

UFRRJ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MODELAGEM MATEMÁTICA E
COMPUTACIONAL

DISSERTAÇÃO

Análise da Propagação Acústica Submarina e
Seus Possíveis Impactos na Vida dos
Misticetos

Fabiano Marcos de Lima

2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL**

**ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA E
SEUS POSSÍVEIS IMPACTOS NA VIDA DOS MISTICETOS**

FABIANO MARCOS DE LIMA

Sob orientação de
Claudia Mazza Dias

e co-orientação de
Carlos Andrés Reyna Vera-Tudela

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Modelagem Matemática e Computacional** no Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Área de Concentração em Modelagem Matemática e Computacional.

Seropédica, RJ, Brasil
Abril de 2019

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L732a Lima, Fabiano Marcos de, 13/04/1987-
Análise da Propagação Acústica Submarina e Seus
Possíveis Impactos na Vida dos Misticetos / Fabiano
Marcos de Lima. - 2019.
59 f.: il.

Orientadora: Claudia Mazza Dias.
Coorientador: Carlos Andrés Reyna Vera-Tudela.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Modelagem
Matemática e Computaciona, 2019.

1. Modelagem Matemática. 2. Acústica. 3. Modelagem
Acústica Submarina. 4. Equação da Onda. 5. Vida
Marinha. I. Dias, Claudia Mazza, 20/12/1969-, orient.
II. Vera-Tudela, Carlos Andrés Reyna , 04/02/1964-,
coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Modelagem
Matemática e Computaciona. IV. Título.

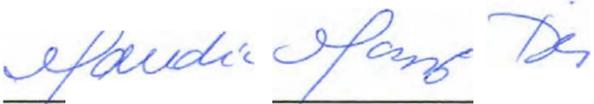
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) -
Código de Financiamento 001.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL**

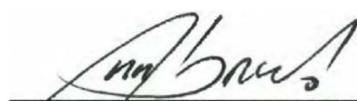
FABIANO MARCOS DE LIMA

Di ertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre** no Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Area de Concentração em Modelagem Matemática e Computacional.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05/04/2019.



Claudia Mazza Dias D. Sc. UFRRJ
(Presidente)



Ana Ibis Abreu Rojas D. Sc. UDELAR



Cristiane Oliveira de Faria D. Sc. UERJ



Renan de Souza Teixeira D. Sc. UFRRJ

AGRADECIMENTOS

Em plena consciência de que ninguém chega a lugar algum sozinho, mais uma vez me manifesto muito grato à todos aqueles que me apoiaram e me suportaram até aqui. Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de vivenciar tudo que aconteceu nesses últimos anos. Por ter me dado forças e saúde e por não permitir que eu desistisse perante os desafios de cada dia. Ele sim é o autor e criador de todas as obras e de toda ciência e mais uma vez partilha um pouco de seu conhecimento comigo. Agradeço a esta universidade que mais uma vez me acolheu como um verdadeiro filho. Foram inúmeros momentos bons vividos neste lugar e todas as lembranças e pessoas que aqui passaram por mim, serão eternas em meu coração.

Aos professores que com muita excelência nos guiaram e nos capacitaram nessa caminhada do conhecimento. Em especial à professora orientadora Claudia Mazza por mais uma vez ter me acolhido como seu orientando. Agradeço por toda paciência, por toda e dedicação, por todos os ensinamentos e principalmente pelo interesse e ajuda no meu crescimento profissional. Agradeço por todo incentivo e desenvolvimento das pesquisas por ter estado sempre presente acreditando e fazendo com que chegasse até aqui. Ao professor Carlos Reyna que cumpriu muito bem a missão sendo um excelente coorientador. Agradeço por toda calma, toda paciência e por cada conselho que me deu durante todo esse período desafiador de pesquisas. Agradeço por cada encorajamento, por querer sempre o melhor de nós, ensinando o verdadeiro significado de dedicação ao trabalho.

Agradeço a todos os meus familiares por todo apoio e compreensão nesse período delicado e muito intenso. Obrigado pelas forças e por todo apoio que me deram para seguir em frente e busca dos meus sonhos. Agradeço por ser sempre um refugio poderoso sendo minha base e motivo para continuar e dar sempre o meu melhor. "Quem encontrou um amigo encontrou um tesouro", sempre soube o quanto sou afortunado por ter tantos "tesouros" de valores inestimáveis na minha vida. Meu sincero agradecimento a todos os amigos que muito me apoiaram, que entenderam minha ausência e me deram forças para me dedicar aos estudos. Obrigado por partilharem comigo todos os momentos, sejam eles de alegria ou tristeza. Agradecimento especial aos eternos companheiros de estudos e amigos Valcenir Júnior, Simone, Wilza Lopes, Isis Nascimento, Jessica, Aline Lima, Thiago Souza e muitos outros que estiveram comigo. Tenham certeza que vocês são verdadeiros amigos que a Rural me deu e que vou levar para sempre. Nunca me esquecerei de como foi trilhar esse caminho com cada um de vocês. Agradeço por me ouvirem na hora do aperto, por tudo que passamos juntos nessa caminhada, por se alegrarem e se entristecerem comigo, por todo apoio e por nunca desistirem de mim.

*"Uma mente que se abre a uma
nova ideia jamais volta ao seu
tamanho original". Albert Einstein*

RESUMO

DE LIMA, Fabiano Marcos. **Análise da Propagação Acústica Submarina e Seus Possíveis Impactos na Vida dos Mysticetos**. 2019. 59f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional). Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

Uma das características importantes dos mamíferos marinhos é sua capacidade de transmitir e captar sons em ambiente submarino. Tal capacidade é fundamental para a sobrevivência desses mamíferos em seu habitat natural, fazendo com que esses animais sejam extremamente dependentes da paisagem acústica local. Atividades como comunicação, caça, fuga de predadores, orientação geográfica, acasalamento, entre outras, estão diretamente ligadas à capacidade desses animais de emitir e receber sons ao seu redor. A poluição sonora causada pelas ações humanas na execução de suas atividades produtivas nos mares e oceanos, podem interferir de uma forma negativa, na rotina desses animais. O presente trabalho trata de um modelo matemático e computacional, baseado na equação da onda, capaz de simular a intensidade da propagação acústica em um ambiente submarino. O modelo é solucionado pelo método das diferenças finitas fornecendo um panorama da poluição de ruídos gerados pelas ações humanas. Após simulações, os resultados são relacionados com as características acústicas dos mysticetos (subordem de mamíferos marinhos) avaliando os possíveis impactos na vida desses animais.

Palavras-chave: Modelagem Matemática, Propagação Acústica, Mamíferos Marinhos, Mysticetos.

ABSTRACT

DE LIMA, Fabiano Marcos. **Analysis of Underwater Acoustic Propagation and its Possible Impacts on the Life of the Mysticetes**. 2019. 59p. Dissertation (Master in Mathematical and Computational Modeling). Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

One of the important characteristics of marine mammals is their ability to transmit and receive sounds in underwater environments. Such ability is critical to the survival of these mammals in their natural habitat, making these animals extremely dependent on the local acoustic landscape. Activities such as communication, hunting, predator flight, geographic orientation, mating, among others, are directly linked to the ability of these animals to emit and receive sounds around them. The noise pollution caused by human actions due to their productive activities in the seas and oceans, can interfere in a negative way in the routine of these animals. The present work deals with a mathematical and computational model, based on the wave equation, able to simulate the intensity of the acoustic propagation in an underwater environment. The model is solved by finite differences method providing a panorama of noise pollution from human actions. After simulations, the results are related to the acoustic characteristics of the mysticetes (marine mammal suborder) evaluating the possible impacts on the lives of these animals.

Keywords: Mathematical Modeling, Acoustic Propagation, Underwater Life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo da aplicação de um dispositivo SONAR.....	4
Figura 1.2 – Exemplo de uma aplicação sísmica.....	5
Figura 2.1 – Movimento de uma onda longitudinal.....	11
Figura 2.2 – Movimento de uma onda transversal.....	11
Figura 2.3 – Esquema da propagação sonora com a compressão e refração das moléculas em um meio elástico (Coates, 1991).....	12
Figura 2.4 – Representação do comprimento e da amplitude de uma onda (Au & Hastings, 2008).....	13
Figura 2.5 – Divergência esférica oriunda de uma fonte pontual em um meio homogêneo de fronteira livre (Xavier, 2005).	14
Figura 2.6 – Divergência esférica oriunda de uma fonte pontual- frentes de ondas em longas distâncias (Xavier, 2005).....	14
Figura 2.7 – Ilustração de um sinal acústico no domínio do tempo e no domínio da frequência (Queirós& Ramirez, 2016).	19
Figura 3.1 – Ilustração de uma malha bidimensional sobre domínio Ω	25
Figura 4.1 – Ilustração da Baleia-franca, família <i>Balaenidae</i> , gênero <i>Eubalaena</i> (Monteiro <i>et al.</i> , 2013).....	30
Figura 4.2 – Ilustração da Baleia-franca da Groenlândia, família <i>Balaenidae</i> , gênero <i>Eubalaena</i> (Monteiro <i>et al.</i> , 2013).....	30
Figura 4.3 – Ilustração da Baleia-pigmeu, família <i>Neobalaenidae</i>	31
Figura 4.4 – Ilustração da Baleia-azul, família <i>Balaenopteridae</i> (Jefferson <i>et al.</i> , 1993).	31
Figura 4.5 – Ilustração da Baleia-fin, família <i>Balaenopteridae</i> (Jefferson <i>et al.</i> , 1993).	32
Figura 4.6 – Ilustração da Baleia-minke, família <i>Balaenopteridae</i> (Jefferson <i>et al.</i> , 1993).	32
Figura 4.7 – Ilustração da Baleia-bryde, família <i>Balaenopteridae</i> (Jefferson <i>et al.</i> , 1993).	32
Figura 4.8 – Ilustração da Baleia-jubarte, família <i>Balaenopteridae</i> (Jefferson <i>et al.</i> , 1993).	33
Figura 4.9 – Ilustração da Baleia-cinza, família <i>Eschrichtiidae</i> (Jefferson <i>et al.</i> , 1993).	33
Figura 5.1 – Condições de contorno utilizadas.	37
Figura 5.2 – Representação geral da geometria do domínio utilizado nas simulações. .	38
Figura 5.3 – Ilustração de um navio de classe <i>Chemical Tanker</i>	39
Figura 5.4 – Ilustração de um navio de classe <i>Crude Oil Tanker</i>	39
Figura 5.5 – Ilustração de um navio de classe <i>Products Tanker</i>	39
Figura 5.6 – Ilustração de um navio de classe <i>Open Hatch Cargo</i>	40
Figura 5.7 – Ilustração de um dos navios de classe <i>Bulk Carrier</i>	40
Figura 5.8 – Ilustração de navio de classe <i>Vehicle Carrier</i>	41
Figura 5.9 – Ilustração de um navio de classe <i>Container Ship</i>	41
Figura 5.10 – Níveis acústicos e frequências para os navios <i>Chemical Tanker</i> , <i>Crude Oil Tanker</i> , <i>Products Tanker</i> e <i>Open Hatch</i> - Adaptado de McKenna <i>et al.</i> (McKenna <i>et al.</i> , 2012).	42
Figura 5.11 – Níveis acústicos e frequências para navios <i>Bulk Carrier</i> , <i>Vehicle Carrier</i> e <i>Container Ship</i> - Adaptado de McKenna (McKenna <i>et al.</i> , 2012).....	42

Figura 5.12 – Representação esquemática das etapas de solução do modelo proposto. .	44
Figura 6.1 – Representação do campo acústico para a simulação dos níveis de ruídos gerados pelo navio de classe <i>Products Tanker</i>	46
Figura 6.2 – Seção transversal da variação dos níveis de propagação de ruídos gerados pelo navio de classe <i>Products Tanker</i>	47
Figura 6.3 – Espectro do sinal acústico para a classe de navios <i>Products Tanker</i> e faixas de frequência de vocalização dos mysticetos.	47
Figura 6.4 – Campo acústico da simulação dos níveis de propagação de ruídos gerados por todas as classes de navios.	49
Figura 6.5 – Seção transversal da variação dos níveis de ruídos gerados por todas as classes de navios.	50
Figura 6.6 – Espectro dos sinais das fontes de todas as classes de navios e faixas de frequências sensíveis às vocalizações da Baleia-jubarte.	50
Figura 6.7 – Campo acústico da simulação dos níveis de propagação de ruídos gerados por todas as classes de navios com fontes com as mesmas frequências de vocalização dos mysticetos 4.1.	52
Figura 6.8 – Seção transversal da variação dos níveis de ruídos gerados por todas as classes de navio com as frequências dos mysticetos.	53
Figura 6.9 – Espectro dos sinais das fontes dos navios e faixas de frequência de vocalização dos mysticetos considerados neste trabalho.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Tipos de ruídos gerados pelo homem nos oceanos.	6
Tabela 2.1 – Perda de transmissão por espalhamento esférico (Au & Hastings, 2008).	15
Tabela 2.2 – Distribuição de frequências em banda de oitava (Redondo & Mateo, 2017).	20
Tabela 4.1 – Frequências de vocalização de algumas espécies de baleias - Adaptada de Au & Hastings (Au & Hastings, 2008).	36
Tabela 5.1 – Níveis de potência acústica e frequências dos navios relacionados nas Figuras 5.10 e 5.11 - Adaptado de McKenna. (McKenna <i>et al.</i> , 2012). ..	43

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

SI	Sistema Internacional de Unidades
MDF	Método de Diferenças Finitas
RJ	Rio de Janeiro
SPL	<i>Sound Pressure Level</i> - Nível de Pressão Sonora
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
<i>EDP</i>	Equao Diferencial Parcial
<i>TL</i>	<i>Transmission Loss</i> - Perda de Transmissão
<i>SL</i>	<i>Source Level</i> - Nível da Fonte
<i>RL</i>	<i>Receptor Level</i> - Nível de Recepo
<i>CT</i>	<i>Chemical Tanker</i> - Petroleiro Químico
<i>COT</i>	<i>Crude Oil Tanker</i> - Petroleiro de leo Bruto
<i>PT</i>	<i>Products Tanker</i> - Petroleiro de Produtos
<i>OH</i>	<i>Open Hatch</i> - Carga Aberta
<i>BC</i>	<i>Bulk Carrier</i> - Graneleiro
<i>VC</i>	<i>Vehicle Carrier</i> - Veículo Portador
<i>CS</i>	<i>Container Ship</i> - Navio Container

LISTA DE SÍMBOLOS

∇^2	(nabla) Divergente
Γ	(gamma) Letra grega usada para representar contornos
Pa	(pascal) Unidade de pressão no SI
∇^2	Operador Laplaciano
Ω	(ômega, letra maiúscula) Letra grega usada para representar domínios
ω	(ômega, letra minúscula) Letra grega usada para representar velocidade angular
rad	(radiano) Unidade de ângulo plano no SI
s	(segundo) Unidade de tempo no SI
dB	(decibel) Unidade de medida relativa ao nível de uma magnitude sonora (pressão, intensidade, potência no SI)
T	(período) Unidade de medida relativa ao período de ciclo de uma onda
f	(frequência) representação da frequência do SI
Hz	(Hert) Unidade de medida no SI relativa a frequência
λ	(lambda) Unidade de medida no SI relativa ao comprimento de onda
A	(amplitude) Unidade de medida no SI relativa a magnitude da oscilação de uma onda
T'	Unidade utilizada para representar temperatura
$^{\circ}C$	(graus Celsius) Unidade de medida no SI para a temperatura
I	(intensidade) Unidade de medida no SI relativa a intensidade
P	(potência) Unidade de medida no SI relativa a potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Modelagem Matemática	1
1.1.1	Modelagem com Equações Diferenciais	2
1.1.2	Breve Histórico do Estudo da Equação da Onda	3
1.1.3	Propagação Acústica Submarina	5
1.1.4	Ruídos Submarinos	6
1.1.5	A Poluição Sonora e os Mamíferos Marinhos	7
2	REVISÃO TEÓRICA	10
2.1	Ondas	10
2.2	Unidades de Medidas Acústicas	11
2.3	Relações Acústicas	11
2.3.1	Propagação Sonora	11
2.3.2	Período, Frequência Angular e Frequência da Onda	12
2.3.3	Comprimento de Onda e Amplitude	12
2.3.4	Representação Matemática de um Sinal Acústico	13
2.3.5	Velocidade de Propagação do Som no Mar	13
2.3.6	Divergência Esférica	14
2.3.7	Perda por Espalhamento Esférico	15
2.4	Métricas em Acústica Submarina	15
2.4.1	Unidade de Medida de Referência	15
2.4.2	O Decibel	16
2.4.3	Energia Acústica	16
2.4.4	Nível de Potência Sonora	16
2.4.5	Nível de Intensidade Acústica	16
2.4.6	Campo de Pressão Acústica	17
2.4.7	Nível de Pressão Acústica	17
2.4.8	Nível de Recepção Acústica	18
2.5	Transformação do Sinal Acústico do Domínio do Tempo para o Domínio da Frequência	18
2.5.1	Banda de Oitava	19
3	EQUAÇÃO DA ONDA	21
3.1	Equação Diferencial Parcial da Onda	21
3.1.1	Solução da Equação da Onda Unidimensional	21
3.2	Equação da Onda Acústica	22
3.2.1	Equação de Estado	22
3.2.2	Equação da Continuidade	23
3.2.3	Equação de Euler	23
3.2.4	Equação Linear da Onda	23
3.2.5	Solução da Equação da Onda Acústica	25
3.2.5.1	Equação da Onda com Fonte	25

3.3	Método de Diferenças Finitas - MDF	25
3.4	Discretização da Equação da Onda	26
3.5	Condições de Contorno	27
3.5.1	Condições de Contorno Reflexivas - CCR	28
3.5.2	Condições de Contorno Não Reflexivas - CCNR	28
4	MAMÍFEROS MARINHOS	29
4.1	A Ordem dos Cetáceos	29
4.2	Subordem dos Mysticetos	29
4.2.1	Família <i>Balaenidae</i>	30
4.2.2	Família <i>Neobalaenidae</i>	30
4.2.3	Família <i>Balaenopteridae</i>	31
4.2.4	Família <i>Eschrichtiidae</i>	33
4.3	Possíveis Efeitos da Poluição Sonora nos Cetáceos	34
4.3.1	Danos Fisiológicos Permanentes e Temporários	34
4.4	Vocalização dos Mysticetos	35
5	MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL	37
5.1	Condições de Contorno Adotadas	37
5.2	Fontes Sonoras Utilizadas no Modelo	38
5.3	Etapas de Solução	43
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
6.1	Simulações para Frequências com Banda de Oitava	45
6.1.1	Simulação 1: Classe de Navios <i>Products Tanker</i> e Vocalização de Todas as Baleias	45
6.1.2	Simulação 2: Todas de Classe de Navios e com Vocalização da Baleia-jubarte	48
6.2	Simulações da Propagação Acústica das Fontes de Todas as Classes de Navios com as Frequências de Vocalização dos Mysticetos	51
6.2.1	Simulação da Propagação Acústica das Fontes de todas as Classe de Navios e Frequências dos Mysticetos	52
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
8	BIBLIOGRAFIA	56

1 INTRODUÇÃO

Os ruídos subaquáticos, em especial os gerados pelas atividades antropogênicas (produzidas pelo homem) tendo como fonte navios e embarcações, têm chamado muito a atenção no meio científico. Os ruídos causados por essas fontes vem causando uma crescente preocupação com seus potenciais impactos no meio ambiente e no ecossistema marinho. Desta forma, em locais com intensa atividade humana, estes são considerados especialmente perigosos para os mamíferos marinhos (Richardson, 1995; Santos, 2010).

Atualmente, observa-se a crescente demanda das atividades econômica nos oceanos, e a necessidade de realizar trabalhos de pesquisas e mapeamento geográfico, transporte de passageiros, escoamento de óleo e gás entre outras atividades relacionadas. Nota-se o aumento significativo do tráfego de navios e embarcações, principalmente em regiões de descoberta de poços de petróleo, onde antes não havia a presença massivas de máquinas e demais atividades antropogênicas (Jesus *et al.*, 2010).

A busca de melhores formas de compreensão da propagação do som nos oceanos, em especial dos ruídos causados pelas ações antropogênicas, vem ganhando destaque sobretudo em abordagens voltadas ao controle da poluição sonora. Uma estratégia voltada a preservação da paisagem acústica, se torna muito importante no ponto de vista ecológico uma vez que, os ruídos podem afetar de forma significativa a vida marinha nas proximidades das fontes (Jesus *et al.*, 2010). Sabe-se que a medição do nível de ruído nos oceanos é uma atividade que demanda muitos recursos financeiros e que muitas vezes não estão disponíveis. Uma forma estratégica de minimizar o custo dos impactos da poluição sonora é através da modelagem matemática e computacional (Jensen, 2011). Através das ferramentas de modelagem é possível simular a propagação sonora, e assim compreender melhor o fenômeno de propagação, ajudando no controle da poluição sonora submarina e conseqüentemente preservando o bem estar dos animais marinhos que dependem do som como meio de sobrevivência.

1.1 Modelagem Matemática

A modelagem matemática é um conceito que vem crescendo em diversos ramos da ciência e tecnologia. A partir de sua ampla gama de possibilidades e aplicações, a modelagem matemática torna-se uma ferramenta adequada para a simulação de problemas reais com finalidade de prever, estudar e compreender o comportamento desses sistemas. Apesar de não existir uma única forma de descrever todos os problemas, estes podem ser representados por conjuntos de símbolos que se relacionam por uma linguagem matemática que tem como principal finalidade representar o fenômeno estudado (Barbosa, 2004). O modelo pode ser considerado uma síntese de reflexão de forma que, represente matematicamente, fenômenos ocorridos na natureza ou em uma aplicação particular da ciência e tecnologia. Tais fenômenos são tratados e analisados de modo que se aproximem o máximo possível da situação real (Bassanezi, 2012). O processo de modelagem matemática, pode ser descrito pelas seguintes etapas segundo Bassanezi (Bassanezi, 2012):

Experimentação: Nesta fase são obtidas informações através de dados experimentais ou empíricos. É uma etapa fundamental, principalmente para a compreensão do problema estudado, ajudando na estruturação matemática e nos possíveis ajustes do modelo;

Abstração: Nesta etapa são formuladas as hipóteses do modelo, ou seja, o processo de obtenção das variáveis que compõem o estudo;

Formulação do Modelo: Etapa em que, a partir do contexto da aplicação, equaciona-se o modelo em uma linguagem matemática adequada e que esteja de acordo com a natureza do problema;

Resolução: Etapa onde são aplicados os diversos métodos de resolução que serão utilizados para solucionar as equações do modelo;

Modificação: Etapa de revisão do modelo, ajustando sua formulação ou parâmetros de entrada caso os resultados do modelo não atinjam o grau de aproximação estipulado para o problema;

Aplicação: Das diversas aplicações de modelagem matemática, uma delas é realizar previsões de uma forma relativamente precisa, afim de tomar decisões sejam elas medidas políticas, sociais ou científicas e ainda, obter melhor explicação e entendimento de diversos fenômenos naturais capazes de influenciar o mundo real através de aplicações e técnicas matemáticas.

Desta forma, aplicando as técnicas relativas ao processo de modelagem matemática e com a implementação de um método numérico adequado ao problema, é possível solucionar fenômenos reais que são descritos por equações diferenciais parciais como a equação da onda, por exemplo. As técnicas de modelagem matemática são de grande utilidade para diversos estudos, em particular o da propagação da onda acústica. Através de implementação computacional, essas técnicas viabilizam simulações do fenômeno de propagação da onda acústica em ambientes variados para a avaliação e aplicação de seus resultados (Burden, 2007).

A medição direta de ruído submarino envolve um custo elevado além de uma logística muito grande para abrangência de regiões extensas. Outras dificuldades encontram-se na padronização de instrumentação de medição, necessidades para uma boa cobertura espacial e temporal, de forma a obter um panorama acústico de abrangência de áreas de âmbito regional. Essas atividades podem levar diversos meses ou anos de observação e medição. A modelagem acústica vem sendo utilizada como forma de prever panoramas acústicos de modo sistemático a custos significativamente menores. Os modelos têm a vantagem de permitir extrapolar eventuais medidas pontuais a zonas no espaço e no tempo, de outra maneira inacessíveis com boa eficácia na obtenção dos resultados.

1.1.1 Modelagem com Equações Diferenciais

Dentro do campo que se pode compreender como modelagem matemática, as equações diferenciais desempenham um papel muito importante. De uma forma geral, devido às propriedades das equações diferenciais, muitos fenômenos naturais podem ser representados por equações a fim de obter uma melhor compreensão de suas características e aspectos. Alguns modelos clássicos como o modelo de crescimento populacional proposto por *Malthus* e *Verhulst* no século XVII e modelos de interações ecológicas, como o modelo presa-predador apresentado por *Lotka* e *Volterra* na década de 1920 (Tavoni, 2013), são exemplos de modelos com aplicações em sistemas biológicos, e que são descritos por equações diferenciais (Azevedo, 2008).

As equações diferenciais estão presentes em diversos modelos para descrever outros sistemas, como por exemplo o modelo do decaimento radioativo, que descreve o comportamento da perda de radioatividade de uma determinada substância radioativa em relação ao tempo. Outros modelos como: o resfriamento/aquecimento de Newton, reações químicas, misturas, circuitos em série, entre outros, são exemplos de problemas que podem ser descritos e modelados por essas equações (Denis, 2011).

Um tipo de equação diferencial muito conhecida e amplamente aplicada para descrever diversos modelos matemáticos, em especial os que apresentam variações no tempo e no espaço, são as Equações Diferenciais Parciais (EDPs). As EDPs são equações que envolvem duas ou mais funções incógnitas de várias variáveis independentes e/ou dependentes e suas derivadas parciais. O uso de EDPs é comum na modelagem de fenômenos, como por exemplo: na eletrostática, na eletrodinâmica, no eletromagnetismo, na dinâmica dos fluidos, na difusão do calor, na propagação de ondas, entre outros (Iório & Magalhães, 1988). No caso particular da modelagem cujo evento estudado é de origem oscilatória, a equação da onda se faz indispensável para a compreensão e solução desse tipo de fenômeno. Com o passar do tempo e o aumento da necessidade de aplicações de modelos matemáticos, as EDPs desempenharam um papel significativo na solução de diversos problemas ampliando seus campos de aplicações.

1.1.2 Breve Histórico do Estudo da Equação da Onda

Uma das EDPs utilizadas para modelar fenômenos físicos, principalmente em estudos de fenômenos de caráter oscilatório, é a equação da onda. A equação da onda é uma EDP linear de segunda ordem que surgiu em meados do século XVIII e foi inicialmente formulada pelo filósofo, matemático e físico francês Jean le Rond d'Alembert ao estudar o problema de uma corda vibrante (Stewart, 2013). Posteriormente, a equação da onda também foi estudada pelo matemático e físico suíço Leonhard Euler, seguido por Daniel Bernoulli e Joseph-Louis Lagrange (Stewart, 2013).

A compreensão dos fenômenos que podem ser representados por essa equação, vem desempenhando um papel importante no desenvolvimento da sociedade ao longo da história. No último século, ocorreram eventos de escala mundial que estimularam os estudos para uma melhor compreensão da propagação acústica, muito utilizados na Primeira e Segunda Guerras mundiais. Essa evolução surgiu da necessidade de uma melhor compreensão das propriedades da propagação do som com finalidade de desenvolver dispositivos de navegação de navios e submarinos conhecidos como o SONAR ¹. O SONAR foi um dispositivo amplamente utilizado para o posicionamento de navios e submarinos de guerra, além de outras aplicações atuais como a pesca, por exemplo.

Outros dispositivos também foram desenvolvidos nesse mesmo período a partir das propriedades da propagação das ondas quando atravessam diferentes meios. Dentro destes novos dispositivos destacam-se os radares e rádios comunicadores, amplamente utilizados para localização e comunicação nos dois períodos de guerra (Bjorno, 2003). A Figura 1.1 ilustra o funcionamento de um dispositivo SONAR utilizado por um submarino e por um navio. Na Figura 1.1 observa-se que esse dispositivo está emitindo ondas sonoras sob a água com a finalidade de detectar e localizar a posição de objetos submersos.

¹ *Sound Navigation and Ranging* (Urlick, 1983).

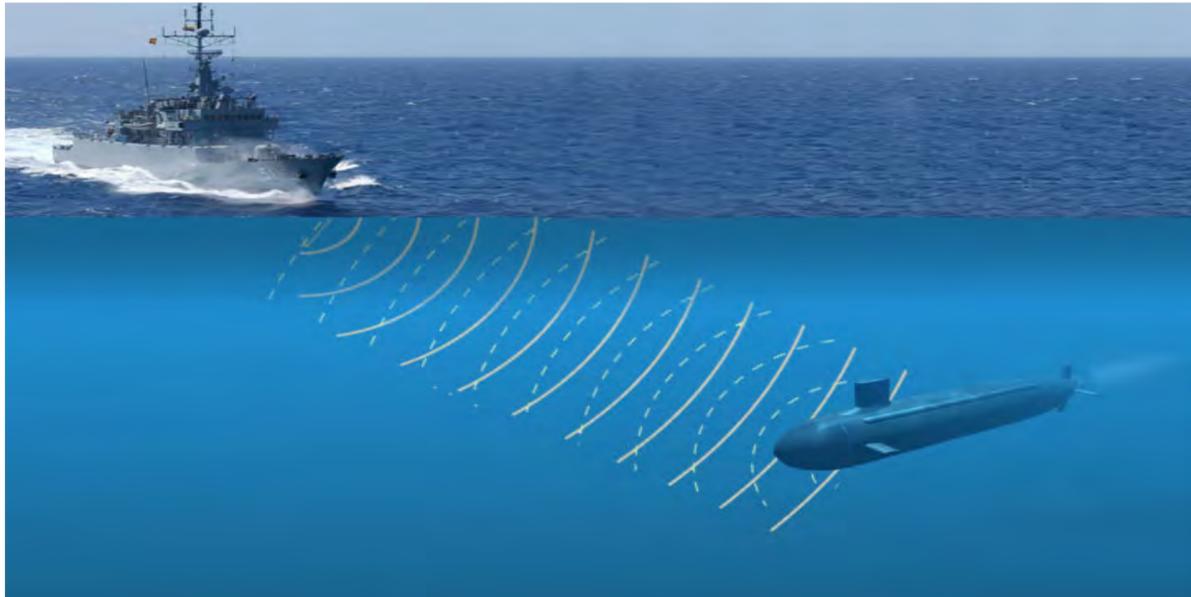


Figura 1.1 – Exemplo da aplicação de um dispositivo SONAR.

Fonte: <https://www.naval.com.br>

No período compreendido como Guerra Fria² ampliou-se ainda mais os estudos baseados na propagação acústica a partir da equação da onda. Nesse período ocorreu o desenvolvimento de pesquisas com a finalidade de levar o homem ao espaço, e como consequência disso, houve uma grande ascensão da tecnologia de processamento computacional. Desta forma, ampliou-se as possibilidades de aprofundar o estudo da propagação acústica, devido à possibilidade da utilização de ferramentas computacionais em diversos ramos de pesquisas, tendo um impacto positivo no desenvolvimento e evolução de muitos estudos envolvendo EDPs.

Já no ano de 1969, encontra-se o trabalho desenvolvido Mitchel *et al.* que já utilizava um método de resolução com auxílio de tecnologia computacional (Mitchell, 1969). O método utilizado no trabalho foi o Método de Diferenças Finitas (MDF). Este método até hoje é amplamente utilizado na solução de problemas modelados com EDPs, em particular a equação da onda, e que também será utilizado neste trabalho. Logo em seguida, no ano de 1974, o trabalho de Alford *et al.*, aprofunda os estudos de resolução da equação da onda utilizando o MDF (Alford *et al.*, 1974). O trabalho consiste na resolução de um problema sismológico onde é estudado um método de comparação de sismogramas calculados para receptores acústicos localizados nas proximidades de um grau de cunha marítima incorporado em um meio bidimensional.

Desde então, diversos avanços tecnológicos ocorreram baseados em fenômenos modelados pela equação da onda em um meio bidimensional. Já em 2004, o trabalho de Silva Neto (Neto, 2004) relacionado a um problema sísmico, solucionou a equação da onda acústica aplicando tanto o MDF quanto o Método dos Elementos Finitos, em modelos para meios homogêneos e heterogêneos. Os avanços computacionais permitiram ainda mais o desenvolvimento e utilização de diversos modelos de propagação da onda acústica, estimulando o desenvolvimento científico dando origem a uma área conhecida como acústica submarina (Jensen, 2011). Desta forma, através da acústica submarina, com o auxílio de um método de solução, é possível obter uma solução bidimensional da equação da onda e com isso avaliar a abrangência e os possíveis impactos da poluição sonora no meio ambiente.

² Período compreendido entre 1945 a 1991 (Dias, 2008).

1.1.3 Propagação Acústica Submarina

Existem variadas aplicações cuja modelagem se baseia na equação da onda. As características oscilatórias que apresentam suas soluções as tornam apropriadas para estudos de problemas de caráter vibratório, como também no campo da propagação acústica. Um ramo em particular da propagação acústica, é a propagação acústica submarina. Como o próprio nome já diz, a propagação acústica submarina estuda a propagação sonora em ambientes subaquáticos considerando a água e suas propriedades como meio de propagação. A propagação acústica submarina foi um dos campos de pesquisas que mais cresceu no último século e seu desenvolvimento se deu em torno de uma melhor compreensão da equação da onda (Jesus *et al.*, 2010).

A indústria petrolífera foi uma das que mais contribuiu para os avanços dos estudos devido seu interesse particular de exploração e produção de óleo e gás (Bjorno, 2003). A partir de então, desenvolveu-se inúmeros estudos para melhor compreender as propriedades e as características da propagação acústica em meio aquoso visto que muitas reservas de óleo e gás são encontradas no fundo dos oceanos. Dessa forma, o campo da acústica submarina tomou um destaque especial e é responsável pelo desenvolvimento de diversas técnicas não só do ponto de vista da propagação em si, mas levando-se em conta o ecossistema marinho e os organismos que compõem os mares e oceanos (Medwin, 1997).

O fenômeno de propagação acústica tornou-se importante nas aplicações da indústria de óleo e gás, nas pesquisas para encontrar reservatórios de óleo no fundo dos oceanos. A sísmica é uma das técnicas conhecidas que se baseia na propagação acústica através da equação da onda. Tem como principal finalidade encontrar e estimar propriedades, volumes e dimensões dos reservatórios de óleo através da reflexão das ondas sísmicas (Yilmaz, 2001). A Figura 1.2 ilustra um processo de mapeamento sísmico através da reflexão da onda. Esse método baseia-se em gerar ondas acústicas através de fontes sísmicas artificiais que são emitidas para o fundo do mar. Ao serem refletidas essas ondas são captadas por um conjunto de hidrofones e posteriormente processadas e analisadas para gerar imagens em forma de sismograma. Essa técnica é conhecida como sísmica de reflexão (Neto, 2000).

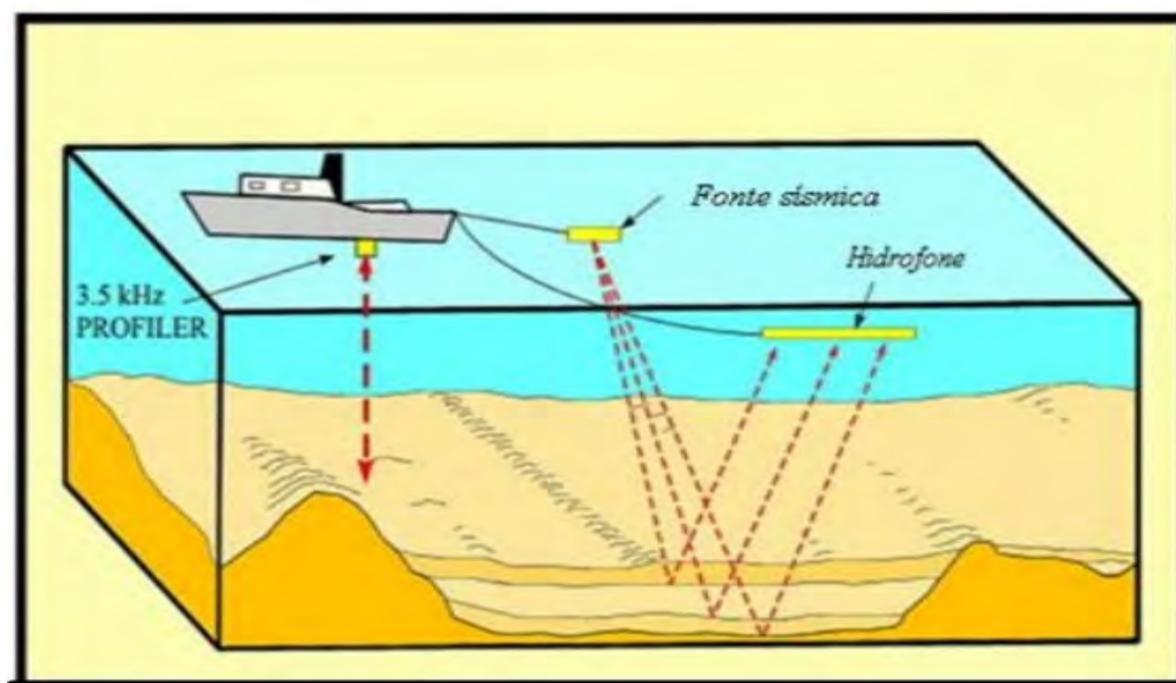


Figura 1.2 – Exemplo de uma aplicação sísmica.

Fonte: <http://www.iag.usp.br/geofisica>.

1.1.4 Ruídos Submarinos

Os ruídos no fundo dos mares e oceanos podem ser entendidos como um conjunto de fontes naturais ou artificiais, podendo estar perto ou distante do local da medição. Os ruídos provenientes das fontes naturais, consistem basicamente em ruídos gerados pelos processos físicos ou biológicos ocorrido na região. Alguns desses processos físicos podem ser: atividades das placas tectônicas, sísmica local, atividades na crosta terrestre como vulcões e terremotos, vento e ondas. E ainda fontes de ruído biológico, que são as vocalizações de mamíferos marinhos e peixes. Já os ruídos gerados pelas ações antropogênicas são os ruídos oriundos dos processos de extração de óleo e gás, por exemplo. Porém, as fontes desses ruídos são variadas como: estudos sísmicos durante a fase de exploração, pela estrutura de condução e colocação de tubos para operações de perfuração durante a fase de instalação, pelas plataformas fixas e móveis na fase de produção e pela desativação de poços, como ocorre na fase de fechamento. Essas fontes de ruídos podem ser classificadas como fontes contínuas e permanentes ou impulsivas e transitórias (Redondo . & Mateo, 2017). A Tabela 1.1 adaptada de Richardson *et al.* (Richardson *et al.*, 1998) apresenta outros exemplos de atividades antropogênicas que podem ser responsáveis pelos ruídos nos oceanos, como a movimentação de navios e embarcações.

Tabela 1.1 – Tipos de ruídos gerados pelo homem nos oceanos.

Transportes	Pesquisas em Geofísica
Aeronaves (Aviões e Helicópteros)	Canhão de Ar
Embarcações (Navios e Barcos)	Camisas Explosivas e Canhão de Gás
Quebra Gelo	Vibradores Sísmicos
Aerodeslizadores e Veículos sobre o Gelo	Outras Técnicas
Dragagem e Construção	Sonares
Dragagem	Explosões
Tunelagem	
Outras Operações de Construção	
Indústria de Óleo e Gás	Estudos Oceanográficos
Perfuração da Ilha e Caixotes	Sismologia
Perfuração de Plataformas Baseadas	Propagação Acústica
Navios de Perfuração	Tomografia Acústica
Produção <i>offshore</i> de Óleo e Gás	Termometria Acústica

Os navios possuem a particularidade de possuir uma característica vibratória, que tem origem a partir do funcionamento de suas hélices e demais equipamentos que estão a bordo. Essas fontes de ruídos são classificadas como fontes contínuas e permanentes (Redondo . & Mateo, 2017). Fontes cujos ruídos são provenientes de máquinas, como o movimento das hélices causando cavitação ou com a excitação hidrodinâmica de estruturas que possuem fluxo turbulento como duto de óleo, por exemplo. Já as fontes classificadas como impulsivas e transitórias, são aquelas que geram uma rápida expansão e colapso de bolhas de ar, como o chamado canhão de ar, muito utilizado nos estudos sísmicos, ou ainda, fontes com aplicação de pressão instantânea para fixar estruturas sólidas no leito do mar na construção de plataformas fixas (Richardson *et al.*, 1998).

Tendo em vista a crescente demanda das atividades econômicas nos oceanos, sobre-

tudo a de exploração de óleo e gás, e com o aumento do tráfego de navios e embarcações nos oceanos, é possível notar que o nível da poluição de ruídos nos oceanos, emitido por fontes antropogênicas, está aumentando (Jesus *et al.*, 2010).

Os ruídos subaquáticos, gerados por essas atividades, vêm causando uma crescente preocupação com os potenciais impactos e danos que podem causar no ecossistemas e principalmente na vida dos mamíferos marinhos que habitam regiões de intensas atividades humanas. Diversas espécies de mamíferos marinhos são muito ligadas à paisagem acústica de seu habitat, visto que são extremamente dependentes do som em suas atividades cotidianas. Por esse motivo, é de suma importância verificar o potencial de poluição acústica que essas fontes podem gerar nos mares e oceanos, de forma a entender o quanto essas atividades podem afetar a vida desses animais (Erbe, 2011).

1.1.5 A Poluição Sonora e os Mamíferos Marinhos

O termo mamífero marinho é utilizado pela maioria dos pesquisadores para referenciar diferentes grupos e espécies de mamíferos aquáticos. São classificados e definidos em cinco grupos de acordo com seus membros e espécies: cetáceos (baleias, golfinhos e botos), sirênios (peixe-boi e o dugongo), pinípedes (leões marinhos, morsas e focas), urso polar e outras espécies de outras famílias (Jefferson *et al.*, 1993). Todos os mamíferos marinhos são capazes de emitir algum tipo de som que são característicos de sua ordem, espécie e de sua família. O som que é produzido por esses animais tem diversas finalidades que abrangem desde atividades de caça, comunicação, fuga de predadores e até mesmo para o acasalamento (Erbe, 2011). Os mamíferos marinhos da ordem cetáceos, de uma forma particular, utilizam muito a emissão e percepção sonora em atividades como: navegação, busca e captura de alimentos, localização de outros de sua espécie, defesa contra predadores, entre outras atividades de seu cotidiano. Tendo em vista sua necessidade e extrema dependência sonora, não há dúvidas de que um alto nível de poluição sonora, causada por ações humanas, pode ser prejudicial para esses animais (Rocha-Campos & Câmara, 2011).

É fundamental o estudo da poluição de ruídos submarinos, já que este é um fator muito influente na vida dos cetáceos que dependem do som como meio de vida. Um alto nível de ruídos podem provocar perturbações até mesmo à longas distâncias, causando perdas auditivas permanentes e danos físicos nesses animais (Weilgart, 2007). Além disso, quando esses animais transitam em locais com elevados níveis de ruídos, são expostos a uma espécie de *stress* causando uma mudança em seu comportamento, e aumentando a probabilidade da ocorrência de acidentes como o efeitos *bycatch*, conhecido também como captura acidental, que consiste na captura desses animais em ferramentas e redes de pesca, quando na verdade não são alvo das mesmas. Outras consequências desastrosas, como a colisão com navios e encalhes massivos, podem ser resultado de danos causado pela elevada poluição sonora (Leatherwood & Reeves, 1983).

Estudos sugerem fortemente que os mamíferos marinhos, em particular os cetáceos, são sensíveis aos impactos de fontes sonoras. Foi observado que fontes que emitem ruídos com frequências de 500 *Hz* ou mais são potenciais influenciadoras do comportamento desses animais, embora é conhecido que os misticetos (subordem dos cetáceos) sejam mais vulneráveis à poluição de ruídos (Engel *et al.*, 2004). Devido as vastas categorias e espécies de mamíferos marinhos, e a alta vulnerabilidade e sensibilidade dos misticetos quanto aos ruídos gerados por fontes antropogênicas, este trabalho irá abordar apenas os animais dessa espécie, e analisar os possíveis impactos da poluição sonora sobre esses

mamíferos.

Assim, este trabalho tem como objetivo principal aplicar técnicas de modelagem matemática e computacional para simular a propagação de ruídos considerando um ambiente aquático e, através de uma modelagem baseada na equação da onda, analisar os possíveis impactos na vida dos misticetos (baleias). Podem ser considerados como objetivos específicos:

- Aplicar um modelo matemático e computacional para o problema de ruídos com as características de um ambiente submarino;
- Solucionar a equação da onda através do MDF;
- Avaliar a influência da intensidade do ruído gerado por uma ou mais fontes sonoras, e assim, verificar os possíveis impactos na vida dos mamíferos marinhos da ordem dos cetáceos em particular da subordem dos misticetos.

Com o intuito de preservação e controle de ruídos ambientais, o artigo de número 225 da Constituição Federal de 1988, destacando-se particularmente os incisos I e VII determina que necessário (Fernandes, 1988):

I - preservar e restaurar os processos ecológicos essenciais e prover o manejo ecológico das espécies e ecossistemas;

VII - proteger a fauna e a flora, vedadas, na forma da lei, as práticas que coloquem em risco sua função ecológica, provoquem a extinção de espécies ou submetam os animais a crueldade.

Desta forma, é necessário criar-se um mecanismo de controle da poluição sonora, para que esta não venha afetar de forma negativa o ecossistema nos arredores onde são exercidas atividades humanas que geram ruídos. A ação do homem no meio ambiente, em particular no meio marítimo, deve ser feita de forma consciente e que cause o menor impacto possível na vida selvagem local. Levando-se em conta que as atividades antropogênicas possam gerar poluição sonora nos mares e oceanos de forma significativa, com auxílio da modelagem matemática, este trabalho propõe uma forma de avaliar os níveis de ruídos emitidos por essas fontes em ambientes submarinos, e assim avaliar os possíveis impactos dessas atividades sobre os animais marinhos próximos às regiões de atividade humana.

Um dos resultados propostos neste trabalho, é a simulação da propagação acústica considerando um ambiente submarino e o alcance dos ruídos oriundos de uma ou mais fontes sonoras. Com isso, é possível realizar um estudo prévio para analisar o impacto desses ruídos no ambiente próximo ao local onde essas atividades são executadas. No geral, estudos relacionados à poluição sonora geradas pelos navios em um meio subaquático e o impacto dessa poluição nos animais marinhos, são realizados por campos de estudos diferentes. Este trabalho propõe uma união dessas linhas de pesquisas uma vez que, através das técnicas de modelagem matemática e computacional, é possível simular a propagação acústica submarina de uma ou mais fontes subaquáticas, e posteriormente correlacioná-las às características acústica da audição e vocalização dos animais marinhos que venham a ser atingidos pela poluição causada pelas fontes simuladas.

Este trabalho está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução com um breve contexto histórico sobre a aplicação da equação da onda assim como a motivação e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica com os principais conceitos matemáticos e da acústica submarina aplicados a este trabalho.

No terceiro capítulo, é apresentada a teoria da equação da onda, assim como suas possíveis soluções.

Já no quarto capítulo são apresentados os animais marinhos e sua espécies. Ainda neste capítulo são apresentadas as características acústicas dos animais e ainda os possíveis danos caso haja constante exposição a elevados níveis de ruídos.

No quinto capítulo é apresentada a estrutura do modelo matemático proposto assim como uma breve discussão sobre o MDF utilizado para a resolução da equação da onda. Apresenta também as características acústicas das fontes utilizadas nas simulações assim como as condições de contorno e os parâmetros considerados no modelo.

No sexto capítulo são apresentados os resultados das simulações com gráficos que representam o nível de pressão sonora na região considerada assim como o espectro dos sinais das fontes sonoras. Neste mesmo capítulo é possível verificar o quanto os sinais podem afetar a audição e a vocalização dos animais marinhos que são considerados nestes trabalhos.

Por fim, no último capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como as sugestões para os trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Ondas

A onda, por definição, é um movimento provocado por uma perturbação que se propaga através do espaço ou de um meio material. As ondas podem transportar massa através do meio em que se propagam, mas não são capazes de transferir massa. De um modo geral, as ondas são classificadas de acordo com sua natureza podendo ser de duas naturezas distintas: ondas mecânicas ou ondas eletromagnéticas (Graff, 1991).

As ondas mecânicas são ondas caracterizadas pela necessidade de um meio material para sua propagação. Em suas perturbações, são envolvidos o transporte de energia cinética e de energia potencial, o que as fazem depender diretamente da elasticidade e de outras propriedades do meio onde se propagam. Para se propagar dependem necessariamente de um meio físico e não são capazes de propagar-se no vácuo. Alguns exemplos de ondas mecânicas são encontrados em: cordas, molas, som, ondas sísmicas, ondas marítimas, terremotos, entre outros (Piubelli *et al.*, 2010).

Já as ondas eletromagnéticas se caracterizam por não necessitarem de um meio físico para se propagar podendo também se propagar no vácuo. São pulsos energéticos resultantes das combinações de campos elétricos e campos magnéticos. Alguns exemplos de ondas eletromagnéticas são: luz, micro-ondas, ondas de rádio, ondas de radar, radiação infravermelha, entre outras (Hayt & Buck, 2013). As ondas também são classificadas quanto a direção de propagação e a direção das vibrações. Para a direção de propagação podem ser do tipo (Piubelli *et al.*, 2010):

- Unidimensionais: são ondas que se propagam em apenas uma direção. Uma perturbação causada em uma corda ou em uma mola é um exemplo de propagação em uma única direção;
- Bidimensionais: são ondas capazes de se propagar em uma superfície nas duas direções. Uma perturbação causada por uma pedra jogada em um lago é um exemplo de propagação de ondas bidimensionais;
- Tridimensionais: são ondas capazes de se propagar pelo espaço tridimensional. A propagação da luz é um exemplo desse tipo de onda.

Quanto à direção da vibração, as ondas são classificadas como ondas longitudinais ou ondas transversais:

- Ondas Longitudinais: são ondas onde as vibrações de suas partículas são paralelas à direção da propagação da onda. O movimento de uma mola perturbada, como mostra a Figura 2.1 é um exemplo desse tipo de propagação. Em uma onda longitudinal o movimento de partículas individuais é paralelo à direção de propagação da onda;
- Ondas Transversais: são ondas onde a vibração de suas partículas são perpendiculares à direção da propagação da onda. O movimento de uma corda fixa em uma de suas extremidades mostra a direção desse tipo de propagação como pode ser visto na Figura 2.2. Em uma onda longitudinal o movimento de partículas individuais é paralelo à direção de propagação da onda.

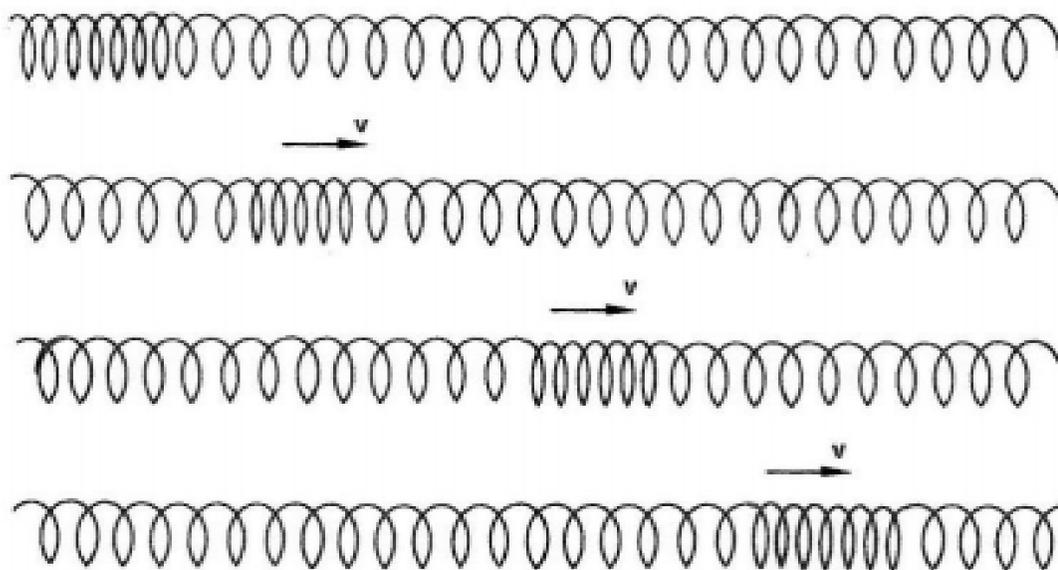


Figura 2.1 – Movimento de uma onda longitudinal.
 Fonte: <http://www.iag.usp.br/geofisica>.

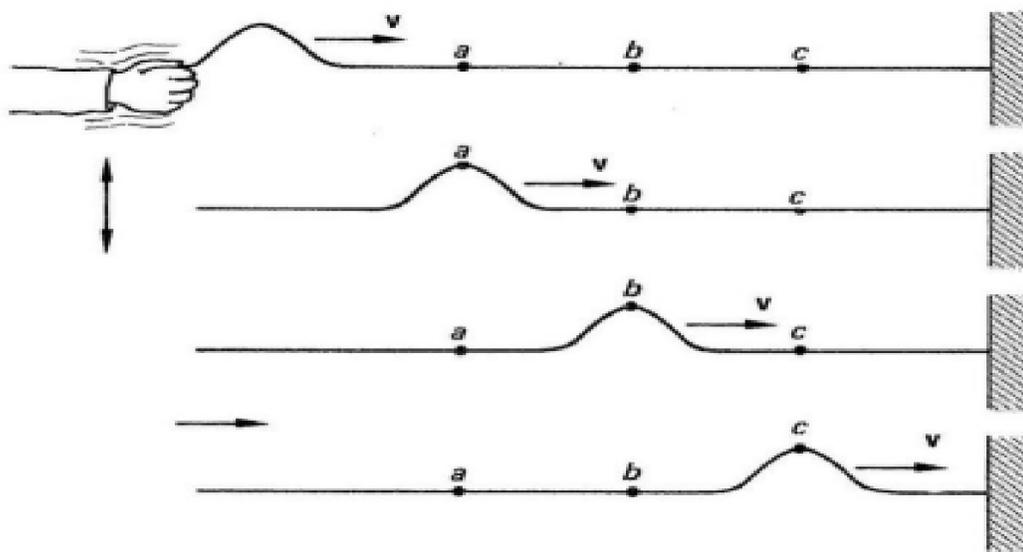


Figura 2.2 – Movimento de uma onda transversal.
 Fonte: <http://www.iag.usp.br/geofisica>.

2.2 Unidades de Medidas Acústicas

2.3 Relações Acústicas

2.3.1 Propagação Sonora

O som é a propagação, na forma de ondas longitudinais, de qualquer perturbação mecânica em um meio físico, ou seja, na mesma direção da propagação da energia e deslocamento. Neste processo, ocorrem oscilações na pressão de um determinado meio elástico que é gerado pelo movimento vibratório de suas moléculas, ocasionando uma variação de pressão no meio, e conseqüentemente, o som (Coates, 1991). A Figura 2.3 ilustra a propagação sonora, onde os pontos representam as partículas do meio elástico, e

a seta para a direita indica o momento da compressão C e para esquerda o momento da refração R.

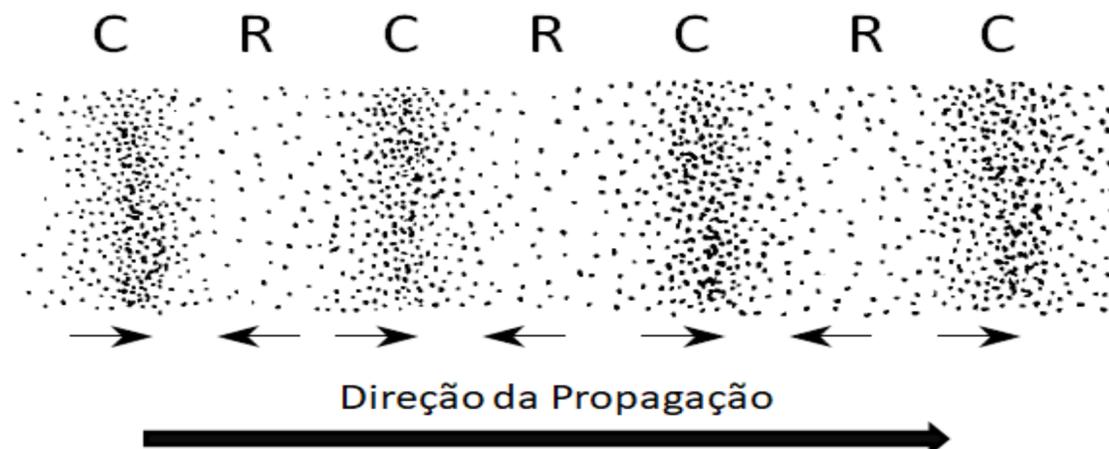


Figura 2.3 – Esquema da propagação sonora com a compressão e refração das moléculas em um meio elástico (Coates, 1991).

Vale ressaltar que a propagação sonora é um processo que envolve transporte de energia mas onde não há transporte de matéria e, como a propagação sonora se dá por meio de ondas mecânicas, o som é capaz de se propagar apenas através de matéria sólida, líquida ou gasosa (Kinsler *et al.*, 1999).

2.3.2 Período, Frequência Angular e Frequência da Onda

Define-se como o período T o tempo que uma onda leva para realizar um ciclo completo de oscilação, dado normalmente em segundos, e representado por (Halliday et al., 2009):

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.1)$$

O parâmetro ω é chamado de frequência angular da onda e sua unidade no SI é dada por radianos por segundos. Reescrevendo a equação (2.1) isolando-se ω , tem-se a seguinte relação:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.2)$$

A partir da equação (2.2) pode-se então determinar a frequência cíclica de uma onda. A frequência cíclica f de uma onda é uma grandeza física dada pelo número de oscilações em um determinado período de tempo t . No SI sua unidade é dada em *Hertz (Hz)*, equivalente à frequência de um fenômeno periódico cujo período tem a duração de um segundo.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.3)$$

2.3.3 Comprimento de Onda e Amplitude

O comprimento de uma onda, representado pela letra grega λ , é a distância (paralela à direção de propagação) entre valores repetidos e sucessivos para um padrão dado de um pico a outro pico. Geralmente é expressado no SI em metros.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.4)$$

onde v é a velocidade de fase de propagação da onda.

A amplitude de uma onda é uma medida escalar que representa a magnitude de oscilação temporal de uma onda, podendo obter valores negativos, positivos ou nulos (Au & Hastings, 2008). A Figura 2.4 ilustra o comprimento e a amplitude de uma onda.

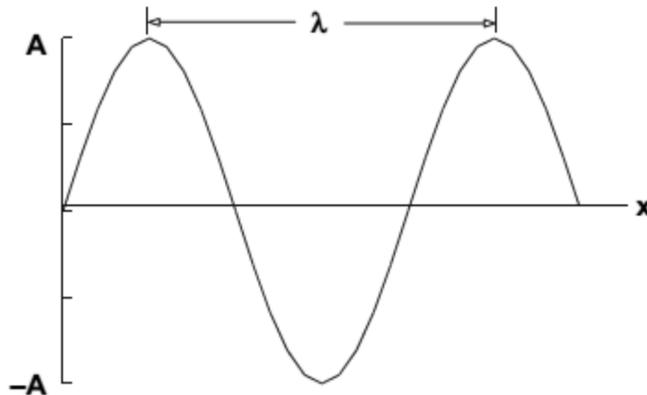


Figura 2.4 – Representação do comprimento e da amplitude de uma onda (Au & Hastings, 2008).

2.3.4 Representação Matemática de um Sinal Acústico

Um sinal acústico no domínio do tempo pode ser representado matematicamente por uma função senoidal (ou cossenoidal) $f(t)$ (Sodré, 2003):

$$f(t) = B + A \cos(\omega t + \theta) \quad (2.5)$$

onde B é a posição do sinal em relação ao eixo das abscissas, A a amplitude do sinal, ω é a frequência angular em rad/s , t é o tempo dado em segundos e θ é o ângulo de fase do sinal. A equação (2.5) caracteriza um sinal acústico contínuo sendo ideal para representar matematicamente uma fonte acústica com tal característica.

2.3.5 Velocidade de Propagação do Som no Mar

A velocidade do som em acústica submarina, se encontra na faixa de 1450 e 1540 m/s . Geralmente, a velocidade do som é representada pela letra c , e pode ser estimada por fórmulas empíricas que dependem diretamente da temperatura T' do mar (dada em $^{\circ}C$), da salinidade $S(g/kg)$ e da pressão, que varia de acordo com a profundidade z , em metros (Redondo & Mateo, 2017). Para o cálculo da velocidade do som no mar pode-se utilizar a expressão (2.6) proposta por Medwin (Medwin, 1975):

$$c = 1449,2 - 4,6 T' - 0,055 T'^2 - 0,00029 T'^3 + (1,34 - 0,010 T')(S - 35,0) + 0,016 z \quad (2.6)$$

A equação (2.6) é válida para as aplicações aqui consideradas dentro dos seguintes limites de temperatura, salinidade e profundidade:

$$0 \leq T' \leq 35 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad 0 \leq S \leq 45 \text{ g/kg}; \quad 0 \leq z \leq 1000 \text{ m}$$

2.3.6 Divergência Esférica

Considerando um meio homogêneo onde não há influências de fronteiras (também chamado de meio livre ou meio infinito), e dada uma fonte sonora pontual, a propagação ocorre de maneira uniforme em todas as direções a partir dessa fonte. Neste caso, a velocidade de propagação é constante e perpendicular à fonte (Junio, 2016). Esse fenômeno é conhecido por divergência esférica, conforme mostra a Figura 2.5.

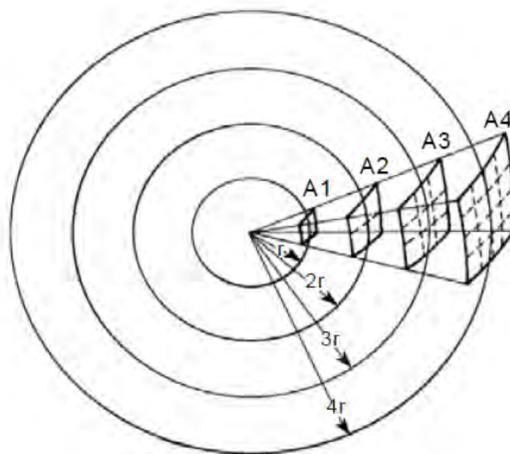


Figura 2.5 – Divergência esférica oriunda de uma fonte pontual em um meio homogêneo de fronteira livre (Xavier, 2005).

A Figura 2.5 mostra a relação entre o fluxo de energia medida que se afasta da fonte. Essa relação é dada pelas áreas A_1 , A_2 , A_3 e A_4 , que aumentam com o quadrado do raio r . Isso significa que a potência por unidade de área, definida pela intensidade sonora, diminui na medida que a onda se afasta de sua fonte com o quadrado do raio do afastamento (Xavier, 2005). Uma outra característica desse fenômeno é que conforme as ondas vão se distanciando da fonte, as frentes tendem a se tornar planas. A Figura 2.6 ilustra esse comportamento.

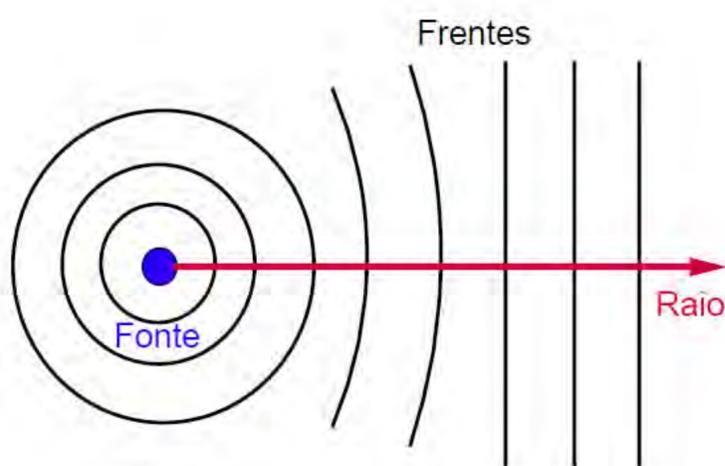


Figura 2.6 – Divergência esférica oriunda de uma fonte pontual- frentes de ondas em longas distâncias (Xavier, 2005).

2.3.7 Perda por Espalhamento Esférico

O espalhamento esférico descreve a perda do nível sonoro na medida em que a onda se afasta da fonte de origem. Essa perda é dada pela distância, em metros, que é definida por um raio r . Quanto maior o valor de r , maior será a perda. Este tipo de espalhamento, considera que a onda se propaga uniformemente em todas as direções a partir de sua fonte. A equação (2.7) representa a perda de transmissão TL , dado um raio r (Au & Hastings, 2008):

$$TL = -10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log(r^2) = 20 \log(r) \quad (2.7)$$

onde I é a intensidade da potência da fonte e I_0 é a intensidade de referência de uma onda de $1W/m^2$ de potência e pressão em dB .

A Tabela 2.1 mostra os valores de intensidade relativa, e a perda de transmissão por espalhamento esférico para alguns valores de r .

Tabela 2.1 – Perda de transmissão por espalhamento esférico (Au & Hastings, 2008).

Raio (m)	Intensidade Relativa I / I_0	TL (dB)
1	1	0
10	1/100	20
100	1 / 10.000	40
1000	1 / 1.000.000	60

As ondas sonoras também sofrem espalhamento de forma aleatória quando incidem em peixes, organismos marinhos, bolhas de ar, entre outros. Esse tipo de espalhamento é chamado de reverberação (Urlick, 1983).

2.4 Métricas em Acústica Submarina

Existem diferentes métricas para representar o nível sonoro na acústica submarina. Estas métricas dependem diretamente do tipo de sinal que está sendo emitido, seja este um sinal de forma impulsiva, contínua ou intermitente. Também é comum encontrar variadas faixas de valores contendo diversas ordens de grandezas nos dados acústicos. Neste caso, é comum utilizar a escala logarítmica para agrupar os valores em uma representação mais compacta. A escala logarítmica mais utilizada nos dados acústicos é a escala logarítmica na base 10, que converte os dados em uma ordem de magnitude para cada fator 10 em uma soma unitária. Desta forma, ela permite uma melhor manipulação e representação dos dados em números mais simples, principalmente para a representação gráfica onde as faixas de pressão podem se estender por mais de 12 ordens de magnitude (Redondo & Mateo, 2017).

2.4.1 Unidade de Medida de Referência

Em acústica submarina são adotadas unidades de medidas tomadas como referência que são base para representar suas medidas de uma forma mais padronizada (Erbe, 2011).

Uma unidade frequentemente utilizada para referenciar a intensidade acústica é o micro Pascal representado por μPa . Com essa unidade de referência é possível expressar valores absolutos de uma magnitude em até 12 faixas de representação em uma escala logarítmica. Desta forma, tem-se que:

$$\log \frac{1 MPa}{1 \mu Pa} = \log(10^{12}) = 12 (re \ 1 \mu Pa) \quad (2.8)$$

onde MPa é a pressão em mega Pascal, μPa pressão em micro Pascal e re (indicando referência) é a sigla para indicar o valor referência adotado.

2.4.2 O Decibel

A notação em decibéis dB , tem sido tradicionalmente usada para descrever a intensidade e pressão das ondas acústicas. O limiar de detecção de um aumento do nível sonoro é aproximadamente um décimo do logaritmo decimal do fator pelo qual a intensidade é multiplicada. A expressão que representa o nível " X Level" em dB é dada pela equação (Erbe, 2011):

$$XL(dB) = 10 \log \frac{X}{X_{re}} \quad (2.9)$$

onde X representa uma determinada medição acústica e X_{re} seu respectivo valor de referência.

2.4.3 Energia Acústica

A energia de uma onda acústica E é obtida através da soma cinética causada pelas vibrações de partículas de um meio elástico. A energia descreve o trabalho realizado por forças de pressão elástica e é proporcional ao quadrado da pressão exercida pela onda (Erbe, 2011).

2.4.4 Nível de Potência Sonora

O nível de potência sonora, ou simplesmente potência, é a quantidade de energia acústica E irradiada dentro de um determinado tempo (Erbe, 2011). É uma medida relativa entre pressões acústicas dada por:

$$P = 10 \log \frac{W}{W_{re}} \quad (2.10)$$

onde W é medido em J/s no SI e $W_{re} = 1W/m^2$.

2.4.5 Nível de Intensidade Acústica

O nível de intensidade IL (*Intensity Level*) do som, é uma medida dada em termos da potência sonora. A potência é definida pelo trabalho em função do tempo e sua unidade no SI é $1Watt = 1J/s$. Em acústica submarina, ao medir a intensidade do som, utiliza-se

o Pascal como unidade de referência de pressão acústica onde $1Pa =$ equivale a $1N/m$. Desta forma, a intensidade sonora é estabelecida em termos da potência aplicada em uma determinada área, da seguinte forma (Au & Hastings, 2008):

$$IL = 10 \log \frac{I}{I_{re}} (dB) \quad (2.11)$$

onde I é a a intensidade da potência da fonte e $I_{re} = 10^{-12} W/m^2$ é a intensidade de referência de uma onda com pressão de μPa em baixo da água tendo como unidade de medida dB . A intensidade da fonte ou SL (*Source Level*), é o parâmetro que determina o quanto de energia acústica é emitida por um dispositivo ou fonte sonora em uma determinada profundidade. A intensidade de uma fonte é medida em escala de dB e está diretamente relacionada ao nível de intensidade que é capaz de produzir.

2.4.6 Campo de Pressão Acústica

Uma forma eficaz de medir um campo de pressão acústica é através da *Root Mean Square* (RMS) muito usada para calcular a intensidade de ruídos de uma fonte contínua e permanente (Au & Hastings, 2008). Um expressão para o campo de pressão p por RMS encontrada na literatura é (Au & Hastings, 2008):

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (2.12)$$

onde $p(t)$ é a função que estima a pressão de um sinal acústico contínuo e permanente.

Desta forma, estima-se a pressão de um sinal acústico pela equação (2.5) sem deslocamentos e mudanças de fase, e definida por uma onda senoidal e contínua a partir de sua amplitude de pico A e da frequência angular $\omega = 2\pi f$ em um tempo t . Aplicando-se a função do sinal $s(t)$ na equação (2.12), a pressão sobre um ciclo será:

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt} = \sqrt{\frac{A^2}{T} \int_0^T \cos^2(2\pi ft) dt} \\ &= \sqrt{\frac{A^2}{T} \int_0^T \frac{1 + \cos^2(4\pi ft)}{2} dt} = \sqrt{\frac{A^2}{T} \left[\frac{T}{2} + \frac{\sin(4\pi ft)}{8\pi f} \right]} \\ &= \sqrt{\frac{A^2}{T} \left(\frac{T}{2} \right)} = \frac{A}{\sqrt{2}} = 0.707A \end{aligned} \quad (2.13)$$

A equação (2.13) representa a relação entre pressão acústica e amplitude do sinal, portanto, o valor *RMS* para uma onda sinusoidal contínua ou um pulso senoidal é simplesmente 0,707 vezes a amplitude do pico (Au & Hastings, 2008).

2.4.7 Nível de Pressão Acústica

Em acústica submarina é muito comum representar o nível de pressão sonora de um meio através do (*Sound Pressure Level*) ou *SPL*, definido por:

$$SPL = 20 \log \frac{p}{p_{re}} (dB) \quad (2.14)$$

onde p é a pressão e p_{re} é a pressão de referência dada em μPa .

2.4.8 Nível de Recepção Acústica

Como visto anteriormente, uma fonte sonora pode ser considerada como qualquer dispositivo ou fenômeno natural capaz de emissão de som ou ruído. Seja uma baleia, um vulcão submarino, um navio ou um canhão de ar. Desde que irradie um sinal com um determinado nível sonoro, pode ser considerada uma fonte que em acústica submarina é chamada de *Source Level* ou *SL*. Devido ao espalhamento, a intensidade do som é reduzida a medida que as ondas vão se afastando das proximidades de sua fonte. O som ao se direcionar da fonte para o receptor, sofre perdas na sua transmissão que são chamadas de *Transmission Loss* ou *TL* (Erbe, 2011). A partir de uma formulação simples é possível encontrar uma expressão para a intensidade do som no momento que este atinge o receptor, (*Recept Level*) ou *RL*, que pode ser então representada por (Urick, 1983):

$$RL = SL - TL \quad (2.15)$$

2.5 Transformação do Sinal Acústico do Domínio do Tempo para o Domínio da Frequência

Quando a amplitude de um sinal é representada em termos do tempo, diz-se que o sinal está no domínio do tempo. Por outro lado, se a amplitude for representada em termos da frequência, diz-se que o sinal está no domínio da frequência e pode ser representada através de um espectro do sinal (Beerends *et al.*, 2003). Com a Transformada de Fourier (*TF*) é possível converter um sinal acústico que está no domínio do tempo para o domínio da frequência sem perda de generalidade. A expressão para a série de Fourier que permite representar uma função periódica e contínua $f(t)$ em uma soma trigonométrica infinita é dada pela equação:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt) \quad (2.16)$$

onde a_k e b_k são denominados coeficientes da série.

Já a TF $F(\omega)$ de um sinal $f(t)$ pode ser obtida através da seguinte expressão (Beerends *et al.*, 2003; Debnath & Bhatta, 2006):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.17)$$

onde $f(t)$ representa o sinal no domínio do tempo, ω é a frequência angular, i é a unidade imaginária, t o tempo e $e^{-i\omega t}$ é a fórmula de Euler definida por (Beerends *et al.*, 2003; Debnath & Bhatta, 2006):

$$e^{-i\omega t} = \cos(\omega t) - i \sin(\omega t) \quad (2.18)$$

Em acústica submarina é muito comum a representação do sinal sonoro no domínio da frequência (Queirós & Ramirez, 2016). A Figura 2.7 ilustra a representação de um sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência, respectivamente.

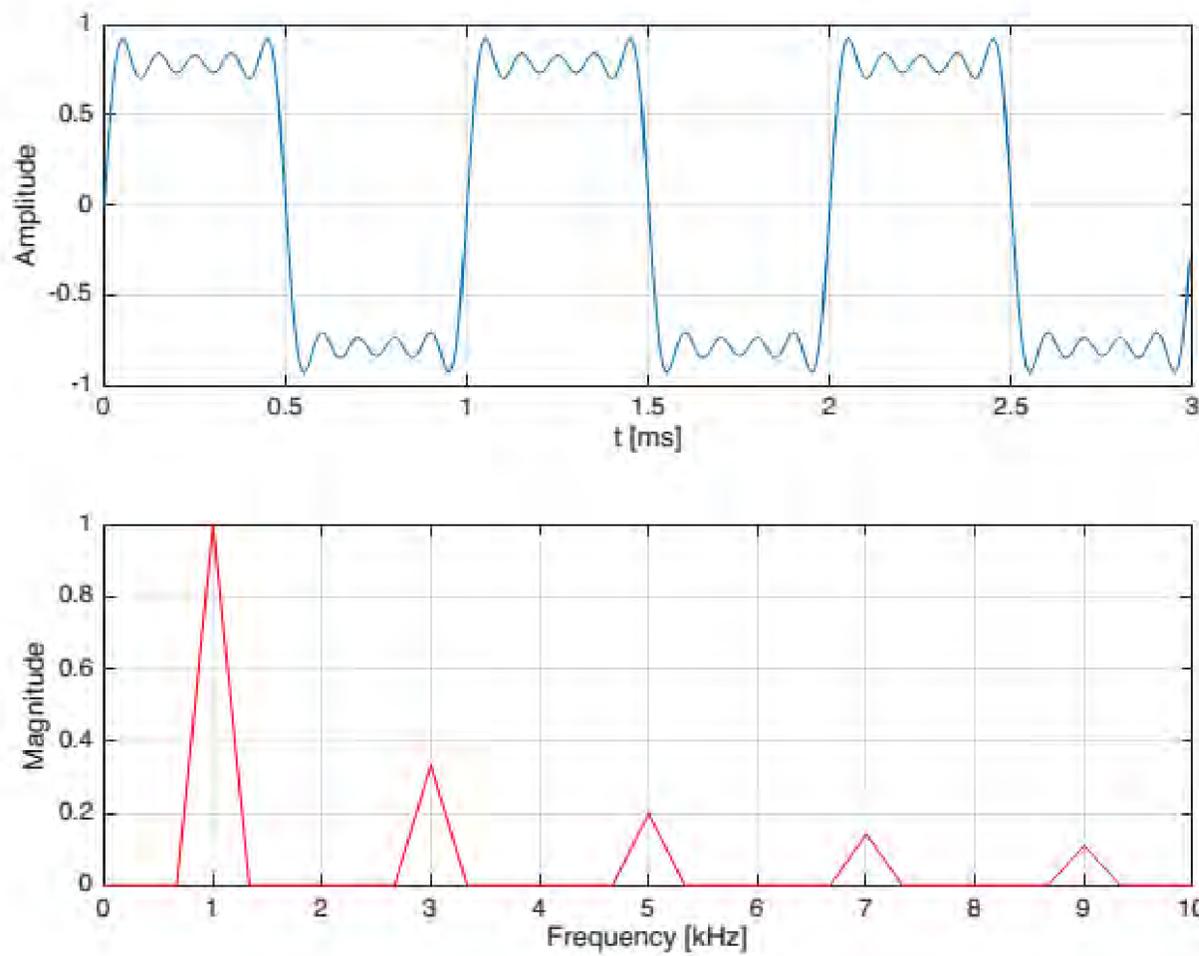


Figura 2.7 – Ilustração de um sinal acústico no domínio do tempo e no domínio da frequência (Queirós& Ramirez, 2016).

2.5.1 Banda de Oitava

O espectro audível, também chamado de campo tonal, é formado pelas frequências que compõe o som, ou seja, ele representa toda a gama de frequências que compõe a propagação de um sinal oriundo de uma fonte acústica. O termo oitava tem origem na escala musical. Trata-se do intervalo de oitavas de frequências entre uma determinada frequência. A oitava pode ser dividida em intervalos menores, como a meia oitava ou a terça de oitava, obtidas dividindo-se a oitava por 2 ou 3, respectivamente. Isso significa que meia oitava é o intervalo de frequências entre uma dada frequência e outra calculada multiplicando o anterior pelo fator $2^{1/2}$ e o terço da oitava, multiplicando por $2^{1/3}$. A posição de qualquer intervalo de oitava é geralmente indicada pela frequência central (f_c) do intervalo na escala logarítmica, que corresponde à média geométrica entre as suas frequências inicial (f_1) e final (f_2) (Redondo & Mateo, 2017). Portanto, as relações entre essas frequências para cada tipo de intervalo são dadas pelas equações (2.19) e (2.20), que serão vistas a seguir.

Para se obter uma distribuição de frequência em banda de oitava:

$$f_c = f_1 \sqrt{2} \quad (2.19)$$

Para se obter uma distribuição de frequência em banda de 1/3 oitava:

$$f_c = f_1 \sqrt[6]{2} \quad (2.20)$$

A Tabela 2.2 apresenta um exemplo de distribuição de frequências em bandas de oitava.

Tabela 2.2 – Distribuição de frequências em banda de oitava (Redondo & Mateo, 2017).

Frequência Inferior - f_1	Frequência Central - f_c	Frequência Superior - f_2
22	32	44
44	64	88
88	128	177
177	256	355
355	512	710
710	1028	1420
1420	2000	2840
2840	4000	5680
5680	8000	11360

Por exemplo, de acordo com a Tabela 2.2, considerando-se a frequência central f_c , as frequências 32, 64, 128, 256, 512 e 1028 representam uma divisão em banda de oitava para as seis primeiras frequências consecutivas (Redondo & Mateo, 2017).

3 EQUAÇÃO DA ONDA

3.1 Equação Diferencial Parcial da Onda

Como já visto anteriormente, a equação da onda é uma EDP frequentemente usada na modelagem de fenômenos físicos onde ocorrem variações de grandezas de forma vibratória (Stewart, 2013). Essas variações são causadas por uma perturbação que, a partir de uma condição inicial, modifica o equilíbrio de um determinado meio ou material. A propagação do som é um exemplo desse tipo de variação, pois para se propagar, o som aumenta a compressão mecânica nas moléculas do meio em que se propaga, causando assim, uma mudança em suas condições iniciais de equilíbrio (Halliday *et al.*, 2009). A equação da onda é classificada como EDP linear, de segunda ordem e hiperbólica, e sua expressão na forma homogênea é dada por:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3.1)$$

onde $u = u(x, t)$ é a função que representa o movimento da partícula com a posição x no instante t e c é uma constante que representa a velocidade de propagação que depende do meio físico (Iório, 2005). Neste estudo será considerada a equação da onda em sua formulação para ondas acústicas.

3.1.1 Solução da Equação da Onda Unidimensional

A solução da equação da onda (3.1) em uma dimensão, em termos da pressão, pode ser obtida em qualquer tempo e posição a depender somente das variáveis t e x , respectivamente. Fazendo-se $u = p$, a equação (3.1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2)$$

onde $p = p(x, t)$ é uma função que representa a pressão na posição x no tempo t e c é a velocidade de propagação da onda. Desta forma, uma solução para a pressão p pode assumir a forma da seguinte função arbitrária:

$$\begin{aligned} p &= f(x - ct) = f(\alpha) \\ p &= g(x + ct) = g(\beta) \end{aligned} \quad (3.3)$$

É possível verificar a solução da equação (3.3) dada por $p = f(\alpha)$ aplicando-se a regra da cadeia, de forma que:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha^2} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(-c \frac{\partial f}{\partial \alpha} \right) = c^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha^2} \quad (3.5)$$

Substituindo-se os resultados na equação (3.2):

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \alpha^2} - \frac{1}{c^2} c^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha^2} = 0 \quad (3.6)$$

De forma análoga, pode-se verificar a solução para a equação (3.3) quando $p = f(\beta)$.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial \beta} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(-c \frac{\partial f}{\partial \beta} \right) = c^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2} \quad (3.8)$$

Substituindo-se os resultados na equação (3.2):

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2} - \frac{1}{c^2} c^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2} = 0 \quad (3.9)$$

Sendo assim, a solução final da equação (3.3), que é a equação da onda unidimensional em um meio homogêneo, é dada pela soma das soluções das equações (3.6) e (3.9):

$$p = f(x - ct) + g(x + ct) = f(\alpha) + g(\beta) \quad (3.10)$$

A solução geral dada pela equação (3.10) também é conhecida como solução de d'Alambert (Graff *et al.*, 1991).

3.2 Equação da Onda Acústica

A equação da onda acústica pode ser obtida como uma variação da equação (3.1) considerando-se, simultaneamente, os conceitos físicos encontrados nas equações de estado, de continuidade e de Euler (Lawrence, 1994) descritas a seguir.

3.2.1 Equação de Estado

Os processos acústicos são aproximadamente isentrópicos (processos sem variação de entropia), ou seja, não são consideradas variações de temperatura e a propagação se dá de forma adiabática³ e reversível. Sendo assim, assume-se que não há condutividade térmica no fluido e o gradiente das temperaturas causado pela perturbação da propagação da onda pode ser desprezado. A equação de estado (3.11) é a equação que representa este processo e descreve a pressão acústica em função da densidade e da entropia (Savi, 2010).

$$P - P_0 = \beta \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (3.11)$$

onde P é a pressão instantânea em determinado ponto, P_0 é a pressão de equilíbrio do fluido, β é o coeficiente de expansão térmica ou módulo adiabático, ρ é a densidade instantânea em um determinado ponto e ρ_0 a densidade de equilíbrio do fluido.

³ O termo Adiabático é empregado para definir um sistema termodinâmico onde não há troca de calor ou esta é desprezada (Costa *et al.*, 2009).

Considerando-se $p = P - P_0$ a pressão acústica e definindo-se $s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$ como a condensação, a equação (3.11) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$p \approx \beta s \quad (3.12)$$

Na teoria de propagação de ondas sonoras em meio elástico, considerando-se um meio não dispersivo, a velocidade de propagação c é definida pela seguinte equação (Piu-belli *et al.*, 2010):

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}} \implies c^2 = \frac{\beta}{\rho_0} \implies \beta = \rho_0 c^2 \quad (3.13)$$

3.2.2 Equação da Continuidade

Uma forma de descrever o movimento do fluido levando-se em conta sua compressão, ou sua expansão, causada pela variação de pressão da propagação do som, é feita através da equação de continuidade. A equação da continuidade representa o princípio de conservação da massa, definindo assim, o estado de um fluido que está em movimento. A partir da distribuição das velocidades das partículas de um determinado meio fluido, da pressão e da densidade desse meio, a equação de estado estabelece que a variação da massa no interior de uma região, deve ser igual ao fluxo de massa e limitada por uma superfície (Michael & Howard, 2008). Como o fluxo de massa deve ser igual a taxa de crescimento, a equação de continuidade é dada por:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot u = 0 \quad (3.14)$$

u uma função que depende da densidade e da velocidade da partícula de um determinado meio e ∇ é o operador divergente.

3.2.3 Equação de Euler

A equação de Euler representa a aplicação da segunda Lei de Newton nas partículas de fluido onde ocorre a propagação. Esta equação considera que, o produto das massas das partículas pela aceleração em qualquer direção é igual a força atuando nas partículas nessa mesma direção, expressando a ação de forças externas sobre um volume de controle (Costa *et al.*, 2009). A equação de Euler é definida por:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = -\nabla p \quad (3.15)$$

onde p é a pressão e ρ_0 é a densidade instantânea.

3.2.4 Equação Linear da Onda

Aplicando-se o operador divergente ∇ em ambos os lados da equação de Euler (3.15), tem-se:

$$\rho_0 \nabla \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = -\nabla^2 p \quad (3.16)$$

onde, ∇^2 é o operador Laplaciano definido por:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.17)$$

Derivando-se a equação de continuidade (3.14) em relação ao tempo obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.18)$$

Isolando-se o termo $\frac{\nabla \partial u}{\partial t}$ a partir da equação (3.18), e substituindo-se $\frac{\partial u}{\partial t}$ na equação de Euler (3.15) tem-se que:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \right) = \nabla^2 p \quad (3.19)$$

Da equação (3.12) define-se uma expressão para a condensação s em termos da pressão p e do coeficiente de expansão β :

$$p \approx \beta s \quad \implies \quad s \approx \frac{p}{\beta} \quad (3.20)$$

Combinando-se a equação (3.20) com a equação (3.19), tem-se que:

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial t \beta} \right) = \nabla^2 p \quad (3.21)$$

Como β é o coeficiente de expansão térmica ou módulo adiabático, e como para este caso não é considerada a troca de calor, tem-se que β é constante. Logo, a equação (3.21) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\nabla^2 p = \rho_0 \frac{1}{\beta} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right) \quad (3.22)$$

A partir da velocidade de propagação da onda em um meio elástico, substituindo-se a expressão de β dada pela equação (3.13) e aplicando-se na equação (3.22), tem-se que:

$$\nabla^2 p = \rho_0 \frac{1}{c^2 \rho_0} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right) \quad (3.23)$$

Simplificando-se ainda a equação (3.23), tem-se:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (3.24)$$

A equação (3.24) é a equação da onda acústica em meio aquoso (Au & Hastings, 2008). Para essa equação, não é considerada a troca de calor e a densidade do meio de

propagação é constante. Esta equação é o ponto de partida para o desenvolvimento da teoria física da propagação sonora e, a partir da implementação de métodos para a solução dessa equação, obtém-se os cálculos da pressão em um determinado meio.

3.2.5 Solução da Equação da Onda Acústica

3.2.5.1 Equação da Onda com Fonte

A equação da onda como descrita na Equação (3.1) é uma equação homogênea no domínio do tempo e não está associada a nenhuma fonte de sinal acústico. Para adicionar um termo fonte, basta relacionar uma função de fonte no lado direito da equação (3.1):

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = s(t) \quad (3.25)$$

onde o termo $s(t)$ representa uma fonte de sinal acústico contínuo dada pela equação (2.5) (Jensen *et al.*, 2011).

3.3 Método de Diferenças Finitas - MDF

Em muitos casos não é possível obter-se uma solução analítica para a equação da onda acústica em duas dimensões como a descrita na seção anterior. Logo, de forma alternativa, recorre-se aos métodos numéricos, que com auxílio computacional, retornam soluções numéricas para esse tipo de problema. O MDF, é uma das várias técnicas numéricas e foi um dos primeiros métodos numéricos desenvolvidos para resolver equações diferenciais. Este método pode ser usado na solução da equação da onda e de vários outros tipos de equações diferenciais. A teoria básica do MDF, consiste na substituição das derivadas parciais da equação contínua por fórmulas discretas de diferenças em um número finito de pontos que constituem a chamada malha, em um domínio Ω , espaçados por passos de tamanho h (Burden & Faires, 2009; Smith, 1985). A Figura 3.1 ilustra uma malha bidimensional sobre um domínio Ω .



Figura 3.1 – Ilustração de uma malha bidimensional sobre domínio Ω .

O tratamento das equações via MDF pode ser feito de várias formas. Em cada

forma é levada em conta a ordem na formulação de diferenças finitas (Duffy, 2013). Uma formulação para uma derivada de segunda ordem é dada por:

$$f''(x) = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (3.26)$$

A equação (3.26) tem um erro de truncamento da ordem de $O(h^2)$.

3.4 Discretização da Equação da Onda

Para solucionar a equação da onda (3.24) obtendo-se o campo de pressão, será utilizado o MDF. Para tanto, considera-se as definições do operador diferencial Laplaciano bidimensional. Sendo assim, a equação (3.17) fica da seguinte forma:

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (3.27)$$

Assim, para o termo da pressão tem-se que:

$$\nabla^2 p = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) \quad (3.28)$$

Para a obtenção da formulação de diferenças finitas para o termo $\nabla^2 p$ na Equação (3.24) é preciso entender a expansão em série de Taylor a seguir. Sejam as expansões em Série de Taylor discretas das funções $F(x + \Delta x)$ e $F(x - \Delta x)$. Somando-se as expansões, vem:

$$F(x+\Delta x) + F(x-\Delta x) \approx 2F(x) + 2\frac{\Delta x^2}{2!} \frac{\partial^2 F(x)}{\partial x^2} + 2\frac{\Delta x^4}{4!} \frac{\partial^4 F(x)}{\partial x^4} + \dots + \frac{\Delta x^n}{n!} \frac{\partial^n F(x_i)}{\partial x^n} \quad (3.29)$$

$$F(x+\Delta x) + F(x-\Delta x) \approx 2F(x) + \Delta x^2 \frac{\partial^2 F(x)}{\partial x^2} + \frac{\Delta x^4}{12} \frac{\partial^4 F(x)}{\partial x^4} + \dots + \frac{\Delta x^n}{n!} \frac{\partial^n F(x_i)}{\partial x^n} \quad (3.30)$$

Isolando-se o termo da derivada de segunda ordem, e truncando-se as expansões, com erro da $O(\Delta x^2)$

$$\Delta x^2 \frac{\partial^2 F(x)}{\partial x^2} \approx F(x + \Delta x) + F(x - \Delta x) - 2F(x) \quad (3.31)$$

Dividindo ambos os lados por Δx^2 :

$$\frac{\partial^2 F(x)}{\partial x^2} \approx \frac{1}{\Delta x^2} [F(x + \Delta x) + F(x - \Delta x) - 2F(x)] \quad (3.32)$$

A equação (3.32) é a expressão geral por diferenças centradas, com aproximação de segunda ordem, para a segunda derivada na direção x . Na equação, Δx é o espaçamento na direção x da malha espacial. Seguindo os mesmos passos, é possível obter uma expressão

geral, via diferenças centradas, para a direção y e também para t . Assim, tem-se as equações (3.33) e (3.34), respectivamente.

$$\frac{\partial^2 F(y)}{\partial y^2} \approx \frac{1}{\Delta y^2} [F(y + \Delta y) + F(y - \Delta y) - 2F(y)] \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial^2 F(t)}{\partial t^2} \approx \frac{1}{\Delta t^2} [F(t + \Delta t) + F(t - \Delta t) - 2F(t)] \quad (3.34)$$

onde Δy é o espaçamento na direção y da malha espacial, e Δt é variação no tempo. Assim, é possível usar equação (3.32) para aproximar a parcela referente a pressão p em (3.28):

$$\frac{p_{(i+1,j)} - 2p_{(i,j)} + p_{(i-1,j)}}{\Delta x^2} \quad (3.35)$$

onde $1 \leq i \leq N_x$, $1 \leq j \leq N_y$ sendo N_x e N_y nas direções x e y , respectivamente. E ainda:

$$\frac{p_{(i,j+1)} - 2p_{(i,j)} + p_{(i,j-1)}}{\Delta y^2} \quad (3.36)$$

Analogamente, para uma aproximação de segunda ordem para a derivada temporal (3.34), tem-se:

$$\frac{\partial^2 F(t)}{\partial t^2} \approx \frac{1}{\Delta t^2} [F(t + \Delta t) + F(t - \Delta t) - 2F(t)] \approx \frac{p_{(i,j)}^{n+1} - 2p_{(i,j)}^n + p_{(i,j)}^{n-1}}{\Delta t^2} \quad (3.37)$$

onde $n + 1$ representa o passo de tempo futuro, n o passo atual e $n - 1$ o passo de tempo anterior.

Fazendo-se $\Delta x^2 = \Delta y^2 = h$ onde h representa o passo da malha, isolando-se o termo $p_{(i,j)}^{n+1}$, que representa o avanço do valor do campo de pressão, e substituindo-se na equação da onda (3.24), tem-se a equação da onda discreta:

$$p_{(i,j)}^{n+1} = 2p_{(i,j)}^n - p_{(i,j)}^{n-1} + \left(c \frac{ht}{h} \right)^2 \left(p_{(i+1,j)}^n + p_{(i-1,j)}^n + p_{(i,j+1)}^n + p_{(i,j-1)}^n - 4p_{(i,j)}^n \right) \quad (3.38)$$

$$i = 1, \dots, N_x \quad j = 1, \dots, N_y \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad n \in \mathbb{N}$$

onde N_x é o número de pontos na malha na direção x , N_y é o número de pontos na malha na direção y .

3.5 Condições de Contorno

A propagação de ondas em um determinado meio ocorre em todas as direções e sem limitações espaciais. No entanto, ao se usar um método numérico para resolver a equação diferencial, é necessário estabelecer as condições de contorno, que determinam o comportamento do modelo em seus limites. Essas condições devem representar da melhor forma as características reais do problema estudado. Para o caso da equação da onda

acústica, é muito comum a utilização de condições de contorno de dois tipos: reflexivas e não reflexivas (Reynolds, 1978) (Reynolds, 1978).

3.5.1 Condições de Contorno Reflexivas - CCR

Essas condições baseiam-se na aplicação de camadas refletoras na região do contorno onde a onda se propaga. Desta forma, quando a onda entra em contato com a região, ocorre uma reflexão total ou parcial da onda (Cerjan *et al.*, 1985). Essas condições equivalem as condições de Dirichlet (Iório, 2005) e no caso de um contorno delimitado por quatro bordas (domínio retangular), essas condições podem ser representadas pelas seguintes expressões:

Bordas esquerda e direita:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (\text{Borda Esquerda}) \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (\text{Borda Direita}) \quad (3.39)$$

Bordas superior e inferior:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (\text{Borda Superior}) \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (\text{Borda Inferior}) \quad (3.40)$$

3.5.2 Condições de Contorno Não Reflexivas - CCNR

As condições não reflexivas (ou absorcivas), baseiam-se em camadas absorcivas na região do contorno onde a onda se propaga. Desta forma, os limites da malha absorvem a onda, quando a mesma entra em contato com a região (Reynolds, 1978). Essas condições podem ser representadas pelas seguintes expressões:

Bordas esquerda e direita:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = c \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{Borda Esquerda}) \quad \frac{\partial p}{\partial x} = -c \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{Borda Direita}) \quad (3.41)$$

Bordas superior e inferior:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = c \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{Borda Superior}) \quad \frac{\partial p}{\partial y} = c \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{Borda Inferior}) \quad (3.42)$$

A propagação acústica em um determinado meio, depende da pressão acústica antes e depois do tempo em que o sinal está sendo emitido. Neste trabalho, quando não há emissão de nenhum sinal acústico considera-se a pressão inicial $p_0 = 0$. Levando em conta que quando $t = 0$ não há emissão de nenhum sinal acústico das fontes, para esse instante as condições iniciais adotadas são:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = p_0 = 0 \quad (3.43)$$

4 MAMÍFEROS MARINHOS

O termo mamífero marinho é utilizado para representar todas as espécies de animais mamíferos que vivem, a maior parte ou todo o seu tempo, em um habitat marinho, sendo a maioria das espécies pertencentes às águas salgadas e algumas outras às águas doces (Monteiro *et al.*, 2013). Os mamíferos marinhos formam quatro ordens de animais com um grande número de espécies. De forma mais estratégica, neste trabalho serão apresentadas apenas as espécies de uma das subordens de cetáceos: os misticetos.

4.1 A Ordem dos Cetáceos

A ordem dos cetáceos é muito conhecida pelas baleias, golfinhos e botos, mamíferos marinhos muito encontrados em águas salgadas, e doces no caso dos botos. São conhecidas cerca de 80 espécies em todo o mundo, divididas em duas subordens: misticetos e odontocetos. Os cetáceos são geralmente encontrados em águas costeiras e estuarinas a uma profundidade de aproximadamente 50 metros. Em águas costeiras, a profundidade geralmente entre 50 a 200 metros, enquanto que em águas mais profundas já consideradas *offshore* é possível encontrá-los em profundidades superiores a 200 metros (Walsh & Kobayashi, 2004).

Dependendo da espécie de cetáceo, o tamanho de um animal adulto pode variar entre 1,5 a 33 metros de comprimento corporal. As espécies que apresentam um comprimento maior que 10 metros são definidas como espécies grandes, já as que atingem comprimentos entre 4 e 10 m, de tamanho médio, e as espécies menores que 4 metros são consideradas espécies pequenas. A maioria das espécies grandes são encontradas na subordem misticeto (baleias de barbatana). Os odontocetos variam entre algumas espécies grandes e médias mas sua maioria são de espécies pequenas (Jefferson *et al.*, 1993). Como toda ordem dos cetáceos se utiliza de som como meio de vida, e ainda tendo-se em vista a diversidade desses animais, este trabalho irá abordar apenas uma das subordens, a dos misticetos. Além disso, sabe-se que os misticetos emitem suas vocalizações em baixas frequências e com isso são mais sensíveis as características dos ruídos gerados pelos navios (Au & Hastings, 2008).

4.2 Subordem dos Misticetos

Os misticetos são animais marinhos em sua maioria de grande porte. No geral, as fêmeas são maiores que os machos, podendo atingir até 33 metros de comprimento e pesar até 160 toneladas (Jefferson *et al.*, 1993). Uma de suas principais características é a ausência de dentes. Além disso, apresentam uma estrutura chamada de barbatana, que consiste em placas de tecido epitelial cornificado, que ficam localizadas no céu da boca, em posição lateral, e servem para filtrar o alimento da água. Se alimentam regularmente de zooplâncton (Monteiro *et al.*, 2013), principalmente pequenos crustáceos (Jefferson *et al.*, 1993). Para este trabalho, foram listadas algumas espécies das quatro famílias de misticetos, como será visto a seguir.

4.2.1 Família *Balaenidae*

A família *Balaenidae* é aqui representada pela Baleia-franca ilustrada na Figura 4.1 e pela baleia Baleia-franca da Groenlândia ilustrada na Figura 4.2. Essa família de baleias é caracterizada pelo tamanho grande. São baleias robustas, podendo medir até 18 metros de comprimento e pesar mais de 70 toneladas. Uma baleia dessa família não possui nadadeira dorsal e sua cabeça e língua são muito grandes. A cabeça chega a corresponder a 30% do comprimento total do corpo. Suas barbatanas são numerosas e podem medir mais de 2 metros. Não possuem pregas ventrais. No crânio, o rosto é arqueado e suas vértebras cervicais são fusionadas. Um de seus membros mais conhecidos é a Baleia-franca, que tem costume de circular em regiões costeiras de águas tropicais, temperadas e circumpolares do Hemisfério Sul. Outro membro conhecido é a e a Baleia-franca da Groenlândia, que vive inteiramente em águas árticas (Monteiro *et al.*, 2013).

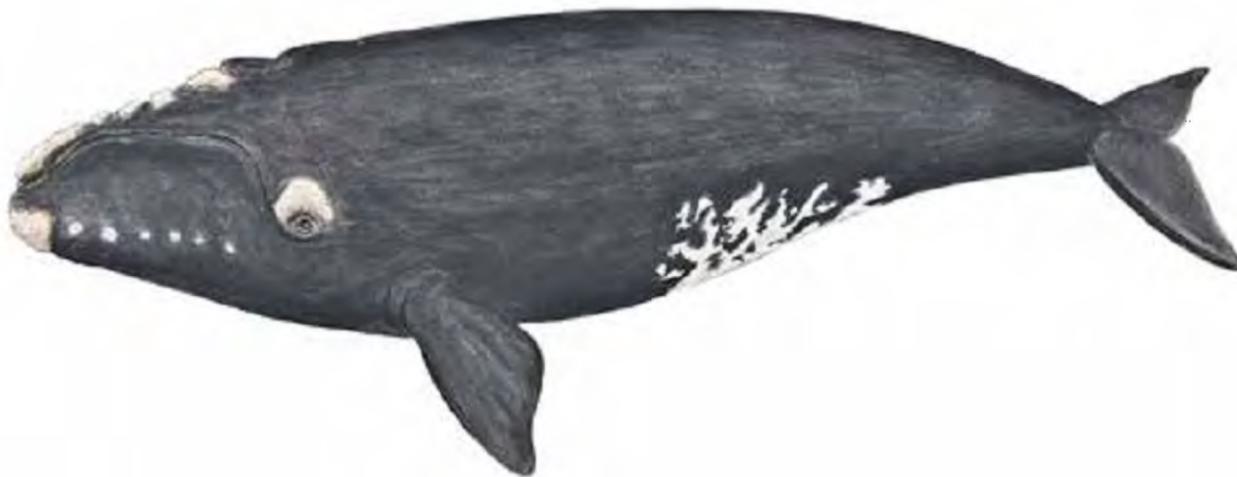


Figura 4.1 – Ilustração da Baleia-franca, família *Balaenidae*, gênero *Eubalaena* (Monteiro *et al.*, 2013).



Figura 4.2 – Ilustração da Baleia-franca da Groenlândia, família *Balaenidae*, gênero *Eubalaena* (Monteiro *et al.*, 2013).

4.2.2 Família *Neobalaenidae*

Esta família é composta por uma única espécie chamada de Baleia-pigmeu ilustrada na Figura 4.3, que geralmente é encontrada no Oceano Atlântico no Hemisfério Sul. Esta baleia é muito menor quando comparada com os demais misticetos. Seu comprimento não ultrapassa 7 metros e seu peso varia entre 3 e 3,5 toneladas. A cabeça representa cerca

de 25% de seu corpo e ainda apresenta uma pequena barbatana dorsal curvada atrás no meio do seu corpo. Possui também um par de sulcos na garganta rasa. Seu crânio é intermediário; o rosto é moderadamente arqueado mas é muito mais largo em sua base (Jefferson *et al.*, 1993).

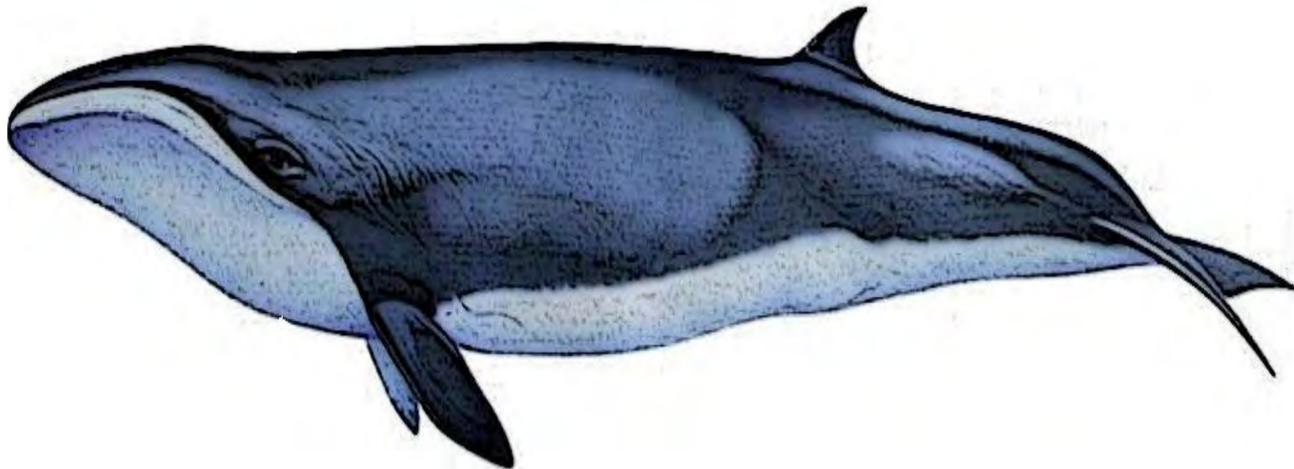


Figura 4.3 – Ilustração da Baleia-pigmeu, família *Neobalaenidae*.

4.2.3 Família *Balaenopteridae*

São também conhecidas como *Rorquais*. Os tamanhos variam desde aproximadamente 7 metros para a Baleia-minke até mais de 30 metros para a Baleia-azul. Possuem nadadeiras dorsais pequenas, geralmente no terço posterior do corpo. De uma maneira geral, as cabeças correspondem a cerca de 20% do comprimento do corpo e o rosto é afinado em forma de "V". Possuem numerosas barbatanas pequenas nos maxilares, que variam em comprimento, largura e cor nas diferentes espécies (Monteiro *et al.*, 2013). A Baleia-azul ilustrada na Figura 4.4 possui um corpo longo, hidrodinâmico. Costumam ficar em agrupamentos de dois a cinco indivíduos.

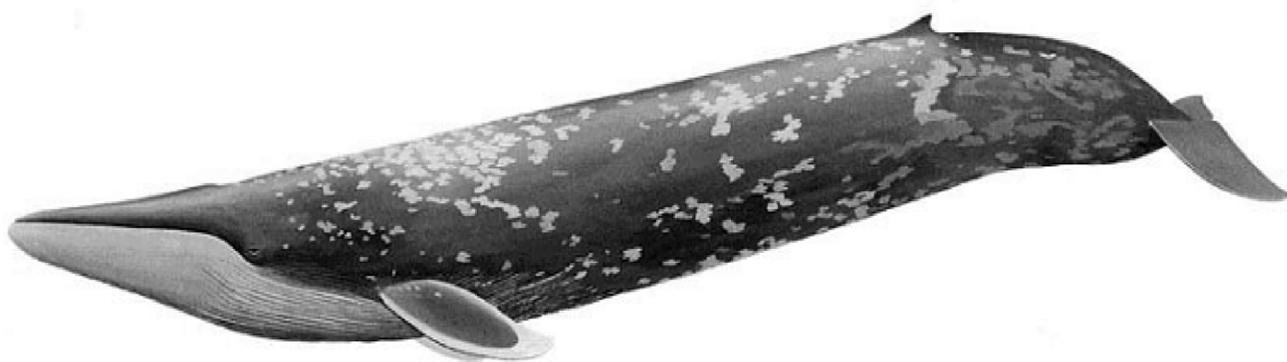


Figura 4.4 – Ilustração da Baleia-azul, família *Balaenopteridae* (Jefferson *et al.*, 1993).

A Baleia-fin ilustrada na Figura 4.5 também conhecida como baleia comum, é uma baleia de grande porte. Possui um corpo hidrodinâmico com cabeça afinada em forma de "V". Costuma ficar em agrupamentos de um a quinze indivíduos (Jefferson *et al.*, 1993).



Figura 4.5 – Ilustração da Baleia-fin, família *Balaenopteridae* (Jefferson *et al.*, 1993).

A Baleia-minke ilustrada na Figura 4.6, também conhecida como Baleia-anã, é uma baleia de pequeno porte. Possui um corpo robusto e hidrodinâmico, e vista por cima seu rosto é estreito, pontudo e quase triangular. Costuma ficar em agrupamentos de um a três indivíduos (Jefferson *et al.*, 1993).

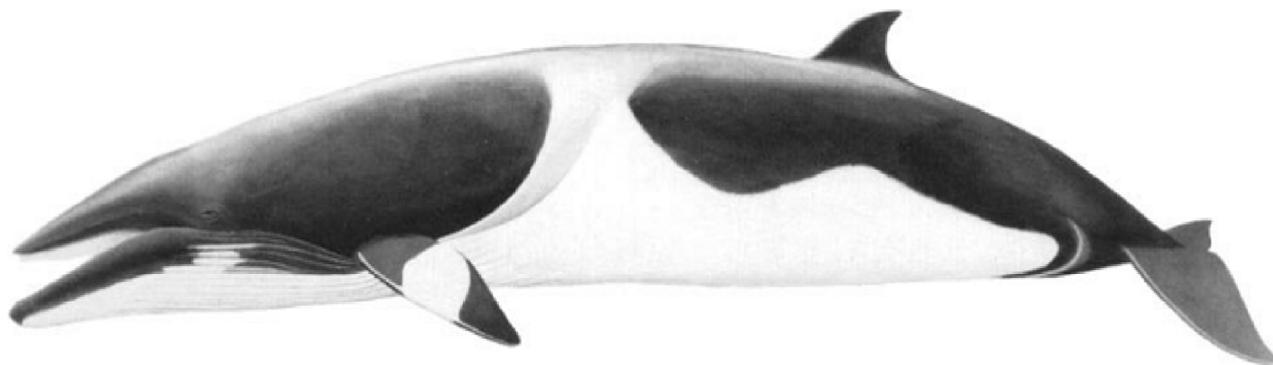


Figura 4.6 – Ilustração da Baleia-minke, família *Balaenopteridae* (Jefferson *et al.*, 1993).

A Baleia-bryde ilustrada na Figura 4.7 possui um corpo esbelto e hidrodinâmico, cabeça alargada e com três quilhas que se estendem da extremidade até próximo aos orifícios respiratórios. Costumam ficar em agrupamentos de cinco a seis indivíduos (Jefferson *et al.*, 1993).

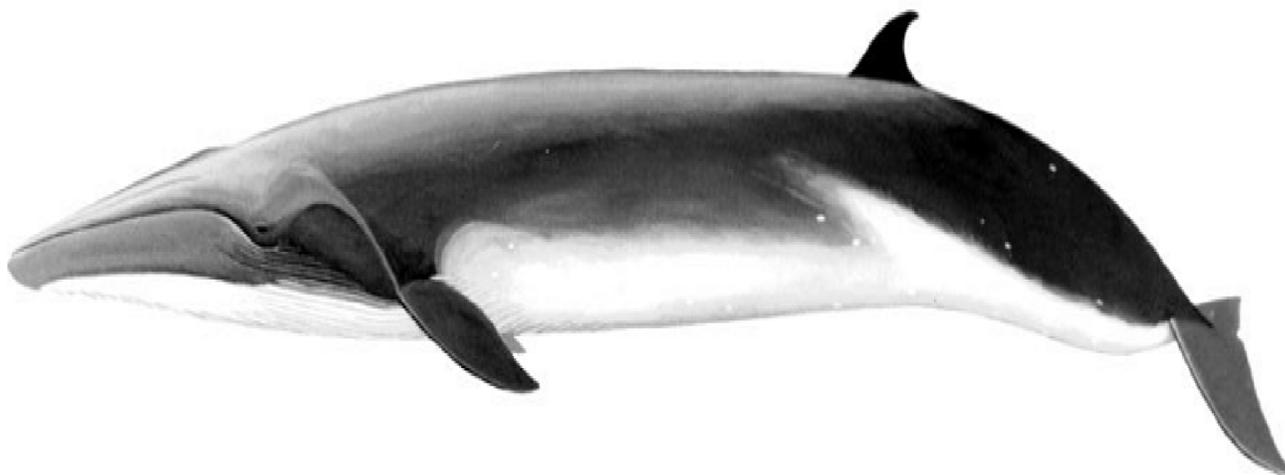


Figura 4.7 – Ilustração da Baleia-bryde, família *Balaenopteridae* (Jefferson *et al.*, 1993).

A Baleia-jubarte ilustrada na Figura 4.8 é uma baleia de grande porte, com corpo robusto, estreitando próximo à cauda. Vista por cima, a cabeça é larga e arredondada

com uma série de calosidades ou protuberâncias em duas linhas dispostas próximas aos lábios. Costuma ficar em agrupamentos de um a sete indivíduos (Jefferson *et al.*, 1993).

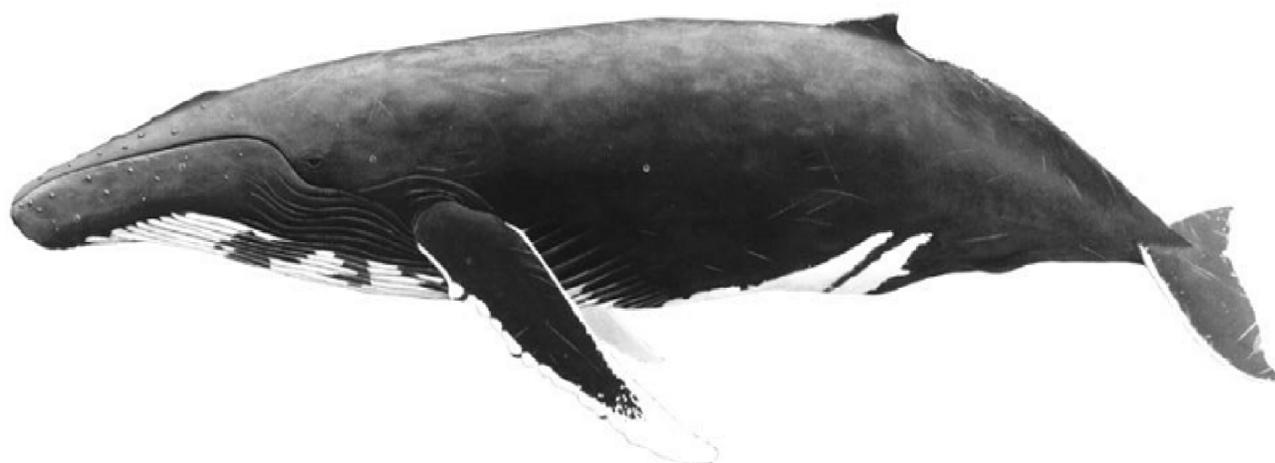


Figura 4.8 – Ilustração da Baleia-jubarte, família *Balaenopteridae* (Jefferson *et al.*, 1993).

4.2.4 Família *Eschrichtiidae*

Esta família está classificada em uma faixa intermediária entre as famílias *Balaenidae* e *Balaenopteridae*. Um dos seus membros mais famosos é Baleia-cinza ilustrada na Figura 4.9, que pode atingir cerca de 15 metros de comprimento e pesar até de 35 toneladas. Essas baleias costumam habitar áreas mais costeiras e de baixa movimentação. Se alimentam sugando suas presas encontradas nos sedimentos do fundo (Jefferson *et al.*, 1993).



Figura 4.9 – Ilustração da Baleia-cinza, família *Eschrichtiidae* (Jefferson *et al.*, 1993).

Os cetáceos são dotados de sistemas sensoriais de modo a perceber o meio onde habitam. Na água, o som se propaga à grandes distâncias podendo chegar até o sistema auditivo desses animais. Nos mamíferos a audição é composta pela combinação de três processos básicos (Ketten, 1998):

- 1) Captação do som: esse processo ocorre no ouvido externo onde o som é captado e direcionado para o ouvido médio;
- 2) Amplificação do som: essa etapa ocorre no ouvido médio onde, a partir das frequências sensíveis aos animais, o som é filtrado e amplificado;

- 3) Conversão dos sinais acústicos: essa etapa ocorre no momento em que o som atinge a cóclea onde é realizada a transdução, ou seja, o local onde os sinais acústicos são convertidos em impulsos nervosos e processados pelo cérebro.

4.3 Possíveis Efeitos da Poluição Sonora nos Cetáceos

Devido a diversos fatores, incluindo à insuficiência de pesquisas sobre os possíveis impactos da poluição sonora, a curto ou longo prazo, nos animais marinhos, tem-se pouca compreensão sobre o assunto, dificultando um julgamento mais preciso sobre as reais consequências da poluição sonora na vida dos animais marinhos, em particular dos cetáceos quando submetidos a um ambiente muito ruidoso. Entretanto, sabe-se que quando um animal é exposto a altos níveis de *stress*, causados pela poluição sonora, eles sofrem uma grande variedade de mudanças hormonais e neuroquímicas que impactam no seu sistema imunológico, tornando-os mais vulneráveis a vários agentes patogênicos, como vírus e bactérias (Engel *et al.*, 2004; Rocha & Câmara, 2011).

Estudos apontam que os cetáceos podem evitar ou deixar uma área por causa do nível de ruído, se deslocando então para um local mais apropriado (Ketten, 2004; Richardson & Würsig, 1995; Simmonds & Weilgart, 2004; Simmonds & Weilgart, 2000). Esses estudos apontam também que ruídos antrópicos, podem aumentar a captura incidental, a colisão com embarcações e encalhes massivos. Esse eventos ocorrem provavelmente como resultado dos danos ao sistema auditivo ou dissimulação de sinais acústicos. Assim, na próxima seção será apresentado um panorama sobre os principais danos que podem afetar esses animais.

4.3.1 Danos Fisiológicos Permanentes e Temporários

Quando os mamíferos marinhos são expostos a altos níveis de intensidade sonora por um determinado tempo, as células capilares da cóclea⁴ de seu sistema auditivo, começam a fatigar podendo causar perdas auditivas temporárias ou permanentes. Se o animal for frequentemente submetido a altos níveis de ruídos, com o passar do tempo, sua sensibilidade auditiva vai diminuindo gradativamente a medida que é exposto a tais condições. Se os níveis de ruídos estiverem em um limiar próximo ou abaixo de um determinado limite crítico de energia sonora, as células capilares sofrem deformações mas acabam retornando à sua forma normal causando um efeito de perda auditiva temporária. Esse efeito é denominado *Temporary Threshold Shift* -TTS. Se esses animais forem expostos constantemente a níveis de intensidade sonora que excedam um determinado limite crítico, com o passar do tempo as células capilares podem ficar permanentemente danificadas e ele acabará morrendo. Esse efeito é denominado *Permanent Threshold Shift* -PTS (Au & Hastings, 2008).

Experimentos conduzidos para verificar os limites críticos da intensidade sonora que pode causar o efeito TTS, mostraram que os limites variam entre 179 a 201 *dB μPa*, a depender da espécie de cetáceo. Um limiar acima desses valores pode induzir ao PTS. Um modelo de exposição acústica utilizado para analisar e investigar os efeitos acústicos de embarcações de observação de baleias, mostrou que ao se utilizar uma fonte de banda larga com nível de intensidade sonora de 120 *dB μPa*, esse som é audível por uma

⁴ Parte do aparelho auditivo com forma de caracol compondo o ouvido interno dos cetáceos (Au & Hastings, 2008).

distância aproximada de 16 quilômetros. Concluiu também que em uma distância de 14 quilômetros, esse ruído pode mascarar uma chamada (ou canto) de uma baleia assassina. Observaram também que, a aproximadamente 200 metros de distância da fonte, esse nível de ruído provoca uma resposta através de mudanças comportamentais dos animais causando estresse além de uma perda TTS de 5 *dB*, se uma baleia permanecer de 30 a 50 minutos em uma distância de 450 metros do barco (Erbe & Farmer, 2000a; Erbe & Farmer, 2000b). Em relação aos danos permanentes, tais estudos mostram que se a baleia estivesse a distância aproximada de 1 km do barco durante o período de 8 horas por dia, 5 dias por semana, durante 50 anos, esse ruído causaria PTS, com perda de 2 a 5 *dB* (Erbe, 2002). Outros estudos relacionados a TTS e PTS podem ser encontrados no trabalho de Nowacek (Nowacek *et al.*, 2007).

4.4 Vocalização dos Mistocetos

As vocalizações das baleias podem ser divididas basicamente em duas categorias: cantos e chamadas. As chamadas podem ser subdivididas em outras três categorias como: chamadas simples, chamadas complexas e outras chamadas, que são compostas por cliques, pulsos, batidas e grunhidos. As chamadas simples soam como "gemidos" e geralmente são moduladas em sons de baixa frequência com energia abaixo de 1 *kHz*. Já as chamadas complexas são sinais de banda larga semelhantes a pulsos com uma mistura variável de ruído modulado. Eles soam como gritos, rugidos e grunhidos, com a maior parte da energia entre 0.5 e 5 *kHz*. Os cliques, pulsos, batidas e grunhidos são sinais de curta duração, geralmente abaixo de um décimo de segundo. Esse tipo de chamada apresenta pouca ou nenhuma modulação de frequência (Clark, 1990).

Chamadas e cantos são utilizados provavelmente para algum tipo de comunicação apesar de não se conhecer especificamente a função de cada tipo de comunicação. É extremamente difícil estudar as funções específicas de cada vocalização, pois em raras ocasiões é possível manter as baleias em cativeiro o tempo suficiente para realizar experimentos acústicos controlados. Entretanto, estudos mostram que os cantos das baleias são utilizados para comunicação entre sua própria espécie, principalmente para atração do sexo oposto em época de acasalamento (Au & Hastings, 2008). A Tabela 4.1 mostra um resumo da vocalização de algumas espécies de baleias com ênfase nas propriedades acústicas das chamadas. Com esta tabela é possível observar o tipo de sinal emitido pela baleias, assim como os limites de frequência de sinal. A Tabela 4.1 mostra também a intensidade de alguns tipos de sinais.

Tabela 4.1 – Frequências de vocalização de algumas espécies de baleias - Adaptada de Au & Hastings (Au & Hastings, 2008).

Espécie de Baleia	Tipo de Sinal	Limites de Frequência (Hz)	Frequência Dominante (Hz)	Nível Sonoro (dB re μPa)
Baleia-azul	Gemidos FM	11.5–200	16–25	188
	Cantos	16–60	16–60	
Baleia-franca da Groelândia	Gemidos	25–900	100–400	129–178
	Pulsos	25–350	152–185	
	Cantos	20–500	158–189	
Baleia-bryde	Gemidos	70–245	124–132	152–174
	Gemidos em Pulsos	100–930	165–900	
	Pulsos Discretos	700–950	700–950	
Baleia-fin	Gemidos FM	14–118	20	160–186
	Tonal	34–150	34–150	
	Cantos	17–25	17–25	186
Baleia-cinza	Pulsos	100–2000	300–825	152
	Gemidos FM	250–300	250–300	
	Gemidos LF-PM	125–1250	<430	
	Pulsos PM	150–1570	225–600	
Baleia-jubarte	Gemidos Simples	20–1800	25–30	175
	Gemidos Complexos	35–360	35–360	175
	Pulsos	25–89	25–80	176
	Cantos	30–8000	120–4000	144–174
	Cliques	500–2000	800, 1800	143–154
Baleia-minke	Tonal FM	60–130	60–130	165
	Batidas	100–200	100–200	
	Grunhidos	60–140	60–140	151–175

5 MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

O modelo matemático da propagação acústica em ambiente submarino proposto para esse trabalho, visa a simulação do campo acústico gerado por uma ou mais fontes emitindo sinais que podem ser sensíveis aos mamíferos marinhos da subordem dos mysticetos que trafegam nas proximidades das fontes acústicas. O ambiente marinho considerado, será um ambiente simplificado, considerando-se que as fontes se encontram em até 1000 metros, sem variação de temperatura e salinidade. Desta forma, a velocidade de propagação será constante em todo domínio. O campo de pressão gerado pela simulação do modelo será o resultado da utilização de uma ou mais fontes com assinaturas acústicas de sete classes de navios encontrados no trabalho de McKenna. (McKenna *et al.*, 2012). Essas assinaturas acústicas apresentam os níveis sonoros em bandas de oitava ou um terço de oitava com frequência variando entre 20 a 1000 *Hz*. O método numérico utilizado na solução do problema, isto é, da equação da onda (3.38), será o MDF, apresentado anteriormente. O resultado obtido é um campo acústico com energia em *SPL* μPa que permite a correlação entre a poluição sonora dos barcos com possíveis impactos nos mysticetos.

5.1 Condições de Contorno Adotadas

As simulações feitas neste trabalho consideram uma associação das condições de contorno reflexivas e não reflexivas. A superfície do mar foi considerada refletora e para esta finalidade, na borda superior as condições de contorno utilizadas foram as reflexivas (ou de Dirichlet) dadas pela equação (3.40). Os valores de pressão e fluxo no contorno são nulos, considerando a total reflexão da onda. Já nos contornos lateral direito, lateral esquerdo e inferior (fundo do mar), as condições adotadas são as não reflexivas, dadas pelas equações (3.41) e (3.42). Essas condições foram adotadas por considerar um ambiente marinho extenso de forma que no limite das bordas as ondas sejam atenuadas e não hajam reflexões (Shaik, 2014). Assim, as condições de contorno utilizadas são ilustradas na Figura 5.1.

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = c \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -c \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -c \frac{\partial p}{\partial t}$$

Figura 5.1 – Condições de contorno utilizadas.

Foi adotada uma região retangular, representada pela Figura 5.2. Considerou-se uma extensão de 2000 metros de comprimento na direção x e de profundidade 500 metros na direção y . Os valores para o dimensionamento da região simulada foram baseados na distância crítica que o ruído pode afetar as baleias assim como a profundidade máxima em que elas costumam ser encontradas, que pode ser de até 200 metros (Walsh, 2004). Já com essas dimensões definidas, as fontes sonoras podem ser posicionadas em qualquer ponto da região.

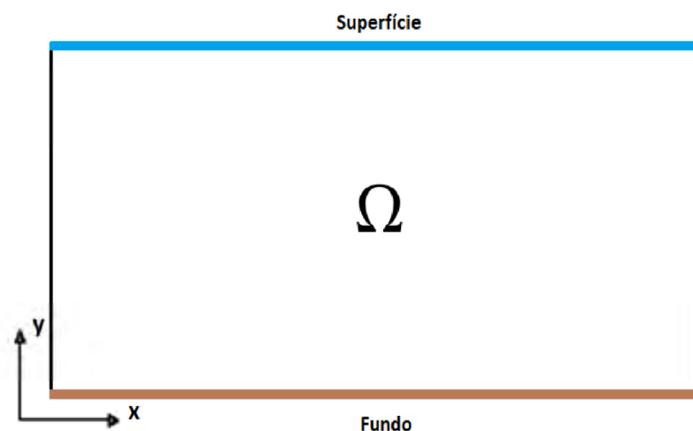


Figura 5.2 – Representação geral da geometria do domínio utilizado nas simulações.

A malha do MDF aqui utilizada, considera divisões h , constantes em ambas as direções x e y . A velocidade do som no meio é de 1500 m/s e a variação do tempo foi definida como $\Delta t = 6 \times 10^{-7}$. Desta forma, será considerado $h = 1$ que atende ao critério $c(\Delta t/h) \leq 1$, que garante que os parâmetros de malha h e Δt , adotados, atendam as condições de estabilidade numérica. Para mais detalhes, ver o trabalho de Cohem & Joly (Cohen, 1990).

5.2 Fontes Sonoras Utilizadas no Modelo

Os níveis das fontes sonoras aplicados nesse trabalho foram obtidos a partir do estudo de McKenna. (McKenna *et al.*, 2012), que descreve e compara a emissão de energia acústica a partir do tipo de navio. Foram analisadas as características espectrais de sete classes de navios modernos enquanto esse executam suas atividades normais de operação. A seguir, tem-se uma descrição geral de cada tipo de navio considerado (Marine Traffic, 2019):

Chemical Tanker: o navio químico, é um tipo de navio-tanque projetado e adaptado para transportar produtos químicos. A Figura 5.3 ilustra um navio dessa classe.



Figura 5.3 – Ilustração de um navio de classe *Chemical Tanker*.
Fonte: <https://www.turbosquid.com> - Acessado em 03/05/2019

Crude Oil Tanker: é um navio petroleiro, projetado para o transporte de petróleo cru e derivados não refinados. A Figura 5.4 ilustra um navio dessa classe.



Figura 5.4 – Ilustração de um navio de classe *Crude Oil Tanker*.
Fonte: <https://www.turbosquid.com> - Acessado em 03/05/2019

Products Tanker: é um navio petroleiro, projetado para o transporte de produtos químicos, em especial os derivados de petróleo já refinados. A Figura 5.5 ilustra um navio dessa classe.



Figura 5.5 – Ilustração de um navio de classe *Products Tanker*.
Fonte: <https://www.turbosquid.com> - Acessado em 03/05/2019

Open Hatch Cargo: é um navio projetado para transportar produtos de origem florestal, entre outros tipos de carga, podendo também transportar contêineres. A Figura 5.6 ilustra um navio dessa classe.



Figura 5.6 – Ilustração de um navio de classe *Open Hatch Cargo*
Fonte: <https://www.dnvgl.com> - Acessado em 03/05/2019

Bulk Carrier: também conhecido como navio graneleiro, é um navio mercante que possui porões de carga projetados para transportar cargas não embaladas como: grãos em geral, carvão, minério e cimento, entre outros. A Figura 5.7 ilustra um navio dessa classe.



Figura 5.7 – Ilustração de um dos navios de classe *Bulk Carrier*.
Fonte: <https://www.turbosquid.com> - Acessado em 03/05/2019

Vehicle Carrier: são navios especialmente projetados para o transporte de cargas sobre rodas, como: carros, caminhões, caminhões semi-reboques, reboques e vagões ferroviários. A Figura 5.8 ilustra um navio dessa classe.



Figura 5.8 – Ilustração de navio de classe *Vehicle Carrier*.
Fonte: <https://www.turbosquid.com> - Acessado em 03/05/2019

Container Ship: navios de contêineres. São navios capazes de transportar grandes cargas. Não transportam toda a sua carga em contêineres, mas com a maior parte de sua carga embalada. A Figura 5.9 ilustra um navio dessa classe.



Figura 5.9 – Ilustração de um navio de classe *Container Ship*.
Fonte: <https://www.turbosquid.com> - Acessado em 03/05/2019

Os resultados do estudo de McKenna (McKenna *et al.*, 2012), são assinaturas acústicas para cada tipo de navio, mostrando os níveis de ruído subaquático de cada classe. Tais assinaturas podem ser utilizadas para verificar os impactos acústicos na vida marinha. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os espectros dessas sete classes de navios, com as distribuições de frequências em oitava, relacionando a frequência com seu respectivo nível de pressão acústica.

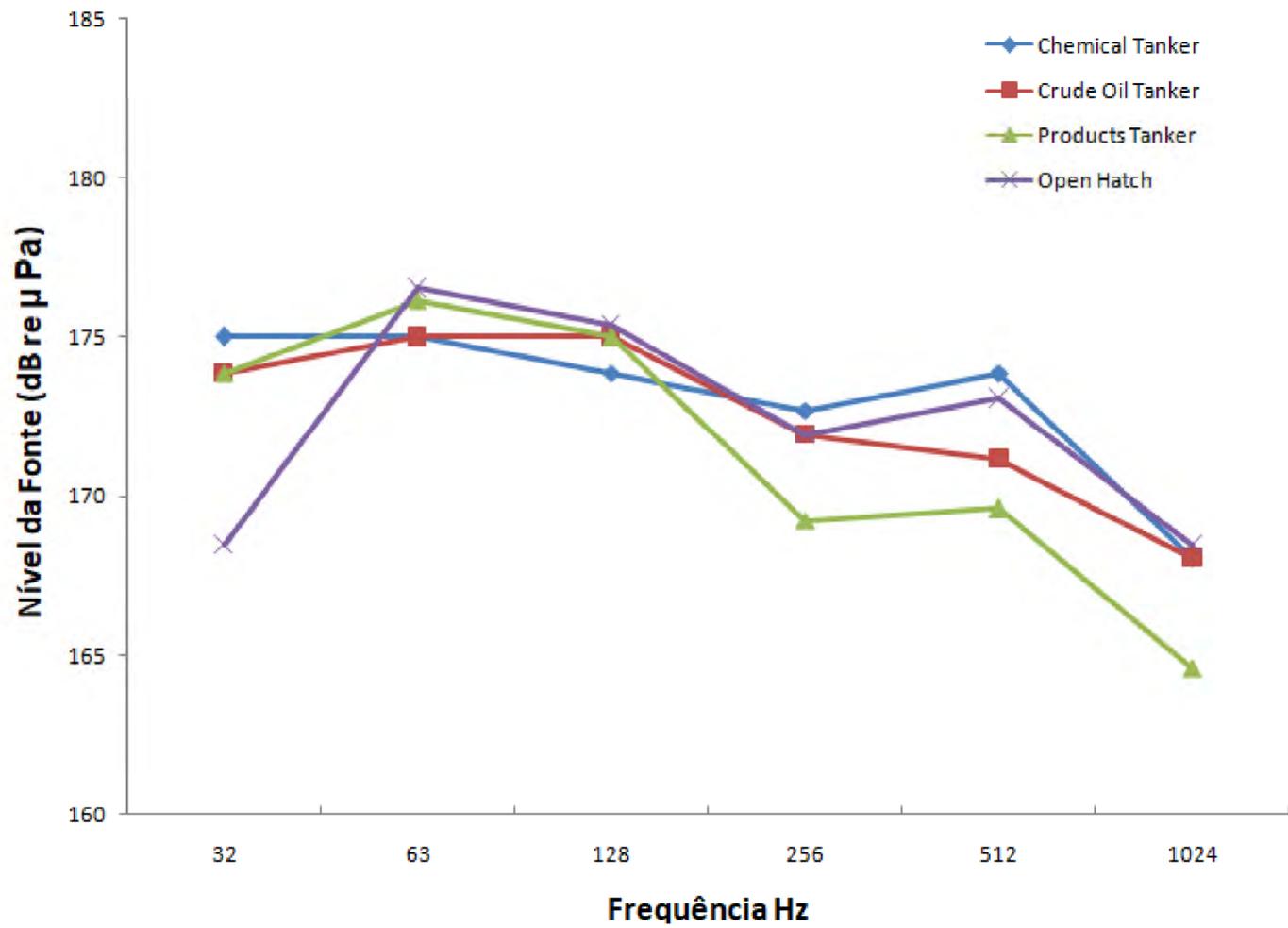


Figura 5.10 – Níveis acústicos e frequências para os navios *Chemical Tanker*, *Crude Oil Tanker*, *Products Tanker* e *Open Hatch* - Adaptado de McKenna *et al.* (McKenna *et al.*, 2012).

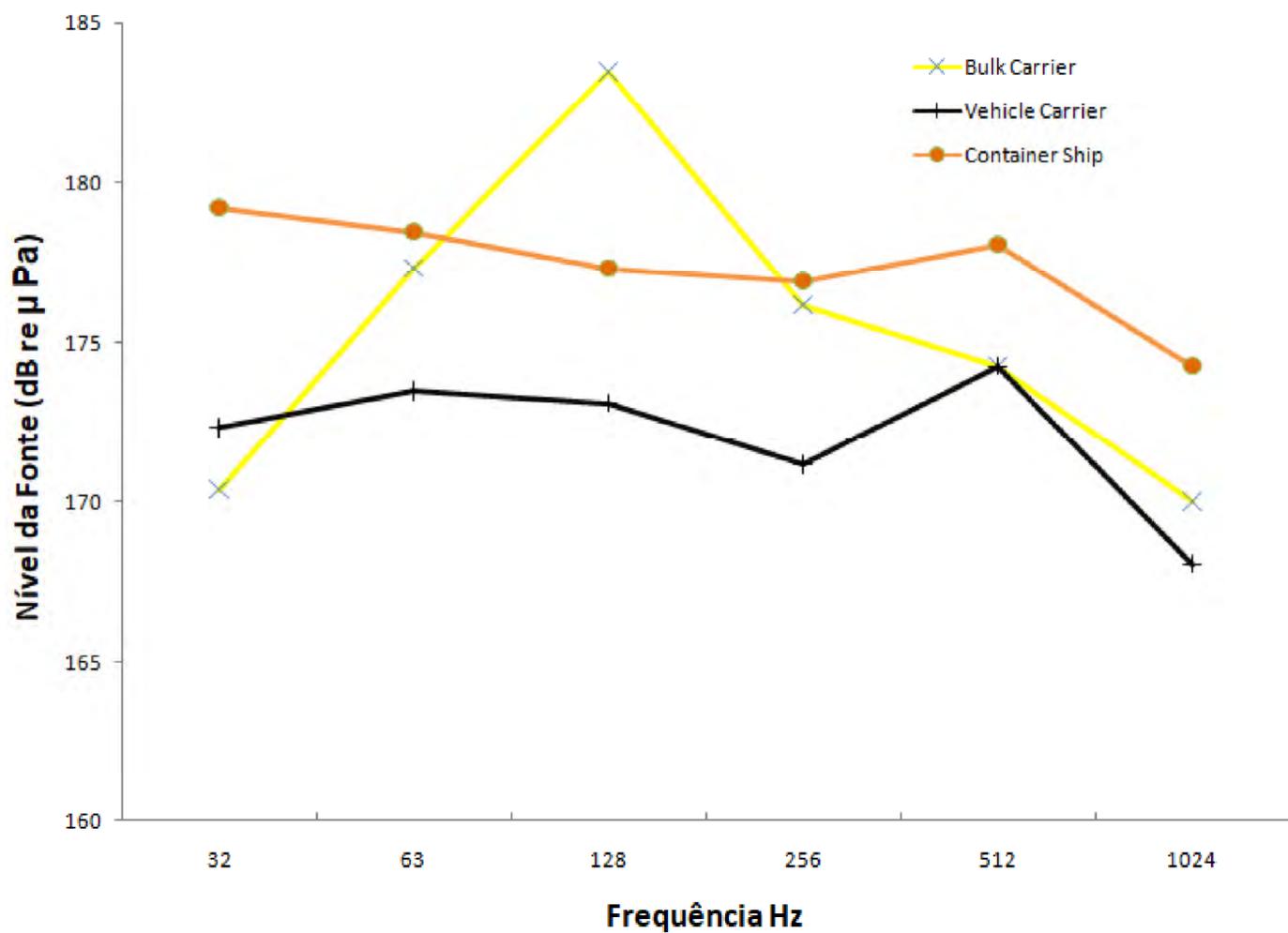


Figura 5.11 – Níveis acústicos e frequências para navios *Bulk Carrier*, *Vehicle Carrier* e *Container Ship* - Adaptado de McKenna (McKenna *et al.*, 2012).

Tabela 5.1 – Níveis de potência acústica e frequências dos navios relacionados nas Figuras 5.10 e 5.11 - Adaptado de McKenna. (McKenna *et al.*, 2012).

Classe do Navio	Frequência -Banda de Oitava (Hz)					
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
<i>Chemical Tanker</i>	175	175	174	173	174	168
<i>Crude Oil Tanker</i>	174	175	175	172	171	168
<i>Products Tanker</i>	174	176	175	169	170	165
<i>Open Hatch</i>	168	177	175	172	173	168
<i>Bulk Carrier</i>	170	177	183	176	174	170
<i>Vehicle Carrier</i>	172	173	173	171	174	168
<i>Container Ship</i>	179	178	177	177	178	174

A partir dos valores dos níveis de pressão acústica apresentados nas Figuras 5.10 e 5.11 e sumarizados na Tabela 5.1, é possível determinar as amplitudes das ondas que compõem o sinal acústico de cada classe de navio aqui considerado. Essas amplitudes são obtidas através da equação (2.14) e aplicadas na equação (2.5) possibilitando a simulação desse sinal em qualquer frequência desejada (Sodré, 2003), inclusive as frequências de vocalização sensíveis aos mysticetos, listadas na Tabela 4.1. Assim, considerando-se que não há deslocamento na posição do sinal em relação ao eixos das abscissas, fazendo $B = 0$ e variando o ângulo de fase θ e as frequências de entrada, a equação que representa esse sinal composto, a partir dos níveis de pressão acústica de uma fonte com banda de oitava, é dada por (Sodré, 2003):

$$f(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \theta) + A_2 \cos(\omega_2 t + \theta) + A_3 \cos(\omega_3 t + \theta) + A_4 \cos(\omega_4 t + \theta) + A_5 \cos(\omega_5 t + \theta) + A_6 \cos(\omega_6 t + \theta) \quad (5.1)$$

onde A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 e A_6 são as amplitudes dos níveis de pressão acústica em banda de oitava, apresentadas na Tabela 5.1; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$ e ω_6 são as frequências angulares determinadas pelas frequências f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 e f_6 , respectivamente; e t o tempo de emissão do sinal. Desta forma, conhecidos os níveis de pressão acústica, a equação (5.1) fornece a entrada para o modelo, representando matematicamente o nível para uma fonte com frequências de banda de oitava.

5.3 Etapas de Solução

Os resultados das simulações serão apresentados na forma de gráficos. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo que foi implementado em *Matlab*[®]. A partir dos resultados será possível analisar o cenário acústico gerado pelas fontes e assim correlacionar os possíveis impactos nos mamíferos marinhos da subordem do mysticetos. A Figura 5.12 apresenta de forma esquemática as etapas de solução.

Esquema de Solução do Modelo

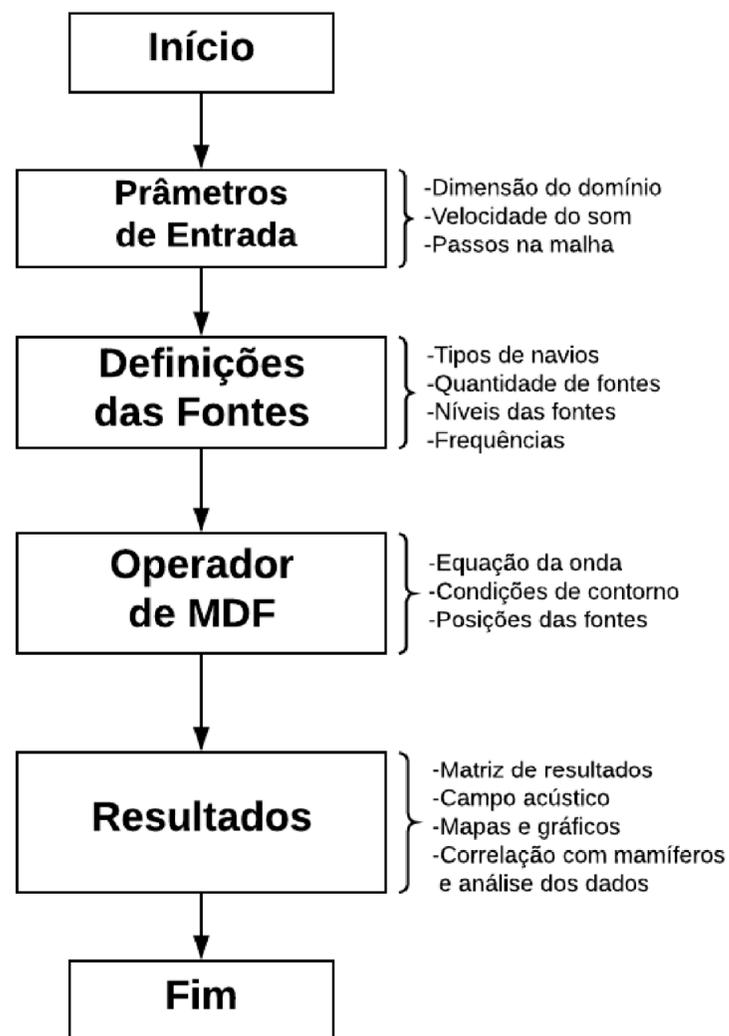


Figura 5.12 – Representação esquemática das etapas de solução do modelo proposto.

No esquema da Figura 5.12, inicia-se o processo com a adoção dos parâmetros de entrada: dimensões do domínio, a velocidade de propagação da onda que pode ser obtida pela equação (2.6) entre outros. O processo segue determinado os tipos de navios assim como os níveis acústicos e frequência para cada tipo. Feito isso, determina-se o número de fontes para a simulação. A etapa seguinte consiste na simulação propriamente dita. Com base na equação da onda e nas condições de contorno. Por fim, obtém-se resultados gráficos, mapas do campo acústico que serão correlacionados com os dados de vocalização.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primieramente, vale lembrar que o critério adotado para a escolha das dimensões tem como objetivo cobrir uma região com até 1000 metros de raio com relação as fontes, visto que, estas dimensões estão relacionadas as faixas de distâncias críticas que podem causar efeitos como perda de audição temporária (TTS), perdas de audição permanente (PTS) além de outros efeitos como estresse, mudança de comportamento, colisão com embarcações, encalhes, e os possíveis danos fisiológicos descritos na seção 4.3 (Erbe *et al*, 2000).

As simulações foram feitas em três etapas onde foram considerados os casos extremos dentre as possibilidades de simulação permitidas pelo modelo. A primeira simulação consiste na propagação acústica do navio menos ruidoso (segundo a Tabela 5.1) e sua relação com todas as espécies de baleias consideradas nesse trabalho (ver Tabela 4.1) através das faixas de frequências sensíveis a elas. Já a segunda simulação, apresenta a propagação do navio mais ruidoso e sua relação com a baleia mais sensível. Por fim, a terceira simulação, é feita com as assinaturas acústicas dos navios de forma que esses emitam sinais nas mesmas faixas de frequências das baleias. Esse último é considerado o pior caso, pois dessa forma, os ruídos serão perceptíveis a todas baleias.

6.1 Simulações para Frequências com Banda de Oitava

As simulações seguintes foram realizadas considerando as fontes acústicas das sete classes de navios listadas na Tabela 5.1 com os níveis de pressão representados por A_1 até A_6 em banda de frequência de oitava onde cada nível de pressão acústica está associado à sua respectiva frequência $f_1 = 32$, $f_2 = 64$, $f_3 = 128$, $f_4 = 256$, $f_5 = 512$ e $f_6 = 1024$. A partir de f_1 até f_6 é possível determinar as frequências angulares ω_1 até ω_6 através da equação (2.2). A representação de cada fonte é obtida pela equação (5.1). Em todas as simulações a velocidade de propagação adotada foi de 1500 *m/s* por considerar-se um meio homogêneo sem variação de temperatura e densidade. Os resultados são gráficos representativos do nível de pressão acústica na região considerada, as seções transversais que representam a distribuição dos níveis acústicos ao longo da distância em uma determinada profundidade e os espectros dos sinais que relacionam as frequências e intensidades das fontes com as frequências e intensidades dos animais marinhos.

6.1.1 Simulação 1: Classe de Navios *Products Tanker* e Vocalização de Todas as Baleias

Para esta primeira simulação, foi selecionada apenas uma classe de navio considerando a fonte que apresenta os menores valores e variação de pressão acústica. O objetivo é observar o comportamento da propagação acústica assim como se esse sinal pode ser sensível as baleias consideradas neste trabalho. De acordo com a Figura 5.10 e a Tabela 5.1, verifica-se que ao se comparar todas as classes de navio, a classe dos *Product Tanker*, apresentou os menores valores de pressão acústica. E ainda, os níveis de pressão acústica $A_1 = 147$, $A_2 = 176$, $A_3 = 175$, $A_4 = 169$, $A_5 = 170$ e $A_6 = 165$ em banda de oitava conforme Tabela 5.1. Desta forma, a partir dos dados dos níveis acústicos e das frequências

em banda de oitava, a expressão matemática que representa a fonte do navio *Products Tanker* é dada pela equação (6.1):

$$f(t_{PT}) = 174 \cos(\omega_1 t + \theta) + 176 \cos(\omega_2 t + \theta) + 175 \cos(\omega_3 t + \theta) + \\ + 169 \cos(\omega_4 t + \theta) + 170 \cos(\omega_5 t + \theta) + 165 \cos(\omega_6 t + \theta) \quad (6.1)$$

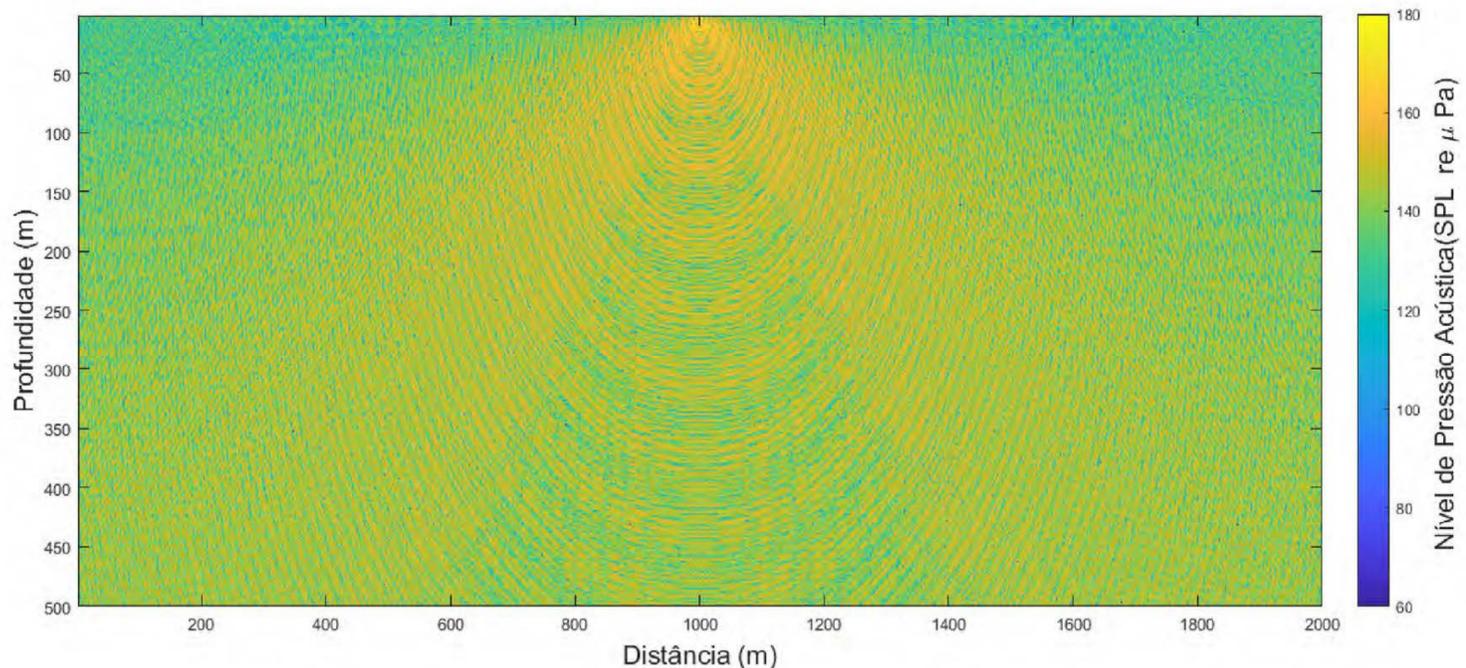


Figura 6.1 – Representação do campo acústico para a simulação dos níveis de ruídos gerados pelo navio de classe *Products Tanker*.

O campo acústico da simulação de propagação da fonte com as características acústicas dos navios de classe *Products Tanker* é representado na Figura 6.1. A fonte foi posicionada considerando-se suas coordenadas na malha em relação a origem⁵ 1000 m de distância com 5 metros de profundidade. Deste modo, é possível obter-se uma ideia geométrica da distância em que um animal marinho pode circular em torno das fontes, em segurança. A simulação mostrou variações de pressão acústica na faixa de 60 a 180 *dB*. Estes níveis sonoros são suficientes para a ocorrência de danos físicos ou estresse nos animais, observando-se que estes devem estar a distâncias próximas de 200, 450 e 1000 metros para que ocorram efeitos como TTS ou PTS (a depender do tempo de exposição e da intensidade da fonte), entre outros efeitos discutidos na seção 4.3.

⁵ A origem se dá no ponto [0,0] do contorno superior do domínio, sendo a primeira coordenada referente à distância e a segunda, à profundidade.

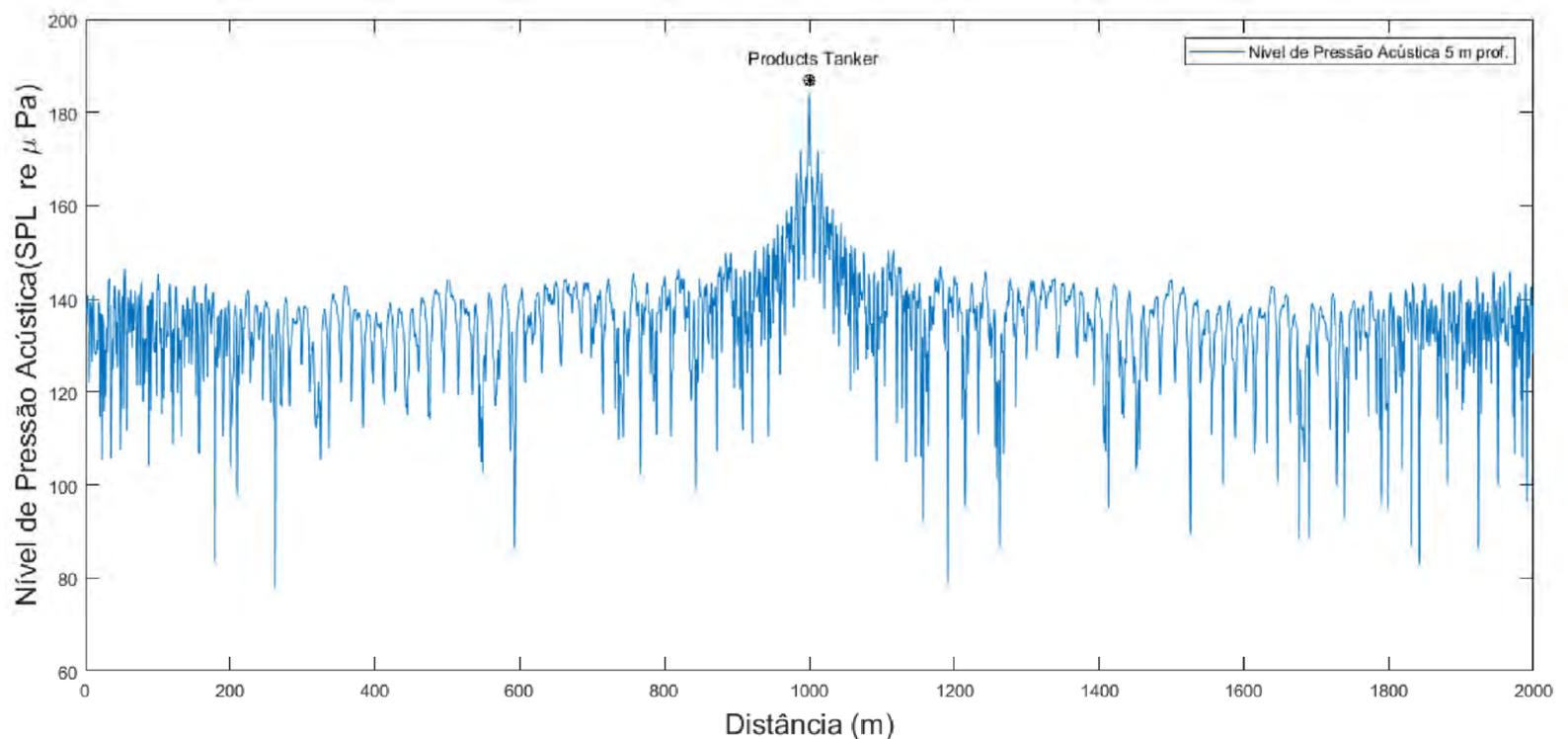


Figura 6.2 – Seção transversal da variação dos níveis de propagação de ruídos gerados pelo navio de classe *Products Tanker*.

A Figura 6.2 mostra a variação dos níveis de propagação de ruídos em uma seção transversal ao longo da região considerada. Essa seção foi realizada na profundidade de 5 metros (mesma profundidade das fontes). Observa-se que os maiores níveis de ruídos estão presentes nas regiões próximas as fontes e que vão reduzindo conforme se afastam das mesmas. O modelo permite obter seções em outras profundidades de forma a avaliar o nível de pressão acústica em qualquer posição que os animais marinhos estejam.

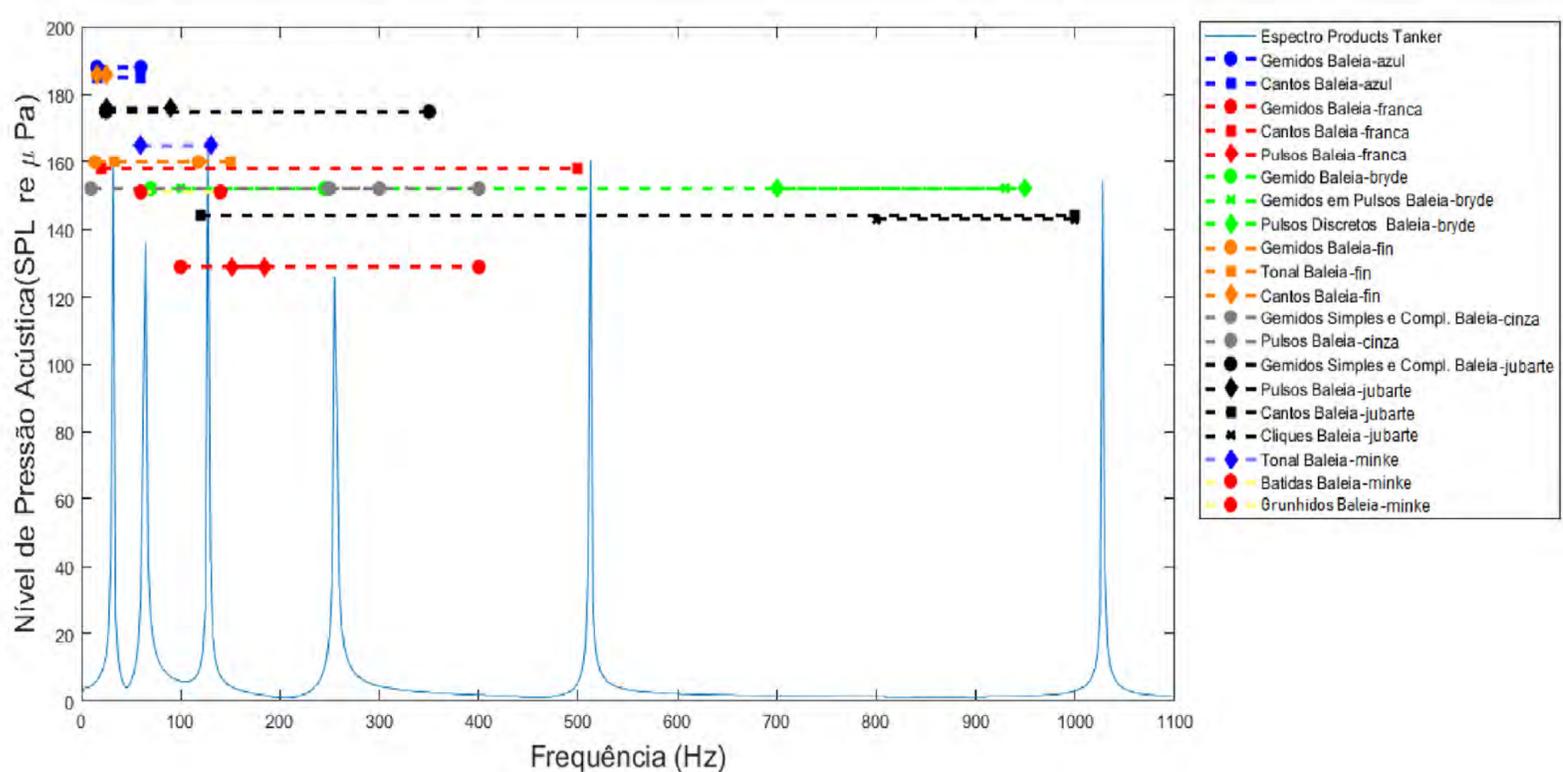


Figura 6.3 – Espectro do sinal acústico para a classe de navios *Products Tanker* e faixas de frequência de vocalização dos mysticetos.

A Figura 6.3 mostra o espectro do sinal da fonte utilizada nesta simulação. Este espectro indica a relação dos níveis de pressão acústica em sua potência máxima com

suas respectivas frequências. Estes valores foram obtidos aplicando-se a Transformada de Fourier, dada na equação (2.17) no sinal da fonte do navio *Products Tanker* equação (6.1). Esse espectro pode ser correlacionado com as frequências e potências de vocalização dos mysticetos listados na Tabela 4.1. Por exemplo, segundo dados da Tabela 4.1, a Baleia-franca (retas em vermelho) emite seus gemidos com faixa de frequência dominante de 100 a 400 *Hz* na potência 129 até 178 *dB*. Caso uma baleia dessa espécie esteja circulando na região considerada por esta simulação, os sinais das fontes poderiam interferir em seu gemido nas frequências 128 e 256 *Hz* caso essa baleia emitisse um gemido com 129 *dB* de potência. Analogamente, o espectro deste sinal faz interferências com as faixas de limites de frequências e suas respectivas vocalizações das demais baleias consideradas nesse trabalho. Nota-se que estariam fora das faixas de frequências os gemidos, pulsos e cliques da Baleia-jubarte, gemidos e cantos da Baleia-azul e canto da Baleia-fin.

6.1.2 Simulação 2: Todas de Classe de Navios e com Vocalização da Baleia-jubarte

Nesta simulação, foram consideradas as fontes de todas as classes de navios e suas respectivas variações de pressão acústica em banda de oitava. O objetivo é observar o comportamento da propagação dessas fontes e como esses sinais podem ser sensíveis a uma única baleia. O critério para a seleção da baleia para esta simulação, leva em conta a maior variação de faixa de frequência assim como o maior número de vocalizações que esta baleia é capaz de emitir. Desta forma, de acordo com a Tabela 4.1, a baleia que melhor se enquadra nesse critério é a Baleia-jubarte. Assim, particularizando-se as frequências para esta situação, chega-se as equações (6.1) a (6.7):

$$f(t_{CT}) = 175 \cos(\omega_1 t + \theta) + 175 \cos(\omega_2 t + \theta) + 174 \cos(\omega_3 t + \theta) + \\ + 173 \cos(\omega_4 t + \theta) + 174 \cos(\omega_5 t + \theta) + 168 \cos(\omega_6 t + \theta) \quad (6.2)$$

$$f(t_{COT}) = 174 \cos(\omega_1 t + \theta) + 175 \cos(\omega_2 t + \theta) + 175 \cos(\omega_3 t + \theta) + \\ + 172 \cos(\omega_4 t + \theta) + 171 \cos(\omega_5 t + \theta) + 168 \cos(\omega_6 t + \theta) \quad (6.3)$$

$$f(t_{CS}) = 179 \cos(\omega_1 t + \theta) + 178 \cos(\omega_2 t + \theta) + 177 \cos(\omega_3 t + \theta) + \\ + 177 \cos(\omega_4 t + \theta) + 178 \cos(\omega_5 t + \theta) + 174 \cos(\omega_6 t + \theta) \quad (6.4)$$

$$f(t_{VC}) = 172 \cos(\omega_1 t + \theta) + 173 \cos(\omega_2 t + \theta) + 173 \cos(\omega_3 t + \theta) + \\ + 171 \cos(\omega_4 t + \theta) + 174 \cos(\omega_5 t + \theta) + 168 \cos(\omega_6 t + \theta) \quad (6.5)$$

$$f(t_{BC}) = 170 \cos(\omega_1 t + \theta) + 177 \cos(\omega_2 t + \theta) + 183 \cos(\omega_3 t + \theta) + \\ + 176 \cos(\omega_4 t + \theta) + 174 \cos(\omega_5 t + \theta) + 170 \cos(\omega_6 t + \theta) \quad (6.6)$$

$$f(t_{OH}) = 168 \cos(\omega_1 t + \theta) + 177 \cos(\omega_2 t + \theta) + 175 \cos(\omega_3 t + \theta) +$$

$$+ 172 \cos(\omega_4 t + \theta) + 171 \cos(\omega_5 t + \theta) + 168 \cos(\omega_6 t + \theta) \quad (6.7)$$

A equação (6.2) corresponde aos navios de classe *Chemical Tanker*; a equação (6.3) corresponde aos navios de classe *Crude Oil Tanker*; a equação (6.4) corresponde aos navios de classe *Container Ship*; a equação (6.5) corresponde aos navios de classe *Vehicle Carrier*; a equação (6.6) corresponde aos navios de classe *Bulkie Carrier* e a equação (6.7) corresponde aos navios de classe *Open Hacth*.

O campo acústico da simulação de propagação da fonte com as características acústicas dos navios de classe *Products Tanker* é representado na Figura (6.4). Todas as fontes estão com 5 metros de profundidade e distam entre si 250 metros tendo seu ponto inicial com 250 metros em relação a origem.

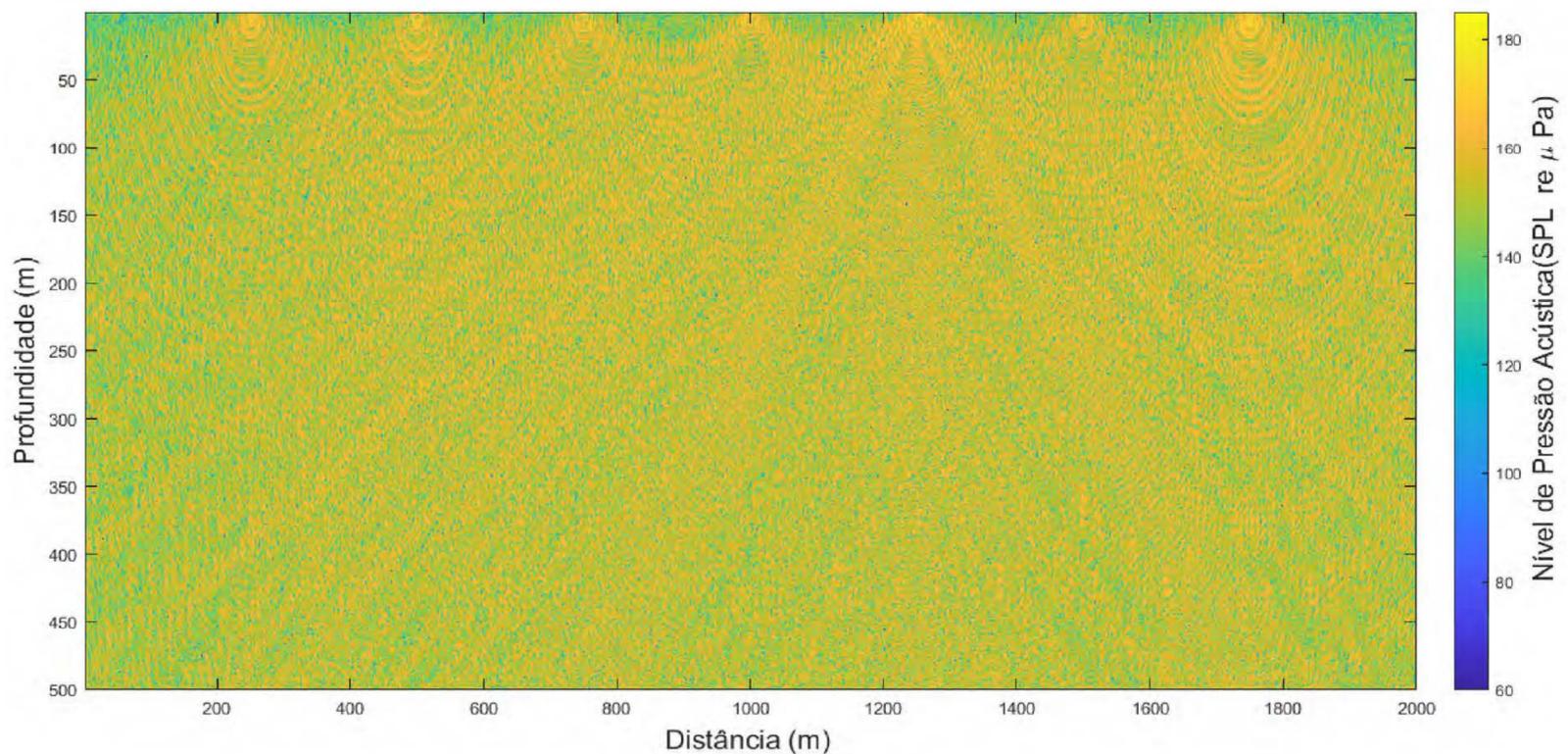


Figura 6.4 – Campo acústico da simulação dos níveis de propagação de ruídos gerados por todas as classes de navios.

A Figura 6.5 mostra a seção transversal da variação dos níveis de pressão acústica em 5 metros de profundidade, assim como as posições de cada fonte.

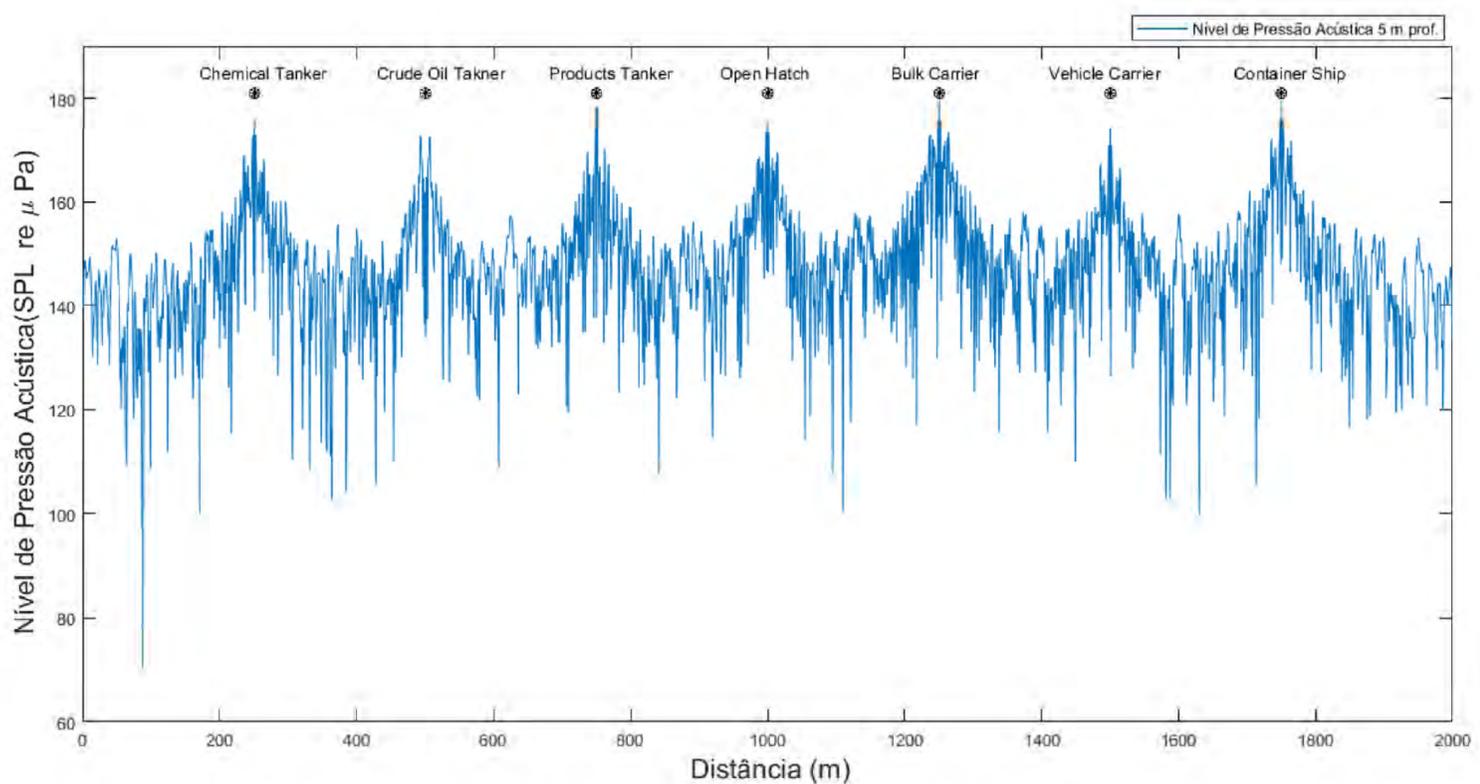


Figura 6.5 – Seção transversal da variação dos níveis de ruídos gerados por todas as classes de navios.

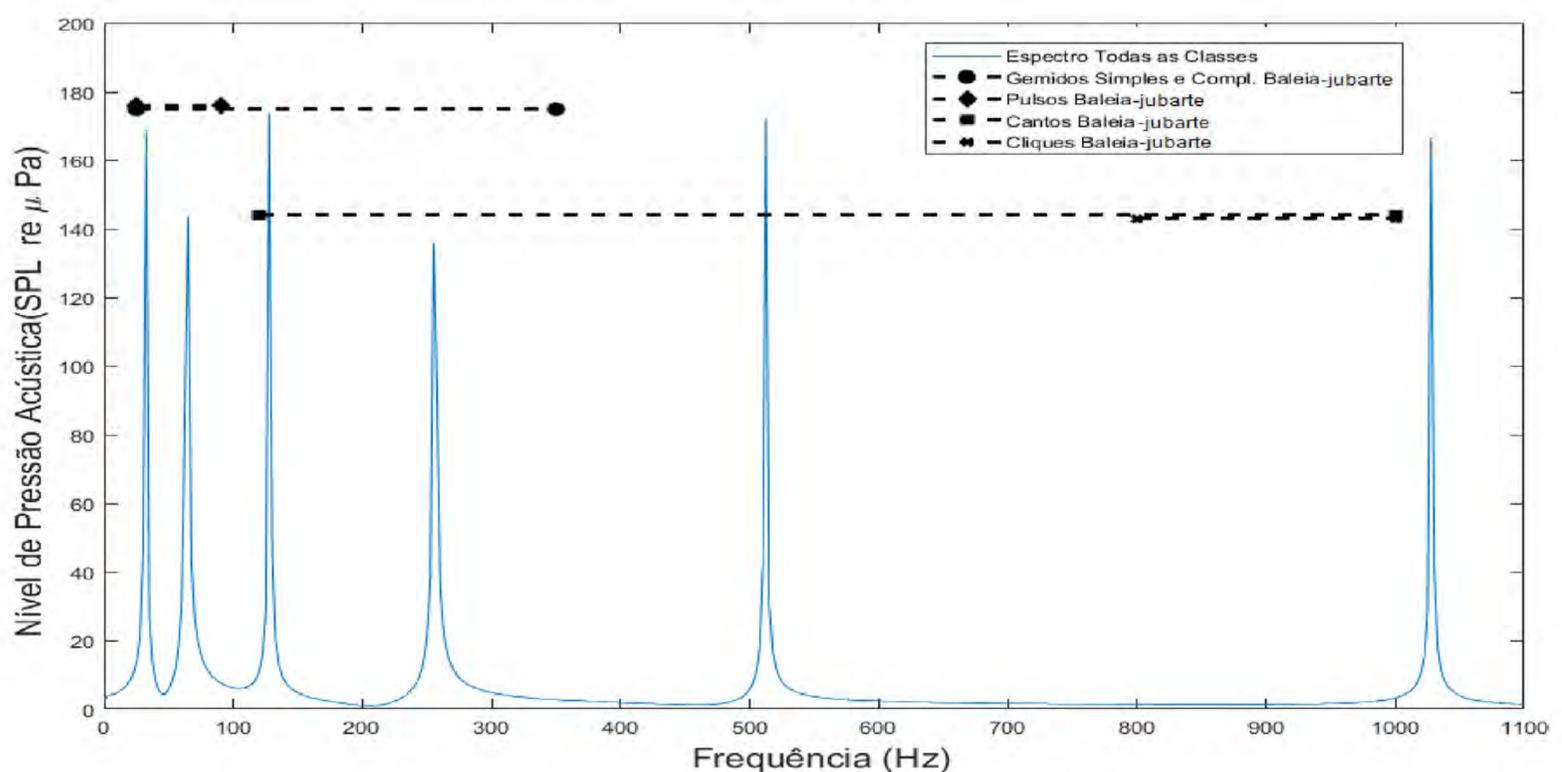


Figura 6.6 – Espectro dos sinais das fontes de todas as classes de navios e faixas de frequências sensíveis às vocalizações da Baleia-jubarte.

A Figura 6.6 mostra o espectro do sinal da fonte utilizada nesta simulação. Este espectro indica a relação dos níveis de pressão acústica em sua potência máxima com suas respectivas frequências de todas as fontes dadas pelas equações (6.1) a (6.7). Foi obtido aplicando-se a Transformada de Fourier, dada na equação (2.17) na soma desses sinais. Note que, como as frequências dos sinais estão todas em banda de oitava, não há variação de frequência entre os espectros dos navios.

Nesta caso como foi considerada apenas a Baleia-jubarte, os sinais de todas as classes é sensível ao cantos da Baleia-jubarte nas frequências 128 e 512 Hz . Vale a pena

destacar que, se houver aumento em torno de 5 ou 10 dB , estes sinais se tornam mais suscetíveis de interferir nos gemidos e pulsos dessa baleia. Nota-se também que as frequências e emissão do clique desta baleia não foram afetadas devido a pouca variação de frequência deste sinal que, neste caso não apresenta valores consideráveis. Isso mostra que quanto maior a variação de frequência que um sinal pode emitir, maior será a probabilidade de ser sensível as vocalizações destas baleias.

6.2 Simulações da Propagação Acústica das Fontes de Todas as Classes de Navios com as Frequências de Vocalização dos Mysticetos

As simulações anteriores consideram apenas as frequências em banda de oitava, ou seja, em todos os casos os níveis de pressão acústica estavam associados a seis diferentes frequências correspondentes à banda de oitava. O objetivo desta nova simulação é obter uma variedade de faixas de frequências para verificar o quanto a variação de frequências pode tornar os sinais mais sensíveis aos animais marinhos. Devido as potências sonoras das assinaturas acústicas das classes de navios e, levando-se em conta as variações das frequências de vocalização dos mysticetos, essa simulação pode ser considerada como pior caso.

Para este caso, as simulações foram realizadas adotando-se as fontes de todas as classes de navios listadas na Tabela 5.1 mantendo os níveis de pressão acústica de cada uma delas. A geometria considerada no modelo foi conservada, assim como a velocidade do som. A diferença do experimento consiste basicamente nas frequências utilizadas para compor as equações (6.1) a (6.7) referentes aos sinais das classes de navios que, para esta simulação, assumiram os valores limites das frequências dominantes de cada espécie de mysticetos listadas na Tabela 4.1.

Por exemplo, para compor um sinal de uma das fontes de classes de navios a partir dos limites de frequências dominantes de vocalização da Baleia-bryde, com faixas 124 a Hz para gemidos, 165 a 900 para gemidos em pulsos e 700 a 950 Hz para pulsos discretos, o sinal será constituído por $f_1 = 124$, $f_2 = 132$, $f_3 = 165$, $f_4 = 700$, $f_5 = 900$ e $f_6 = 950$, conservando-se os níveis de pressão acústica do navio de classe *Products Tanker*.

1. Para a equação (6.2) correspondente ao sinal da classe de navios *Chemical Tanker* foram adotadas as frequências dominantes $f_1 = 11$, $f_2 = 16$, $f_3 = 25$, $f_4 = 60$, $f_5 = 200$ e $f_6 = 1028$, referentes à Baleia-azul.
2. Para a equação (6.3) correspondente ao sinal da classe de navios *Cude Oil Tanker* foram adotadas as frequências dominantes $f_1 = 20$, $f_2 = 25$, $f_3 = 100$, $f_4 = 185$, $f_5 = 400$ e $f_6 = 900$, referentes à Baleia-franca.
3. Para a equação (6.1) correspondente ao sinal da classe de navios *Products Tanker* foram adotadas as frequências dominantes $f_1 = 70$, $f_2 = 100$, $f_3 = 132$, $f_4 = 245$, $f_5 = 700$ e $f_6 = 900$, referentes à Baleia-bryde.
4. Para a equação (6.4) correspondente ao sinal da classe de navios *Container Ship* foram adotadas as frequências dominantes $f_1 = 60$, $f_2 = 100$, $f_3 = 130$, $f_4 = 140$, $f_5 = 200$ e $f_6 = 1024$, referentes à Baleia-minke.
5. Para a equação (6.5) correspondente ao sinal da classe de navios *Vehicle Carrier* foram adotadas as frequências dominantes $f_1 = 100$, $f_2 = 125$, $f_3 = 150$, $f_4 = 250$, $f_5 = 300$ e $f_6 = 600$, referentes à Baleia-jubarte.

6. Para a equação (6.6) correspondente ao sinal da classe de navios *Bulk Carrier* foram adotadas as frequências dominantes $f_1 = 24$, $f_2 = 25$, $f_3 = 34$, $f_4 = 100$, $f_5 = 150$ e $f_6 = 1028$, referentes à Baleia-cinza.
7. Para a equação (6.7) correspondente ao sinal da classe de navios *Open Hatch* foram adotadas as frequências dominantes $f_1 = 14$, $f_2 = 34$, $f_3 = 118$, $f_4 = 150$, $f_5 = 512$ e $f_6 = 1028$, referentes à Baleia-fin.

6.2.1 Simulação da Propagação Acústica das Fontes de todas as Classe de Navios e Frequências dos Mysticetos

Observa-se que o experimento também apresentou uma boa abrangência do ruído, como pode ser observado na Figura 6.7. Desta forma, os animais marinhos que estiverem nessa região serão atingidos pelos ruídos em uma faixa de 60 a 185 dB , aproximadamente. A Figura 6.8 mostra a seção transversal da variação dos níveis de pressão acústica a 5 metros de profundidade, assim como as posições de cada fonte.

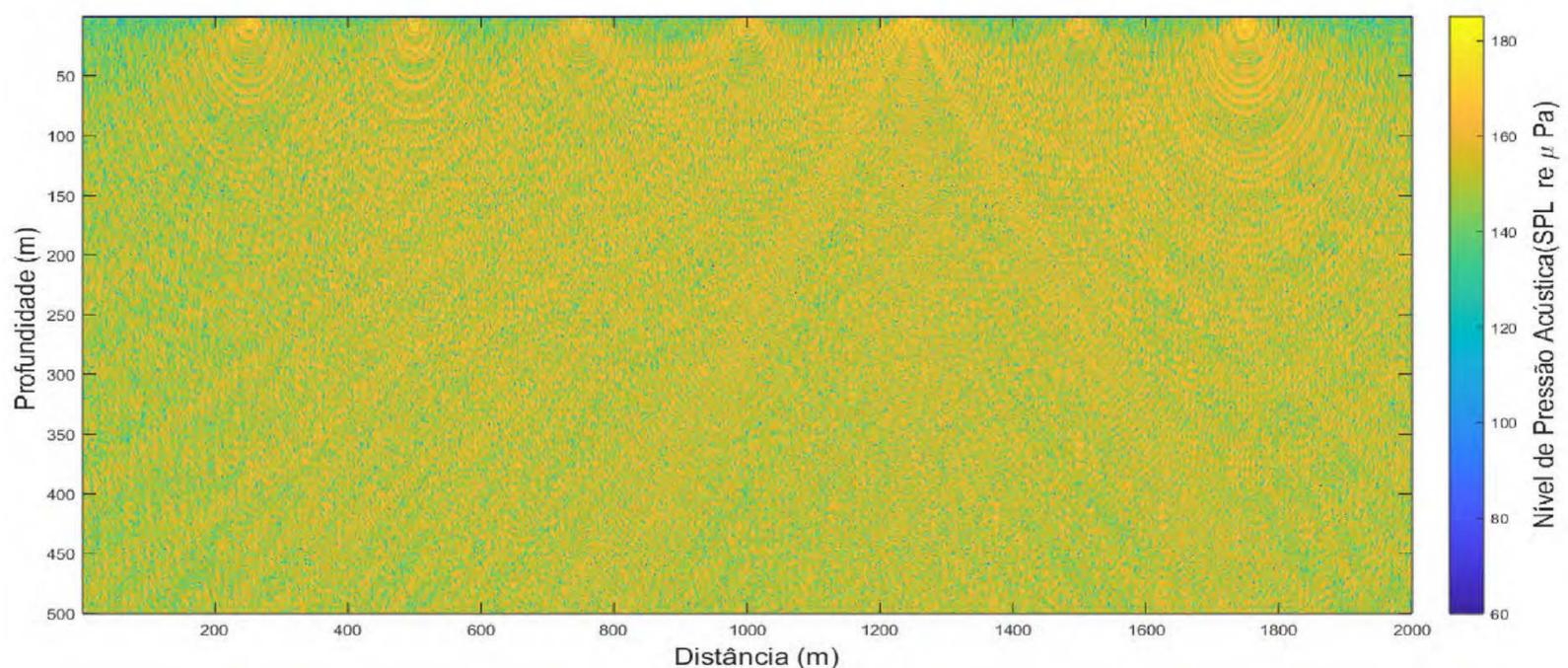


Figura 6.7 – Campo acústico da simulação dos níveis de propagação de ruídos gerados por todas as classes de navios com fontes com as mesmas frequências de vocalização dos mysticetos 4.1.

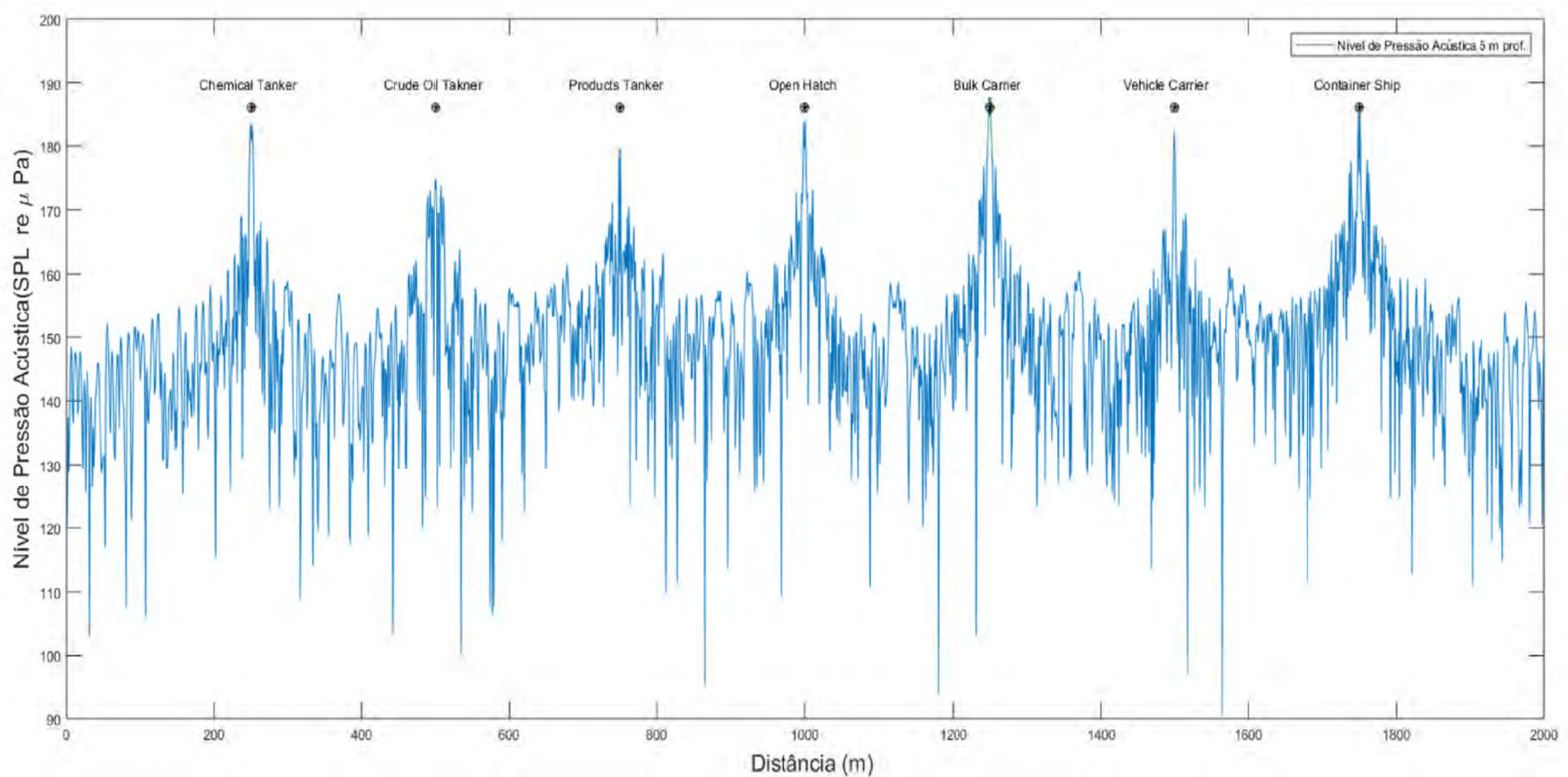


Figura 6.8 – Seção transversal da variação dos níveis de ruídos gerados por todas as classes de navio com as frequências dos mysticetos.

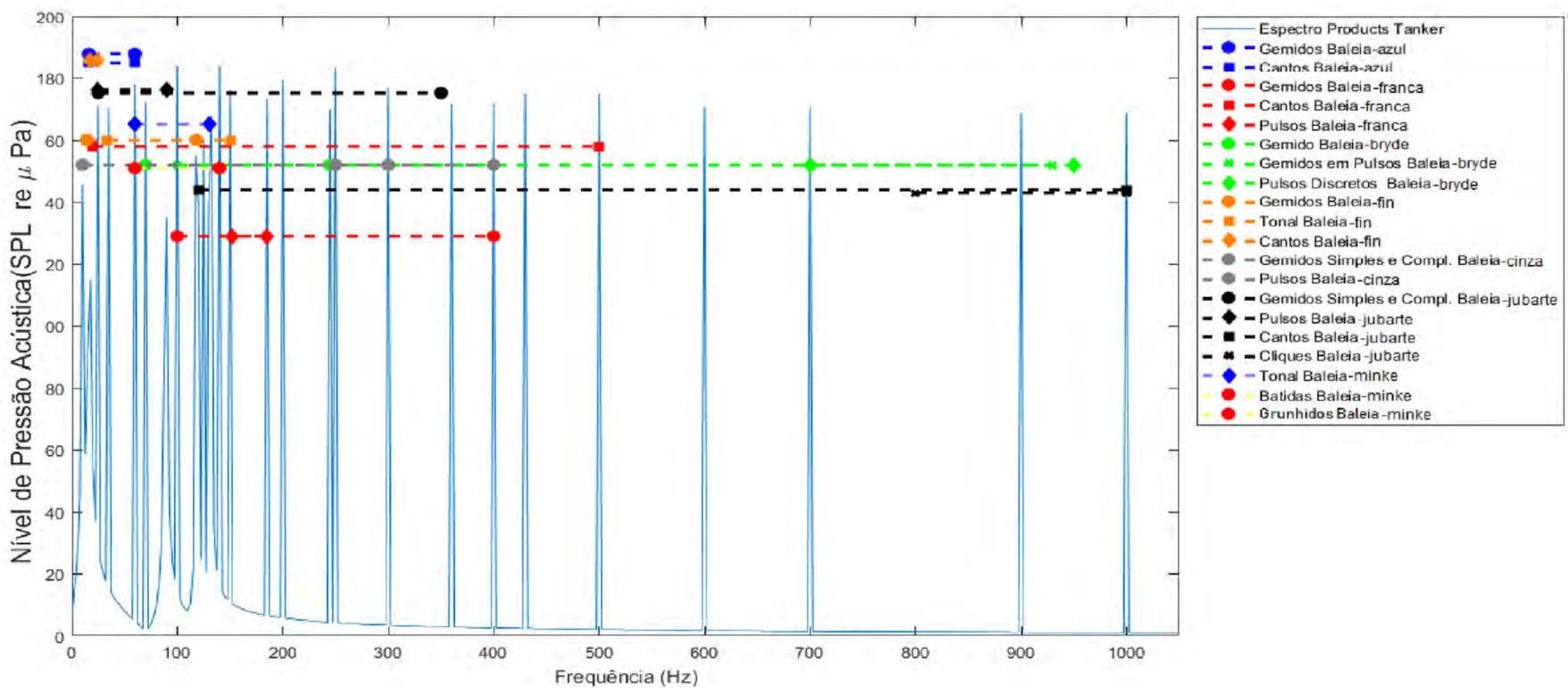


Figura 6.9 – Espectro dos sinais das fontes dos navios e faixas de frequência de vocalização dos mysticetos considerados neste trabalho.

A Figura 6.9 mostra o espectro relacionando os níveis de pressão acústica em sua potência máxima e as respectivas frequências de todos os sinais aplicados nesta simulação. Esse espectro se destaca dos anteriores, apresentados nas Figuras 6.3 e 6.6, pois, nesse caso, foi considerada uma variedade de frequências maior que nos demais experimentos. Nas simulações das seções 6.1.1 e 6.1.2, foram realizados testes apenas com as frequências de 32, 64, 128, 256, 512 e 1028 Hz , o que levou a pouca variação entre seus espectros, sendo sensíveis apenas a seis faixas de frequências dominantes das Baleias-franca, Baleias-bryde, -Baleiasminke, Baleias-fin e Baleiasjubarte. Já o espectro dos sinais desta simulação,

apresentado na Figura 6.9 mostra resultados sensíveis às doze formas de vocalização das espécies de misticetos listados na Tabela 4.1.

Esta simulação mostra que quanto maior a variação de frequências emitidas pelas fontes, maior será a probabilidade de afetar a vida desses animais. Mostra também que estes sinais podem causar maiores interferências em espécies de misticetos que vocalizam com frequências menores que 500 Hz . Os gemidos e cantos da Baleia-azul, assim como os cantos da Baleia-fin, foram as únicas vocalizações que não se apresentaram sensíveis aos ruídos.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interferência humana no ambiente marinho vem causando um aumento significativo no nível de ruído dos oceanos. Levantando-se em contas as preocupações quanto ao seu impacto na vida marinha local, em especial a dos mamíferos marinhos, por dependerem do som como forma de sobrevivência, este estudo justifica-se, principalmente quando o tráfego naval é considerado o principal contribuinte na escala global em poluição sonora submarina.

Tendo-se em vista os fatores que contribuem com a poluição sonora submarina, no presente trabalho foram abordadas técnicas de modelagem matemática para simulação da propagação da onda acústica em duas dimensões a fim de permitir uma avaliação dos possíveis impactos ambientais provenientes desses ruídos. O trabalho tratou particularmente da influência da poluição sonora na vida de algumas espécies de mamíferos marinhos classificados como mysticetos que é uma das subordem de cetáceos, que são extremamente dependentes do som.

Através do MDF, foi possível solucionar as equações provenientes de um modelo, construído a partir da equação da onda. Tal solução, foi tomada em uma região sintética, capaz de posicionar as fontes sonoras e assim simular sua propagação acústica. Desta forma, a partir dos resultados gerados pelas simulações e considerando-se os dados característicos das fontes acústicas e das vocalizações de algumas espécies de mysticetos, foi possível simular a propagação acústica dessas fontes e assim analisar os efeitos na vida dos mysticetos.

O possível aumento dos ruídos dos oceanos, sobretudo os ruídos gerados pelas atividades antropogênicas, com a evolução das atividades produtivas, justifica o desenvolvimento de pesquisas científicas voltadas para estratégias de controle da poluição sonora nos oceanos e avaliação de seu impacto na natureza. O presente trabalho está em sintonia com tais objetivos.

Como sugestões para trabalhos futuros, pretende-se outras abordagens de forma a:

- estender o estudo aplicando a metodologia a outras espécies de mysticetos, assim como de odontocetos;
- ampliar a quantidade de fontes e classes de navios de forma a melhor representar a situação real;
- incluir camadas no modelo, de forma que a velocidade possa variar de acordo com a profundidade e a variação de temperatura e de salinidade;
- identificar mudanças de rotas de migração desses animais marinhos e verificar se existe alguma relação com a poluição sonora gerada pelas ações antropogênicas;
- incluir no modelo os ruídos naturais gerados pelas fontes de ruído ambiental como: vento, chuva, raios, ondas do mar, etc;
- utilização de malhas não regulares para o método elementos finitos, com a finalidade de obter uma região de estudo mais parecida com o leito marinho.

8 BIBLIOGRAFIA

- Alford, R. M., Kelly, K. R. & Boore, D. M. Accuracy of Finite-difference Modeling of the Acoustic Wave Equation. *Geophysics*. N.6, v.39, p.834-842, 1974.
- Au, W. W. L. & Hastings, M. C. *Principles of marine bioacoustics*. 1st Edition, Springer, 2008.
- Azevedo, F. S. *Modelo de competição de Lotka-Volterra com difusão aplicado a fragmentos de florestas bidimensionais*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008.
- Barbosa, A. A. S. *Modelagem matemática*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará (UFPA), 2012.
- Bassanezi, R. C. *Equações diferenciais ordinárias-Um curso introdutório*. 1ª Edição, Coleção BC&T, Editora UNICAMP, 2012.
- Beerends, R. J., Morsche, H. G., van den Berg, J. C. & van de Vrie, E. M. *Fourier and Laplace transforms*. 1st Edition, Cambridge, 2003.
- Bjorno, L. Features of underwater acoustics from Aristotle to our time. *Acoust. Phys.* N. 1, v.49, p.24-30, 2003.
- Burden, R. L. & Faires, J. D. *Análise numérica*. 8ª Edição, Cengage Learning, 2007.
- Cerjan, C., Kosloff, D., Kosloff, R. & Reshef, M. A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations. *Geophysics*. N.4, V.50, p.705-708, 1985.
- Clark, C. W. Acoustic behavior of mysticete whales. *Sensory Abilities of Cetaceans*. V. 196. P.571-583, 1990.
- Coates, R. *Seiche Technical Education: The Sonar Course*. 1st Edition, Seiche, 2001.
- Cohen, G. & Joly, P. Fourth order schemes for the heterogeneous acoustics equation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. N. 1-3, v.80, p.397-407, 1990.
- Costa E. S., Ester N. M. & Borges, M. M. A. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. 6ª Edição, LTC, 2009.
- Debnath, L. & Bhatta, D. *Integral transforms and their applications*. 2nd Edition, Chapman and Hall/CRC, 2006.
- Dennis, G. Z. *Equações Diferenciais com aplicações em modelagem*. 2ª Edição, Cengage Learning, 2011.
- Dias, A. L. M. O movimento da matemática moderna: uma rede internacional científica-pedagógica no período da Guerra Fria. *Jornadas Latino-Americanas de Estudos Sociais das Ciências e das Tecnologias*. V.1, p.1-22, 2008.
- Duffy, D. J. *Finite Difference methods in financial engineering: a Partial Differential Equation approach*. 1st Edition, John Wiley & Sons, 2013.
- Engel, M. H., Marcondes, M. C. C., Martins, C. C. A., Luna, F. O., Lima, R. P. & Campos, A. Are Seismic Surveys Responsible for Cetacean Strandings? An Unusual Mortality of Adult Humpback Whales in Abrolhos Bank, Northeastern Coast of Brazil. *Proceedings of 56st International Whaling Commission*. V.28, p.1091-1116, 2004.
- Erbe, C. *Underwater acoustics: noise and the effects on marine mammals*. 3rd Edition, JASCO, 2011.

- Erbe, C. Underwater noise of Whale-watching Boats and Potential Effects on Killer Whales (*Orcinus Orca*), Based on an Acoustic Impact Model. *Marine Mammal Science*. N.2, V.18, p.394-4018, 2002.
- Erbe, C. & Farmer, D. M. A Software Model to Estimate Zones of Impact on Marine Mammals Around Anthropogenic Noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. N.3, v.108, p.1327-1331, 2000a.
- Erbe, C. & Farmer, D. M. Zones of Impact Around Icebreakers Affecting Beluga Whales in the Beaufort Sea. *The Journal of the Acoustical Society of America* . N.3, V.108, p.1332-1340, 2000b.
- Fernandes M., A., O. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília: Senado Federal, 1988.
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B. & Schmidt, H. *Computational Ocean Acoustics*. 2nd Edition, Springer Science Business Media, 2011.
- Graff, K. F. *Wave Motion in Elastic Solids*. 1st Edition, Dover Publications, 1975.
- Halliday, D., Resnik, R. & Walker, J. *Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica*. 2ª Edição, LTC, 2009.
- Hayt Jr, W. H. & Buck, J. A. *Eletromagnetismo*. 1ª Edição, Bookman Editora, 2013.
- Iório, R. & Magalhães I. V. *Equações diferenciais parciais: uma introdução*. 3ª Edição, SBM, 1988.
- Iório, V. *EDP, Um Curso de Graduação*. 2ª Edição, IMPA, 2005.
- Jefferson, T. A., Leatherwood, S. & Webber, M. A. *Marine mammals of the world*. 1st Edition, Academic Press, 1993.
- Jesus, S. M., Soares, C., Zabel, F. & Silva, A. *Marine Strategy Framework Directive. Descritor 11 - Ruído Ambiente Submarino*. Universidade do Algarve e Marsensing. 2010.
- Junior, C. C. *Propagação acústica em águas profundas: Descrição de um experimento controlado de propagação acústica submarina no mar do Brasil*. 1ª Edição, Novas Edições Acadêmicas, 2016.
- Ketten, D. R. Marine Mammal Auditory Systems: a Summary of Audiometric and Anatomical Data and Implications for Underwater Acoustic Impacts. *Polarforschung*. N.2/3, V.72, p.79-92, 2004.
- Ketten, D. R. Marine Mammal Ears: An Anatomical Perspective on Underwater Hearing. *Sea*. N.1, v.43, p.43, 1998.
- Kinsler, L. E. Frey, A. R., Coppens, A. B. & Sanders, J. V. *Fundamentals of Acoustics*. 4th Edition, Wiley-VCH, 1999.
- Lawrence Z. *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing*. 1st Edition, CRC Press, 1994.
- Leatherwood, S. & Reeves, R. R. *The Sierra Club handbook of whales and dolphins*. 1st Edition, Sierra Club Books, 1983.
- Marine Traffic. <<https://help.marinetraffic.com/hc/en-us/articles/205579997-What-is-the-significance-of-the-AIS-Shiptype-number->>. Acessado em 11-01-2019.
- McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M. & Hildebrand, J. A. Underwater radiated noise from modern commercial ships. *The Journal of the Acoustical Society of America*. N.1, V.131, p.92-103, 2012.

- Medwin, H. Speed of Sound in water: A Simple Equation for Realistic Parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*. N.6, V.58, p.1318-1319, 1975.
- Medwin, H. & Clay, C. S. *Fundamentals of acoustical oceanography*. 1st Edition, Academic press, 1997.
- Medwin, H. & Clay, C. S. *Fundamentals of Ocean Acoustics (Modern Acoustics and Signal Processing)*. 3rd Edition, Springer, 2010.
- Michael J. S. & Howard N. M. *Simulação Numérica de radiação sonora através do Método de Elementos de Contorno*. Anais do XXXI CNMAC, 2008.
- Mitchell, A. R., Macfarlane, G. J., Soholt, J. *Computational Methods in Partial Differential Equations*. 6th Edition, John Wiley and Sons, 1969.
- Monteiro F., Emygdio L. A. O., Lisa, V., Monteiro, K. D. K. A., Filla, G. F., Quito, L., Godoy, D. F. *Guia Ilustrado de Mamíferos Marinhos do Brasil*. 1ª Edição, Instituto de Pesquisas Cananéia (IPEC), 2013.
- Neto, A. A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Brazilian Journal of Geophysics*. N.3, V.18, p.241-256, 2000.
- Neto, F. S. *Modelagem acústica por diferenças finitas e elementos finitos em 2-D e 2,5-D*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará (UFPA), 2004.
- Nowacek, D. P., Thorne, L. H., Johnston, D. W. & Tyack, P. L. Responses of Cetaceans to Anthropogenic Noise. *Mammal Review*. N.2, V.37, p.81-115, 2007.
- Piubelli, S. L., Errobidart, H. A., Gobara, S. T. & Errobidart, N. C. G. Simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos para o ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. Vol.32, N.1, p.1501-1506, ISSN 1806-1117, 2010.
- Queirós, R. & Ramirez-Fernandez, F. *Técnicas de Processamento Digital de Sinais Acústicos: Caracterização do Meio Submarino*. Anais da 1ª Conferência de Engenharia e Arquitetura da Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto, 2016.
- Redondo, L. & Mateo, A. R. Ruido Subacuático: Fundamentos, Fuentes, Cálculo y Umbrales de Contaminación Ambiental. *Ingeniería Civil*. V.186, p.73-94, 2017.
- Reynolds, A. C. Boundary Conditions for the Numerical Solution of Wave Propagation Problems. *Geophysics*. N.6, V.43, p.1099-1110, 1978.
- Richardson W. J. Greene jr, C. R., Malme, C. & Thomson, D. H. *Marine Mammals and Noise*. 1st Edition, Academic Press, 1998.
- Richardson, W.J. & Würsig, B. Significance of Responses and Noise Impacts. *In: Marine Mammals and Noise*. p.387-424, 1995.
- Rocha-Campos, C. C. & Câmara, I. G. *Plano de Ação Nacional para Conservação dos Mamíferos Aquáticos: Grandes Cetáceos e Pinípedes. Série Espécies Ameaçadas Nº 18*. V.14, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2011.
- Santos, M. E., Couchinho, M. N., Rita L. A. & Gonçalves, E. J. Monitoring Underwater Explosions in the Habitat of Resident Bottlenose Dolphins. *The Journal of the Acoustical Society of America*. N.6, V.128, p.3805-3808, 2010.
- Savi A. A., Cesar C. C. *Coleção Formação de professores em Física - EAD*. Apostila de Curso, Eduem - Editora da Universidade Estadual de Maringá (UEM), 2010.
- Simmonds, M. Dolman, S. & Weilgart, L. Oceans of Noise 2004: A WDCS Science Report. *Whale and Dolphin Conservation Society*. V.108, p.23-36, 2004.

- Simmonds, M. Dolman, S. & Weilgart, L. *Marine Seismic Surveys: Analysis and Propagation of Air-gun Signals; and Effects of air-gun Exposure on Humpback Whales, Sea Turtles*. Reportt R99-15, Centre For Marine Science and Technology. 2000.
- Shaikh, S. & Huang, Y. W. Influences Analysis of Environmental Parameters on Sound Propagation in Shallow Water. *Trans Tech Publ.* V.556, p.4815-4819, 2014.
- Sodré, U. *Transformada de Fourier*. Apostila do Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2003.
- Smith, G. D. *Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods*. 1st Edition, Oxford university press, 1985.
- Stewart, I. *Dezessete equações que mudaram o mundo*. 1ª Edição, Zahar, 2013.
- Tavoni, R. *Os Modelos de Crescimento Populacional de Malthus e Verhulst: uma Motivação Para o Ensino de Logaritmos e Exponenciais*. Dissertação-Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2013 .
- Urlick, R. J. *Principles of Underwater Sound*. 3rd Edition, Peninsula Pub, 1983.
- Urlick, R. & Kuperman, W. A. Ambient noise in the sea. *The Journal of the Acoustical Society of America* , V.86, p.1626-1626, 1989.
- Walsh, W. A. & Kobayashi, D. R. *A Description of the Relationships Between Marine Mammals and the Hawaii-based longline Fishery From 1994 to 2003*. Report prepared by the University of Hawaii and Pacific Islands Fisheries Science Center. 2004.
- Weilgart, L. S. The Impacts of Anthropogenic Ocean Noise on Cetaceans and Implications for Management. *Canadian Journal of Zoology*. N.11, V.85, p.1091-1116, 2007.
- Xavier, B. C. *Modelos de Propagação Acústica em Águas Rasas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2005.
- Yilmaz, Ö. *Seismic data analysis*. 10th Edition, Society of Exploration Geophysics, 2001.