (assumindo-se um posição fixa na superfície); além de possuir uma geometria de transmissão favorável, pois o transmissor e o receptor são posicionados aproximadamente um sobre o outro. Somente essas características já geram economia de potência e facilitam os algoritmos de comunicação digital (menor ISI, desvanecimento e flutuação). O grande problema da comunicação vertical é a re-

¹Por exagero, vamos aproximadamente até o máximo de 11 Km nas fossas Marianas, segundo dados da NOAA.

²Dados da NOAA (<https://oceanservice.noaa.gov/facts/oceandepth.html>)

flexão da onda acústica nas diferentes camadas de massas d'água que possam existir, que no caso de águas rasas pode ser amenizado arriando-se o transdutor para uma profundidade maior que a camada de mistura.³

Já um canal horizontal no oceano é um ambiente muito mais severo. Distâncias muito maiores (podendo chegar a milhares de quilômetros) e o conseqüente aumento das reflexões na superfície e fundo (multicaminhamento e suas conseqüências); obstáculos naturais provocando reflexão, dispersão e difração do sinal no tempo; baixa relação SNR devido as fontes de ruído antropogênicas, naturais e biológicas; maior probabilidade do sinal interagir com alguma biomassa; e geometria transmissor/receptor desfavorável (normalmente, com cotas diferentes). Soma-se ainda, a desfocalização da energia, em maior ou menor grau, dependendo da frequência e distância devido as variações perfil de velocidade do som no percurso.

Em suma, as tecnologias implementadas até o momento funcionam razoavelmente bem no canal vertical porém, no canal horizontal têm que ser adaptadas de acordo com os vários parâmetros ambientais específicos do ambiente operacional de modo que a confiabilidade das comunicações não se degrade sensivelmente.

2.1.2 Considerações sobre transdutores acústicos submarinos para comunicação

O desempenho de um transdutor envolve o conhecimento de parâmetros acústicos, elétricos e mecânicos, e para definirmos quais tipos e que especificações deverão ter para a comunicação submarina, teremos que apresentar alguns conceitos básicos de forma a subsidiar os critérios de nossa escolha final. De maneira geral, o termo transdutor acústico submarino TAS engloba dois tipos de dispositivos: os projetores, empregados na transmissão, que convertem sinais elétricos em acústicos e os hidrofones, empregados na recepção e que realizam a conversão reversa. Em algumas aplicações, um mesmo dispositivo é empregado nas duas funções (muito comuns nos atuais MODEMS). Na transmissão, como a irradiação acústica é obtida pela vibração da superfície em contato com o meio, nos TAS essa vibração é controlada pelo sinal elétrico aplicado. Na recepção, uma onda acústica provoca a vibração de uma superfície em contato com o meio, sendo convertida em sinal elétrico.

A maior diferença em transdutores de uso geral e de uso específico é a sensibilidade e a resposta em frequência características, ou seja, para transdutores de uso geral o ideal é se ter alta sensibilidade sobre larga faixa de frequências, enquanto para os de uso específico, deve-se ter uma alta sensibilidade numa banda estreita.

³no caso de águas rasas no máximo três, qual sejam, camada de mistura, termoclina e a de fundo, caso alguma intrusão de massa d'água esteja ocorrendo. No caso de águas profundas depende do local no oceano

Em seu manual de Souza [43] estipula que os tipos de transdutores variam com a tecnologia empregada na transformação da onda mecânica em elétrica e vice-versa, alguns deles são: Piezelétricos (PZT); Eletrorrestritivos, Magneto-restritivos, Eletroestáticos e de molas móveis.

Na função de projetores os transdutores dependem do tipo de tecnologia empregada, sendo: a) esféricos ou em anel, entre os quais se encontra o tipo omnidirecional; b) tipo pistão, entre os quais se encontra o tipo específico *Tonpilz*; c) de transmissão em linha; d) os flexensionais; e e) os flexurais. Nos projetores, informações como o nível da fonte desejado, as frequências de operação, a diretividade e a impedância são fundamentais para a escolha.

Na função de hidrofones podem ser: a) cilíndricos ou esféricos; b) planares; c) tipo Bender; c) vetoriais; d) com difração da onda plana constante; e) de ruído termal. Possuem genericamente ainda as seguintes características básicas: a) frequência de ressonância; b) fator de qualidade mecânica; c) impedância mecânica; e d) coeficiente de acoplamento eletromecânico.

Ainda segundo DE SOUZA [43], "Um transdutor é dito reversível quando pode ser empregado tanto como projetor quanto como receptor (embora seu projeto possa ser otimizado para uma dessas funções). Caso contrário é dito ser irreversível. Transdutores piezoelétricos, eletrorresistivos e magnetorrestritivos são reversíveis; hidrofones de fibra ótica, por exemplo, são irreversíveis".

Cabe ressaltar que transdutores recíprocos (inversíveis) funcionam como hidrofones e projetores, mas, normalmente, em frequências distintas de acordo com a função.

O transdutor será linear quando as relações entre as grandezas elétricas ($V =$ voltagem nos terminais elétricos do transdutor e $I =$ corrente elétrica) e as mecânicas (F ou $P =$ força na superfície radiante e $U =$ velocidade de vibração da superfície radiante). e I) forem lineares. Passivo se não contiver componentes ativos (fontes de energia, amplificadores etc.) e com características de reciprocidade se for, simultaneamente, reversível, linear e passivo. A maioria dos transdutores eletroacústicos apresenta reciprocidade.

Ainda segundo de Souza [43] devemos a fim de assegurar que as especificações originais do sistema estão mantidas na sua aquisição ou para avaliar seu desempenho após o uso, devemos verificar as seguintes características básicas dos transdutores:

- para **projetores**:
 - a) Impedância Terminal (IT);
 - b) Fator de qualidade mecânica (QM);
 - c) Eficiência Eletro-acústica (Φ_{ea}); e

Elétricas			Acústicas		
Quantidade	Símbolo	Unidade	Quantidade	Símbolo	Unidade
Voltagem	E	Volts	Pressão	P	μ Pa
Carga	q	Colombs	Desloc. Partícula	ξ	m
Corrente	I	Ampere	Veloc. Partícula	u	m/sec
Impedância	Z	Ohms	Impedância Acústica	$\rho_0 c$	Pa s/m

Tabela 2.1: Analogias de Ohm entre propriedades elétricas e acústicas. Adaptado de MASSA [44]

d) Curva de Resposta de Transmissão (mais plana possível⁴);

- para **hidrofonos**:

- Faixa de frequência de atuação¹;
- Curva de Sensibilidade-OCCR a mais plana possível ¹;
- Capacidade de pré-amplificação ¹;
- Performance em baixas frequências¹;

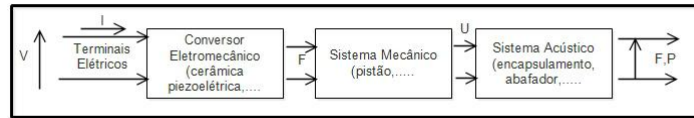


Figura 2.1: Cadeia de Transdução. Adaptado de DE SOUZA [43]

2.1.3 O canal acústico submarino

Modos ou raios, que modelo usar?

Como comentado anteriormente, Pekeris desenvolveu seu modelo para águas rasas, ou seja, aproximadamente 200 m, demonstrando que na acústica submarina o conceito de águas rasas está correlacionado com as interações da onda acústica com o fundo. Os parâmetros que definem águas rasas podem modificar-se em limites amplos que não dependem só da geometria mas também da frequência. KATSNELSON e PETNIKOV [37] nos alertam que no caso de, por exemplo, fontes pontuais em frequências relativamente altas o guia de ondas tanto pode ser descrito pela propagação por modos como por raios. Contudo, qual modelo e que geometria melhor representa propagação da energia? Os mesmos KATSNELSON e PETNIKOV [37]

⁴Nota do autor

apresentam uma relação simples para a escolha da representação da propagação. Vejamos, BREKHOVSKIKH e LYSANOV [38] nos ensinam que para fontes pontuais, velocidade constante e fundo rígido o número de máximo de modos é dado pela relação $M \cong \frac{2H}{\lambda}$ onde H é a profundidade local e λ o comprimento da onda acústica. KRAVTSOV *et al.* [45] estabelecem que para o guia ideal o número máximo de raios que atravessam o guia de ondas com comprimento de onda $\lambda_r < \sqrt{2}$. é dado por $M' = \frac{2r}{H}$ onde r é a distância fonte/receptor. A comparação entre $M = M'$ nos fornece a relação (KATSNELSON e PETNIKOV [37]),

$$r \gg \frac{H^2}{\lambda} \quad (2.1)$$

que, sendo verdadeira, estabelece que o número de raios supera em muito o número de modos, recomendando o uso do modelo de raios porque a energia que chega em um só raio é menor que a propagada em um só modo. Ainda segundo KATSNELSON e PETNIKOV [37], esta condição ocorre para águas rasas e frequências menores que 500Hz.

Ainda segundo KATSNELSON e PETNIKOV [37], essa relação também estabelece indiretamente a definição de águas rasas, onde os modos normais melhor identificam a propagação da energia, e águas profundas, aonde a propagação por raios cumpre melhor essa função.

Contudo, essa formulação nos alerta também para a necessidade de avaliarmos corretamente se nossa RAS operará em um ambiente de águas rasas ou não, ou seja, se a quantidade de energia recebida nos nós e a escolha da faixa de frequências estão adequadas para uma sustentação ou estabelecimento do enlace. Por exemplo, para o nosso sítio com as frequências limites utilizadas na transmissão, 5kHz a 10kHz, com profundidade média 25m e distâncias, r , entre transmissão e recepção (TX/RX) entre 1500 e 2300 metros teremos ($c = \lambda.f$ onde $c \cong 1.521 \text{ m/s medido in situ}$), comprimentos de onda de 15cm (10kHz) a 30cm(5kHz), ou seja, aplicado os valores na relação teremos :

$$r \gg 4166 \text{ (10kHz) ou } 2083 \text{m (5kHz)} \quad (2.2)$$

o que NÃO verifica a relação, ou melhor, nos remete ao uso da teoria por raios e não por modos, usada no nosso modelo. Qual o porquê ? Porque ambas as relações são para o guia ideal e não estão capturando corretamente a física das águas muito rasas. Ademais, a frequência máxima deveria estar abaixo de 500 Hz, como o autor recomenda, o que no nosso caso não ocorreu.

Nosso trabalho busca justamente analisar a propagação da energia por modos nessa situação adversa, pois não obedecemos a relação, numa faixa de frequência

e ambiente teoricamente desfavorável ao uso da propagação por modos, buscando mostrar que para as faixas de frequência de comunicação submarina e ambiente ultra rasos uma avaliação mais cuidadosa da relação é necessária.

O meio de transmissão

Densidade e os perfis de salinidade e temperatura.

O campo termohalino dos oceanos tem papel fundamental na acústica submarina devido às alterações que provoca no perfil de velocidade do som (URICK [46], CLAY e MEDWIN [39]). Em águas muito rasas (profundidades menores que 50m), a interferência passa a ser mais relevante com o aumento da camada de mistura, devido ao aquecimento solar da superfície, e sua interferência na propagação (BROWN *et al.* [47]). Adicione-se a isto os efeitos de maré mais acentuados quando conjugados com a batimetria, às descargas de água doce da chuva, rios e canais (naturais ou não) e até à própria chuva aumentando a camada de mistura e alterando a salinidade. A figura 2.2 apresenta um perfil genérico de águas profundas (onde a pressão provoca o aumento de temperatura no fundo) com suas variações sazonais e de latitude (linhas pontilhadas inclinadas). Para águas rasas, espera-se o mesmo comportamento sem a influência da pressão (elevação da temperatura em águas profundas), sem formação do duto profundo (SOFAR) e com a característica de formação de dutos de subsuperfície. O perfil levantado na comissão RASSCOM'14 apresentado na figura: 3.1 é característico de águas muito rasas, principalmente o qual apresenta a camada inferior já misturada pelo efeito de maré.

Fenômenos oceanográficos e os efeitos da variação do campo termohalino.

Fenômenos oceanográficos provocados pela dinâmica do meio como Jatós, Vórtices, Meandros, Ondas Internas e Frentes (Ressurgência) atingem o campo termohalino e conseqüentemente o perfil de velocidade do som, influenciando na comunicação e na acústica submarina como um todo (BROWN *et al.* [47]). Além disso, geram aumento de velocidade do fluido e podem gerar modulação da onda acústica, efeito Doppler na comunicação, queda do sinal por desvio da frente de onda, focalização e sombreamento do sinal e até alteração da paisagem acústica submarina.(BROWN *et al.* [47])

A existência no local de instalação e escala desse fenômenos (mesoescala, de 10 a 100 km) são fatores preponderante no planejamento e instalação de sistemas de comunicação submarinos e das RAS, pois impactarão na densidade, alcance, potência de TX, topologia, modulação, energia embarcada, transdutores, protocolos e outros parâmetros para implantação. O caráter sazonal e periódico dos fenômenos também deverá ser considerado e integrado ao planejamento. Cabe mencionar que

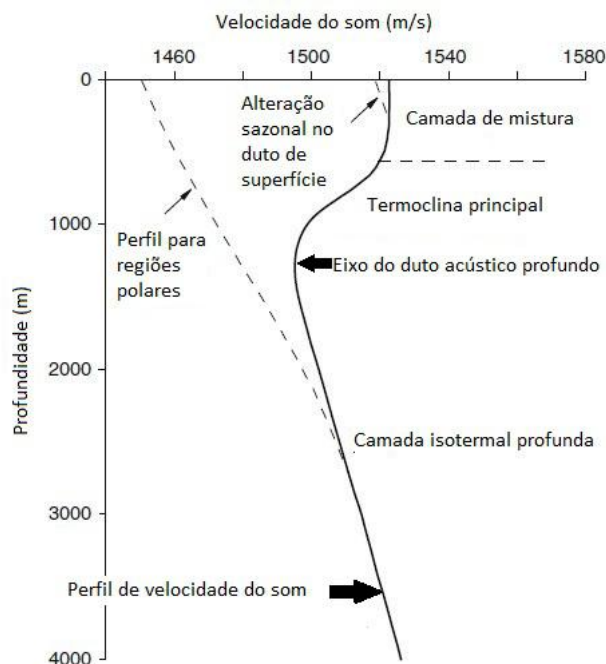


Figura 2.2: Perfil genérico da velocidade do som nos oceanos

ao invés de um problema para comunicação estes fenômenos são a razão ser de uma outra área da acústica submarina, a oceanografia acústica, visto que o sensoriamento e observação e monitoramento destes fenômenos são um dos objetivos deste campo da acústica submarina.

Fronteiras e contornos limitante da propagação.

A superfície dos oceanos.

A reflexão do som e a dispersão por espalhamento oriundo das iterações da onda acústica com a superfície dos oceanos dependem, principalmente, da distância, frequência, profundidade e diretividade da fonte, ou seja, a proximidade da superfície e o tipo de irradiação (omni ou com formação de feixe) ditarão a influência da superfície na propagação. A grande diferença de impedância acústica existente na interface ar-mar faz com que em muitas aproximações, que a superfície seja considerada um refletor perfeito, principalmente, em modelos físicos⁵, além de provocar mudança na fase e, por vezes, até reversão (180° de mudança e coeficiente negativo), dependendo da ondulação da superfície do mar. Em altas frequências (acima de 1 kHz) ou quando o estado do mar é alto (vide escalas de Mar e Beaufort em NODC/WMO [48]), uma parte do som incidente é disperso acarretando um coeficiente de reflexão com magnitude menor que um.

⁵Esta aproximação é largamente utilizada em função da grande quantidade de energia refletida e da quantidade mínima refratada.

JENSEN *et al.* [1] nomeiam a relação acústica da onda plana como a razão entre a pressão e a velocidade no meio $\frac{P}{v_x} = \rho_0 c$ na qual fica fácil verificar que as diferenças de densidade $\rho_0 \cong 1,293 \text{ kg/m}^3$ (a 0° C do ar na superfície) no ar contra uma massa específica de $\cong 1026 \text{ kg/m}^3$ acrescido do fator $\cong 4,7$ no mar, serão preponderantes. DE SOUZA [43] calcula de $1,5410^{-6} \text{ Pas/m}$ para água e 415 Pas/m a 1 atm a 20° C para o ar.

A utilização de ondógrafos para se obter o período, o espectro direcional e amplitude da ondulação local é uma das formas de propiciarmos assimilação de dados aos modelos de propagação acústica visando melhor aproximação do comportamento da ondulação superficial que é parte integrante de alguns modelos de propagação como o Bellhop (PORTER [33]), por exemplo.

Uma outra complicação é a presença de bolhas geradas por peixes próximos à superfície ou pelo vento. As bolhas formam uma camada absorvente tanto para energia refletida como para a espalhada e também são fonte de ruído quando explodem. A quantificação da energia irradiada ou absorvida é função de modelos físicos de reverberação que fogem ao escopo deste trabalho. Notadamente, o aumento das frequências para comunicação (menor comprimento de onda) terão uma interação muito maior com a superfície, fazendo com que ligeiras alterações, sejam do marulho (ondulação gerada pelo vento local) sejam do *swell* (ondulação com forçante distante do local de observação), gerem interferências significativas (ruído), modulação do sinal e alteração da fase, caso a fonte não esteja numa profundidade adequada.

Fundo e Subfundo Marinho.

A diferença da impedância acústica entre a água e o subfundo marinho é muito menor do que a da superfície com o ar mas é muito mais complexa dadas as diversas camadas com densidades, espessuras e inclinações diferentes. A figura 2.3 exemplifica essas afirmações. Em que pese o fato do equipamento apresentado, um perfilador de subfundo, usar o retorno da energia para obtenção da imagem com aquisição e pós processamento específicos para o problema de comunicação ou se conhece o ambiente a priori, realizando um levantamento do subfundo e obtendo-se um valor mais preciso para a quantidade de energia que retorna radialmente na visada entre nós, ou estima-se a perda para o fundo realizando transmissão e recepção controladas para o cômputo da TL (Total). Alerta-se que a perda para o fundo será apenas um dos fatores atuando nas perdas de transmissão. Cabe ressaltar ainda que a frequência de operação secundária desse perfilador (1 a 10 kHz) atua exatamente dentro da faixa de frequências utilizada para comunicação, demonstrando que a faixa é também própria para penetração no fundo gerando conseqüente atenuação e redirecionamento do sinal. Do mesmo modo, o perfil de fundo pode ter, principal-

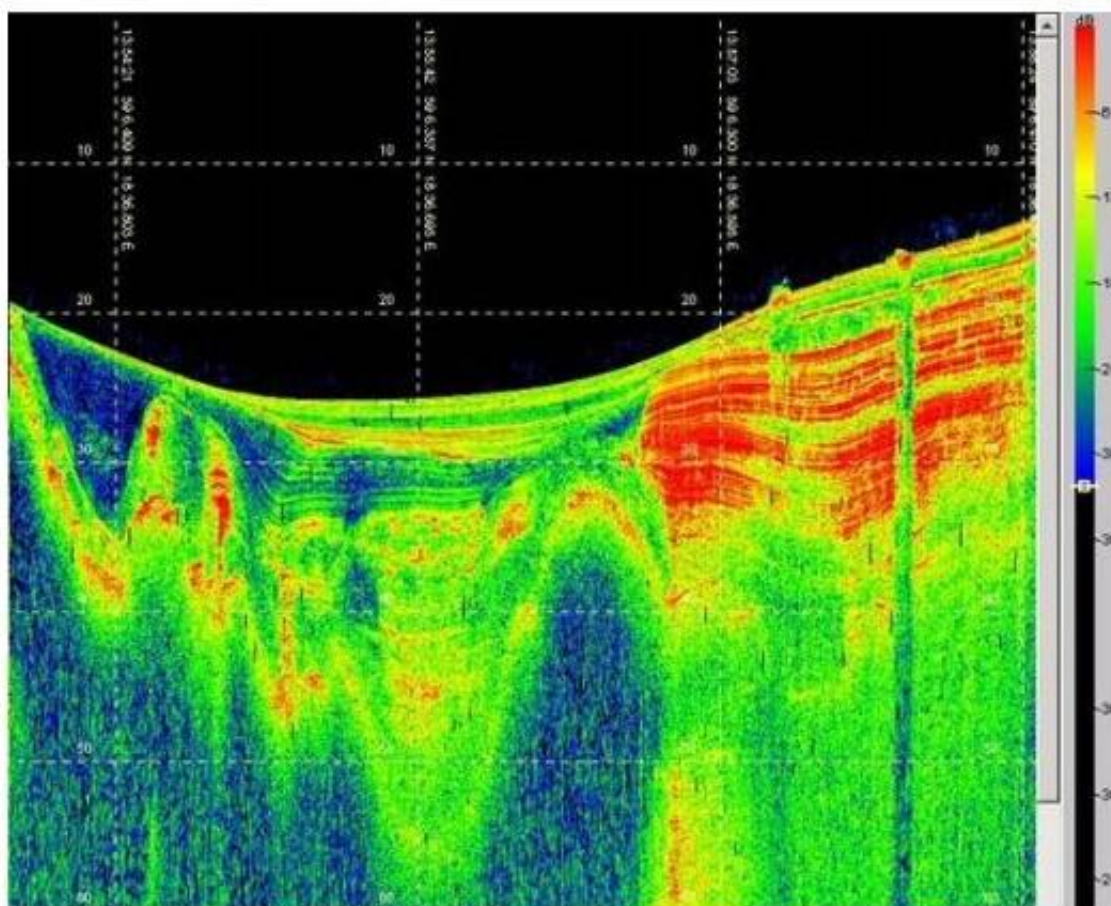


Figura 2.3: Imagem do Equipamento Kongsberg TOPAS 40 com lâmina d'água de 15m e pacote sedimentar de 45m.

Ref.: <https://www.kongsberg.com/en/kds/products/navalsystems/topas/>

mente em águas rasas, alterações de forma e relevo que impactarão os coeficientes de reflexão, refração e difração para a onda acústica incidente, dando ao (ângulo de ataque)⁶ uma grande importância na propagação da frente de onda. A figura 2.4 apresenta uma ampliação do corte apresentados na figura: 3.3, na visada entre os pontos P1P5. Apesar do processamento do perfil ter sido discretizado e haver um exagero na escala vertical do desenho para permitir melhor visualização, a ampliação do corte ilustra o problema dos obstáculos e ondulações do fundo que, se próximos do comprimento da onda incidente, gerarão reflexões e refrações da onda acústica incidente no fundo.

⁶Em inglês *grazing angle*

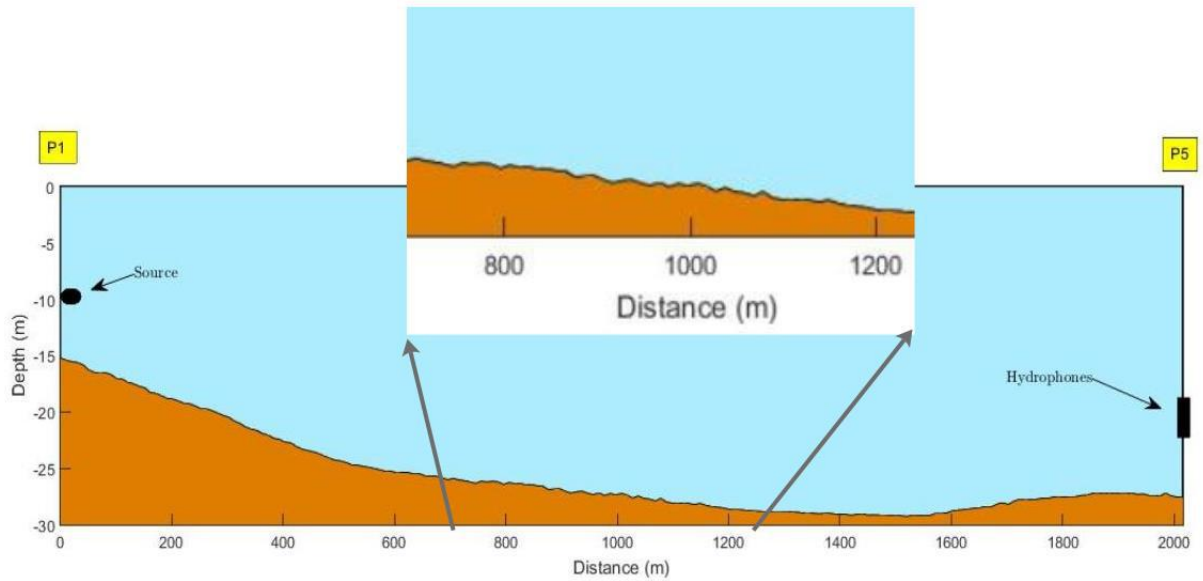


Figura 2.4: Perfil batimétrico da visada P1P5

2.1.4 Perdas e eficiência da propagação:

A análise da relação Sinal/Ruído (SNR) no canal submarino

O ruído ambiental: antropogênico, biológico e natural.

Todo ruído submarino interfere na comunicação acústica diminuindo a relação Sinal/Ruído (*Signal to Noise ratio* ou *SNR*). Contudo, as fontes e a amplitude podem ter origens e valores diferentes, que impossibilitam temporariamente a comunicação (tornando o sinal imperceptível). Seguramente, as fontes Antropogênicas de superfície e fundo (navios, "cabeças de poço", fontes para exploração geofísica etc...) são as que, normalmente, possuem maior amplitude. Fontes biológicas, excetuando-se mamíferos marinhos, que dependendo da proximidade e do volume de emissão podem interromper as comunicações, compõem a paisagem acústica submarina e têm sua amplitude variando com a atividade solar (dia/noite) e sazonal (verão/inverno). Ruídos naturais tipo chuva, ondas de superfície, deslizamentos de subfundo etc, provocam interferência temporária e alguns possuem característica impulsiva (deslizamentos de fundo e terremotos). De uma maneira geral é conveniente que antes da instalação de qualquer sistema de comunicação submarina, seja feita uma medição prolongada da paisagem acústica de forma a proporcionar um correto valor do ruído ambiente esperado a fim de compor o planejamento e requisitos do sistema.

Biomassa.

A biomassa animal (cardumes, grandes peixes, mamíferos) e vegetal (bloom de algas, fitoplâncton e outros) atuam como obstáculos refletores e absorvedores da

energia acústica que impactam na transmissão, seja na geração de multicaminha-mento seja como absorvedor ou refletor de energia ou estimulando o aumento do ruído ambiental (biológico e/ou antropogênico (pesca)). Por vezes, causam distúrbio temporal mas dependendo da região (enseadas e baías) provocar interrupções mais perenes. No caso das RAS, a predição (conhecimento) de tais fenômenos e a distribuição da topologia no sítio são fundamentais para mitigar esse problema. A alteração em profundidade dos nós (se possível) e outra forma de contornar-se momentaneamente o problema de forma a sustentar o enlace ou mesmo a medição do fenômeno.

2.1.5 A escolha da faixa de frequência para comunicação submarina

Em um projeto de análise de desempenho de uma RACS, a definição da faixa de frequência é fundamental para a viabilidade da comunicação entre nós e o funcionamento da rede em si. A taxa de transmissão e a avaliação da capacidade do canal, dentro das limitações impostas pelo meio submarino e fronteiras (superfície e fundo), são dentre outros itens, função da faixa de frequências escolhida. Na prática, a escolha da frequência ótima para a distância permite escolher uma banda de transmissão ao redor dela e ajustar a potência de transmissão e o nível da relação sinal/ruído (SNR) desejada. Utilizamos o trabalho de STOJANOVIC [9] extrapolando-o para águas rasas de forma obtermos uma curva para a distância de 2 km (maior distância entre nós) e a frequência máxima para essa distância, obtendo assim a banda ideal para operação. Cabe ressaltar que este tópico foi aqui incluído para manter a coerência lógica na apresentação do assunto. Contudo, o desenvolvimento mas elaborado sobre este tema encontra-se no Capítulo 4, na seção 4.2.1 e resultados apresentados na figura: 4.1.

2.2 Notas sobre técnicas de processamento utilizadas na comunicação acústica submarina

Camada física (canal acústico submarino):

Um grande desafio para a comunicação acústica submarina é a sustentação do enlace. Fatores limitantes como banda limitada, velocidade da onda, multipercursos, propriedades refrativas do meio, desvanecimento severo, variabilidade temporal, saltos e espalhamentos Doppler são alguns dos problemas a enfrentar. Contudo, algumas técnicas têm se mostrado promissoras, resumidamente CHITRE *et al.* [18] apresentam as seguintes:

- Equalização do canal:

Visa combater o longo espalhamento de retardo (*delay spread*), gerado pelos multicaminhamentos impostos pelo fundo, superfície e o efeito doppler, se incorporada a não linearidade na equalização, gerado pelo movimento de fontes e receptores.

Técnicas empregadas: Modulações coerentes de fase PSK conjugada com equalizadores do tipo DFE e diversidade espacial; equalização esparsa e com resposta parcialmente esparsa; equalização cega (*blind equalization*), equalização turbo (*turbo equalization*)

- Conjugação de fase:

Reduz o desvanecimento e o espalhamento de retardo do sinal e aumento a relação SNR.

Técnicas empregadas: Espelhamento por tempo reverso (*time reversal mirrows*) no domínio do tempo e conjugação ativa de fase (*active phase conjugation*) no domínio da frequência - Reduz espalhamento de retardo do sinal (*delay spread*) por meio da compressão temporal do método, enquanto a focagem espacial, que pressupõe múltiplos receptores, aumenta a SNR e reduz o desvanecimento (não elimina a IIS completamente). Se implementada em conjunto do um DFE melhora a Interferência Intersimbólica e utilizando filtros-otimizados (*optimal filters*) na transmissão e recepção pode eliminar a IIS, contudo necessita de sondagem do canal na TX e na RX e é extremamente complexa; Conjugação Passiva de Fase (*Passive Fase Conjugation*) com a modulação da posição do pulso *Pulse Position Modulation*. Requer que o espaço entre sinais seja maior do que o retardo de espalhamento. Esta técnica requer a premissa de um canal quasi-estático (*quasi-static channel*) que pode ser relativamente relaxada na conjugação com um DFE. Contudo, canais rapidamente variantes no tempo resultantes de nós móveis podem limitar o uso da técnica para comunicação móvel (AUV em 2D RAS ou 3D RAS);

- Modelagem do Canal:

O projeto de um sistema de comunicação não pode prescindir de um bom entendimento da física existente no canal de comunicação. Dentre os vários modelos para águas rasas alguns tem se destacado, sendo:

Modelo de raios: Fornece uma boa avaliação da estrutura de multicaminhamento existente no canal mas não representa natureza dinâmica do canal nem sua evolução temporal. Este tipo de modelo tem sido acoplado com modelos dinâmicos de superfície (ainda não acurados o suficiente para gerar resultados satisfatórios). Ademais, as variações temporais não estão restritas

as chegadas refletidas na superfície, gerando mais um complicador;

Modelos de canal com desvanecimento Rayleigh ⁷: O modelo é questionado quando as chegadas discretas podem ser notadas na resposta do canal. Sem consenso na Academia sobre sua validade em águas rasas;

Modelo de canal implementando o ruído Gaussiano aditivo, contudo alguns canais acústico submarinos exibem comportamento de ruído impulsivo devido à vida marinha (no caso o exemplo dado é do Camarão estalo (*snapping shrimp*)).

Em que pese alguns modelos de propagação consagrados na acústica submarina para predição do campo acústico com Kraken, Belhop, Traceo, Monterey-Miami PE e outros, TODOS, sem exceção ainda não foram adaptados para comunicação acústica submarina e apresentam melhor desempenho se adaptados ao local de uso, ou seja, não há qualquer consenso sobre os modelos de guia de ondas ou de canal consagrado, sendo uma área totalmente aberta para pesquisa e desenvolvimento.

- Modulações multiportadoras:

Consiste de uma solução atrativa para sistemas de comunicação de banda larga e portadora única onde a banda é subdividida para processamento.

Técnica empregada: OFDM

Um sistema OFDM possui vantagens que fazem dele um dos mais pesquisados em CAS, pois permite equalização no domínio da frequência, modulação e demodulação implementável em FFT, grandemente simplificada se o intervalo de guarda for maior que o espalhamento do retardo entre símbolos consecutivos. Contudo, na prática os sistemas incoerentes ainda são o mais usados e robustos na comunicação submarina deixando os sistemas coerente, como a modulação OFDM, ainda na fase de avaliação.

- Modulação espacial:

Objetivando a ampliação da capacidade do canal com a adição de um número mínimo de antenas para recepção de transmissão.

Técnica empregada: Este aumento de capacidade se traduz no aumento da taxa de transmissão de dados via o uso de técnicas de processamento e codificação espaço-tempo em múltiplas entradas e múltiplas saídas (Técnica MIMO), ou seja, aumento no número de transdutores para TX e RX. Contudo a técnica necessita que o espaçamento dos transdutores seja maior que a escala de coerência espacial na frequência de interesse, fato que pode vir a causar

⁷O sinal recebido é a soma de um grande número de chegadas por multicaminhamento onde cada uma é modelada por um processo estocástico Gaussiano complexo.

restrições significativas na construção de antenas, principalmente em VAS onde ocorre restrição de espaço.

Pelo acima apresentado CHITRE *et al.* [18] demonstra o grande esforço de pesquisa que está sendo realizado de forma a se transpor a intermitência do enlace e, de fato, a transposição de algumas tecnologias do Ar para o Mar têm promovidos avanços significativos. Nosso trabalho, como será apresentado no Capítulo 4, buscará contribuir neste sentido, especificamente na modelagem do canal.

2.3 Redes Acústicas Submarinas

Cabe salientar que aqui serão apresentados tópicos relevantes sobre o tema, apenas para que o leitor tenha uma idéia da abrangência e sua interseção com os objetivos deste trabalho.

2.3.1 Caracterização

As RAS são formadas por nós portadores ou não de sensores, com capacidade de comunicação bidirecional, atuando de forma cooperativa, recebendo e enviando mensagens de outros nós, adjacentes ou não (no caso de uma RAS densa) visando a sustentação dos enlaces entre nós e conseqüentemente de toda a Rede.

Normalmente, essas Redes possuem um nó centralizador (ponte de ligação ou "Gateway") e/ou acumulador, tipicamente, com capacidade de enlace rádio para transmissão dos dados para terra.⁸

A coleta de parâmetros físicos, químicos, biológico e geológicos nos oceanos de forma contínua e considerando sua variabilidade espaço-temporal é uma demanda necessária à sua exploração. Realizar tal tarefa no mar não é simples. Isso devido às suas dimensões e às dificuldades operacionais inerentes ao ambiente marinho, tanto de superfície como submarino. As medições realizadas por plataformas de coleta (navios, boias, fundeadouros, gliders, flutuadores, etc.) ou por estações fixas têm sido o método tradicional de coleta. Contudo a medição em tempo real, contínua e cooperativa é o grande desafio das últimas décadas. Para realização de tal tarefa a comunicação entre os sensores e a transmissão dos dados coletados é mandatória. Com o avanço da informática e das telecomunicações nos últimos 50 anos a instalação remota desses sensores com transmissão dos dados por ondas eletromagnéticas via cabo, rádio ou telefonia (seja fixa ou móvel) tem sido largamente utilizada. Com o desenvolvimento da tecnologia da comunicação digital sem fio (telefonia celular e redes locais e regionais sem fios), ocorreu a tendência natural de sua experimentação

⁸A utilização do enlace acústico transmissão dos dados para fora do domínio da RAS é possível caso a quantidade de dados seja pequena.

no meio líquido. Com o uso cerceado das ondas eletromagnéticas na subsuperfície dos oceanos, surge a alternativa tecnológica da comunicação entre sensores e com a superfície via ondas de pressão acústica. Conjugando essa alternativa com a tecnologia de transmissão digital, sem fio entre vários nós, com sensores de forma cooperativa define uma Rede Acústica de Comunicação Submarina ou, resumidamente, Rede Acústica Submarina, RAS, nos oceanos, e, Subaquática, nos corpos d'água em geral. Com o atrelamento de outros sensores e equipamentos aos nós de uma RAS, obteremos diversas outras funções para a rede, como já apresentado na seção 1.4.

Todavia, cabe a nota sobre a existência de outros tipos de estabelecimento de comunicação submarina possíveis, como: a por cabo (óticos ou de metal); por fibra ótica a laser e até a eletromagnética (rádio e ótica) para curtas distâncias.

Em que pese a dificuldade de implementação de uma rede submarina deve possuir as mesmas propriedades de uma aérea, elencada por PERLMAN [49], quais sejam:

- *escopo amplo*, ou seja, atender as diversas demandas, o que no nosso caso passa por diferentes tipos de sensores com diferentes taxas de aquisição e de necessidade de comunicação; *escalabilidade*, ou seja, permitir o crescimento do número de nós e de redes interligadas;
- *robustez*, ou, manutenção do enlace mesmo que ocorram falhas individuais nos nós ou perturbações no meio;
- *autoconfiguração*, ou, em caso de falha total, os próprios nós serem capazes de se religarem (recarregar) e retornar ao funcionamento normal (característica fundamental para nós submarinos que não possuem possibilidade de acesso que não seja remoto);
- *capacidade de adaptação*, ou seja, permitir ao administrador alterar parâmetros individualmente para otimização da performance da rede (outra característica fundamental para nós submarinos); e
- *determinismo*, ou, para condições idênticas, idênticos resultados; e
- *capacidade de migração*, ou seja, que o projeto da rede permita que novos protocolos seja possíveis de implementação sem necessidade de alteração no projeto.

2.3.2 Arquiteturas 2D/3D

Apresentaremos aqui as arquiteturas descritas em XIAO [50, Pag.12] onde basicamente 3 tipos dominam, sendo:

1. Estática ou fixa ou 2D (Fig.: 2.5)

Nós fixo no fundo, conectados a um nó repetidor/centralizador encarregado da comunicação com a superfície (*gateway*) com capacidade de enlace vertical, distribuídos em uma ou mais agrupamentos (*clusters*), com enlaces acústicos horizontais e capacidade de troca de informações entre nós (*multihop*). O nó centralizador por sua vez é conectado a terra via enlace RF ou satélite e normalmente possui dois transdutores, um para comunicação horizontal e outro para comunicação vertical ⁹. As funções do *Gateway* basicamente são enviar comandos de configuração aos sensores e armazenar ou retransmitir os dados coletados pelo sensores nos nós distribuídos.

2. Semi-móvel ou 3D (Fig: 2.6)

Nós ancorados no fundo, com o grau de liberdade oferecido pelo tipo e distância da amarra de fundeio, normalmente, posicionados em diferentes profundidades de forma a coletar diferentes fenômenos oceanográficos em 3D. Sua distribuição, grau de liberdade e topologia são determinadas pelo alcance de comunicação dos nós e os graus de cobertura, pelo alcance dos sensores.

3. Redes 3D dinâmicas (Fig: 2.7)

São RAS 3D com alguns nós autônomos ou com *todos* os nós autônomos (Redes descentralizadas) que visam a coleta adaptativa, comando e controle de VAS, posicionamento e adensamento adaptativo dos nós-sensores conforme o interesse ou necessidade de aumento da taxa de coleta ou mudança da área focal. Nós devem possuir capacidade de autoconfiguração, detecção de falha de comunicação e redefinição da topologia ideal. Os nós podem, também, ser usados para instalação e manutenção da rede e de outros nós tendo maior autonomia e menor dependência da comunicação com a base.

⁹No caso de água profundas de ser um transdutor para longo alcance

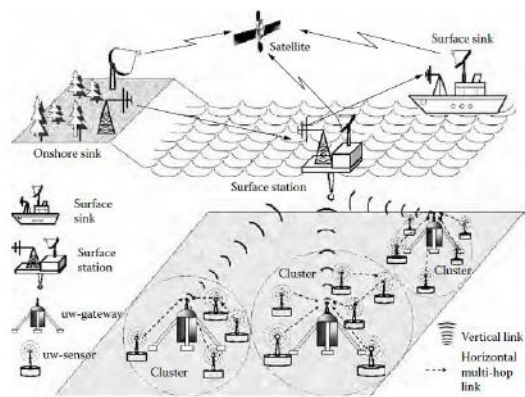


Figura 2.5: RAS 2D Estática.
 Fonte: XIAO [50]

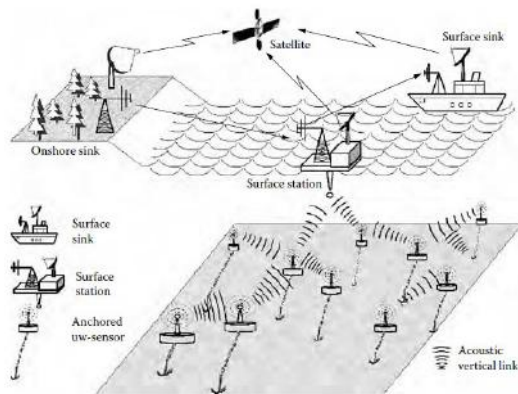


Figura 2.6: RAS 3D Semi-móvel.
 Fonte: XIAO [50]

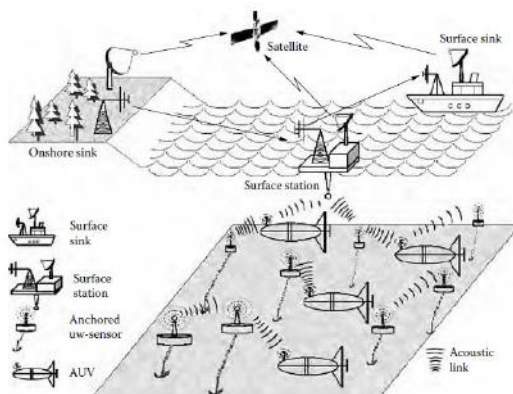


Figura 2.7: RAS 3D Móvel ou dinâmica.
 Fonte: XIAO [50]

2.3.3 O modelo OSI aplicado às RAS

Dentro da estrutura, tecnologias e conceitos herdados das redes sem fio o modelo de camadas *Open System Interconnection* (OSI) da *International Organization for Standardization* (ISO) com seus protocolos foi inicialmente adotado nas RAS. A figura 2.8 apresenta esta estrutura. No caso das RAS as camadas de transporte tem uma relevância maior, pois a adequação das demais camadas ao problemas existentes na camada física (oceano ou meio aquoso) é uma das áreas de pesquisa em comunicação submarina (protocolos ótimos para as camadas de transporte)

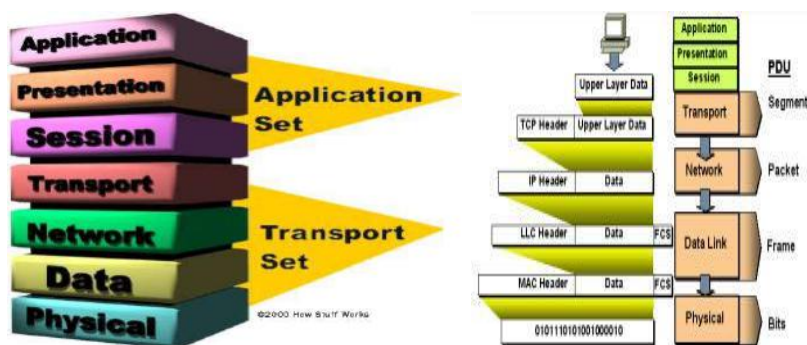


Figura 2.8: Estrutura OSI para camadas de redes.

Adaptado de PERLMAN [49] e <http://computernetworkingsimplified.com/wp-content/uploads/2013/11/LLCMAC.jpg>.

Teceremos alguns comentários sobre o conjunto de camadas de transporte ante sua relevância para as RAS.

A camada física ou o canal acústico submarino

Nossa camada física já foi amplamente descrita nas seções 2.1.3 e 2.2, contudo cabe aqui alertar, que na estrutura OSI é da camada física que dependem todas as demais, ou seja, enquanto um pacote de informação não for recebido completa e corretamente (informação mais os pacotes de endereçamento para outras camadas) os demais protocolos das camadas superiores não são iniciados. Basicamente esta camada lida com: tipos de conectores (no nosso caso transdutores acústico); com a conversão da onda mecânica em impulsos elétricos; e sincronização dos níveis dos bits transmitidos;

O óbvio nunca deve ser desprezado, em outras palavras, sem o enlace ponto a ponto (nó a nó) não há rede!

Estabelecido o enlace, a escolha do protocolo para a camada física dependerá das condições do canal, da necessidade ou não de segurança nas comunicações, da capacidade de processamento do nó, das taxas de transferência necessárias e da eficiência energética requerida para o nó. Destarte, num canal limitado em banda a

otimização do tráfego de protocolos entre camadas para obtenção de maiores taxas de transmissão pode ser forçoso, indicando a necessidade de uma quebra na arquitetura OSI.

AKYILDIZ *et al.* [51] por exemplo, colocam que para canais horizontais em águas rasas a variação temporal do sinal é a principal limitação para a performance de estação de recepção. O multicaminhamento cria dois problemas básicos: o espalhamento de retardo que gera ISI e o salto em fase do envelope do sinal, dificultando a comunicação via coerência de fase em alta velocidade.

Cabe assim, elencar resumidamente a grande diferença entre os problemas da camada física das redes eletromagnéticas e da acústica de modo a dimensionar o nosso maior problema, qual seja, a camada física. A tabela 2.2 apresenta os parâmetros, diferenças e técnicas de tratamento do problema.

Parâmetro do canal	Diferença Acústica/Rádio	Implicações no processamento do sinal e no projeto de RAS
Largura de Banda / SNR	Largura de banda severamente limitada e dependente da distância	Necessita de compressão dos dados, modulações eficientes para a banda; seleção correta da topologia; compartilhamento e reuso de recursos
Desvanecimento / Multicaminhamento	ISI abrange dezenas de símbolos; Desvanecimento/Interrupção não capturados nos modelos	Equalização adaptativa; processamento de arranjo; Necessidade de protocolos dinâmicos; Necessita de otimização para as camadas
Velocidade do som	Velocidade da luz várias ordens de magnitude maior que a do som; distorção Doppler severa; retardos de propagação muito longos	Sincronização (retardo de fase); latência de retorno do canal; Protocolos de redes necessitam de taxas de transferências eficientes;

Tabela 2.2: Resumo das características do canal.

Adaptado de STOJANOVIC [19]

Camada de Enlace ou Dados

Segundo PERLMAN [49] a camada de dados transmite pedaços de informação via o enlace lidando com problemas como: a checagem dos dados para verificar se o

pacote está ou não corrompido; coordenação do compartilhamento do meio (camada de controle de acesso ao meio, *Medium Access Control - MAC*), fundamental num meio onde o espalhamento de retardo é significativo; e endereçamento dos nós. Sua unidade de enlace é o quadro que por sua vez é composto por: preâmbulo, início, endereço MAC, endereço MAC de origem, tipo de carga, carga ou *payload*, e código de verificação de erro. Normalmente é implementada em duas camadas, a MAC, que cuida das colisões e endereçamento dos quadros e a de controle lógico dos enlaces (LLC) responsável pela velocidade de comunicação.

Cabe a ressalva de que numa rede aérea a camada pode conectar diferentes enlaces o que no caso da rede submarina não existe, pois o enlace é único, acústico.¹⁰

Camada de Redes

Lida com problemas de cálculo de rota, fragmentação e remontagem de pacotes e controle de congestionamento. Para a acústica submarina somente algumas categorias de protocolos são aplicáveis. Para o roteamento existem três categorias: Os proativos, os reativos e os geográficos, sendo:

- Proativos (e.g., DSDV, OLSR)
Tentam minimizar a latência das mensagens induzidas pela descoberta de rota mantendo um tabela de informações de rotas de todos os nós para todos os nós, obtida pela difusão de pacotes de controle que contêm as informações da tabela. Contudo, provoca grande sobrecarga de sinalização para o estabelecimento de rotas da primeira vez e quando a topologia é alterada por falha ou mobilidade de um nó. Por este motivo não são apropriados para RAS.
- Reativos (e.g. AODV, DSR)
Só inicia a busca pela rota quando solicitado. Um vez solicitado mantém a rota até a rota ser descartada. Possuem grande latência mas são adequados ambientes dinâmicos, contudo não são adequados para RAS por agregar mais latência a existente no meio, que já é alta.
- Protocolos geográficos
Estabelecem as rotas obtendo a informação de localização, ou seja, cada nó seleciona o seus contrapartes mais próximo baseado na informação de distância. Apesar de promissora esta técnicas depende da precisão do posicionamento submarino.

¹⁰N.A. Este autor não tem conhecimento de qualquer nó de rede acústica submarina implementado com enlaces diferentes do acústico, apesar de que teoricamente tanto o eletromagnético como o ótico serem passíveis de implementação subaquática

Camada de Transporte

PERLMAN [49] define a camada de transporte com a que estabelece um duto de comunicação confiável entre dois sistemas (no nosso caso nós). Ela lida com erros introduzidos pela camada de redes como perda, duplicação, reordenamento de pacotes, fragmentação e remontagem e reage ao congestionamento da rede. É a camada que pode ser acessada por API (*Application Program Interface*) padronizadas (i.e *sockets* logo é a que proporciona acesso ao mundo externo (operador, gerente, programador etc.)

As figuras 2.10 e 2.9 trazem um resumos dos protocolos MAC e de roteamento existentes.

Após esta rasa incursão no mundo das redes e comunicação submarina visando propiciar ao leitor mais um aspecto dentro do panorama do nosso problema, iremos agora abordar um outro aspecto relevante na implantação de uma RAS, a coleta de dados e experimentos no mar.

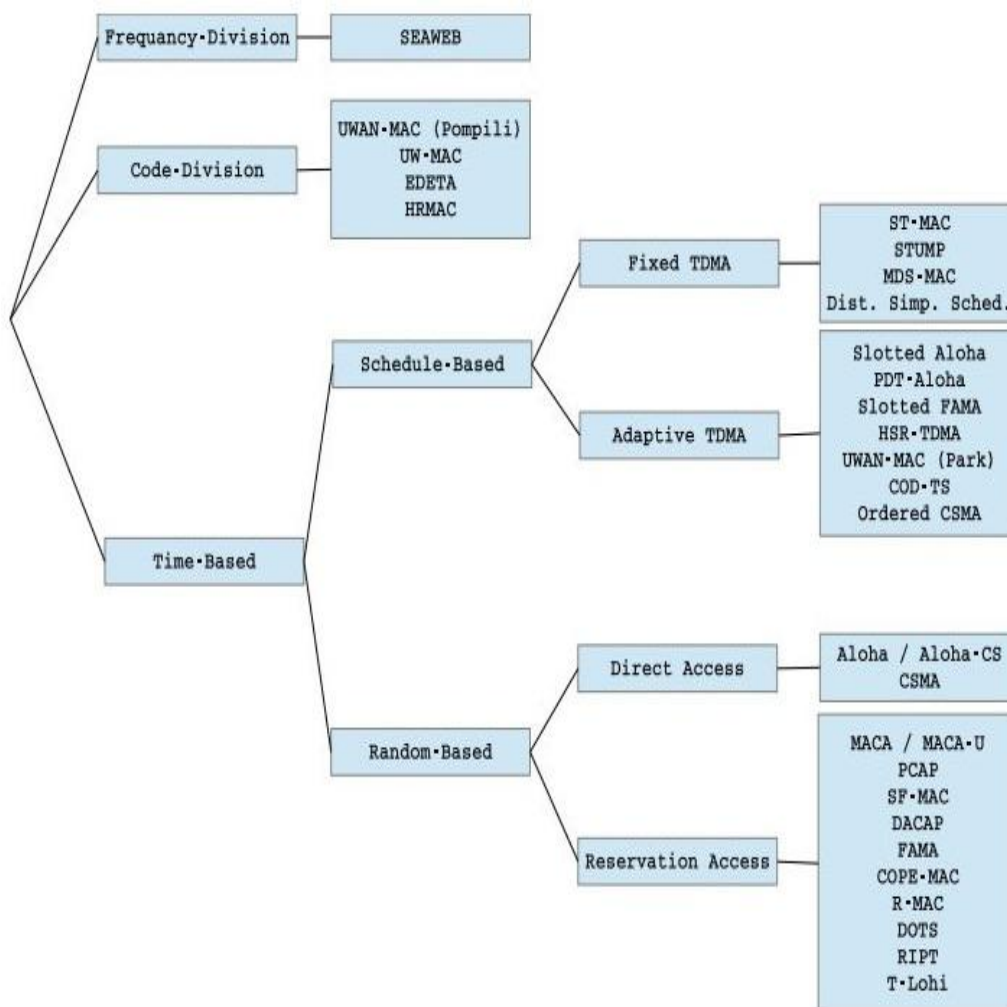


Figura 2.9: Classificação do protocolos MAC segundo CLIMENT *et al.* [3]

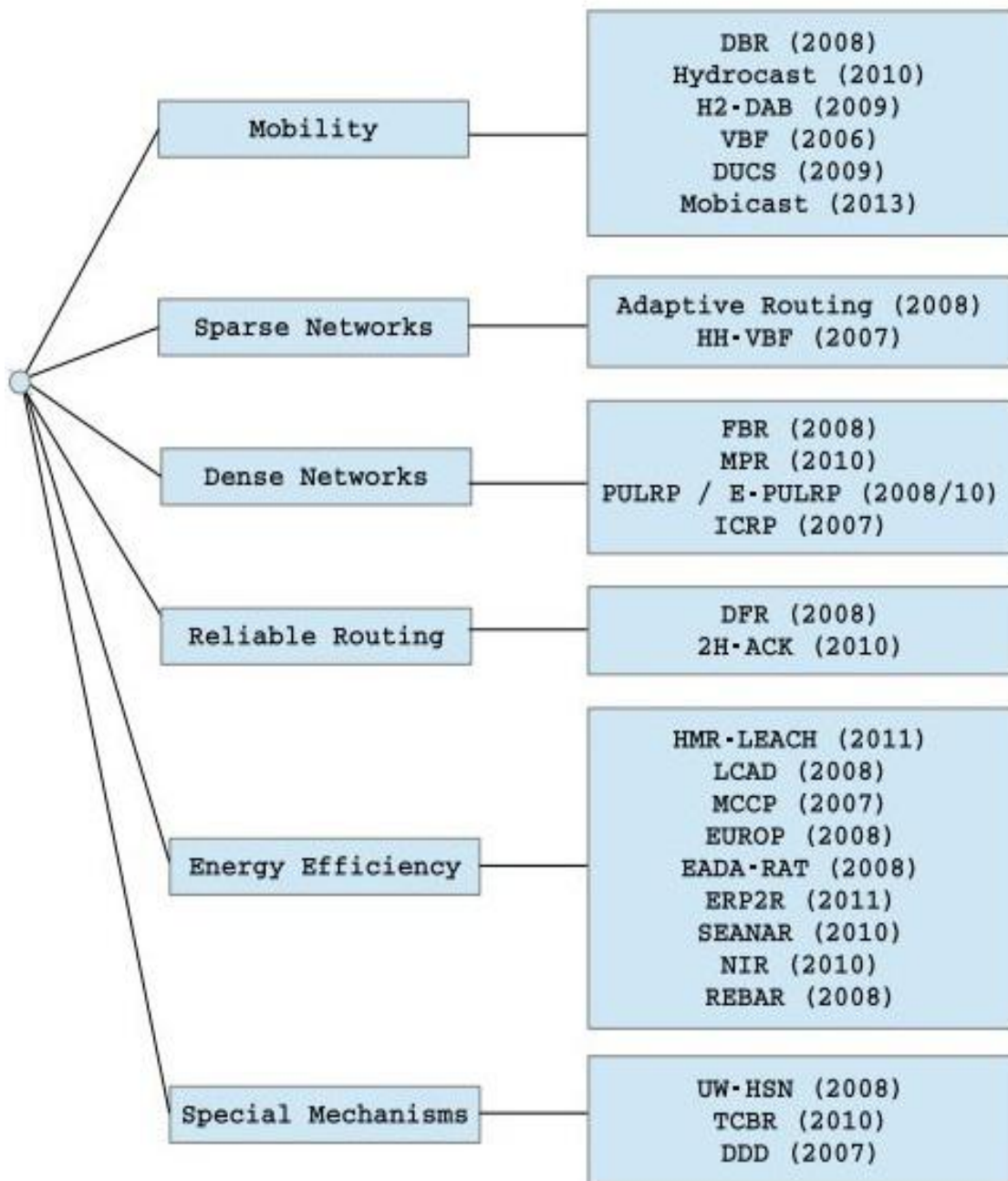


Figura 2.10: Classificação do Protocolos de Roteamento segundo CLIMENT *et al.* [3]

Capítulo 3

Comissão RASSCOM'14

3.1 Objetivos

O objetivo da comissão 'Redes Acústica Submarina de Sensores e Comunicação' (RASSCOM'14) foi coletar dados para cálculo da perda de transmissão (TL), em uma topologia específica para RAS fixas, com transdutores pré-definidos e posicionados numa geometria favorável à coleta dos dados e ao enlace dos nós.

3.2 Plataformas e dados coletados

Plataformas:

Foram utilizados na comissão duas embarcações do IEAPM. O Av. Pq. Asp. Moura - Aviso de Pesquisa Aspirante Moura e o Aviso de Pesquisa Diadorim (Características vide Apêndice), com ancoragem dupla do Av.Pq.Diadorim (proa e popa), nos quatro (4) pontos de transmissão (TX) (P1, P2, P3 e P4), e com ancoragem simples do U14-Av.Pq.Asp. Moura no de ponto fixo de recepção, (RX), P5. O posicionamento na RX foi corrigido com ajustes via máquina de suspender e motor (desengrazado, para diminuir o ruído gerado pelo navio, mas funcionando por motivos de segurança). Na transmissão, após a dupla ancoragem e posicionamento, o desengrazamento era feito e a transmissão realizada.

Coleta de dados:

Além da própria medição do sinal, em condições controladas, o que no mar nem sempre é a ideal, buscou-se a medição dos principais parâmetros oceanográficos afetos aos experimentos acústicos (condutividade, temperatura, salinidade e pressão) em pontos predefinidos e nos pontos de TX e RX. A medição desses parâmetros influenciam o perfil de velocidade do som, a variabilidade do guia de ondas em estudo (oceano) e no cômputo da TL, em última instância. Alguns parâmetros, como a

composição do fundo e subfundo, que também participam da atenuação e variabilidade do sinal e, conseqüentemente, da TL, foram coletados de outros experimentos já publicados (e.g., DA SILVA [52]) devido ao seu papel secundário face à concepção do modelo (modos com pouca ou sem interação com a superfície e o fundo) e nos resultados qualitativos da validação do modelo proposto. Dados de vento (forçante de superfície) foram obtidos da estação A606 - Arraial do Cabo, do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), posicionada nas dependências do IEAPM e com posição privilegiada para medições de vento na região das enseadas. A coleta de dados do espectro de ondas de superfície com o equipamento próprio, o ondógrafo, não foi possível de realizar. Contudo, novamente dentro da proposta do nosso modelo, as iterações com a superfície serão minoradas tornando sua coleta secundária. Os dados de ruído ambiente foram coletados durante todo o experimento e serviram para fornecer uma avaliação da relação sinal/ruído (SNR). Dados de correntes de fundo, que poderiam inserir um espalhamento Doppler no sinal não foram coletados devido a ausência de equipamento para tal. Contudo, como a estação de recepção estava instalada fixa, ou melhor, com o menor grau de liberdade possível, esperamos ter minorado este efeito.

3.3 O ambiente das enseadas de Arraial do Cabo

O site escolhido para a futura RAS configurada para comunicação e monitoramento ambiental foi o da região das enseadas de Arraial do Cabo, RJ, na parte mais Sudoeste da costa brasileira. As enseadas de Arraial do Cabo estão mapeadas na Carta Náutica 1503, da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil (MB), e é famosa tanto pela ilha adjacente, a Ilha do Cabo Frio, como pelo fenômeno responsável pela denominação do cabo.

A ressurgência:

É o surgimento persistente de águas frias na superfície e subsuperfície próximas à costa que, no nosso caso, ocorre ao redor da ilha invadindo as enseadas e se espalha por toda região, indo ao longo da costa, na direção Sul, até o Rio de Janeiro. Esse fenômeno ocorre, principalmente, durante o período primavera-verão (SET-MAR), sendo modulado por uma maré semidiurna na região das enseadas. A gênese do fenômeno possui três razões principais: primeiro, a inflexão de quase 90 graus da costa brasileira, onde a ilha de Cabo Frio é o ponto de viragem. Em geral, a costa brasileira desde Pernambuco até o Rio de Janeiro é NE-SO, mas na Ilha de Cabo Frio, a costa do Estado do Rio de Janeiro vira para E-O até a cidade do Rio de Janeiro (MUEHE [53]); segundo, a presença de fortes e persistentes ventos (aproximadamente 10 m/s de pico) vindos de Leste-Nordeste durante o período SET-MAR

(primavera-verão). IKEDA *et al.* [21] observam também que a Água Central do Atlântico Sul ou ACAS¹ leva perto de 24-30 horas, após o estabelecimento do vento Nordeste (intensidades maiores que 5 m/s. Fig.: (3.7), para aflorar. Finalmente, o terceiro é o encurtamento da plataforma continental na direção leste do cabo (aprox. 60 mn), onde a ACAS, que é normalmente contida pelas massas d'água de menor profundidade pelo fenômeno de bombeamento de Ekman², aflora para a superfície do Cabo Frio até a costa da cidade do Rio de Janeiro. A ressurgência na região tem influência direta no campo termohalino que, por sua vez, impacta o perfil de velocidade do som em toda a região do cabo frio, enseadas e sacos adjacentes. Isso desempenhará um papel importante no enlace entre os nós, criando um duto próprio, dentro das enseadas e no modelo, como será mostrado mais tarde.

Essas alterações do perfil ficam caracterizadas basicamente dentro da área do experimento em quatro tipos, quais sejam: com ventos NE-E predominantes (Perfil de NE-tipicamente com fortes gradientes, caso do dia das medições, vide figura.: 3.1), enfraquecimento do ventos de NE-E e predominância de SO (Pré-Sistemas Frontais - tipicamente com perfis de menor gradiente), ventos de SO predominantes (perfil de SO Perfil Isotérmico) e os de retorno ao regime dominante (Perfil Pós Sistemas Frontais - perfil caótico).

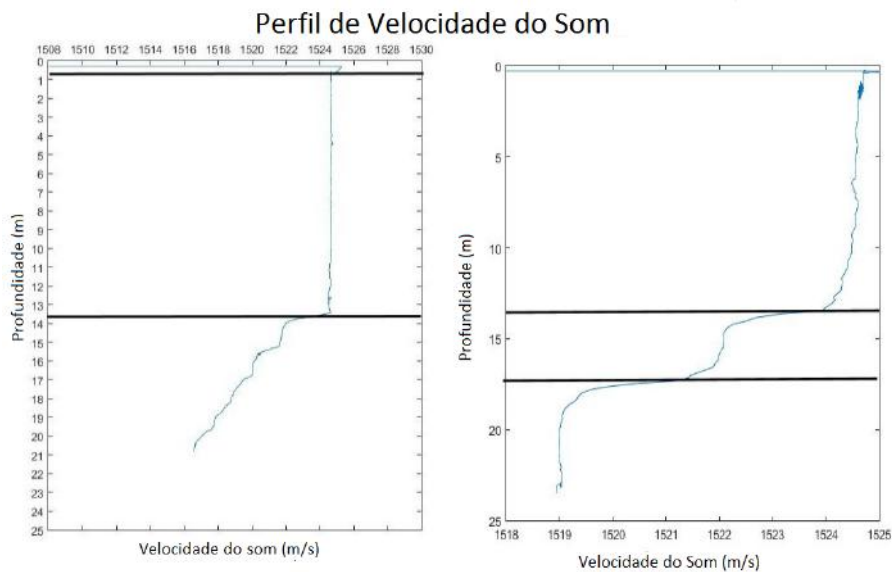


Figura 3.1: SVP em P5 (esq) 12h:35m, (dir) 10h:49m

¹Águas oriundas da Antártica, com temperatura de características: $5.0 - 18.0^{\circ}C$ e intervalo de salinidade: $34.3 - 35.8^{\circ}/_{\text{oo}}$, ricas em nutriente, trafegando subsuperfície na direção S-N normalmente junto a quebra da plataforma na costa Brasileira

²Fenômeno oceanográfico no qual a camada superior do oceano é deslocada ao longo da costa por arrastamento pela forçante de superfície (vento) gerando um movimento de massas d'água subsuperfície perpendicular à costa provocando o levantamento das massas d'água subjacentes (ressurgência)

3.3.1 Topologia e geometria entre nós (transmissor/receptor)

A posição da rede de nós foi escolhida com três principais objetivos futuros: primeiro, a capturar todo o tráfego de embarcações (ruído antropogênico) do porto de Arraial do Cabo; segundo, capturar o ruído biológico das enseadas secundárias na região (Anjos, Forno e Carneiro), na Ilha de Porcos e na parte norte da Ilha de Cabo Frio (CFI); e terceiro, manter os nós em águas rasas com fácil acesso em uma profundidade que pode ser facilmente alcançada pelos mergulhadores (para fins de manutenção). Essa escolha de configuração para a topologia da futura rede de comunicação e detecção exige que as ligações ponto a ponto entre o nós sejam estáveis para permitir a melhor taxa de transmissão, pelo maior tempo possível (Fig. 3.2).

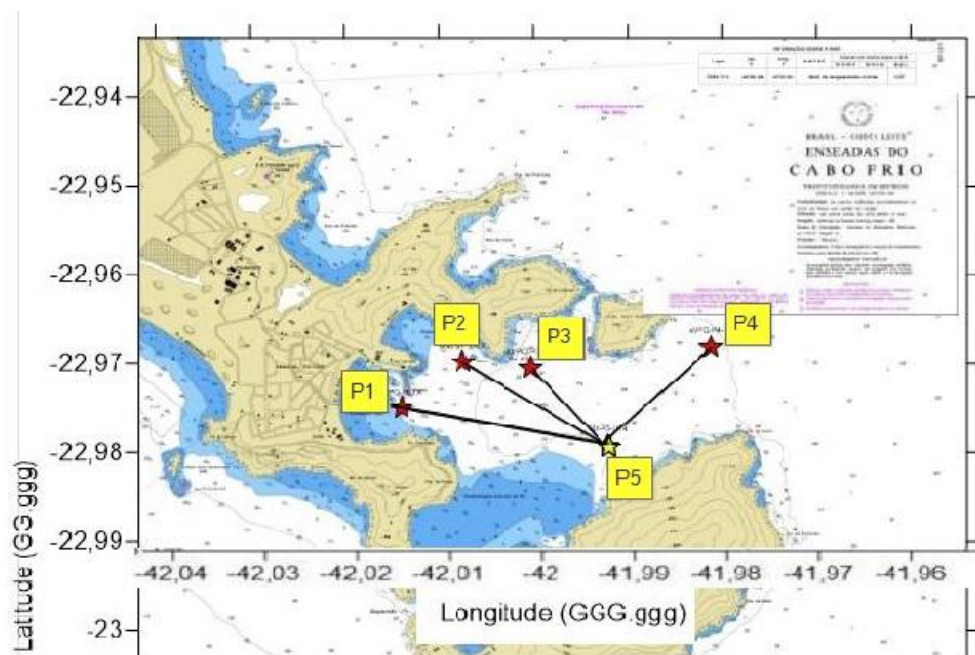


Figura 3.2: Topologia proposta para um RAS em Arraial do Cabo, RJ

3.3.2 O canal acústico local

3.3.3 Batimetria

A batimetria foi obtida a partir de uma série de levantamentos hidrográficos multifeixes e monofeixes (Fig .:3.3) que permitiram um perfil batimétrico bastante preciso entre os pontos TX e RX, como mostrado nas figuras, 3.4 e 3.5, e usado para calcular a profundidade média para o fundo, ou seja, nosso limite inferior para o guia de onda utilizado no modelo de propagação para o cálculo da TL (linhas retas nas figuras 3.4 e 3.5).

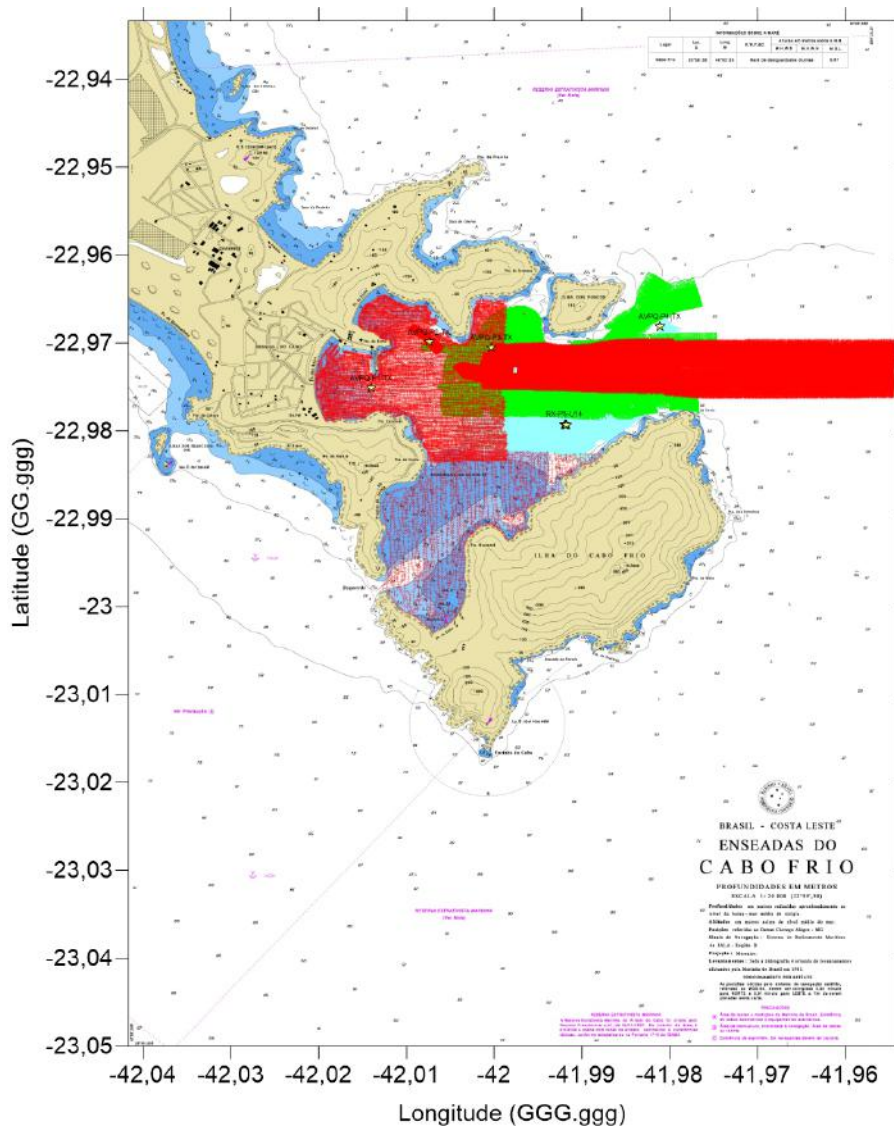


Figura 3.3: Reunião de todos aos levantamentos batimétricos utilizados na geração do perfil de fundo das visadas

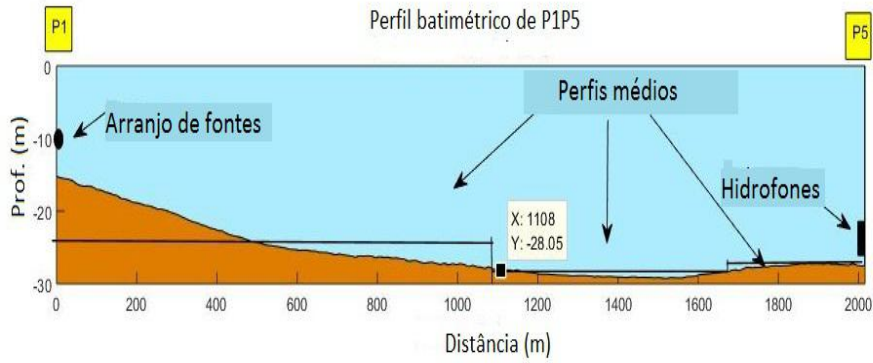


Figura 3.4: Perfil batimétrico da visada P1P4 (TX) para P5 (RX)

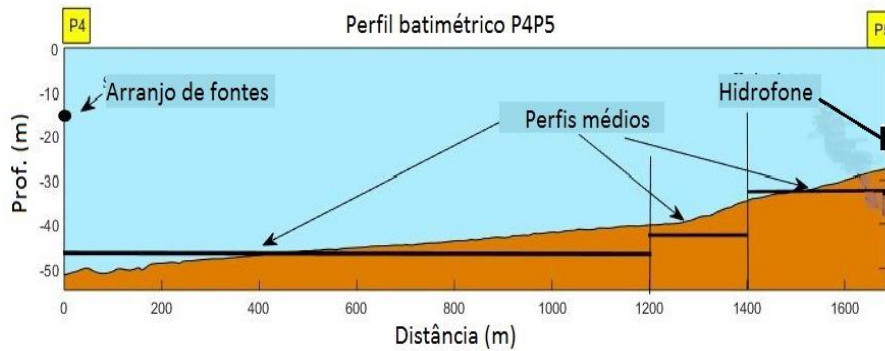


Figura 3.5: Perfis batimétricos das visadas P1P4 (TX) para P5 (RX)

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN)
 CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM)
 BANCO NACIONAL DE DADOS OCEANOGRÁFICOS (BNDO)
 PREVISÕES DE MARÉS
 PORTO DO FORNO (ESTADO DO RIO DE JANEIRO)

Latitude: 22°58,3'S Longitude: 042°00,8'W
 Fuso: +03.0 Ano: 2014
 Instituição: IEAPM 51 Componentes
 Nível Médio: 0.68 m Carta: 01503

Lua	Dia	Hora	Alt. (m)
Cheia	THU 09/10/2014	02:41 1.3	
		09:17	0.1
		14:58	1.1
		21:30	0.1

Figura 3.6: Previsão de Maré para 09OUT18

3.3.4 Ventos, superfície e condição de ressurgência:

As condições do guia de onda eram típicas do período de Ressurgência (MUEHE [53], TORRES JUNIOR [22] e ELIAS [23]), com ventos que sopram da direção E e NE com picos de 11 m/s e pelo menos três dias de persistência como mostrado na Fig. 3.7. Essa condição permitiu o desenvolvimento da ressurgência que entra nas enseadas de Arraial a partir de duas entradas principais: pelo *Boqueirão* (boca entre continente e SW parte de CFI) e pela entrada principal da região da enseada entre o ponto leste da CFI e *Ilha de Porcos* (ilha pequena entre o ponto P4 e P3 na Fig. 3.2) com um influxo secundário de pequena boca entre *ponto de Jararaca* e *Ilha de Porcos*. Em todas as entradas, o fluxo de maré contribui significativamente na incursão da água de ressurgência nas enseadas. As medições foram feitas as 11h45m/P45, 12h30m/P35, 13h24m/P25 e 13h48m/P1P5 durante o influxo de maré (09h17/baixa mar e 14h58m/Preamar), fato confirmado pelo SVP no ponto P5. (Fig.:3.1) e pela Tábua de marés para o dia (Fig.: 3.6).

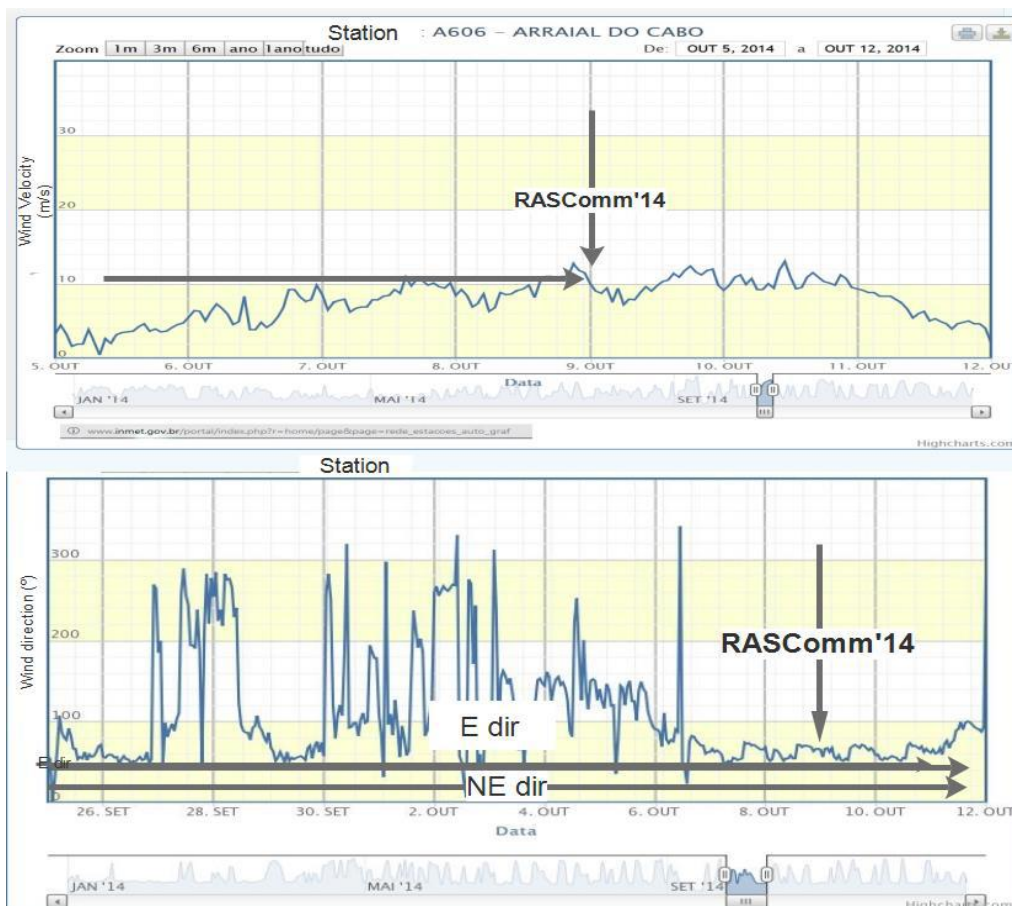


Figura 3.7: Regime de ventos (direção e velocidade) no site do experimento RASS-COM'14

3.3.5 Assoalho marinho, correntes, subfundo e superfície do mar:

O assoalho marinho das enseadas é basicamente caracterizado por areia fina e lama (DA SILVA [52]) que se altera devido ao regime de vento na região (ondas), correntes de maré e eventos de ondas extremas, principalmente no banco de areia superficial entre CFI e o continente (azul escuro na Fig.3.2), com pequenas mudanças no diâmetro do grão dentro da região de interesse (DA SILVA [52]), ou seja, dentro da topologia sugerida.

A falta de medições de correntes de superfície e subsuperfície ocorreu por dois motivos: um operacional (falta do equipamento) e outro científico, qual seja, o efeito Doppler (espalhamento e salto em frequência) terá pouca influência nos resultados de cálculo da TL, não só devido às posições semifixas dos nós, mas também devido ao fato de que o tempo de transmissão (5min) não é suficiente para uma alteração significativa na velocidade das correntes subsuperficiais, gerando apenas uma inclinação no hidrofone (caso existam e tenham força suficiente para deslocar o equipamento).

Tendo em conta que o modelo proposto foi idealizado para propagação de modos com pouca ou sem interferência com o fundo e a superfície do mar, as medidas das propriedades do fundo e do movimento da superfície foram consideradas fora do escopo deste trabalho.

3.4 Computando as perdas de transmissão

3.4.1 Objetivos

Todo o planejamento e coleta de sinais concorram para a obtenção dos valores das perdas de transmissão TL para todos os sinais LFM recebidos, de modo que fosse possível calcular toda a energia em cada um deles e compará-la com a energia do LFM transmitido..

3.4.2 Configuração dos sinais

O experimento usou um período de transmissão de 10 min (5 min LFM (CHIRP) e 5 minutos CW (Tom)) onde um sinal LFM de 5 kHz a 10 kHz com 1 s de silêncio foi transmitido durante os 5 min iniciais e em seguida um CW, também de 1 segundo, foi transmitido nas frequências 5, 5.5, 6.0 ... 10 kHz, iniciando e terminando com o mesmo período de silêncio. O sinal total obtido possui 320 segundos (16Mi de amostras). Usando uma taxa de amostragem de 50K amostras/s, foi processado de modo a produzir cortes de 1s de sinal somente com os sinais LFM recebidos. A banda de sinal de 5 a 10kHz foi autocorrelacionada com o sinal LFM transmitido para

identificar e marcar o início dos LFMs recebidos para permitir extração individual das voltagens para o cômputo da TL na recepção. Apesar da coleta de tons que visavam o estudo da estacionaridade do canal, neste trabalho lidamos somente com os sinais LFM para o cálculo da TL.

3.4.3 Estações de Transmissão e Recepção

Geometria fonte/receptor:

Infelizmente, devido a problemas operacionais durante o posicionamento não apenas os dos navios, AvPq Aspirante Moura (U14) e AvPq Diadorim- (IEAPM-01), mas também das estações de recepção (RX em P5) e de transmissão (TX em P1, P2, P3 e P4) no fundo, a geometria do experimento não foi a ideal. A fonte foi colocada na profundidade de 10 m a meio do Av.Pq.Diadorim, com um esquema de ancoragem duplo, na proa (frente) e popa (traseira), para fornecer o alinhamento com o vento local de modo a evitar a rotação do barco e manter seu través e a frente da fonte diretamente apontada para P5. A colocação da fonte foi feita usando-se um ponto fixo na proa e na popa do Av.Pq.Diadorim para garantir a posição de través e os 10 m de profundidade para a transmissão. Tal configuração foi a possível e necessária para minimizar as posições e os erros de movimento devido à ausência do sensor de atitude nas configurações de transmissão e recepção. Na recepção, o U14-Av.Pq.Asp. Moura foi ancorado a 25 m de fundo (profundidade esperada de 23 m para o hidrofone), de modo a permitir uma visada direta para todos os pontos de transmissão . Esse alinhamento também permitiu a menor variação na posição do navio, necessária à mitigação da flutuabilidade do sinal, seja devido ao *swell* ou à mudança de direção do vento ou mesmo aos movimentos das ondas(Fig. 3.8).

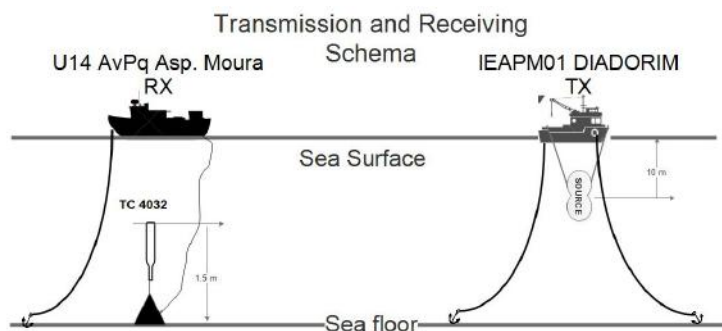


Figura 3.8: Esquema de recebimento e transmissão do teste RASSCOM'14.

3.4.4 A transmissão:

A transmissão foi feita com um arranjo linear de três fontes do tipo Piston modelo EDO 610, no qual cada fonte individualmente possui faixa de operação nominal de 5 a 9 kHz e de 3 a 11 kHz(forma estendida), conformação de feixe cônica, com 90° de largura de feixe (horizontal e vertical) @ 6.5 kHz nos pontos de 3 dB e TVR típica @ 6.5 kHz de 136 db re $\mu Pa/Volt$ @ 1 m e impedância de 7600 ohms. O arranjo com três fontes possui uma tensão de resposta de transmissão (TVR) medida em laboratório, mostrada na Fig. 3.9.

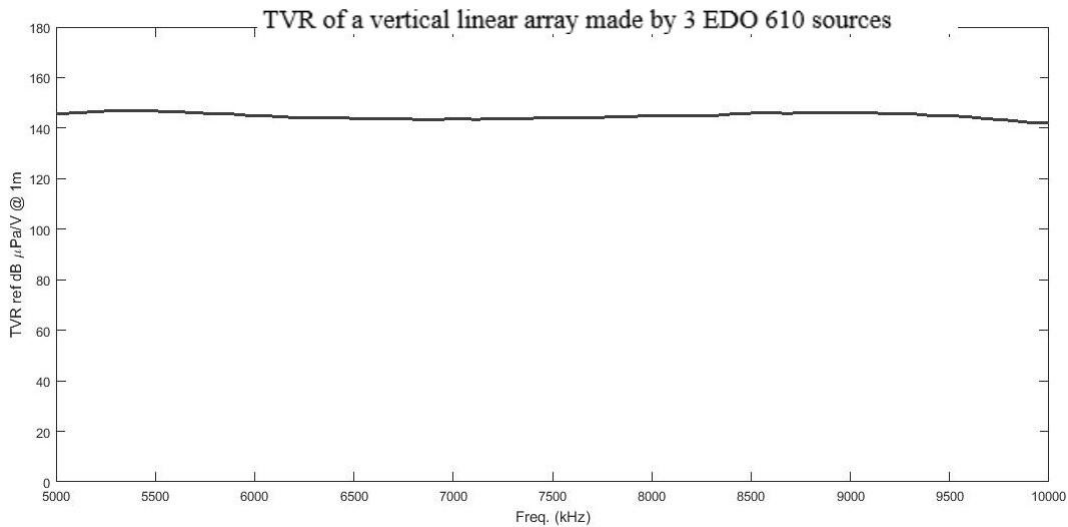


Figura 3.9: TVR do arranjo vertical e linear de fontes tipo EDO 610

A tensão aplicada foi de 960v para obtermos cerca de 230 dB de nível de pressão sonora (SPL) re 1V por μPa com o arranjo a uma profundidade de 10m voltado para a estação receptora.

A figura 3.10 apresenta duas conformações de feixes para o arranjo linear vertical, primeiro com três fontes omnidirecionais (acima) e depois com transdutores do tipo EDO 610E (abaixo).

Sendo a alteração da largura de feixe num arranjo ser função da frequência, ante às oscilações esperadas na fonte (principalmente, lançadas pela borda do navio) e na recepção (oscilações naturais do navio e das correntes de fundo), o efeito geral será o de oscilação do sinal em amplitude, que somar-se-á aos provocados pela oscilação da superfície ampliando as interferências construtivas e destrutivas. Este esperado comportamento será mitigado com a realização de sucessivas transmissões visando gerar uma amostra de LFM suficiente para realização de uma avaliação estatística de forma a se obter um valor médio de TL. Os histogramas da figura: 3.11 para as visadas P1P5 e P4P5 demonstram.

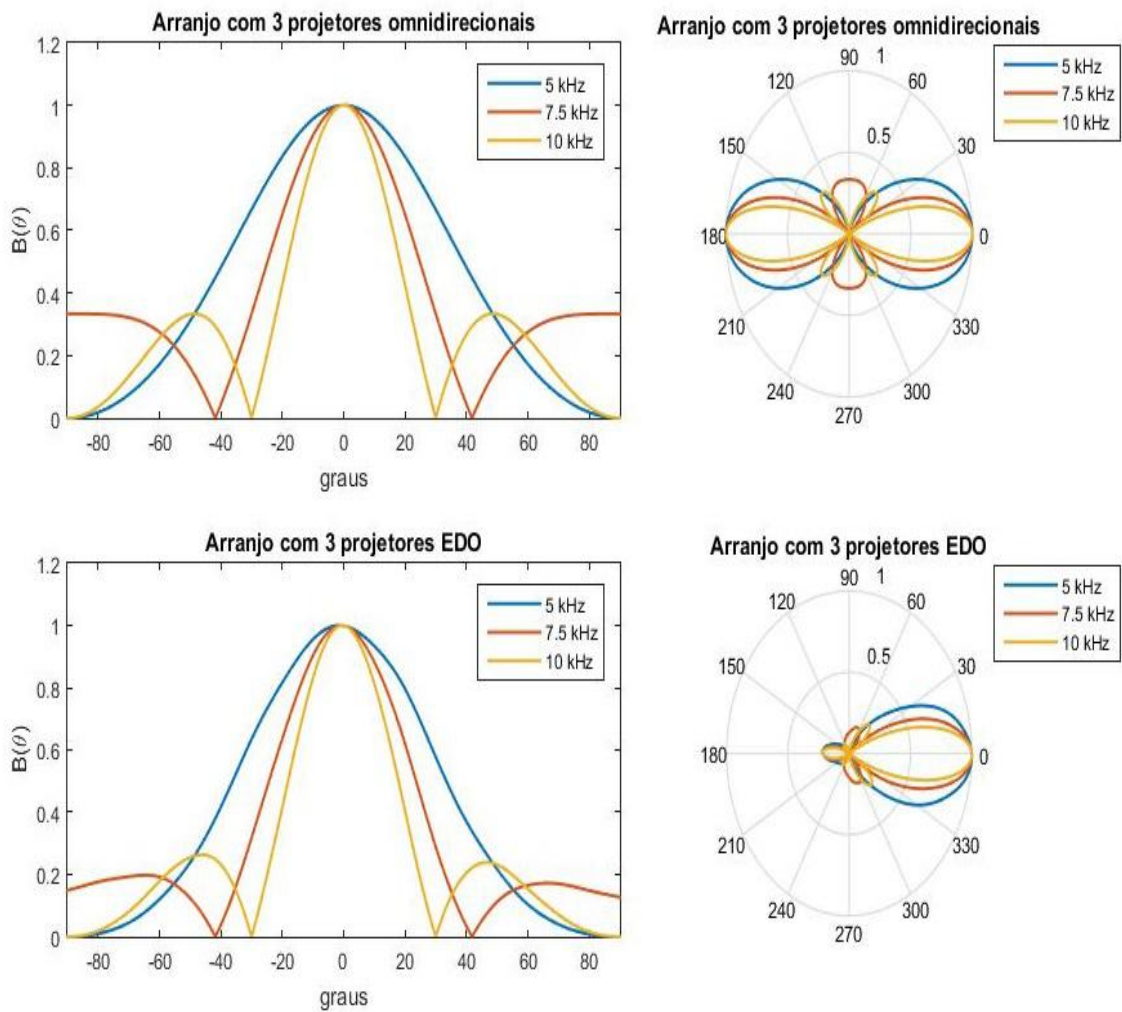


Figura 3.10: Configuração de feixes para um arranjo linear vertical de três transdutores omnidirecionais (Fig.: superior). Configuração de feixes para um arranjo linear vertical de três transdutores modelo EDO610E - (Usado na RASSCOM'14 - Fig.: inferior)

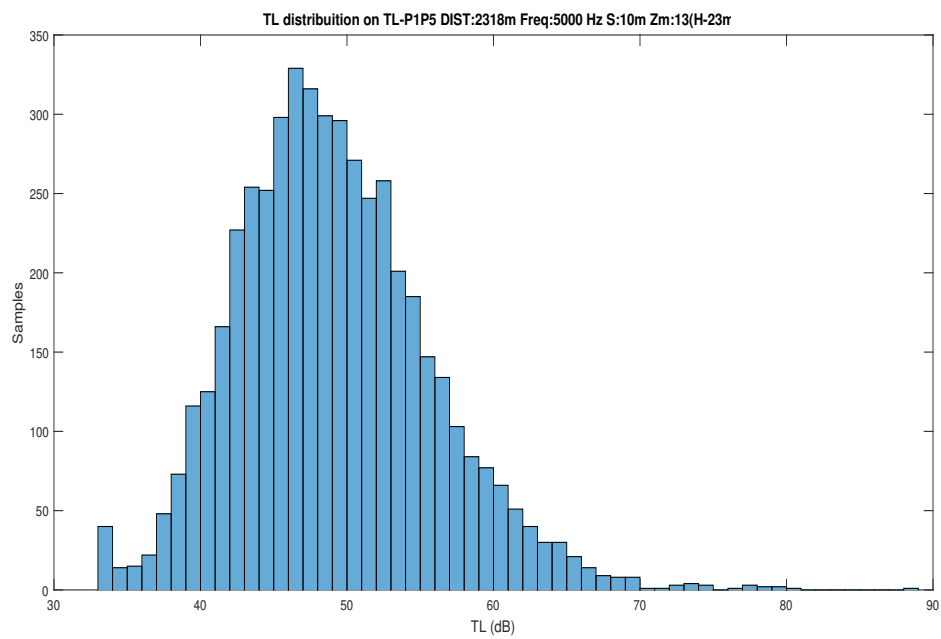
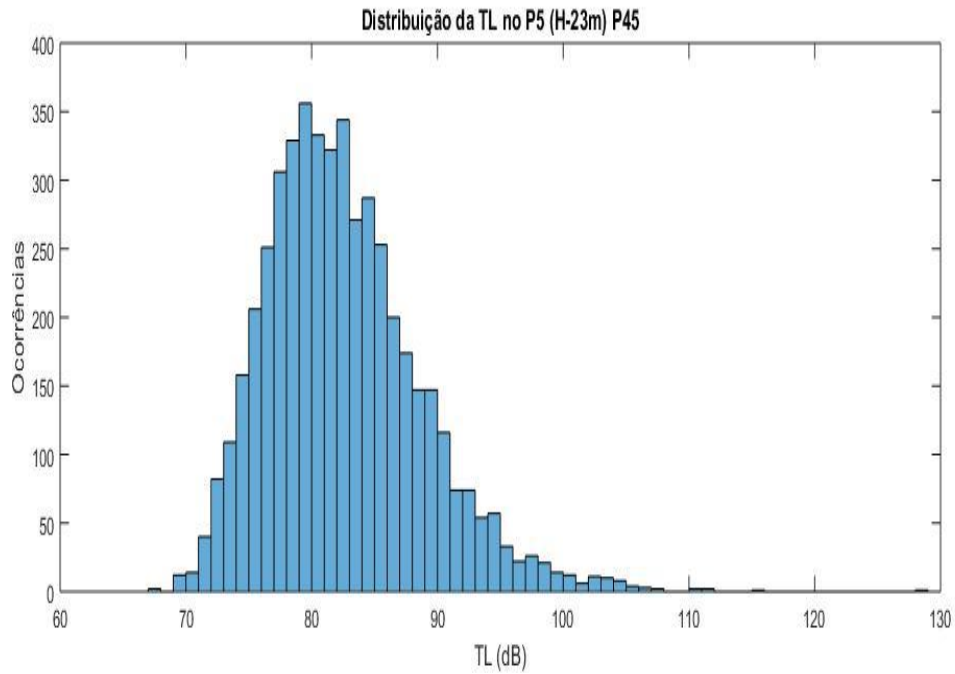


Figura 3.11: Histograma das perdas de transmissão TL atinentes a visada P1P5 e P4P5

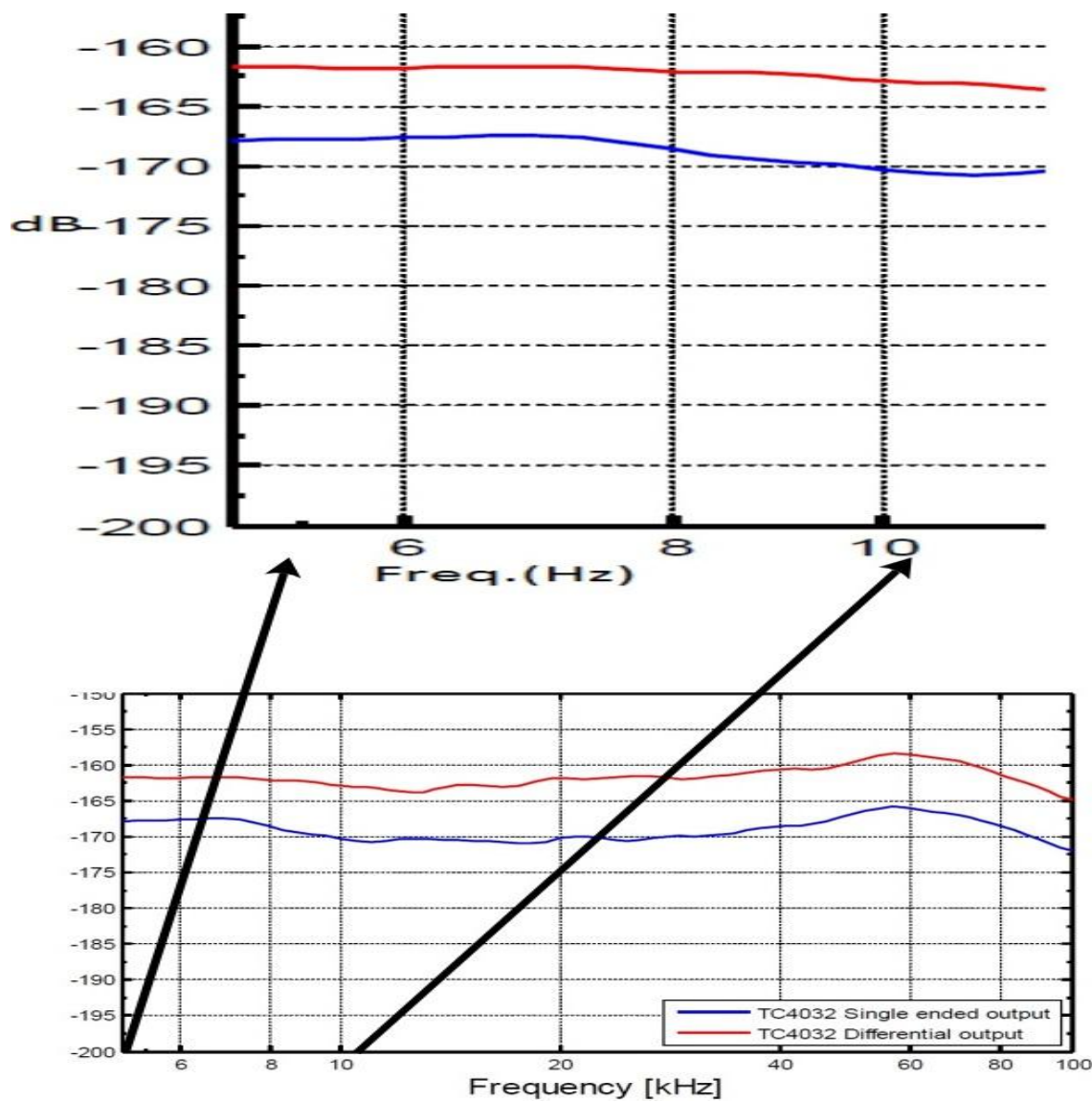


Figura 3.12: OCCR (sensibilidade) em toda a faixa de operação do hidrofone of RESON TC 4032

No ponto de recebimento (P5), configuramos dois hidrofones: um RESON TC4032, com conexão diferencial, cujas principais características são: ganho de 10 dB no pré-amplificador; sensibilidade de -170 dB (-164 diferencial) re $1V/\mu$ Pa; faixa de frequências utilizáveis de 5 Hz até 120 kHz; omnidirecional horizontalmente (± 2 dB re $1V/\mu$ Pa) e com 270° de diretividade vertical, temperatura de operação de -2°C até 55° e profundidade de operação 600 m. A figura 3.12 apresenta a sensibilidade do hidrofone em toda sua faixa de frequências e uma ampliação na faixa de comunicação escolhida. O outro hidrofone foi usado como um equipamento alternativo³ para *a posteriori* ser comparado com o hidrofone calibrado (TC4032) na mesma posição de recepção (2,0 m acima do fundo do mar) de modo a nos permitir tirar conclusões sobre seu estado de operação e sobre a recepção sem ganho de amplificação.

A configuração de transmissão usada (fonte estacionária em torno de 10 m) não evita a influência do movimento do navio e das correntes subsuperficiais (não medida, mas observada), que inserem algum resíduo de Efeito Doppler, principalmente espalhamento (Doppler spread - STOJANOVIC [9]) no sinal. Como já mencionado, a forma utilizada para se combater este efeito foi a realização de transmissões sucessivas (96 sinais LFM ao todo) para se gerar uma estatística confiável.

Um dos problemas detectados para instalação de uma RAS fixa é a imprecisão da medida de posição tomada pelos métodos tradicionais (GPS, Carta Náutica e derivados) para um modelo com resultados de TL para uma malha de 30 cm baseada nos comprimentos de onda passíveis de sofrerem interferência⁴ durante o percurso direto ou multicaminhamento. O menor valor de comprimento de onda derivado da frequência no limite superior da faixa deveria, em primeira análise, ser o escolhido, posto que obstáculos àqueles comprimentos de onda seriam detectados pela malha do modelo. Contudo a imprecisão na distância, quatro ordens de grandeza maior (30 cm para 100 m) que o maior comprimento de onda, torna esta medida inócua e irreal. Ademais, reduzindo o comprimento da malha à metade (30 para 15 cm), teríamos um custo computacional razoável no tempo de processamento do modelo, principalmente aumentando-se a frequência. Assim, deve-se ficar alerta ao valor até o momento qualitativo do resultado do modelo, posto que a distância utilizada entre nós possui para a escala do modelo um erro considerável, da ordem dos 10 m, o que, em termos de RAS em águas rasas, terá que ser avaliado em trabalhos futuros.

³Apesar desse hidrofone não possuir qualquer calibração prévia ou conhecimento dos dados de calibragem e operacionais, sua utilização nos permitiu verificar que o sinal de transmissão possuía nível de pressão sonora SPL suficiente para sensibilizar um hidrofone não amplificado

⁴Temos o comprimento de onda $\lambda = \frac{c}{f}$ onde a frequência varia $5 \text{ kHz} < f < 10 \text{ kHz}$ com velocidade do som média das medidas realizada in situ $c = 1522.5$, teremos comprimentos de onda entre $15 \text{ cm} < \lambda < 30 \text{ cm}$

	Geodesica_WGS84	Euclidiana	Google	SURFER
P15	2318.20629578986	2504.9922587006	2289	2015
P25	1883.22993258153	1997.32447297788	1887	1169
P35	1302.37685019205	1352.79219250402	1306	1297
P45	1658.75982905438	1726.66723525363	1465	1687

Figura 3.13: Imprecisão das distâncias medidas entre TX e RX

3.4.5 Processamento do sinal:

A faixa de frequências para o sinal LFM e para os tons foi coadunada com a faixa de melhor resposta em frequência tanto do arranjo de fontes com do hidrofone. O tratamento consistiu basicamente em retirar o sinal DC do sinal recebido e filtrar a faixa de frequência de interesse, no domínio do tempo, deixando o sinal pronto para a separação dos sinais LFM recebidos. As figuras 3.14 e 3.15 ilustram o processo.

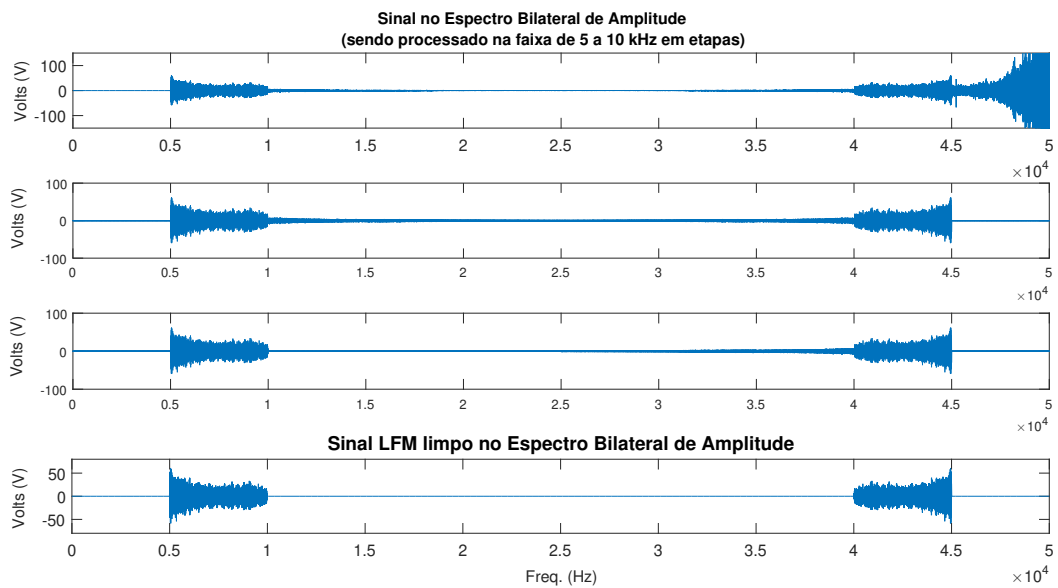


Figura 3.14: Etapas de filtragem no Espectro Bilateral de Amplitude na faixa de 5 a 10kHz

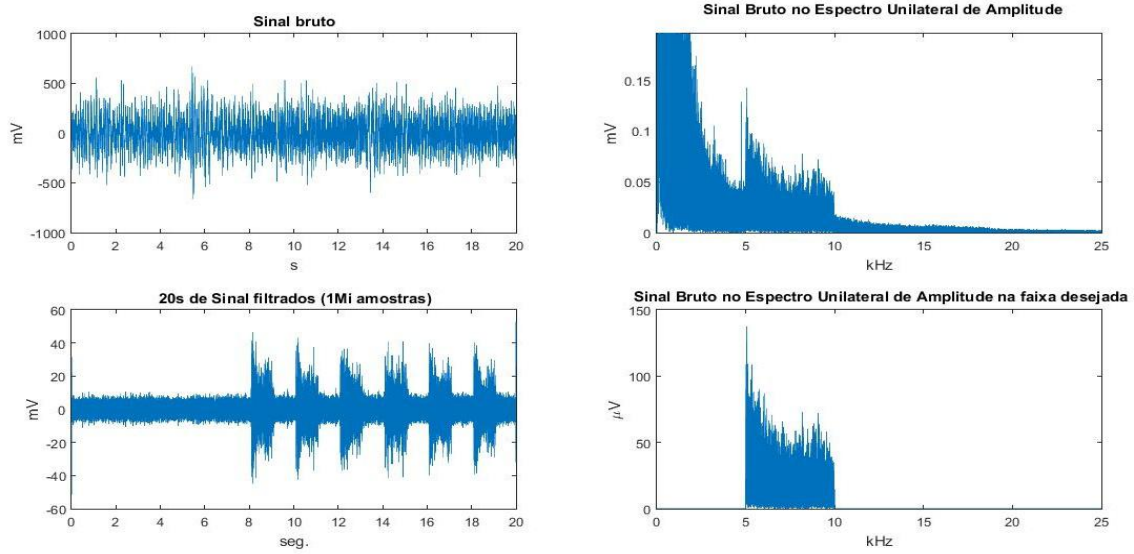


Figura 3.15: Sinal LFM extraído do hidrofone 4032 (direita inferior)

Após a separação LFM, utilizamos o envelope gerado pela Transformada de Hilbert do sinal para obter a amplitude de voltagem correta no sinal LFM para cada frequência desejada (Fig. 3.16). Dentro da faixa de 5 do 10 kHz, escolhemos frequências cheias (5, 5,5, 6,0 ... 9,5 e 10 kHz) para comparar os resultados do campo com os sintéticos de modo a permitir uma avaliação mais precisa do modelo proposto.

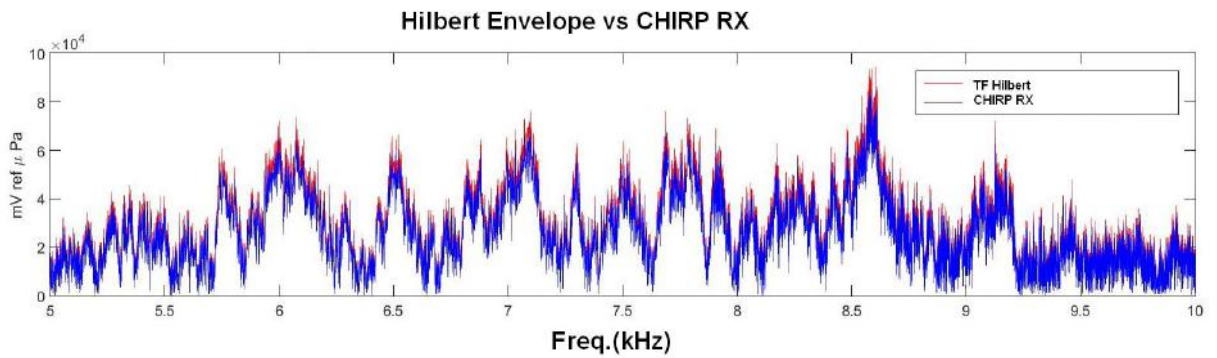


Figura 3.16: Transformada de Hilbert aplicada no sinal LFM extraído do hidrofone RESON TC 4032

Finalmente, para o cálculo da TL usamos a relação apresentada na Eq.(3.1) de DE SOUZA [43],

$$TL = 20\log\left(\frac{V_{TX}}{V_{RX}}\right) + TRV_{Source} + OCCR_{Hydrophone} \text{ dB re } 1\mu Pa @ 1m \quad (3.1)$$

onde V_{TX} é a tensão aplicada da fonte de transmissão em Volts (V), V_{RX} é a tensão entregue pelo hidrofone em Volts (V), TRV como Resposta de Voltagem de Trans-

missão em dB re $\mu Pa/V @ 1m$ e OCCR como resposta de recepção de circuito aberto em dB re $1V/\mu Pa @ 1m$. A figura 3.17 apresenta todos os sinais LFMs de recepção, em frequências de 5 a 10 kHz em intervalo de 100 Hz, calculado de todos os CHIRPS recebidos durante 320s de dados de recepção. A linha vermelha indica a média de todos os valores de todos os LFM transmitidos. Todos esses valores são a base para comparações futuras de resultados do modelo teórico por nós desenvolvido.

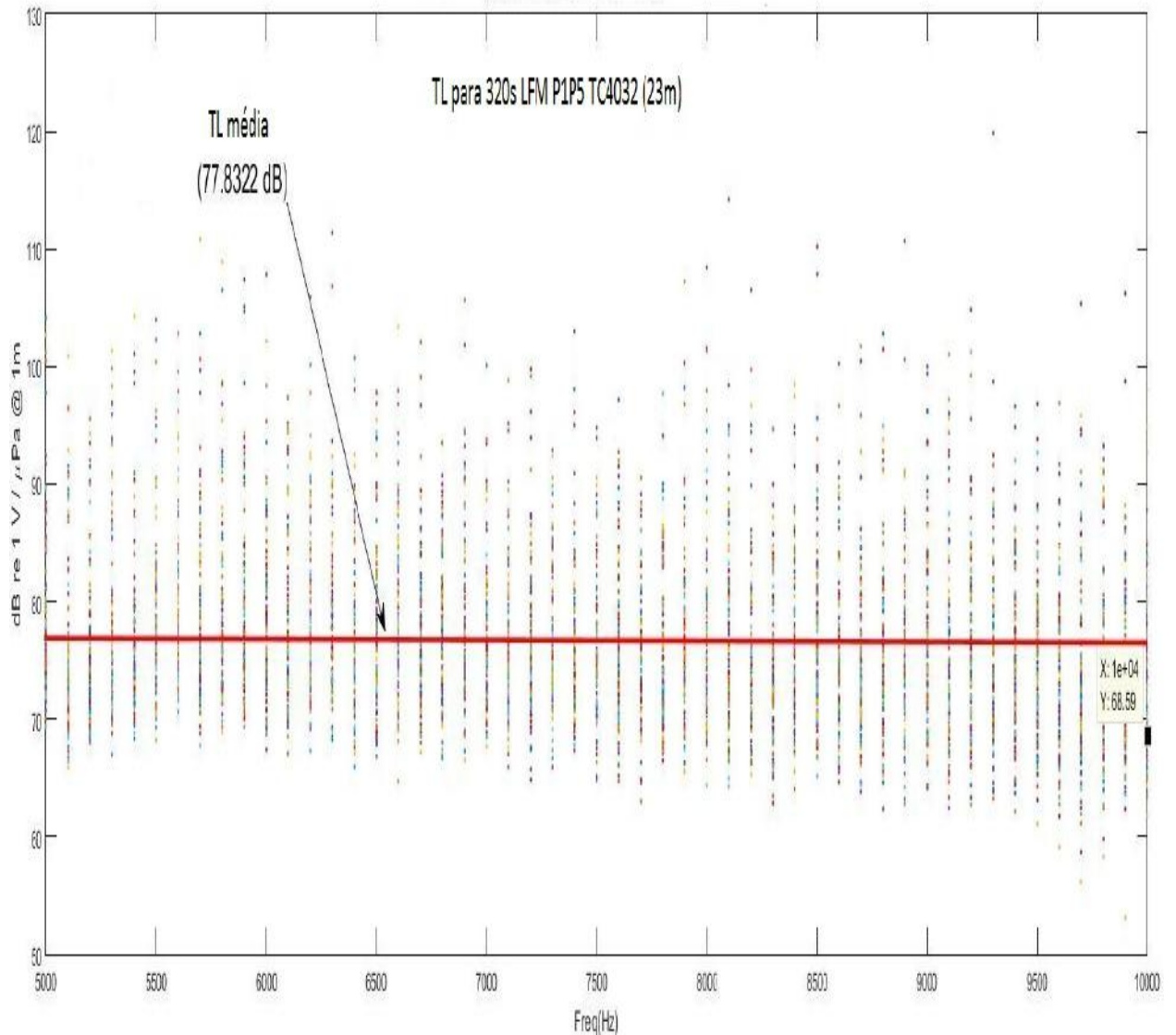


Figura 3.17: TL calculada em 23 m de profundidade no hidrofone RESON TC4032

Capítulo 4

O modelo proposto (K2)

4.1 Considerações iniciais

O modelo proposto é uma variação do modelo de oceano em duas camadas (PEKERIS [2]) considerando as seguinte premissas:

- frequências de transmissão ótimas para o guia, considerando a atenuação e o ruído existente no canal e desconsiderando, no cálculo da frequência ótima, o índice de diretividade e outras perdas que não sejam as por caminhamento da frente de onda (STOJANOVIC [9]);
- quebras de simetria na batimetria entre os pontos de transmissão e recepção (nós) que farão o canal comportar-se como guias 'acoplados em série' ¹;
- o efeito de ressonância de transmissão entre modos na evolução radial e azimutal;
- um ambiente adiabaticamente invariante e estacionário no tempo, para os períodos de transmissão; e
- dentro de um guia de ondas efetivo, entre o final da camada de mistura e o fundo, existirão modos com incidência próxima ao ângulo crítico, com menor número de reflexões, e, conseqüentemente, com perdas mínimas para o fundo e camada superior (JENSEN *et al.* [1]) sendo assim mais estáveis no transporte da energia entre o ponto de transmissão e o ponto de recepção.

A solução da equação da onda, em suas diversas formas para as diversas variáveis de interesse para a acústica² com ou sem uma forçante (fonte acústica),

¹Esse efeito foi observado, principalmente, na propagação por modos em guia de ondas com geometria regular (fio, fibras óticas, etc.) como "*butt coupled modes*"

²pressão (p), densidade (ρ), velocidade da partícula (u) e deslocamento ou velocidade potencial (ψ, ϕ)

demandam manipulação matemática e técnicas numéricas ³ que associadas às condições de fronteira e radiação guiarão a solução. Contudo, como alerta JENSEN *et al.* [1], os que pretendam implementar uma dessas equações e técnicas numéricas para solução devem bem compreender as limitações das diferentes técnicas. Conselho que procuramos seguir à risca.

Usando os fatores também definidos por JENSEN *et al.* [1] para escolha da técnica de solução, qual sejam, avaliação da dimensionalidade do problema; avaliação da variação do número de onda do meio ou avaliação da variabilidade do perfil de velocidade do som, em última análise; estabelecimento das condições de fronteira e da geometria fonte-receptor; e escolha da frequência e banda de trabalho, optamos então por implementar a técnica de modos normais acoplados, utilizando a ressonância de transmissão, com condições de contorno adaptadas às condições do guia de ondas em águas muito rasas (*"ultra-shallow waters"*) com perfis acústicos característicos, levantados na comissão RASSComm'14, nas visadas entre os pontos escolhidos para serem nós da RAS a ser proposta (3.2).

Definida a geometria fonte-receptor, utilizamos frequências e bandas compatíveis com nossos transdutores de modo que, com baixa capacidade computacional, um modelo acústico de propagação pudesse ser proposto para otimização da topologia de rede na região (ou em regiões), considerando condições similares de geometria (fonte-receptor), de evolução sinótica do campo termohalino, seja por forçantes de superfície (vento) ou de fundo (correntes de maré) e batimetria ⁴ (simplificada). Ademais, do ponto de vista computacional utilizamos a abordagem híbrida com soluções analíticas e numéricas.

4.2 Roteiro utilizado na solução proposta

4.2.1 Escolha da frequência máxima para a banda de comunicação

Utilizamos para esta tarefa o modelo desenvolvido por STOJANOVIC [9], para a escolha da frequência ótima para a distância desejada. O modelo de atenuação, A , ou perda por caminhamento (*"path loss"*), foi inspirado em URICK [46] no qual a atenuação é função da distância, r , da frequência, f , e o coeficiente de absorção, a , é dado pela função:

$$A(r, f) = r^k \cdot [a(f)]^r \quad (4.1)$$

³diferença e elementos finitos, métodos de raios, integração por número de onda, modos normais, equações parabólicas et al.

⁴O tipo de fundo deverá também ser considerado caso o diâmetro esperado do sedimento seja muito diferente do existente na região das Enseadas, como, por exemplo, lama

onde, k , descreve o tipo de geometria do espalhamento entre o Cilíndrico (1) e o Esférico (2) e qualquer valor neste intervalo é considerado um valor prático, ou seja, adaptado ao local. A absorção é calculada pela fórmula de Thorp, sendo:

$$10. \log a(f) = 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f} + 2.75 \cdot 10^{-4} \cdot f^2 + 0.003 \quad (4.2)$$

fornece $a(f)$ em dB/Km para f em kHz, sendo válida para frequências acima de centenas de Hz. Para frequências mais baixas é proposta a fórmula;

$$10. \log a(f) = 0.002 + 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 0.011 \cdot f^2 \quad (4.3)$$

STOJANOVIC [9] considerou ainda que, para o cômputo do ruído ambiental N , os ruídos gerados pela turbulência N_t , na faixa $f < 10$ Hz, pelo tráfego de navios N_s , na faixa 10 Hz a 100 Hz; pelas ondas N_w (movimento da superfície causado pelos ventos), na faixa de 100 Hz a 100 kHz, e o termal N_{th} , na faixa acima de 100 kHz, teríamos empiricamente em dB os seguintes valores:

- Turbulência (em geral):

$$10. \log N_t(f) = 10 - 30 \log(f) \quad (4.4)$$

- Ruído de Embarcações:

$$10. \log N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 26. \log(f) - 60. \log(f + 0.03) \quad (4.5)$$

- Ruído gerado pelo vento

$$10. \log N_w(f) = 50 + 7.5w^{(1/2)} + 20. \log(f) - 40. \log(f + 0.4) \quad (4.6)$$

- Ruído termal

$$10. \log N_{th}(f) = -15 + 20. \log(f) \quad (4.7)$$

Usando atenuação, A , a função densidade de probabilidade (pdf) do ruído ambiental e computado, N , obteremos a dependência no cálculo da relação, SNR , dada pela frequência, f , com potência, P , e largura de banda do ruído no receptor, Δf , (uma faixa estreita em torno da frequência, f) por:

$$SNR(r, f) = \frac{P}{\frac{A_{(r,f)}}{N_{(f)} \Delta f}} \quad (4.8)$$

ou usando a potência unitária para normalização, temos:

$$SNR(r, f) = \frac{1}{A_{(r,f)}N_{(f)}\Delta f} \quad (4.9)$$

Logo, concluímos que para a banda da fonte utilizada a figura 4.1 mostra que com potência igual a 1 W, para a faixa de 5 a 10 kHz, teremos as frequências ótimas entre 8 e 10kHz, para as distâncias entre nós de 2 e 5 Km, na montagem da topologia. A figura 4.2 demonstra o ganho em dB no caso de decuplicarmos a potência na fonte com um ganho na atenuação (menos perda) de aproximadamente 10 dB com o aumento de potência dentro das distâncias entre 5 e 10 Km.

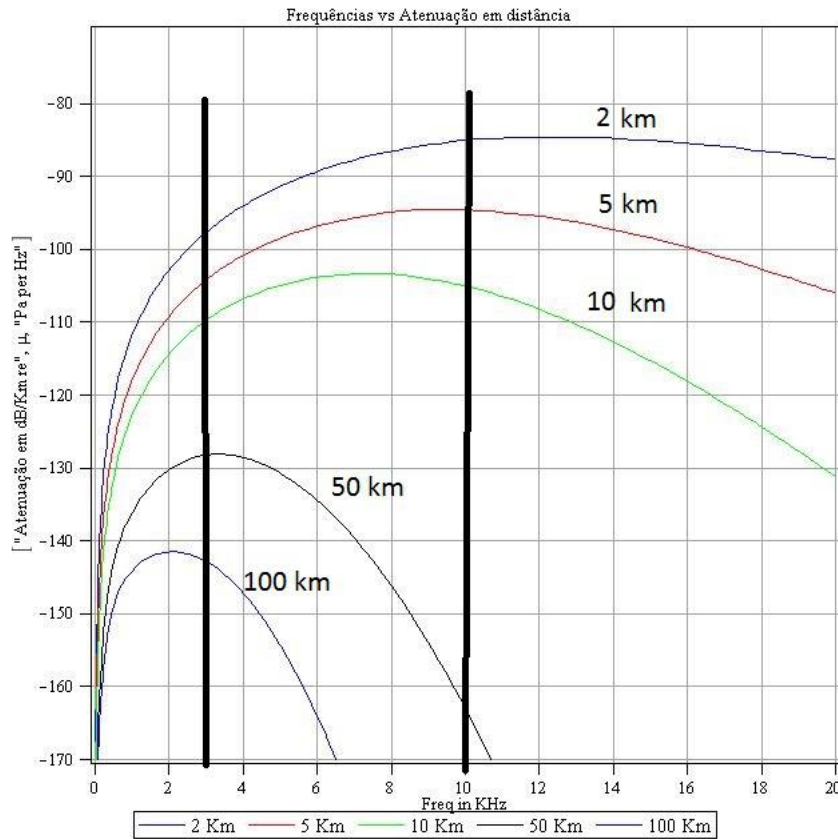


Figura 4.1: Plotagem da frequência (kHz) versus SNR para $P=1\text{ W}$, $k=1.5$, $s=0.5$ (atividade moderada de navios) e sem vento $w=0$

Segundo STOJANOVIC [9] essa metodologia oferece uma abordagem para o relacionamento entre a capacidade do enlace acústico e a distância, com um modelo de canal invariante no tempo para cálculo da relação SNR ótima para RAS, na qual a TL é parte preponderante, levando em conta a atenuação ("path loss") e o ruído ambiente. A autora também nos alerta que esse trabalho é plenamente extensível considerando modelos de canais acústicos mais acurados, levando em consideração o multicaminhamento e a variação no tempo. Nossa proposta é tentar contribuir

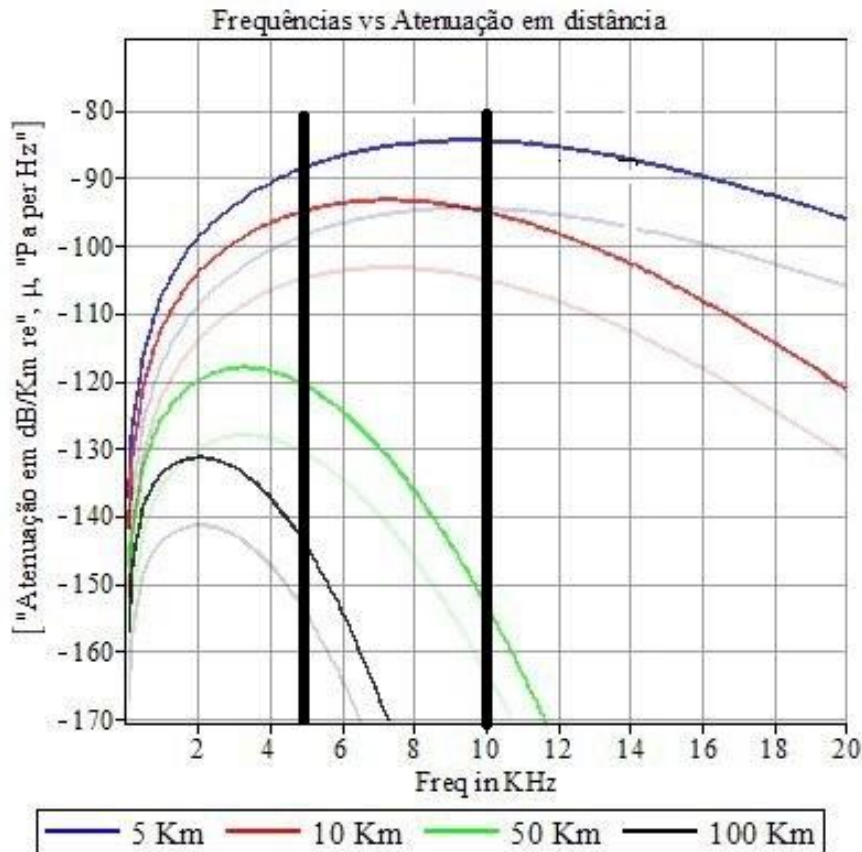


Figura 4.2: Plotagem da frequência (kHz) versus SNR para $P=10 \text{ W}$, com índice de espalhamento geométrico prático ($k=1.5$), atividade moderada de navios ($s=0.5$) e sem vento ($w=0$), com aumento da potência para 10 w (linhas vivas) para Potência = 1W (linhas esvaivecidas), para as mesmas distâncias em um faixa de frequência diferente (10 a 14 kHz) da usada no experimento

não só com o aumento na acurácia no tocante ao multicaminhamento, mas também, futuramente, na definição de um melhor modelo de ruído ambiente usando a abordagem dessa metodologia.

4.2.2 Premissas para solução da Equação da Onda

Todo modelo representa uma modalidade simplificada da realidade seja física ou matematicamente. Assim sendo, algumas premissas são assumidas de forma a permitir a solução do modelo. No caso da solução da Equação da Onda para um guia de ondas acústico submarino, temos a seguintes premissas, listadas por WILLIAMS [25]:

- A rotação (muito lenta) e a curvatura (muito suave) da terra não afetam significativamente o campo;
- A interface ar-mar é tratada com totalmente reflexiva com liberação total da

pressão acústica (o que é parcialmente correto mas que também não afeta significativamente a solução, principalmente, se comparada com os efeitos incluídos pela rugosidade da superfície);

- Em águas rasas, a variação de densidade do oceano em profundidade pode ser ignorada;
- A profundidade do oceano é considerada constante (essa premissa impacta tremendamente a utilização da solução para águas rasas);
- A absorção do som é ignorada (a relaxação molecular química da água do mar é de uma ordem que, para as frequências de comunicação, consideraremos aqui o espectro do audível, ou seja, de 16Hz a 16KHz, nas mais baixas quase não existe e nas altas frequências é mínima, se comparada ao espalhamento que é dominante);
- A velocidade de propagação do som na água é função exclusivamente da profundidade e independente do tempo;
- O fundo é plano, horizontal, infinitamente profundo, homogêneo, isotrópico e fluido não absorvente, excedendo a densidade da água e com a velocidade do som maior (dentro da mesma ordem de grandeza) que a velocidade na água logo acima do fundo;
- A fonte será pontual, uniforme, omnidirecional e contínua com amplitude infinitesimal e frequência angular constante;
- O ruído ambiente e outras fontes são ignorados;
- O hidrofone de recepção tem resposta plana em todas as frequências e é omnidirecional;
- Flutuações dos parâmetros do guia no espaço e tempo são ignoradas.

Além das premissas acima, temos a escolha da simetria cilíndrica para o problema com o eixo vertical z , transpassando a fonte pontual, e o eixo radial r ortogonal ao eixo azimutal ϕ , fazendo assim com que os ângulos azimutais não necessitem ser especificados. ⁵

Esquema de Dedução:

A propagação do som através da água é matematicamente descrita pela Equação da Onda Acústica Linearizada (EOAL) dependente do tempo, tendo a densidade e velocidade do som estratificadas no meio e cujos os parâmetros e condições

⁵No nosso caso a escolha da origem foi a de $z = 0$ caracterizando a interface oceano-ar

de fronteira são descritores do ambiente oceânico. A figura 4.3 descreve esquematicamente de cima para baixo os passos para dedução da Equação da Onda Acústica Linear Homogênea, ou seja, sem a forçante da fonte acústica. A figura apresenta em seu primeiro nível as equações hidrodinâmicas de conservação de massa, Euler (Momento Linear), e a equação adiabática de estado em constante entropia, estabelecendo que a densidade (ρ_0) e a pressão (P_0) locais são constantes, a velocidade da partícula muito menor que a do som na água ($v \ll c$) e a velocidade inicial igual a zero ($v = 0$). No segundo nível, o esquema apresenta linearização da equações em primeira ordem, apresentando o resultado da linearização e da assunção das premissas no terceiro nível. São então obtidos o divergente da equação do momento linear, taxa de variação no tempo da equação linearizada da conservação de massa, por último aplicada a definição que a velocidade do som no meio ($[\frac{\partial P}{\partial \rho}]_{s,0}$) resultando na equação homogênea da onda.

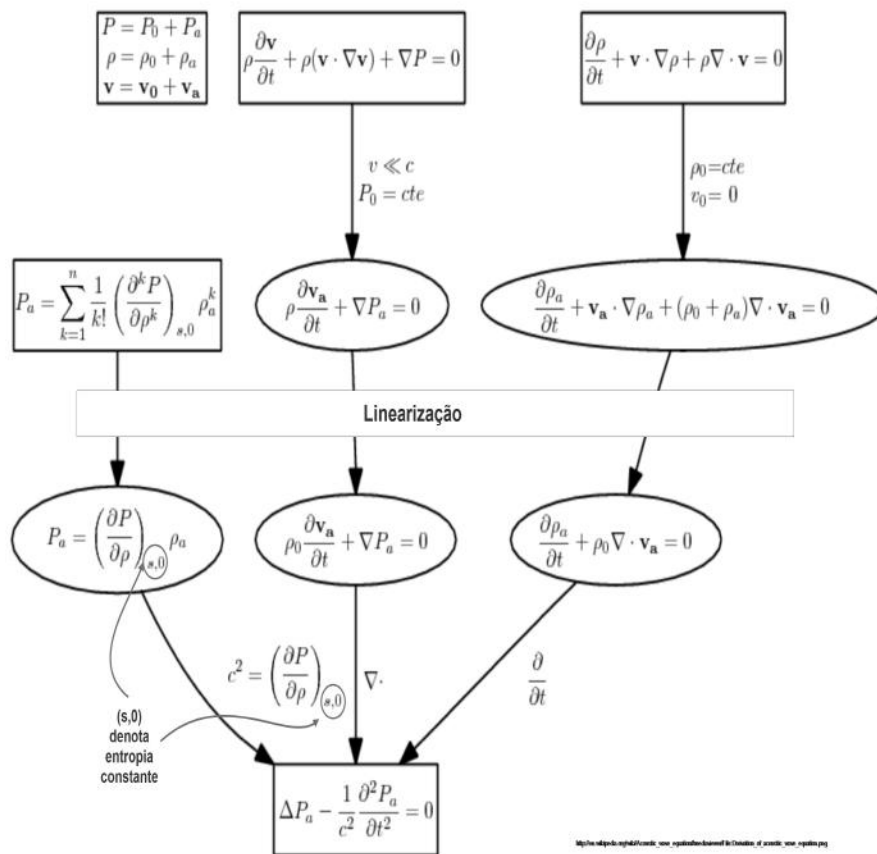


Figura 4.3: Esquema de dedução da Equação da Onda Acústica Homogênea e Linearizada.

Adaptado de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/5/55/Derivation_of_acoustic_wave_equation.png

Tipos e Técnicas de Solução:

ETTER [16] divide a modelagem acústica submarina em três aspectos fundamentais: o primeiro estabelece os princípios físicos usados na formulação do modelo acústico submarino; o segundo, as técnicas matemática para solução e versão desses princípios para os modelos computacionais; e o terceiro a aplicação da modelagem na tecnologias sonar na pesquisa oceanográfica.

Já JENSEN *et al.* [1] hierarquiza as soluções dependentes da distância (*range dependent-RD*) ou não (*range independent-RI*) e alerta que as RD levam a soluções baseadas em técnicas espectrais ou modos mas que ambas podem ser estendidas para atender a dependência da distância. No nosso caso, a solução por modos foi ligeiramente alterada de modo a atingirmos nosso objetivo da forma como iremos expor a seguir.

JENSEN *et al.* [1] e FRISK [34] nos ensinam que num guia de ondas RI a solução da equação da onda com as respectivas condições de contorno ajustadas é uma boa aproximação para algumas situações reais e, portanto, usada em uma variedade de aplicações práticas devido a facilidade que proporciona. Esse tipo de guia tem como premissas básicas que a profundidade, as características acústicas do fundo marinho e o perfil de velocidade do som no mar, $c(z)$, não variam ao longo do eixo de propagação, r , simplificando assim a solução da equação e sua aplicação prática. Já para um guia de ondas dependente da distância, RD, inserimos uma propagação mais realística em termos de um ocean variável em distância com a óbvia alteração na solução e em algumas condições de contorno. São três os principais casos de uso dessa técnica,

- Quando a propagação se dá próxima à costa (águas rasas) com variação significativa de profundidade na direção da costa;
- Quando as ondas acústicas atravessam feições (frentes) oceanográficas como jatos, vórtices, correntes, meandros, diferentes massas d'água. No caso da nossa região temos linguas de ressurgência, massas d'água oriundas das ACAS (Águas Centrais do Atlântico Sul).
- Quando as ondas acústicas atravessam grandes distâncias no globo nos quais o perfil de velocidade do som varia grandemente, especialmente nas regiões Meridionais

Assim, JENSEN *et al.* [1] organizam os tipos e técnicas de solução de acordo com o apresentado na figura 4.4

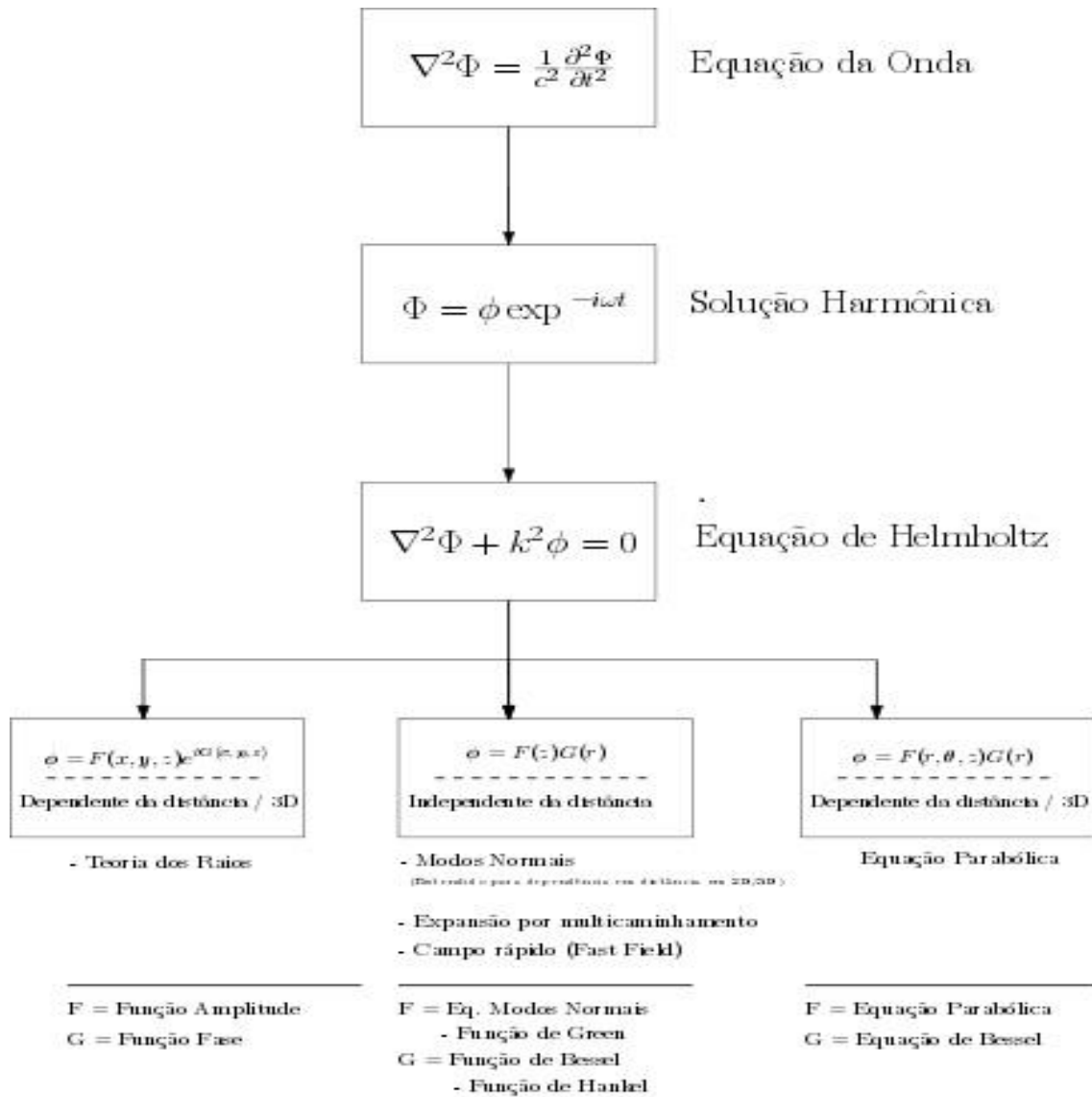


Figura 4.4: Tipos e técnicas de solução para Equação de Helmholtz.

Adaptado de JENSEN *et al.* [1]

Tipos de Condições de Contorno:

Apresentaremos as condições de contorno listadas por FRISK [34], JENSEN *et al.* [1] e WILLIAMS [25], utilizadas nas soluções da Equação de Helmholtz (4.4), lembrando que as dependências no tempo são condições iniciais para a solução e as dependências no espaço são condições de contorno ou fronteira. Sendo assim na superfície S temos:

Dirichlet ou Relaxamento da Pressão (*Pressure Release* ou *soft boundary*)

$$P(\vec{r}, t) = 0 \text{ em } S \quad (4.10)$$

onde para a densidade constante e dependência harmônica do tempo é equivalente à condição de extinção da velocidade potencial na superfície S :

$$\Phi(\vec{r}, t) = 0 \text{ em } S \quad (4.11)$$

Neumann (*Hard boundary condition*)

Condição da superfície dura onde a derivada ou variação da pressão normal a superfície da fronteira S se extingue. Fazendo \hat{n} um vetor unitário normal a superfície S temos:

$$\frac{\partial P(\vec{r}, t)}{\partial \vec{n}} = \nabla P(\vec{r}, t) \cdot \hat{n} = 0 \text{ em } S \quad (4.12)$$

Condição da superfície rígida (*Rigid boundary condition*)⁶

Estabelece que a componente normal da velocidade de partícula (v_n) se extingue na superfície, sendo:

$$v_n(\vec{r}, t) = \vec{v}(\vec{r}, t) \cdot \vec{n} = -\nabla \Phi(\vec{r}, t) \cdot \vec{n} = \frac{\partial \Phi(\vec{r}, t)}{\partial \vec{n}} = 0 \text{ em } S \quad (4.13)$$

Para a dependência harmônica no tempo e densidade constante as condições de contorno dura (2) e rígida (3) se equivalem.

Condição de contorno de Cauchy ou da impedância ou mista: Especifica que a razão entre a pressão e a velocidade de partícula normal deve ser constante (ξ) independente da posição e do tempo:

$$\frac{P(\vec{r}, t)}{V_n(\vec{r}, t)} = \xi \text{ em } S \quad (4.14)$$

As condições soft e rígida são casos limitantes da condição de Cauchy (Impedância) para $\xi \rightarrow 0$ e ∞ , respectivamente. Para a dependência harmônica do tempo e densidade constante a condição de Cauchy fica:

$$\frac{P(\vec{r}, t)}{V_n(\vec{r}, t)} = \frac{i\omega\rho_0 P(\vec{r}, t)}{\frac{\partial P(\vec{r}, t)}{\partial n}} = \frac{i\omega\rho_0 p(\vec{r}, \omega)}{\frac{\partial p(\vec{r}, \omega)}{\partial n}} = \xi \text{ em } S \quad (4.15)$$

Condição de radiação de Sommerfeld: Estabelece que fontes confinadas em domínios espaciais finitos produzem campos de ondas irradiantes para fora do domínio de confinamento da fonte na direção do infinito. Especificamente para meios homogêneos em n dimensões é expresso por :

$$\lim_{\vec{r} \rightarrow \infty} r^{\frac{n-1}{2}} \left[\frac{\partial p(\vec{r}, k)}{\partial \vec{r}} - ikp(\vec{r}, k) \right] = 0 \quad (4.16)$$

onde r é a coordenada espacial adequada. Esta condição leva aos seguintes comportamentos assintóticos;

⁶Alerta-se que as condições 'Dura' (*Hard*) e 'Rígida' (*Rigid*) se diferenciam no desvanecimento da pressão normal à superfície versus o desvanecimento da velocidade de partícula normal a superfície.

Condição Linear (1D).

$$p(x, k) \sim A(k)e^{ik\|x\|} \quad (4.17)$$

Condição para coordenadas cilíndricas (2D).

$$p(r, k) \sim A(k)\frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}} \quad (4.18)$$

Condição de contorno para coordenadas esféricas (3D).

$$p(r, k) \sim A(k)\frac{e^{ikr}}{r} \quad (4.19)$$

onde r a coordenada radial cilíndrica em (4.18) e radial esférica em (4.19)

A seguir serão exemplificadas as condições de contorno supondo uma fronteira no plano $z = 0$

Condições de Continuidade:

Essa condição aparece devido a uma restrição física em que a pressão, a componente normal da velocidade de partícula, o deslocamento vertical da partícula devem ser contínuos através da fronteira, i.e,

Para continuidade da pressão:

$$p(x, z)|_{z=0} = p_1(x, z)|_{z=0} \quad (4.20)$$

ou

$$\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p(x, z)}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p_1(x, z)}{\partial z} \right]_{z=0} \quad (4.21)$$

ou

$$\rho_1 \psi_1(k_r, z) = \rho_2 \psi_2(k_r, z) \quad (4.22)$$

ou inserindo as funções de Green nos dois guias(ou meios) para o modelo de Pekeris, temos;

$$\rho_2 A_2^+ - \rho_1 A_1^- = \rho_1 g_{\omega,1}(k_r, 0, z_s), \quad z = 0 \quad (4.23)$$

Para componente normal da velocidade da partícula:

$$\vec{v}_n(\vec{r}, t) = \vec{v}(\vec{r}, t) \cdot \vec{n}|_{z=0} = \vec{v}_{1_n}(\vec{r}, t) = \vec{v}_{1_n}(\vec{r}, t) \cdot \vec{n}_1|_{z=0} \quad (4.24)$$

ou ainda,

$$\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \vec{v}_n(\vec{r}, t)}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \vec{v}_{1_n}(\vec{r}, t)}{\partial z} \right]_{z=0} \quad (4.25)$$

Analogamente para continuidade do deslocamento vertical:

$$\frac{\partial\psi_1(k_r, z)}{\partial z} = \frac{\partial\psi_2(k_r, z)}{\partial z}, \quad z = 0 \quad (4.26)$$

novamente para o modelo de Pekeris, substituindo $\psi(k_r, z)$ pelas funções de Green e adicionando as duas soluções homogêneas e a função de Green para a fonte temos:

$$k_{z,2}A_2^+(k_r) + k_{z,1}A_1^-(k_r) = k_{z,1}g_{\omega,1}(k_r, 0, z_s), \quad z = 0 \quad (4.27)$$

Encerrada a apresentação das condições de contorno relevantes para solução da equação de Helmholtz e nosso problema, bem como os comentários sobre a solução da equação da onda, estamos aptos a aplicar os tópicos apresentados a um problema clássico.

4.3 O modelo de Pekeris

4.3.1 Considerações iniciais.

O modelo criado por PEKERIS [2] em 1948 de um oceano simplificado, apresentado na figura 4.5, possui as seguintes características:

- duas camadas, sendo uma um semi-espço finito em um meio líquido, com densidade e perfil de velocidade do som constantes, e outra, representando o fundo, com um semi-espço com profundidade infinita, densidade e velocidade de propagação do som constantes, porém maiores que a do meio líquido;
- propagação do som independente da distância (RI);
- fronteiras planas, com a liberação completa da pressão (4.10) e perfeitamente reflexivas (4.12); e
- ponte pontual, harmônica, constante no tempo e numa profundidade z_s constante.

Apesar de simples, se comparado ao oceano real, em águas rasas o modelo é amplamente consagrado na literatura sobre modelagem acústica submarina (vide JENSEN *et al.* [1], BREKHOVSKIKH e LYANOV [38], FRISK [34] e KATSNELSON e PETNIKOV [37] *et al.*) em virtude de permitir a representação de forma satisfatória os fenômenos básicos que ocorrem num guia de ondas associados à propagação acústica nos oceanos. Além disso, as condições de contorno propostas, qual

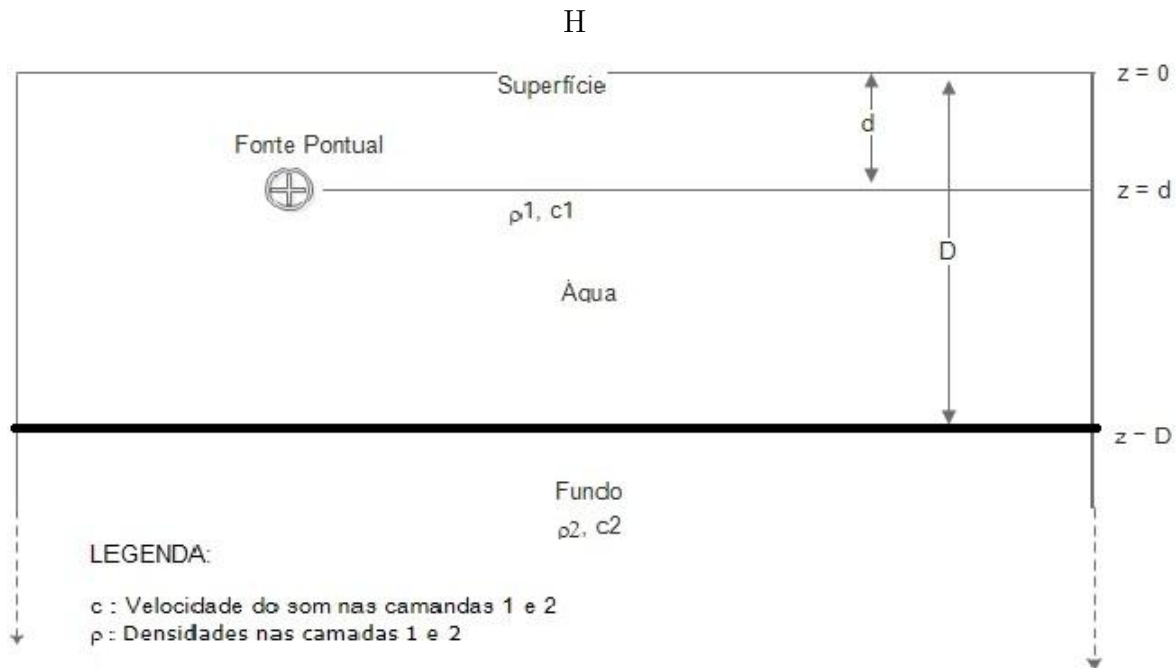


Figura 4.5: Guia de Pekeris de Duas Camadas (GPDC).

sejam, relaxamento da pressão na superfície e continuidade do deslocamento e da pressão na interface oceano-fundo são aproximações realistas para o assoalho e sub-fundo marinho, onde o assoalho oceânico reflete, para ângulos de ataque pequenos, do mesmo modo que a superfície livre (propagações horizontais a longa distância no oceano são dominadas por pequenos ângulos de ataque ao fundo (JENSEN *et al.* [1]) pois a energia incidente com ângulos de ataque elevados (pequenos ângulos de incidência) é rapidamente atenuada devido às perdas no fundo. Do mesmo modo, a condição é realista para superfície, pois a mesma atua como relaxadora da pressão incidente (diferenças de densidade ar-mar). A evolução intuitiva deste modelo na direção de um modelo de oceano mais próximo do real naturalmente implica no aumento do número de camadas horizontais com diferentes densidades (incluindo fundo) e diferentes velocidades do som para cada camada. Diversos métodos de solução da equação da onda, tanto analítica como numericamente, são utilizados para tal, focados tanto na dependência da distância para propagação, RD e RI (JENSEN *et al.* [1]) como nos métodos de solução (vide Fig. 4.4).

Baseado na literatura JENSEN *et al.* [1], SCHMIDT [4] passaremos agora a discutir a solução formal do problema de Pekeris.

Por premissa num problema com um fluido horizontalmente estratificado, independente da distância⁷, (RI), com fronteiras planas, podemos utilizar o método das transformadas integrais como abordagem para a solução,⁸ na qual o campo de

⁷Segundo JENSEN *et al.* [1] esta é a geometria canônica mais importante na acústica submarina para a aplicação da técnica analítica das Transformadas Integrais

⁸equivalente ao da método de separação das variáveis, neste caso.

deslocamento tem a seguinte representação integral: JENSEN *et al.* [1]

$$\Psi(r, z) = \int_0^{\infty} \Psi(k_r, z) J_0(k_r r) k_r dk_r \quad (4.28)$$

sendo J_0 a função de Bessel de primeira espécie e ordem 0, com o núcleo da transformada sendo a superposição das funções de *Green*.

Explicitamente para o Guia de Pekeris teremos a fronteira inferior representada mais realisticamente com um semi-espço infinito, tal que denotamos c_1, ρ_1 e c_2, ρ_2 como os perfis e densidades dos meios 1 (oceano) e 2 (fundo), e como supomos ter uma fonte S_ω com uma dependência harmônica à $e^{-i\omega t}$ em profundidade z_s . Desta forma, segundo JENSEN *et al.* [1], o campo será:

$$\Psi_1(k_r, z) = S_\omega \frac{e^{-ik_{z,1}|z-z_s|}}{4\pi ik_{z,1}} + A_1^+(k_r) e^{ik_{z,1}z} + A_1^-(k_r) e^{-ik_{z,1}z} \quad (4.29)$$

enquanto no fundo teremos,

$$\Psi_2(k_r, z) = A_2^+(k_r) e^{ik_{z,2}(z-H)} \quad (4.30)$$

onde o número de onda vertical na camada 1 (Oceano) é

$$k_{z,1} = (k_1^2 - k_r^2)^{\frac{1}{2}} \text{ com } k_1 = \frac{\omega}{c_1} \text{ e do mesmo modo no fundo }^9:$$

$$k_{z,2} = \begin{cases} \sqrt{k_2^2 - k_r^2}, & |k_r| < k_2 \\ i\sqrt{k_r^2 - k_2^2}, & |k_r| > k_2 \end{cases} \quad (4.31)$$

onde $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$.

Para o cálculo das três amplitudes (A_1^+, A_1^-, A_2^+) foram aplicadas as condições de contorno de relaxamento da pressão na superfície, e as duas condições de contorno relativas à interface oceano-fundo, ou seja, continuidade do deslocamento da partícula (4.23) e continuidade da pressão (4.2.2) na interface oceano-fundo de modo que obtivemos o seguinte sistema linear equações:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ k_{z,1} e^{ik_{z,1}D} & -k_{z,1} e^{-ik_{z,1}D} & -k_{z,2} \\ \rho_1 e^{ik_{z,1}D} & \rho_1 e^{-ik_{z,1}D} & -\rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^+ \\ A_1^- \\ A_2^+ \end{bmatrix} = \frac{iS_\omega}{4\pi k_{z,1}} \begin{bmatrix} e^{ik_{z,1}Z_s} \\ k_{z,1} i e^{ik_{z,1}(D-z_s)} \\ \rho_1 i e^{ik_{z,1}(D-z_s)} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

cuja solução possui polos para valores de número de onda horizontal k_r . JENSEN *et al.* [1] e tais polos são soluções da seguinte equação transcendental (característica):

⁹Relembro que o fundo é considerado um semi-espço infinito na solução de Pekeris (condição de radiação $z \rightarrow \infty$)

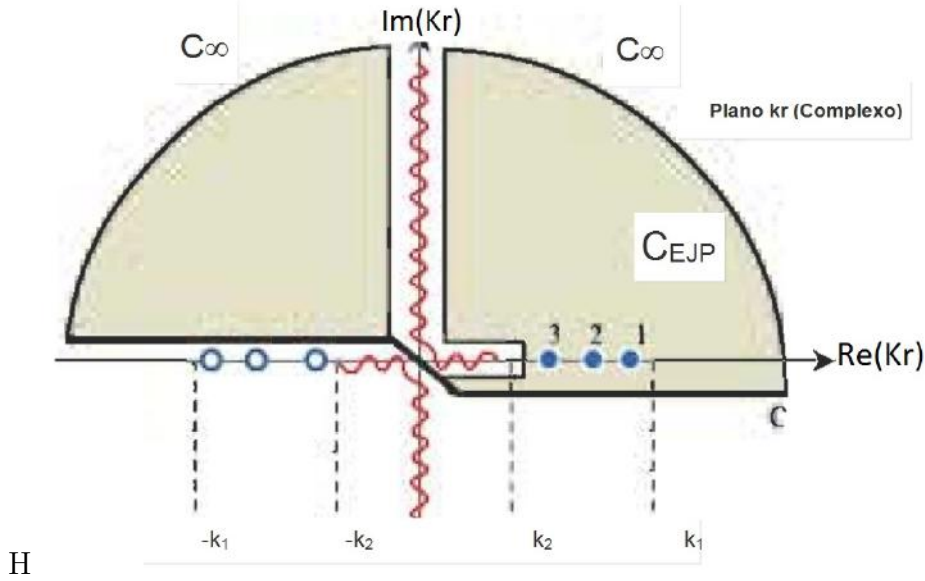


Figura 4.6: Plano complexo do número de onda com o corte EJP, Polos (1, 2 e 3) e contornos de integração (C_∞ , C_{EJP} e C) adaptado de SCHMIDT [4]

$$\tan(k_{z,1}D) = -\frac{i\rho_2 k_{z,1}}{\rho_1 k_{z,2}} \quad (4.33)$$

JENSEN *et al.* [1] ainda alerta que a solução para (4.33) onde k_r é real, dentro do intervalo $|k_2| < |k_r| < |k_1|$, corresponde à propagação dos modos normais sem perdas (exceto as ocorridas pelo espalhamento geométrico). Sendo assim, não existirão modos com números de onda reais menores que $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$ levando a que modos com ângulo de ataque acima do crítico se propagarão verticalmente, perdendo energia do guia oceânico para o fundo. Ademais, a equação (4.33) ainda pode ter valores complexos para as raízes correspondentes aos modos que decaem em amplitude em distância (modos virtuais ou *leaking modes*). Por fim, fazendo a integração 4.28 no plano dos números de onda complexo e utilizando o corte no ramo da integral proposto por EJP¹⁰ a expansão dos modos será dada pela seguinte série de resíduos JENSEN *et al.* [1]:

$$\Psi(r, z) \cong -\frac{iS_\omega}{2D} \sum_{m=1}^M a_m(k_{rm}) \sin(k_{zm}z) \sin(k_{zm}z_s) H_0^{(1)}(k_{rm}r) \quad (4.34)$$

onde os números de onda modal, k_{rm} , são soluções da equação transcendental (4.33), a excitação modal é, $a_m(k_{rm})$, e o número de onda vertical no oceano para o modo m é $k_{zm} = \sqrt{(k_1^2 - k_{rm}^2)}$

Finalmente, estabelecidos os tipos de soluções e a situação em que aplicá-las trataremos a seguir do nosso caso específico, qual seja, uma solução independente

¹⁰Proposta para solução do problema por EWING *et al.* [28]

da distância, usando a técnica de propagação por modos, em guias acoplados com condições de fronteiras regulares, usando as premissas e recomendações propostas por JENSEN *et al.* [1], FRISK [34], WILLIAMS [25] *et al.*

4.4 Construindo o modelo proposto (K2)

Nesse trabalho para uma fonte pontual localizada em profundidade $z = z_s$ a equação de Helmholtz relacionada ao comportamento de pressão sonora p no intervalo r , bem como em profundidade z pode ser escrito conforme proposto em JENSEN *et al.* [1]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(z)} p = \frac{-\delta(z - z_s) \delta(r)}{2\pi r}. \quad (4.35)$$

Considerando o ponto de vista de propagação de ondas, é adequado descrever o guia de ondas presente como a superposição de duas camadas oceânicas distintas e um fundo do mar infinito configurado como na Fig. 4.7, mais especificamente, as camadas oceânicas de mistura e termoclina são caracterizadas pela densidade e perfil de velocidade do som ρ_0, c_0 e ρ_1, c_1 , respectivamente, enquanto no fundo do mar temos ρ_2, c_2 . Além disso, definimos a profundidade local como H e a profundidade efetiva da guia de onda na termoclina como $h = H - z_M$, respectivamente, e z_M como a profundidade final da camada da mistura.

Aplicando o método da separação de variáveis, tal que $p(r, z) = \Psi(z)H_0^1(r)$, onde H_0^1 é a função de Hankel emergente de ordem 0 sendo $\Psi(z)$ a função de onda representativa do comportamento de pressão em profundidade descrita por:

$$\Psi(z) = \begin{cases} f_0 = A_0 \sinh(q_0 z) ; z > 0 \text{ and } z \leq z_M \\ f_1 = A_1 \sin(k_1(z - \frac{(z_M+H)}{2})) + B_1 \cos(k_1(z - \frac{(z_M+H)}{2})) ; z > z_M \text{ and } z \leq H \\ f_2 = A_2 e^{-q_2(z-H)} ; z > H. \end{cases} \quad (4.36)$$

Onde as constantes A_0, A_1, B_1 e A_2 são determinadas pelas condições de contorno do problema, bem como pelo critério de ortogonalidade da função de onda Ψ . Além disso, assumimos que a densidade de líquido estratificado $\rho(z)$ se comporta em profundidade como:

$$\rho(z) = \begin{cases} \rho_0 ; z > 0 \text{ and } z \leq z_M \\ \rho_1 ; z > z_M \text{ and } z \leq H \\ \rho_2 ; z > H. \end{cases} \quad (4.37)$$

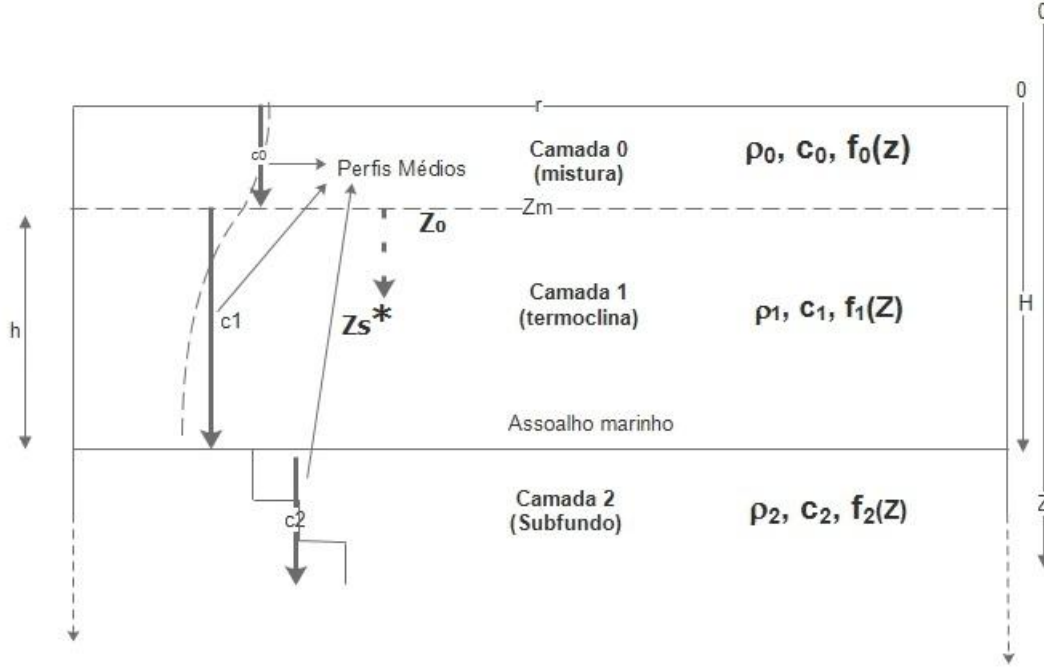


Figura 4.7: Guia de Pekeris de Duas Camadas (GPDC)

Tentando nos aproximar um pouco mais da realidade, adotamos $c_2 > c_0 > c_1$ e para um determinado número de onda radial k_r , definimos para a camada j -ésima os números de onda k_j e penetração q_j , respectivamente, como:

$$k_j(k_r) = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_j^2} - k_r^2}, \quad (4.38)$$

$$q_j(k_r) = \sqrt{k_r^2 - \frac{\omega^2}{c_r^2}} \quad (4.39)$$

Para satisfazer as condições de fronteira do nosso problema acústico, é necessário impor a conservação da pressão (4.20) e (4.21), bem como a continuidade do componente normal à superfície da velocidade da partícula em cada interface entre as camadas (4.24) e (4.25). Sob estas premissas, uma solução modal de problema de campo distante aproximada é dada pela seguinte série de resíduos (JENSEN *et al.* [1]):

$$p(r, z) \approx \frac{i/p_0}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}} e^{-\frac{i\pi}{4}} \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_n(z_s)\Psi_n(z) \frac{e^{ik_n r}}{\sqrt{k_n}} \quad (4.40)$$

Onde p_0 é o valor da pressão de referência próxima à fonte localizada na profundidade z_s e os inteiros $n = 1, 2, \dots$ são o número do modo normal relacionado ao discreto $k_r \mapsto k_{r;n}$ número de onda radial $k_{r;n}$ modal e comprimento de onda modal $\lambda_{r;n}$ tal que $k_{r;n} = 2\pi/\lambda_{r;n}$, que são a n -ésima solução da equação transcen-

dental Δ dada pelo seguinte determinante:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \rho_0 \sinh(q_0 z_M) & -\rho_1 \sin(1/2 k_1 (z_M - H)) & -\rho_1 \cos(1/2 k_1 (z_M - H)) & 0 \\ \cosh(q_0 z_M) q_0 & -\cos(1/2 k_1 (z_M - H)) k_1 & \sin(1/2 k_1 (z_M - H)) k_1 & 0 \\ 0 & -\rho_1 \sin(1/2 k_1 (z_M - H)) & \rho_1 \cos(1/2 k_1 (z_M - H)) & -\rho_2 \\ 0 & \cos(1/2 k_1 (z_M - H)) k_1 & \sin(1/2 k_1 (z_M - H)) k_1 & q_2 \end{vmatrix} \quad (4.41)$$

Para frequências em torno de alguns $kH z$ e profundidades locais de alguns metros a Fig. 4.8 esboça para três GPDC distintos, o comportamento típico dos modos de propagação permitidos, para três profundidades locais diferentes $H_1 < H_3 < H_2$, respectivamente.

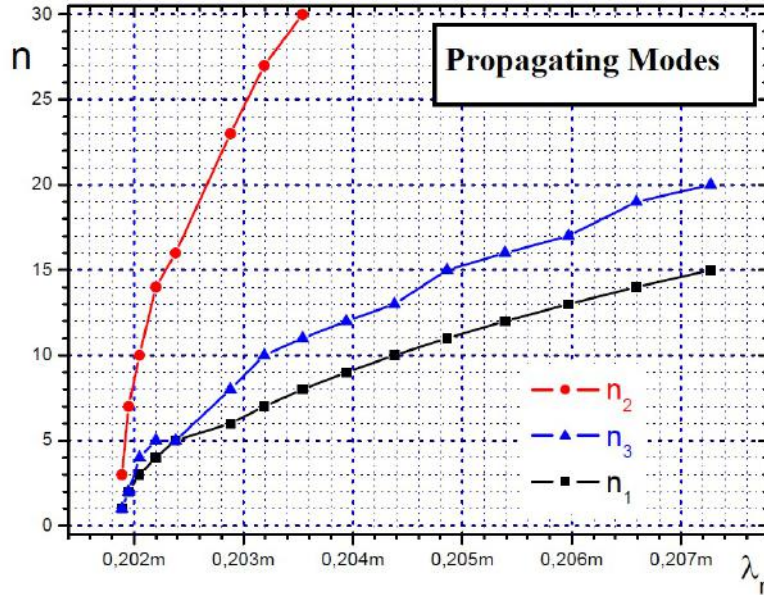


Figura 4.8: Modos cuja existência é possível em três guias distintos.

Em geral, em problemas acústicos subaquáticos, é adequado usar escalas de som medidas em dB (Fig. 4.11), assim escolhemos o conceito de *perda de transmissão* (TL) para como figura de mérito para a propagação modelada num guia de ondas. Assim, temos:

$$TL(r, z) = -20 \log \left| \frac{p(r, z)}{p_0} \right|. \quad (4.42)$$

Além disso, cabe ressaltar que é possível relacionar alguns $\lambda_{r;n}$ com um valor de número modal distinto n_j , em outras palavras, *as fases de diferentes ondas modais podem radialmente interferir de forma construtiva umas com as outras se os comprimentos de onda relacionados forem semelhantes* (Fig. 4.9). Ademais, esse

processo de interferência construtiva pode ser potencializado se a separação entre nós consecutivos de funções de onda modal verticais distintas Ψ_{n_j} forem também similares (Fig.4.10). Quando essas combinações de fase modal radial e vertical ocorrem simultaneamente, as condições de excitação para a *Ressonância Adiabática da Transmissão - RAT* são cumpridas.

Mostraremos ao longo deste trabalho que a RAT tem um papel fundamental no mecanismo físico relacionado à propagação de energia acústica em guias de ondas subaquáticas reais. A figura 4.11 demonstra para escalas de comprimento normalizadas à profundidade local as interferências modais e sua evolução em distância dentro do guia. A seguir detalharemos nossas medições *in situ* obtidas num experimento de campo em comparação com as previsões do modelo proposto.

4.5 Análise dos Resultados

Modelo vs dados *in situ*:

Os resultados da perda de transmissão foram gerados pela Eq. (4.42) para três visadas distintas (P1P5, P2P5 e P4P5) em diferentes frequências (5, 7,5 e 10 kHz), usando a profundidade da camada de mistura que termina em 12 m (coletada *in situ*) e com a fonte colocada em duas posições diferentes: a 10 m de profundidade (dentro do canal da camada de mistura) e a meio caminho do guia de onda termoclina (posição ideal contudo sintética). As figuras 4.12, 4.13, 4.15 apresentam as perdas de transmissão em profundidade e distância para uma respectiva visada com a fonte colocada a 10m de profundidade ou a meio da camada termoclina, para uma frequência específica, dentro da banda de transmissão (5kHz a 10kHz). Representam os resultados do modelo para um perfil isobatimétrico com a velocidade do som coletada *in situ* nos pontos de recepção e transmissão e aplicada em todos os guias de onda (sempre três, escolhidos ao longo da visada pela quebra de simetria).

Já as figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 são basicamente as figuras de mérito do modelo pois confrontam os resultados sintéticos para o ponto de recepção em profundidade (plotados em azul ao longo da profundidade) contra os resultados das perdas por propagação esférica (ponto azul escuro), cilíndrica (ponto verde claro) e todas as TL medidas a 23m de profundidade no ponto de recepção (pontos em vermelho).

A simulação ocorreu para a distância fixa (transmissor/receptor) com o cômputo da TL, em profundidade, no local de recepção, estimado (planimetricamente via posição GPS) e altimetricamente (via a colocação do hidrofone em profundidade conhecida). Os resultados do modelo computados em profundidade foram confrontados com a TL medida no experimento RASCOMM'14, a 23m e ladeadas pelo espalhamento esférico e cilíndrico com já descrito.

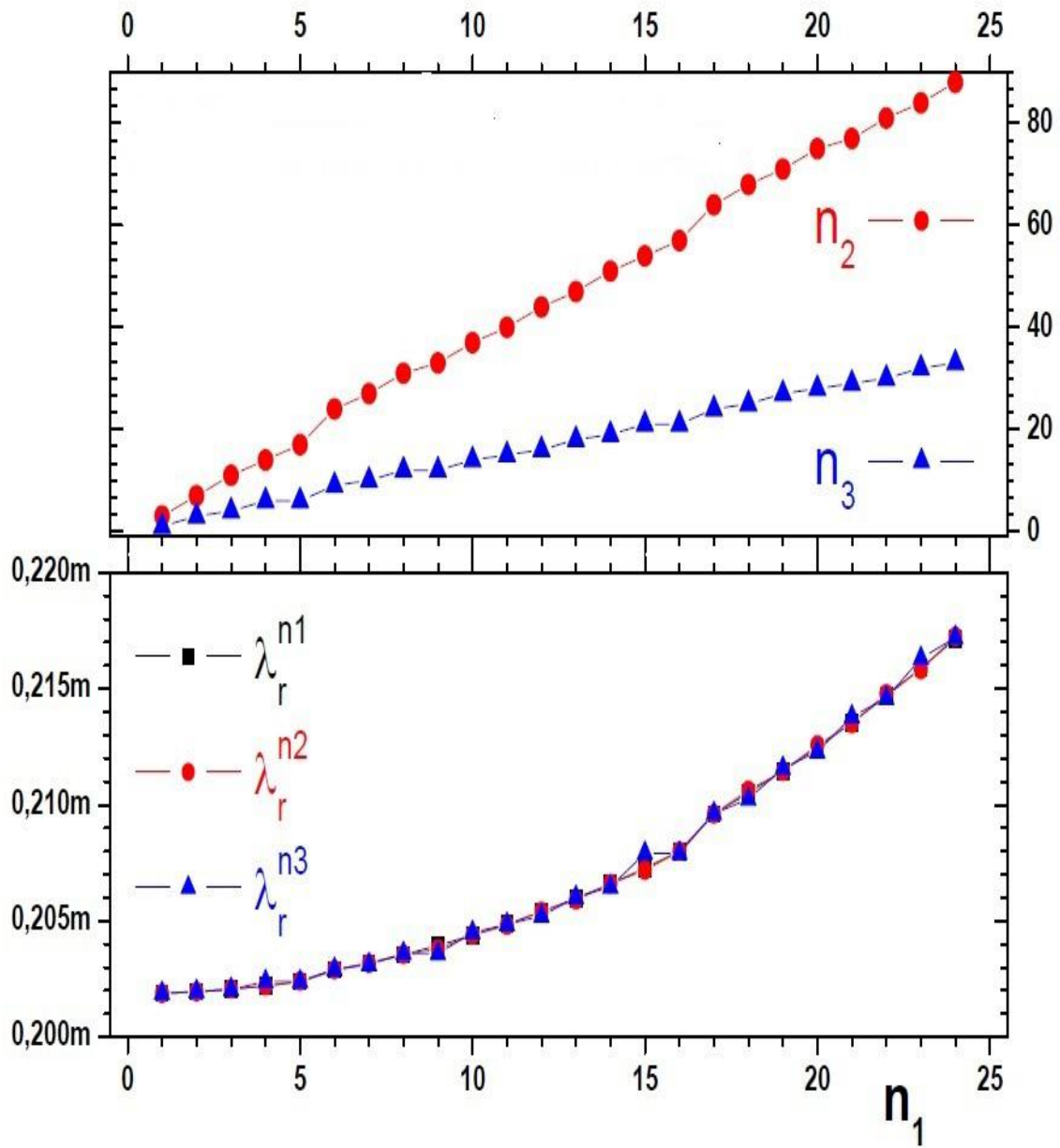


Figura 4.9: Ressonância de transmissão radial ou casamento da fase radial.

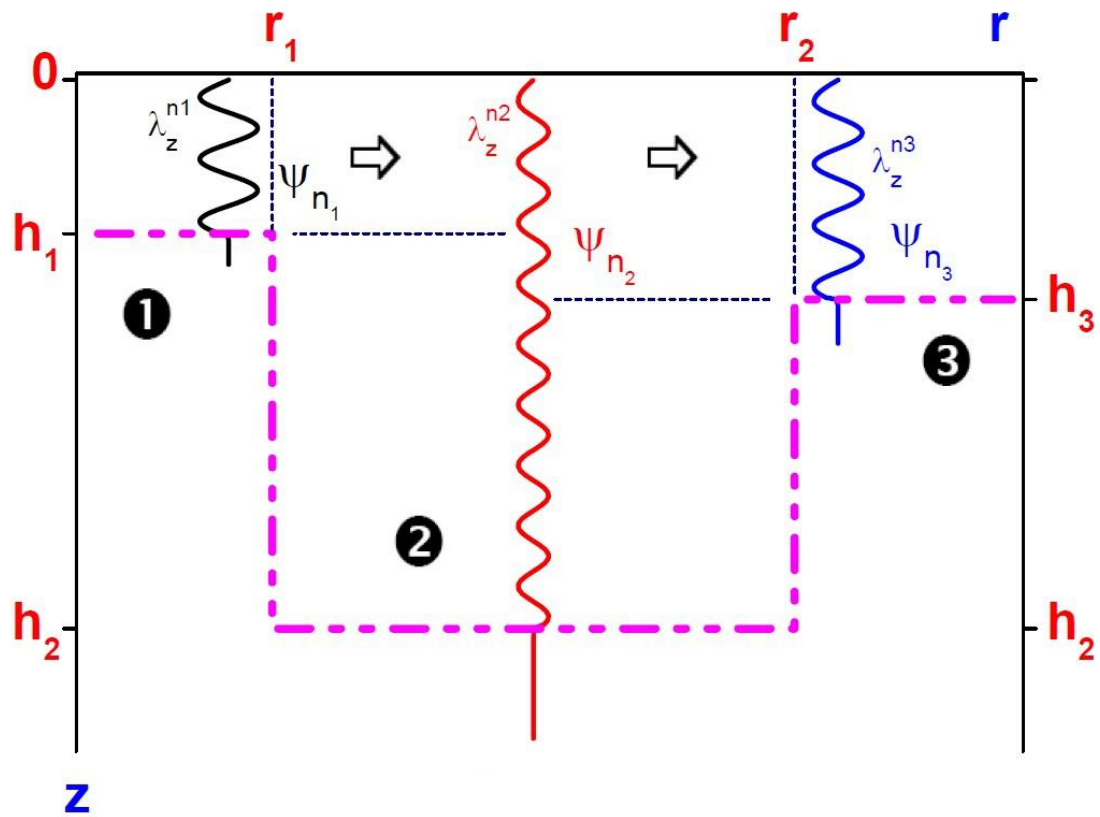


Figura 4.10: Acoplamento adiabático de Nodos.

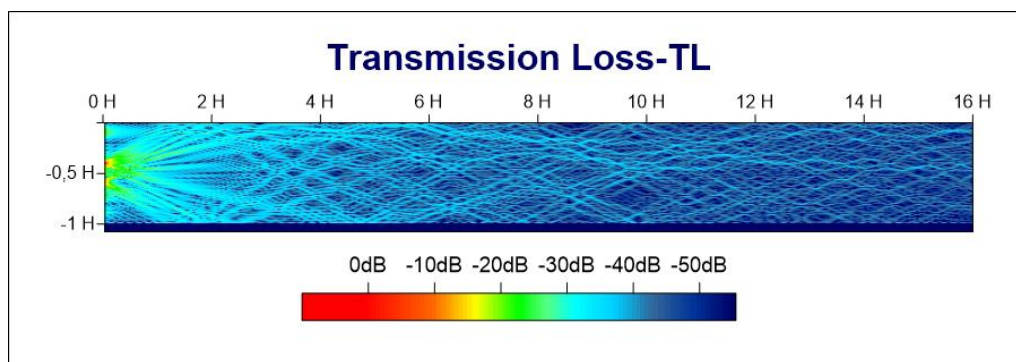


Figura 4.11: TL com a fonte a meio da profundidade H.

Na figura 4.16, os resultados mostraram-se satisfatórios com as medidas ocorrendo dentro do intervalo previsto (Cilíndrico/Esféricos) e modelo acompanhando a tendência de variabilidade, na mesma profundidade, como os dados. Fato que demonstra um bom resultado qualitativo apresentado pelo modelo.

Na 4.17 buscando-se uma melhor aferição dos resultados, realizamos uma ampliação (*zoom*) significativa, dos dados em $z = 23m$, focada na média dos dados *in situ*, em comparação com a curva gerada pelo modelo. Podemos então constatar que mesmo não levando em conta a energia irradiada nos lóbulos laterais e de retorno do sinal, como apresentado no diagrama de irradiação da fonte (Fig.:3.10); a falta de focalização da energia irradiada da fonte (oscilação do navio e fonte); a não instalação do nós (TX e RX) na geometria ideal, aproveitando o canal efetivo; as variações de posicionamento altimétrico e planimétrico não controladas, tanto da recepção como da transmissão tem uma discrepância de aproximadamente 10 dB para a frequência de 10 kHz, entre os valores computados pelo modelo nas duas profundidades adjacentes aos 23m, mesmo estando a média corretamente posicionada entre elas, o que não invalida o modelo mas identifica pontos de correção, tanto na coleta dos dados *in situ* para aferição, com nas melhorias a serem implementadas no modelo físico. Comportamento semelhante na comparação entre os dados *in situ* e aqueles previstos pelo modelo, também ocorreram para frequências mais baixas, como exemplificado nas figuras 4.15 e 4.19 com a frequência de 5 kHz.

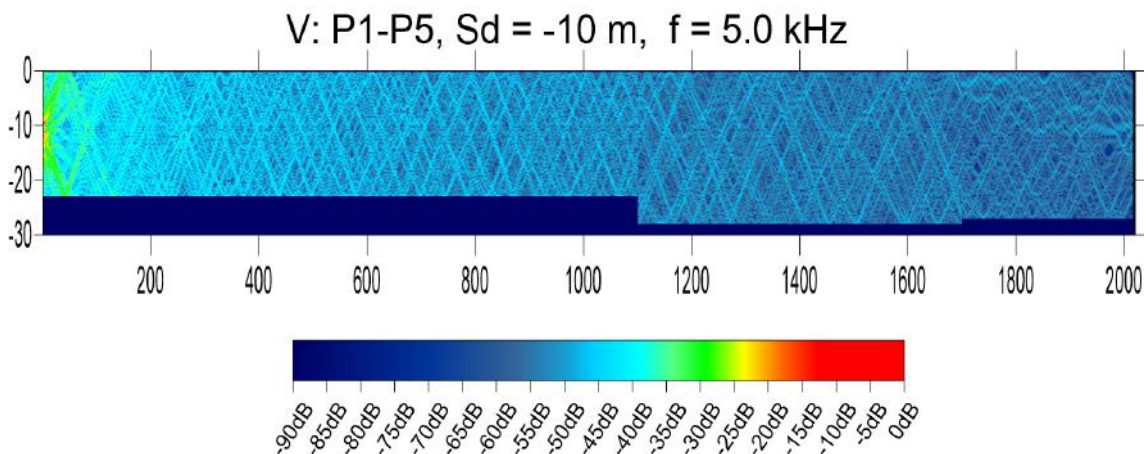


Figura 4.12: TL para visada P15, Freq.:5.0 kHz, fonte a 10 m e Camada de Mistura a 12m

V: P1-P5, $S_d = 1/2 C_{ef}$, $f = 5.0$ kHz

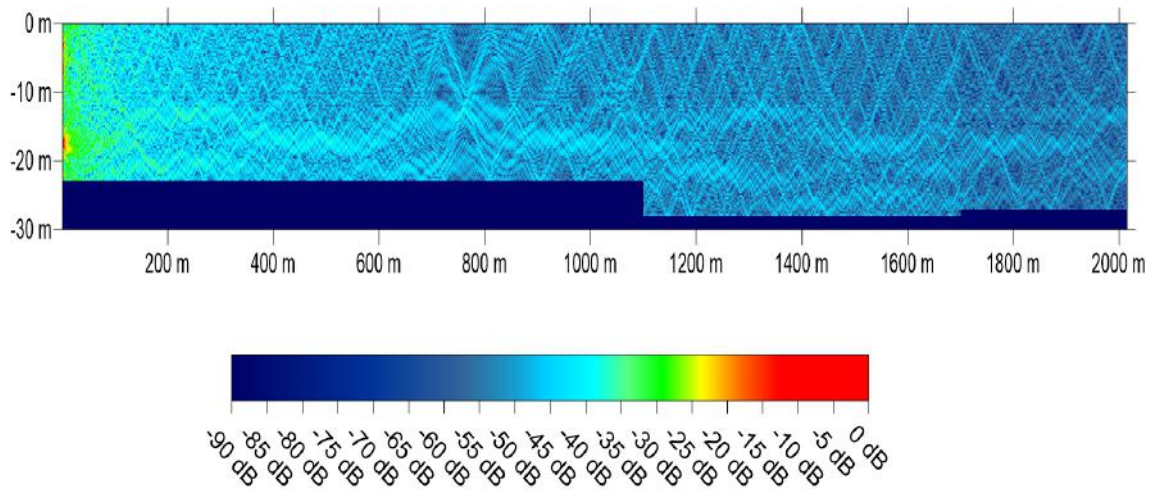


Figura 4.13: TL para visada P15, Freq.:5.0 kHz, fonte a meio da Termoclina e Camada de Mistura a 12m.

V: P2-P5, $S_d = -10$ m, $f = 7.5$ kHz

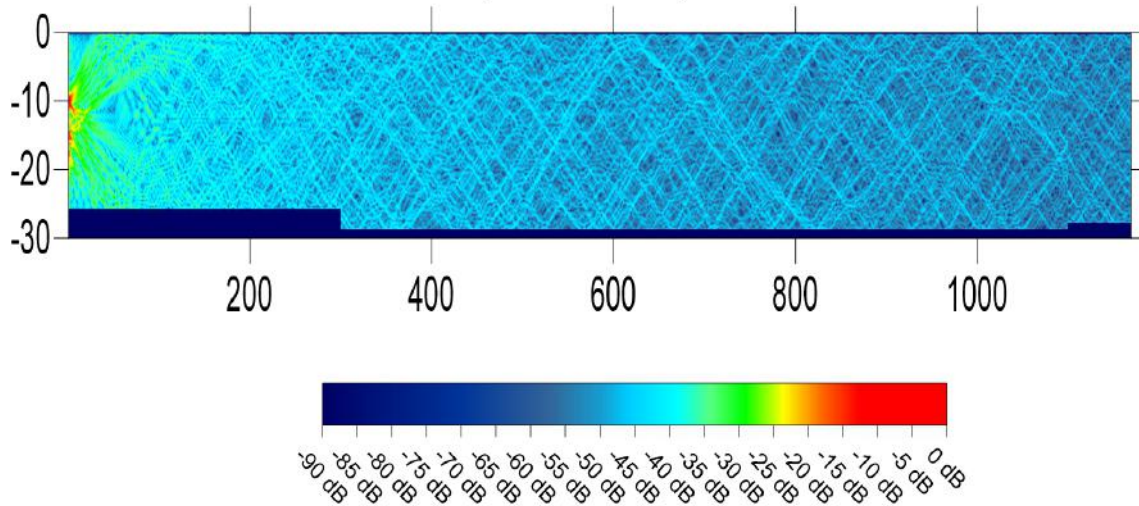


Figura 4.14: TL para visada P25, Freq.:7.5 kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura a 12m.

V: P4-P5, Sd = 10m, f = 10.0 kHz

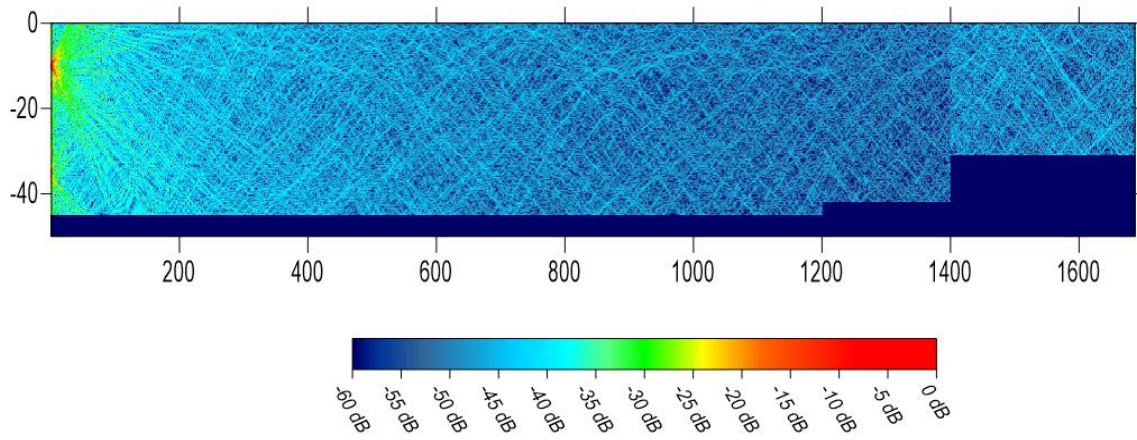


Figura 4.15: TL para visada P45, Freq.:10 kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura a 12m.

Passaremos agora a sumarizar nossos principais resultados, conclusões e perspectivas futuras.

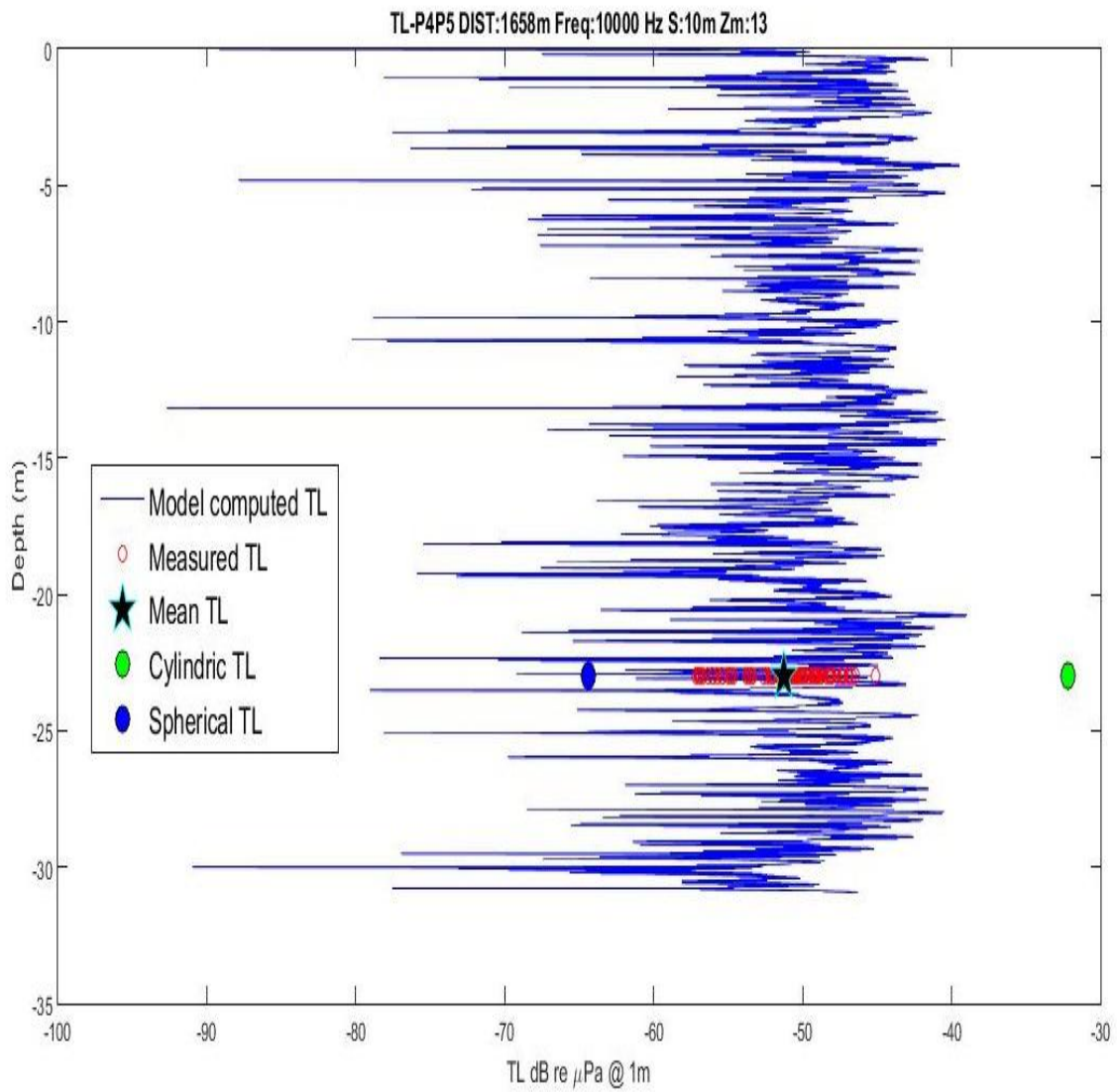


Figura 4.16: TL computada para visada P4P5, Dist.:1658m com freq.:10kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura com 13 m

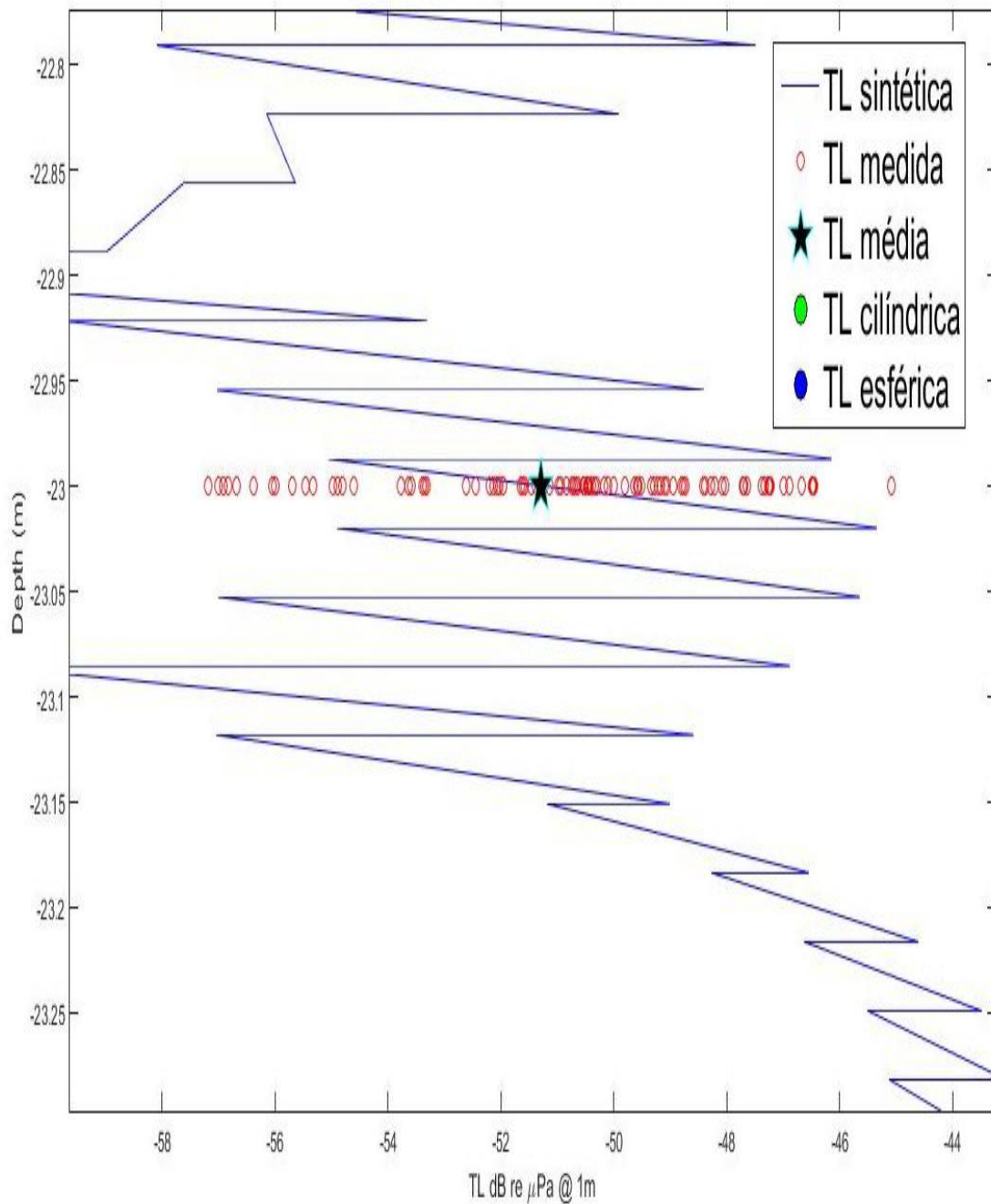


Figura 4.17: Ampliação do resultado do modelo versus medições na visada P4P5, Dist.: 1658m, freq.:10kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura com 13m

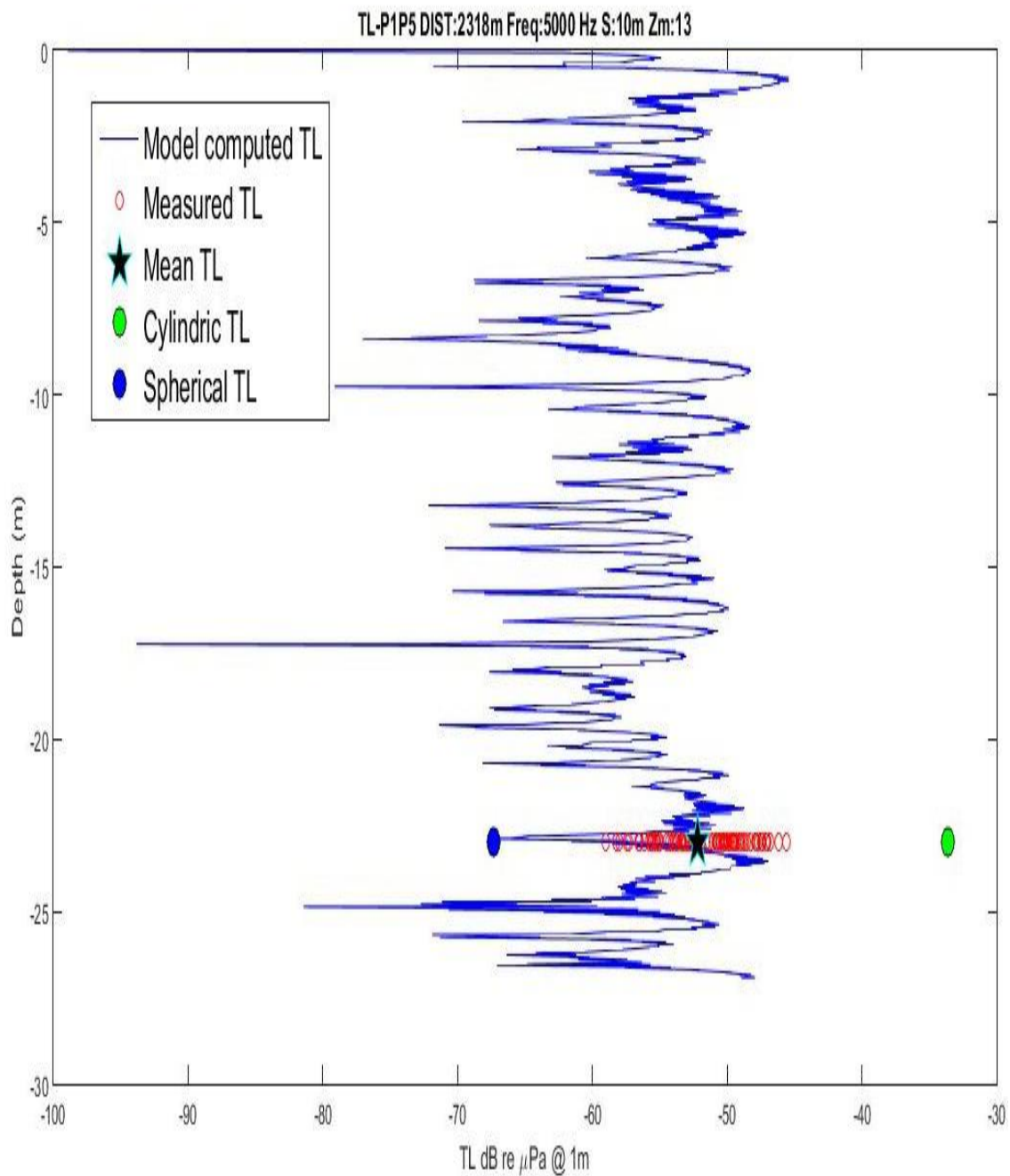


Figura 4.18: Resultado do modelo versus medições na visada P1P5, Dist.: 2318m, freq.:5kHz, fonte a 10m e Camada de Mistura com 13m

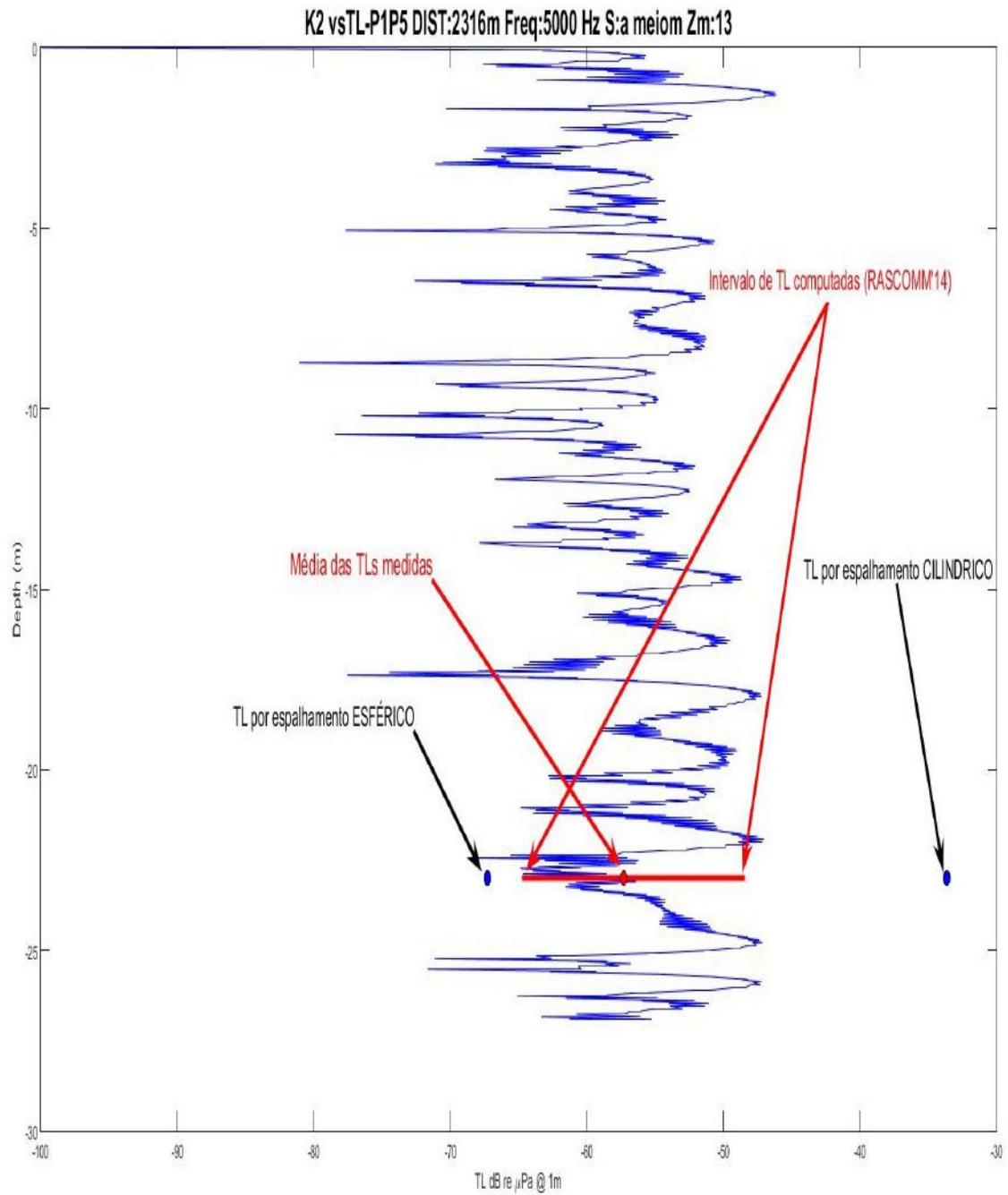


Figura 4.19: Resultado do modelo versus medições na visada P1P5, Dist.: 2316m, freq.:5kHz, fonte a meio da Camada efetiva e Camada de Mistura com 13m

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

5.1.1 Sobre o desenvolvimento do modelo:

O objetivo do modelo teórico apresentado é explicar qualitativamente o mecanismo de transporte de energia acústica, em ambientes com parâmetros meteorológicos variáveis, a fim de permitir melhorias em tempo real no desempenho de um enlace de uma RAS em águas rasas. Usando os conceitos físicos fundamentais como o fenômeno de ressonância adiabática de transmissão, foi possível desenvolver um modelo teórico de propagação acústica subaquática ponto a ponto, baseado na propagação modal, que descreve satisfatoriamente o principal fluxo de energia entre fonte e receptor como mostrado nas figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15. No entanto, o modelo não leva em conta as perdas de energia laterais e retroativas sofridas pelos acoplamento radial e azimutal dos modos, nem a absorção em todas as possíveis direções de propagação. Todavia os algoritmos numéricos utilizados são preliminares e devem ser otimizados para aplicações futuras mais robustas.

5.1.2 Sobre os resultados teóricos do modelo

Os resultados sintéticos na Fig.4.16 estão dentro da gama de valores de espalhamento esféricos e cilíndricos ideais (JENSEN *et al.* [1] BREKHOVSKIKH e LYSANOV [38], MEDWIN e CLAY [40], FRISK [34], BREKHOVSKIKH [26] e CLAY e MEDWIN [39]). Da mesma forma, a figura 4.13 mostra algumas características importantes como: formação de duto de energia, zonas convergentes de sombra e brilhante, além de aumentar a dispersão à medida que a frequência aumenta nas diferentes visadas. Estes resultados testemunham o acordo qualitativo com o comportamento real do campo acústico subaquático, mas também impõem medidas *in situ* adicionais para aprimorar os resultados quantitativa e qualitativamente em di-

ferentes cenários. Apesar de seus valores médios estarem de acordo, os resultados medidos não estão mostrando boa concordância com os do modelo e devem ser repetidos no mesmo sítio, mas em diferentes posições para confirmar não apenas valores e comportamento do sinal, mas, principalmente, para identificar o motivo de uma diferença não esperada superior a 10dB entre valores sintéticos em profundidades adjacentes e de aproximadamente 6dB entre o valor sintético e a média das medidas *in situ* (vide figura 4.17). Cabe mencionar que esta metodologia pode ser refinada com a definição das frequências ótimas dos transdutores escolhidos para outras distâncias, com uma melhor estatística da faixa e frequências do ruído ambiental (definidas para o local) e uma melhor avaliação do valor do espalhamento geométrico (k) para a região. Essas providências permitirão um ajustamento melhor das condições de propagação e um conseqüente aumento na qualidade do sinal.

5.1.3 Sobre a coleta de dados de campo (RASSCOM'14)

Uma grande quantidade de ações operacionais e de engenharia podem ser feitas para melhoria das medições em *in situ*, são elas: uso de mergulhadores para posicionamento dos nós, permitindo uma configuração melhor controlada; inclusão de sensores de atitude e temperatura subaquática nos cabos de hidrofones (controle de atitude e condições de operação); instalação durante o experimento de um arranjo de hidrofones e termistores em toda a coluna d'água de forma a se possibilitar a aferição do modelo em qualquer profundidade; medição do perfil de velocidade do som durante todo o experimento na recepção, transmissão e ao longo da visada; instalação de um ADCP na região do experimento para medição de correntes subsuperfície; instalação de ondógrafo para medição das oscilações de superfície; instalação de flutuadores subsuperfície para mitigar a oscilação das estações de fundo (caso estejam suspensas) seja pela plataforma, seja pela ondulação natural; melhora do controle de posição planimétrica dos nós;

5.2 Trabalhos Futuros

Dentre os possíveis futuros trabalhos derivados desta tese podemos elencar:

- Inclusão no modelo físico do vazamento de energia lateral e inversa tanto da saída dos arranjos de fontes como entre o acoplamento dos modos nos diferentes guias, visando mitigar a diferença entre a perda efetiva de transmissão no canal e a medida a partir de valores de sinal;
- Avaliação do modelo proposto com os resultados de outros modelos consagrados (validação) que possam ser utilizados nas mesmas condições do nosso experimento;

- Avaliação do espalhamento geométrico prático (k) para a região;
- Inclusão do modelo físico do efeito DOPPLER de forma a mitigar o espalhamento em frequência na recepção;
- Avaliação e inclusão de métodos numéricos mais eficazes no modelo (estabilidade dos cálculos dos modos e ressonância de transmissão);
- Reforço do número de experimentos de coleta de dados, utilizando no planejamento o modelo proposto, de modo a se avaliar o impacto no modelo causado pela variabilidade do campo termohalino (diária e sazonalmente) e pela alteração da paisagem acústica submarina local (relação SNR). Validação qualitativa e quantitativa;
- Avaliação estatística do canal de forma a se mapear sua evolução temporal (correção do modelo físico);
- Medições *In situ* em diferentes cenários para estressar a validação qualitativa e para confirmar quantitativamente os resultados do modelo;
- Avaliação, em termos computacionais da possibilidade de embarque do software em plataformas dedicadas e de baixo custo;
Integração do modelo com um MODEM definido por software para aplicações reais; e
- Desenvolvimento de hardware e software para uma RAS de sensores em águas rasas.

Por fim, gostaríamos de ressaltar que, pioneiramente, desenvolvemos, baseados na teoria de ressonância adiabática de transmissão, não só um modelo teórico que explica a transmissão da energia acústica em águas rasas e ultra-rasas, como também um código computacional em FORTRAN77 que permitiu, a confrontação de forma satisfatória entre as predições do modelo e os dados coletados.

Referências Bibliográficas

- [1] JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B., et al. *Computational Ocean Acoustics*. NY, Springer, 2011.
- [2] PEKERIS, C. L. “Theory of Propagation of Explosive Sound in Shallow Water”, *The Geological Society of America*, v. 27, 1948.
- [3] CLIMENT, S., SANCHEZ, A., CAPELLA, J. V., et al. “Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks: Advances and Future Trends in Physical, MAC and Routing Layers”, *Sensors*, 2014. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/sensors>.
- [4] SCHMIDT, H. “Lecture Notes of Computational Ocean Acoustics”. 2001.
- [5] HEIDEMANN, J., STOJANOVIC, M., ZORZI, M. “Underwater Sensor Networks: Applications, Advances and Challenges”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 370, pp. 158–175, 2011. ISSN: 1364-503X. doi: 10.1098/rsta.2011.0214.
- [6] LLOR, J., MALUMBRES, M. P. “Underwater Wireless Sensor Networks: How do Acoustics Propagation Models Impact the Performance of Higher-Level Protocols ?” *Sensors Open Access*, v. 12, pp. 1312–1335, 2012.
- [7] SOZER, E. M., STOJANOVIC, M., PROAKIS, J. G. “Underwater Acoustic Networks”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 25, n. 1, jan. 2000.
- [8] LANDAU, L. D., LIFSHITZ, E. M. *Mechanics*. Moscou, B/H-Butterworth / Heinemann, 2000.
- [9] STOJANOVIC, M. “On Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Communication Channel”, *WUWNet06*, 2006.
- [10] QUAZI, A. H., KONRAD, W. L. “Underwater Acoustic Communications”, *IEEE Communications Magazine*, v. 20, pp. 24 – 30, mar. 1982. ISSN: 0163-6804. doi: 10.1109/mcom.1982.1090990.

- [11] KUCHPIL, C. *Sistema de Monitoramento Subaquático para Exploração usando Rede de Sensores Acusticos*. Tese de Mestrado, UFRJ/PENO/COPPE, 1991.
- [12] FERREIRA, R. S. *Modelagem da Propagação do Som em Águas Rasas*. Tese de Mestrado, UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Março 2002.
- [13] DOS SANTOS, F. D., RUBINSTEIN, M. G. “Análise da Viabilidade de Aplicações de Monitoramento”, *XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 0, 2012.
- [14] VIEIRA, L., LOUREIRO, A., FERNANDES, A., et al. “Redes de Sensores Aquáticas”, *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, maio 2010.
- [15] RIBEIRO, F. J. L. *Sistema de Monitoramento Subaquático para Exploração usando Rede de Sensores Acústicos*. Tese de Doutorado, UFRJ/PEE/COPPE, nov. 2012.
- [16] ETTER, P. C. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. New York, Taylor and Francis e-Library, 2003.
- [17] BAGGEROER, A. B. “An Overview of Acoustic Communication from 2000-2012”, *Underwater Communications Conference and Workshop (2012)*, 2012.
- [18] CHITRE, M., SHAHABUDEEN, S., STOJANOVIC, M. “Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges”, v. 42, pp. 103–116, 2008. ISSN: 0025-3324. doi: 10.4031/002533208786861263.
- [19] STOJANOVIC, M. “Wireless Underwater Communications and Networks: Current Achievements and Future Research Challenges”. .
- [20] XIE, G., GIBSON, J. *A Network Protocol for Underwater Acoustic Networks*. Relatório técnico, CS Depto/NPS/USN, 2000.
- [21] IKEDA, Y., MIRANDA, L. B., ROCK, N. J. “Observations on stages of upwelling in the region of Cabo Frio (Brazil) as conducted by continuous surface temperature and salinity measurements.” *Bol. Inst. Oceanogr*, v. 23, 1974.
- [22] TORRES JUNIOR, A. R. *Resposta da Ressurgência de Cabo Frio a Forçantes Locais*. Tese de Mestrado, UFRJ/COPPE, 1995.

- [23] ELIAS, L. M. C. *Variabilidade interanual da ressurgência de Cabo Frio - RJ*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ/PENO, 2009.
- [24] CAMPOS, E. D. J., LORENZZETI, J. A., ET AL, M. R. S. “Penetration Of Waters From The Brazil-Malvinas Confluence Region Along The South American Continental Shelf Up To 23 S””, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, n. 1, pp. 49–58, 1996.
- [25] WILLIAMS, A. “Nomal-Mode methods in propagation of Underwater Sound”. In: *Underwater Acoustics*, pp. 23–56, New York, Wiley-Interscience, New York, 1970.
- [26] BREKOVSKIKH, L. M. *Waves in Layered Media*. Applied Mathematics and Mechanics 6. Moscou, Academic Press, Elsevier, 1960. ISBN: 978-0-12-395777-1.
- [27] URICK, R. J. “Intensity Summation of Modes and Images in Shallow-Water Sound Transmission”, *Journal of Acoustical Society of America*, pp. 780–788, 1969.
- [28] EWING, W. M., JARDETZKY, W. S., PRESS, F. *Elastic Waves in Layered Media*. New York, McGraw Hill, 1957.
- [29] FRANCOIS, R. E., GARRISON, G. R. “Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 3, n. 72(3), pp. 896–907, 1982.
- [30] FISHER, F. H., SIMMONS, V. P. “Sound absorption in seawater”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 62, pp. 558–564, 1977.
- [31] WILSON, W. D. “Equation for the Speed of Sound in Sea Water”, *The Journal of the Acoustical Society of America* 32, 1357 (1960), 1960.
- [32] BUCKINGHAM, M. J. “Ocean-Acoustic Propagation Models”, *J. Acoustique*, 1992.
- [33] PORTER, M. B. *The Kraken Normal Mode Program*. Relatório técnico, Naval Research Laboratory, 1992.
- [34] FRISK, G. *Ocean and Seabed Acoustics - A theory of Wave Propagation*. Upper Saddle River, NJ, 07458, PTR Printice Hall, 1994.

- [35] HARDIN, R., TAPPERT, F. D. “Applications of Split the Split-Step Fourier method to the Numerical Solution of nonlinear and variable coefficient wave equation”, *SIAM Rev.*, 1973.
- [36] BERGMANN, P. G. *Physics of Sound in the Sea*. Department of The Navy, 1969.
- [37] KATSNELSON, B. G., PETNIKOV, V. G. *Propagação Acústica em Águas Rasas*. Rússia, Moscou, Academia de Ciências Russa, 1997.
- [38] BREKHOVSKIKH, L. M., LYSANOV, Y. P. *Fundamentals of Ocean Acoustics (3rd edition)*, v. 116. Springer-Verlag, Inc. 172 Fifth Avenue, New York, NY 10010, Springer-Verlag New York, inc, 2004. doi: 10.1121/1.1792644.
- [39] CLAY, C. S., MEDWIN, H. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Applications of Modern Acoustics. Academic Press, San Diego-CA, USA, Academic Press, 1998.
- [40] MEDWIN, C., CLAY, C. S. *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*. Applications of Modern Acoustics. New York/NJ/USA, Wiley-Interscience Publication, 1977.
- [41] PROAKIS, J. G., RICE, J. A., SOZER, E. M., et al. “Shallow water acoustic network”, *Encyclopedia of Telecommunication*, 2003. doi: 10.1002/0471219282.eot352.
- [42] FELEMBAN, E., SHAIKH, F. K., QURESHI, U. M., et al. “Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 2015, n. 896832, pp. 14, aug 2015. ISSN: 1550-1477. doi: 10.1155/2015/896832.
- [43] DE SOUZA, L. A. L. *Princípio do SONAR*. Instituto de Pesquisas da Marinha, 1997.
- [44] MASSA, D. P. *An Overview of Electroacoustic Transducers*. Massa Products corp., 280 Lincon Street, Hingham, MA 02043-1796 U.S.A.
- [45] KRAVTSOV, I. U., KUSKIN, V. M., PETNIKOV, V. G. “Sobre a distinção entre raios e modos em um guia de ondas ideal”, *Revista Acústica*, 1984.
- [46] URICK, R. J. *Principles of Underwater Sound*. McGrawHill Inc, USA, McGraw-Hill, New York, 1983.

- [47] BROWN, E., COLLING, A., PARK, D., et al. *Ocean Circulation*. Open University, 2004.
- [48] NODC/WMO. “Tabela do Estado do Mar and Beaufort”. Disponível em: <https://www.nodc.noaa.gov/woce/woce_v3/wocedata_1/woce-uot/document/wmocode.htm>.
- [49] PERLMAN, R. *Interconnections: Bridges, Routers, Switches and internetworking*. New York, Addison-Wesley Longman Inc, 2000.
- [50] Xiao, Y. (Ed.). *Underwater Acoustic Sensor Networks*. New York, Taylor and Francis Group, LLC, 2010. ISBN: 978 1 4200 6711 8. doi: 10.1002/rnc.3621.
- [51] AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D., MELODIA, T. “Challenges for Efficient Communication in Underwater Acoustic Sensor Networks”, *ACM Sigbed Review*, 2004 -, 2004.
- [52] DA SILVA, A. C. *Dinâmica Batimétrica e Sedimentológica da Região do Cabo Frio - Rio de Janeiro 2009*. Tese de Mestrado, UFRJ/GEO, 2009.
- [53] MUEHE, D. “Sedimentology and Topography of High Energy Coastal Environment Between Rio de Janeiro and Cabo Frio, Brazil”, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 1979.

Apêndice

1. Aviso de Pesquisa Aspirante Moura (U14-AvPq Asp. Moura)

Características:

Lançamento: 1987;

Incorporação (MB): 25 de janeiro de 2010;

Deslocamento: 380 ton (grt), 114 ton (net) e 63 ton. (dwt);

Dimensões: 36.06 m de comprimento, 9.0 m de boca e 3.03 m de calado;

Propulsão: 2 motores diesel MAN 9L 20/27 gerando 1.213 BHP, acoplados a 2 propulsores azimutais Rolls Royce/Ulstein. 360°, US 401/2000 e bow thruster Brunvoll 150 Hk (Tunnel);

Eletricidade: 3 geradores diesel Scania 14/14 M. 223 kW e 3 alternadores de 210 kVA 150 Hz/380V 3-fases;

Velocidade: máxima de 12 nós e mantida de 9 nós;

Raio de ação: 2.160 milhas náuticas à 9 nós;

Autonomia: 10 dias;

Armamento: nenhum;

Sensores: 1 radar de navegação Furuno Type 1510, 1 radar de navegação Simrad CR 50, Auto Pilot AP-50, Gyro Anschutz STD-22, Carta Eletronica Telchart V + Zone 1, Navtex, mod ICS Nav- 5, Inmarsat Mini-M, mod. NERA worldphone, data, fax. Código Internacional de Chamada: PWAM IMO: 8870322; e Tripulação: 12 homens, sendo 3(2) oficiais e 9(10) praças, mais 9 pesquisadores.

Histórico:

O Aviso de Pesquisa Aspirante Moura - U 14, ex-Finder, que tinha bandeira de Malta (callsign 9HW18) e porto de registro em Valetta, foi o primeiro navio a ostentar esse nome em homenagem ao Aspirante José Cláudio Soares de Moura, que entrou na Escola Naval em 1963 e faleceu em serviço em 12 de junho de 1966. O navio foi construído no estaleiro Astilleros Brodogradiliste, em 1987, e foi modernizado em 2008. Foi adquirido, junto a empresa FAR - Research and Recover Ltd., em parceria com o Ministério da Ciência e Tecnologia, ficando então subordinado ao Instituto de Estudos do Mar

Almirante Paulo Moreira IEAPM, para funcionar como Laboratório Nacional Embarcado II, contribuindo com as pesquisas de interesse da Marinha e da comunidade científica nacional, realizadas por aquele Instituto. Foi incorporado à Marinha do Brasil em Sandfjord (Noruega) em 25 de janeiro de 2010 em cumprimento ao Aviso 31/MB/2010.

Fontes:

<http://www.naval.com.br/ngb/A/A130/A130.html>

https://www.marinha.mil.br/ieapm/noticia_aniversario_asp_moura

2. NPq/AvPq Diadorim - IEAPM 02

Caraterísticas:

Classe Diadorim;

Incorporação (MB): 1999;

Deslocamento: 147 ton (carregado);

Dimensões: 24 m de comprimento e 3 m de calado.

Propulsão: diesel;

Velocidade: máxima de 10 nós;

Raio de Ação: 30 dias de autonomia;

Sensores: 1 radar de navegação;

Código Internacional de Chamada: PP2965 (SUDEPE); e

N.A.: Tripulação: 9(8) ; Pesquisadores: 4(5)

Histórico O Aviso de Pesquisa Diadorim é o primeiro navio a ostentar esse nome na Marinha do Brasil. Pertenceu a SUDEPE e posteriormente ao IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, o qual firmou convenio para operação com a Marinha em 1999, por um período de dois anos. A transferência objetivou atender às necessidades apontadas pela Coordenação Geral do Programa REVIZEE relativas à carência de meios flutuantes disponíveis para atender o SCORE-Central. O navio passou a realizar operações de pesquisas na região central em proveito do referido programa sob a coordenação do Instituto de Estudo do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM). A manutenção e operação do navio foram custeadas com recursos do SECIRM, inicialmente e posteriormente pelo IEAPM/MB. **Fonte:** <http://www.naval.com.br/ngb/D/D075/D075.htm> N.A.: Embarcação desincorporada da MB em 2016.

3. Invariante Adiabático:

Propriedade de um sistema físico que se mantém aproximadamente constante

quando mudanças neste sistema ocorrem lentamente. Quando a variação tende ao infinito o invariante adiabático tende a zero.

4. GPS Diadorim

Tipo: GARMIM GPS MAP 78S

Precisão do GPS - Acuracidade:

GPS: < 33 pés (10 m) 95 % da utilização típica **

DGPS: De 10 a 16 pés (de 3 a 5 m) - 95 % típica

WAAS: Somente na América no Norte

Altímetro: Precisão: ± 10 pés (± 3 m)*

Resolução: 1 pé (0,3 m)

Intervalo: de -2000 a 30000 pés. (Sujeito a calibração adequada por parte do utilizador).

Bússola: Precisão: ± 2 graus (± 5) graus em latitudes extremas a norte e a sul)*

Resolução: 1 grau. ***Sujeito a calibração adequada por parte do utilizador**

5. GPS AvPqAspMoura

Tipo: FURUNO GP-150/Dual SP-1

Precisão do GPS - Acuracidade

GPS: 10 m approx. (2DRMS)**

DGPS: 5 m approx. (2DRMS)

WAAS: 3 m approx. (2DRMS)

Position Update Interval 1 s

**** GPS está sujeito à degradação da precisão para 100 m (2DRMS), ao abrigo do Programa de Disponibilidade Seletiva (SA) imposto pelo Departamento de Defesa norte-americano, quando ativado.**