



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

LEONARDO PESTANA DE SOUZA

Propagação UHF sobre a superfície do mar
aplicada à vigilância acústica da costa
brasileira

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

LEONARDO PESTANA DE SOUZA

Propagação UHF sobre a superfície do mar
aplicada à vigilância acústica da costa
brasileira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientadora:
Vanessa Przybylski Ribeiro Magri

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S719p Souza, Leonardo Pestana de
Propagação UHF sobre a superfície do mar aplicada à
vigilância acústica da costa brasileira / Leonardo Pestana
de Souza ; Vanessa Przybylski Ribeiro Magri, orientadora.
Niterói, 2022.
60 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2022.m.10026019752>

1. Acústica. 2. Transmissão de radiofrequência. 3.
Frequência ultra elevada. 4. Navio. 5. Produção
intelectual. I. Magri, Vanessa Przybylski Ribeiro,
orientadora. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. III. Título.

CDD -

LEONARDO PESTANA DE SOUZA

Propagação UHF sobre a superfície do mar aplicada à vigilância acústica da costa
brasileira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

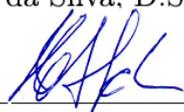
Aprovada em Maio de 2022.

BANCA EXAMINADORA


Prof^ª. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri, D.Sc. – Orientadora, UFF


Prof^ª. Leni Joaquim de Matos, D.Sc. – UFF


Prof. Maurício Weber Benjó da Silva, D.Sc. – UFF


Prof. José Carlos Araujo dos Santos, Ph.D. – IME

Niterói

2022

Dedico este trabalho à minha querida mãe (in memoriam), que sempre me incentivou e foi o meu maior exemplo de vida. Sua lembrança me inspira e me faz persistir.

Agradecimentos

Agradeço a minha orientadora Prof^ª. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri, por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa.

Ao meu orientador técnico da Marinha do Brasil, Pesq. Stilson Veras Cardoso, pelas valiosas contribuições dadas durante todo processo.

À Prof^ª. Leni Joaquim de Matos, pelas correções e ensinamentos.

Ao aluno de doutorado Vitor Luiz Gomes Mota, pelo apoio no uso dos equipamentos do laboratório da UFF, troca de ideias e ajuda.

Aos oficiais de Marinha, Capitão de Mar e Guerra Cesar Augusto e Capitão de Corveta Leonardo Cassiles de Souza do Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP), pela receptividade e empréstimo de alguns dos equipamentos usados nos testes.

À minha família e minha namorada, por compreenderem minha dedicação a este trabalho.

À Marinha do Brasil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET) da UFF, que me proporcionaram a oportunidade de cursar o mestrado.

Resumo

Esta dissertação de mestrado engloba o estudo e análise de transmissões UHF que podem vir a ser utilizadas pela Marinha do Brasil em um projeto de vigilância acústica da costa brasileira, com uso de boias fundeadas. Inclui exemplos de aplicação da vigilância acústica desde a Guerra Fria aos dias de hoje, descreve como é implementada a vigilância no Brasil e cita projetos que utilizam boias com sensores acústicos para fins meteorológicos e ambientais no país. Contém equações e resultados de cálculos das perdas de propagação para transmissão sobre a superfície de mar calmo entre as boias e os navios que irão coletar os dados acústicos, com base no modelo da Terra esférica. Abrange uma pesquisa de propagação em radiofrequência em diferentes estados do mar relacionados na escala Beaufort, e apresenta testes em laboratório da transmissão UHF utilizando dados reais de hidrofones.

Palavras-chave: Vigilância, Acústica, Transmissão, UHF, Boia, Navio.

Abstract

This master's thesis covers the study and analysis of UHF transmissions that may be used by the Brazilian Navy in an acoustic surveillance project of the Brazilian coast, using anchored buoys. It includes examples of the application of acoustic surveillance from the Cold War to the present day, describes how surveillance is implemented in Brazil, and cites projects that use buoys with acoustic sensors for meteorological and environmental purposes in the country. It contains equations and calculation results of propagation losses for transmission over the calm sea surface between the buoys and the ships that will collect the acoustic data, based on the spherical Earth model. It covers a survey of radiofrequency propagation in different sea states listed on the Beaufort scale and presents laboratory tests of UHF transmission using real hydrophone data.

Keywords: Surveillance, Acoustic, Transmission, UHF, Buoy, Ship.

Lista de Figuras

1.1	Amazônia Azul [1].	2
1.2	Navio de superfície, submarino [2] e helicóptero [3] empregados na vigilância acústica.	3
1.3	Sistema SOSUS [4].	3
1.4	Sonoboias sendo lançadas de uma aeronave [5].	5
1.5	Boia de vigilância fundeada [6].	5
1.6	Esquema do projeto de vigilância acústica da costa brasileira.	7
2.1	Modos de propagação [7].	10
2.2	Esquema e variáveis envolvidas para os cálculos das perdas na transmissão sobre a superfície do mar com reflexão em Terra esférica.	10
2.3	Fluxograma para identificar se a transmissão ocorre na zona de interferência ou na zona de difração.	12
2.4	Gráfico da perda de percurso na frequência de 300 MHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.	15
2.5	Gráfico da perda de percurso na frequência de 450 MHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.	16
2.6	Gráfico da perda de percurso na frequência de 1 GHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.	16
2.7	Gráfico da perda de percurso na frequência de 2 GHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.	17
2.8	Gráfico da perda de percurso na frequência de 3 GHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.	17

2.9	Gráfico da menor perda de percurso em função da distância para diferentes frequências e alturas das antenas do receptor.	18
2.10	Gráfico da perda de percurso em função da altura da antena do receptor para transmissão de uma boia para distância de 20 milhas náuticas (37,04 km) nas diferentes frequências.	19
3.1	Determinação do ângulo de incidência.	21
3.2	Perda básica de transmissão em várias alturas de antenas em função do comprimento do enlace transmissor-receptor, em 10 MHz [8].	24
4.1	Arranjo cilíndrico de hidrofones - <i>Cylindrical Hydrophone Array</i> (CHA) com os 32 barrotes (<i>staves</i>) de 3 hidrofones da comissão SONAP-I [9]. . . .	27
4.2	Gráfico da tensão versus amostra para os sinais dos barrotes (<i>staves</i>) de hidrofones.	28
4.3	Esquema para visualizar no osciloscópio os sinais dos barrotes (<i>staves</i>) de hidrofones modulados.	29
4.4	Montagem em laboratório para visualizar no osciloscópio os sinais dos barrotes (<i>staves</i>) de hidrofones modulados.	29
4.5	Esquema para visualizar o espectro de frequência do sinal que chega à antena de transmissão.	30
4.6	Montagem em laboratório para visualizar o espectro de frequência do sinal que chega à antena de transmissão.	31
4.7	Espectro de frequência do sinal que chega à antena de transmissão.	31
4.8	Estrutura utilizada para medição da perda de retorno da antena 1 (identificação 146035038).	33
4.9	Gráfico da perda de retorno da antena 1.	33
4.10	Estrutura utilizada para medição da perda de retorno da antena 2 (identificação 146035011).	34
4.11	Gráfico da perda de retorno da antena 2.	35
4.12	Esquema para transmissão UHF no laboratório dos sinais dos barrotes (<i>staves</i>) de hidrofones.	36

4.13 Montagem em laboratório para transmissão UHF dos sinais dos barrotes (<i>staves</i>) de hidrofones.	37
4.14 Espectro de frequência da portadora.	37
4.15 Espectro de frequência da portadora junto com os sinais dos barrotes (<i>staves</i>) de hidrofones transmitidos.	38

Lista de Tabelas

2.1	Distâncias mínimas para faixa de UHF no modelo da Terra esférica.	15
2.2	Perdas de percurso para os casos em que a transmissão do navio para a boia foram superiores às da boia para o navio.	19
3.1	Escala Beaufort [10].	20
3.2	Alturas de ondas máximas permitidas nas diferentes frequências e números da escala Beaufort associados.	22
3.3	Limiares da reflexão especular nas diversas alturas da antena receptora em função da frequência.	23

Lista de Abreviaturas e Siglas

RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>	1
MB	Marinha do Brasil	1
SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i>	1
SOSUS	<i>Sound Surveillance System</i>	3
SOFAR	<i>Sound Fixing And Ranging</i>	4
VHF	<i>Very High Frequency</i>	4
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>	4
AIS	<i>Automatic Identification System</i>	6
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>	6
OPT	<i>Ocean Power Technologies</i>	6
CPU	<i>Central Processing Unit</i>	6
PNBOIA	Programa Nacional de Boias	7
PMPAS-BS	Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina na Baía de Santos	7
RVT	Raia Virtual de Tiro	11
CASOP	Centro de Apoio a Sistemas Operativos	11
HF	<i>High Frequency</i>	23
CHA	<i>Cylindrical Hydrophone Array</i>	26
SONAP	Sonar Nacional Passivo	26
GSAS	Grupo de Sistemas Acústicos Submarinos	26
IPqM	Instituto de Pesquisas da Marinha	26
ETAS	Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina	26
A/D	Analogico-Digital	27
LAProp	Laboratório de Antenas e Propagação	27

PPGEET	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações	27
UFF	Universidade Federal Fluminense	27
AM	<i>Amplitude Modulation</i>	28
D/A	Digital-Analógico	28
DAQ	<i>Data Acquisition</i>	28

Sumário

1	Introdução	1
2	Cálculos das perdas de propagação para transmissão UHF em mar calmo	9
2.1	Teoria dos cálculos das perdas de propagação	9
2.2	Resultados dos cálculos das perdas de propagação	15
3	Pesquisa da propagação em diferentes estados do mar	20
4	Testes para transmissão UHF com dados reais de hidrofones	26
4.1	Aquisição e modulação dos sinais contendo dados reais de hidrofones	26
4.2	Caracterização das antenas	32
4.3	Transmissão UHF em laboratório	35
5	Conclusões	39
	Referências	43

Capítulo 1

Introdução

O Brasil possui, a partir da sua costa, uma extensa área marítima no oceano Atlântico, que apenas este país pode explorar economicamente, sendo a sua principal via do comércio exterior e rica em recursos naturais e minerais.

Esta área é subdividida em mar territorial, zona contígua, zona econômica exclusiva e extensão da plataforma continental, e em uma comparação à importância da floresta amazônica para o país, é chamada de Amazônia Azul [1], como ilustrado na Figura 1.1.

Para este vasto espaço oceânico, faz-se necessário haver garantias de segurança e condições para exercer a autoridade do Estado.

No Brasil, a Marinha é responsável por fiscalizar e combater as atividades ilícitas no mar. E para isto, é primordial que tenha a capacidade de vigilância, com o objetivo de identificar eventuais ameaças, permitindo, assim, atuar perante situações adversas.

Atualmente a vigilância da costa brasileira é realizada fazendo uso de instalações em terra, navios e aeronaves, por meio de identificação visual e com a utilização de Detecção e Telemetria por Rádio – *Radio Detection and Ranging* (RADAR), para reconhecer navios de superfície que venham a transitar no mar sem fornecer suas informações. Para reconhecer tanto navios de superfície quanto submarinos, a Marinha do Brasil (MB) utiliza navios e aeronaves, dotados de Navegação e Determinação da Distância pelo Som – *Sound Navigation and Ranging* (SONAR), como ilustrado na Figura 1.2.

Para que a MB realize a vigilância permanente e abrangente da costa, com a detecção de navios de superfície e submarinos, sem a necessidade de deslocar constantemente os seus navios de superfície, submarinos e aeronaves equipados com sensores acústicos, e para minimizar a exposição desses meios, se faz necessário a implantação de um projeto

de vigilância acústica da costa brasileira, tendo em vista, que o Brasil não possui projetos com essa finalidade em operação.

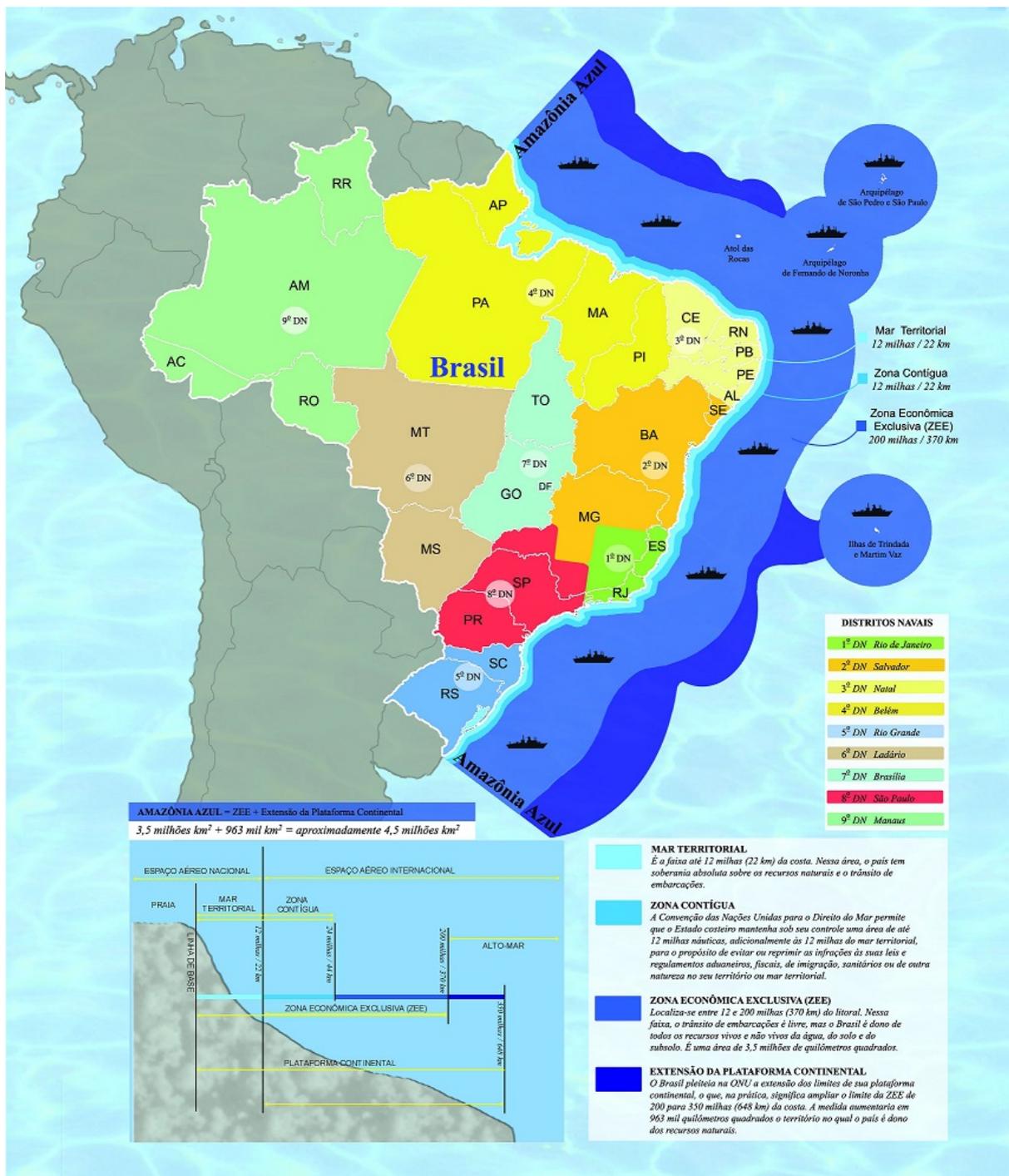


Figura 1.1: Amazônia Azul [1].

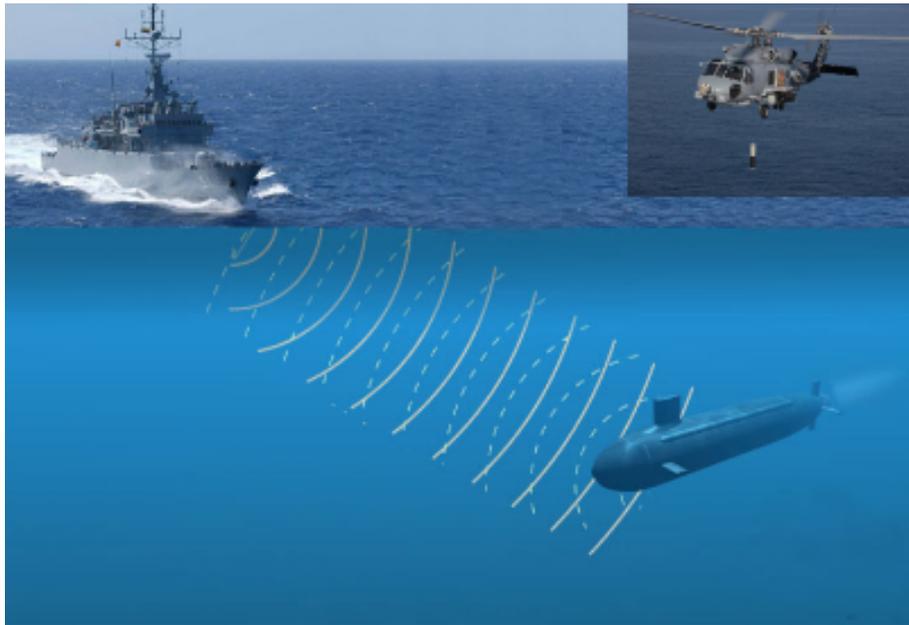


Figura 1.2: Navio de superfície, submarino [2] e helicóptero [3] empregados na vigilância acústica.

A utilização desse tipo de projeto em outros países tem como exemplo o que foi empregado nos EUA em meados da década de 1950, durante a Guerra Fria, quando a Marinha dos EUA instalou um sistema de vigilância submerso para rastrear submarinos. O Sistema de Vigilância Sonar – *Sound Surveillance System* (SOSUS), apresentado na Figura 1.3, é uma rede formada por conjuntos de hidrofones instalados no fundo do mar ao longo dos oceanos Atlântico e Pacífico.

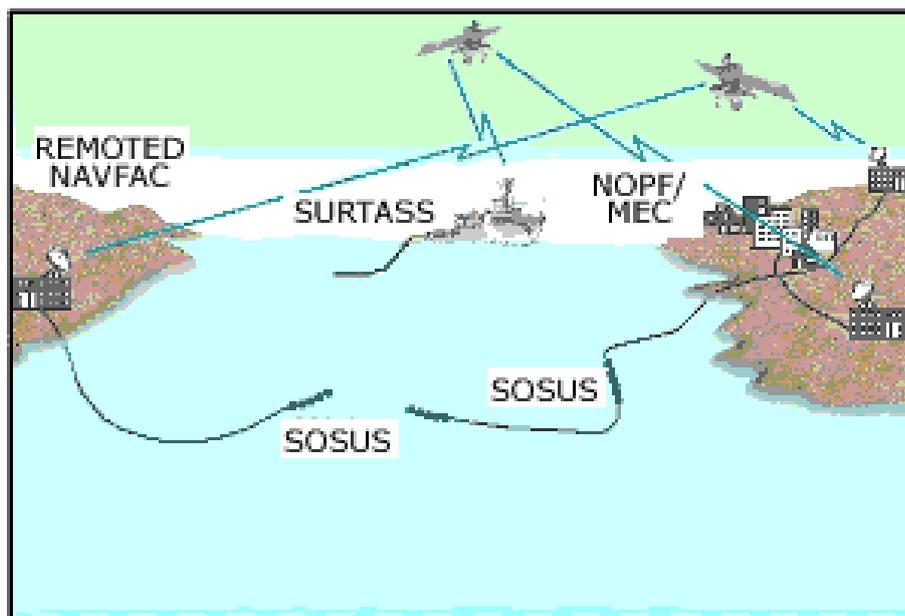


Figura 1.3: Sistema SOSUS [4].

Esse sistema faz uso do canal que ocorre em regiões de águas profundas oceânicas, atuando como um guia para ondas acústicas de baixas frequências – *Sound Fixing And Ranging* (SOFAR), as quais sofrem menor perda de propagação, permitindo sua transmissão por longas distâncias. Os sons de baixa frequência gerados por submarinos podem ser detectados a grandes distâncias por conjuntos de hidrofones localizados em taludes continentais e montes submarinos, conectados por cabos submarinos a instalações em terra. Esses conjuntos de hidrofones monitoram o oceano, gravam sons e transmitem os dados de volta às estações costeiras para análise.

Ao final da Guerra Fria, a Marinha dos EUA decidiu permitir que esse sistema fosse usado por cientistas com habilitações de segurança adequadas, no que foi chamado de “uso duplo”. O SOSUS agora é usado para estudar fontes hidrotermais e identificar erupções vulcânicas submarinas. O sistema também é empregado no estudo dos sons emitidos por mamíferos marinhos. Os cientistas podem estudar e rastrear tais mamíferos nos oceanos Atlântico e Pacífico usando os conjuntos de hidrofones SOSUS. Este sistema também tem sido usado para monitorar as variações de temperatura nos oceanos, decorrentes das mudanças climáticas. Ao medir o tempo percorrido pelas ondas sonoras, o sistema SOSUS é capaz de registrar as mudanças na temperatura média do oceano em uma bacia oceânica.

Com a evolução dos hidrofones e das transmissões sem fio, foi possível desenvolver equipamentos para vigilância acústica que retransmitem via radiofrequência os dados acústicos coletados, para processamento e análise, tais como as sonoboias, apresentadas na Figura 1.4. Elas são sistemas sonar portáteis com flutuador, lançadas no mar por aeronaves, para detecção de submarinos, utilizadas atualmente pela Marinha dos EUA. No impacto com a água o flutuador é inflado e o sistema acionado.

Um flutuador de superfície inflável com um transmissor de rádio permanece na superfície para comunicação com a aeronave, enquanto um ou mais conjuntos de hidrofones e equipamentos estabilizadores descem abaixo da superfície até uma profundidade selecionada, em função das condições ambientais e do padrão de busca.

A boia transmite informações acústicas de seus hidrofones via rádio para os operadores a bordo da aeronave em frequência muito alta - *Very High Frequency* (VHF) e frequência ultra-alta - *Ultra High Frequency* (UHF), que são as designações das faixas de radiofrequências compreendidas entre 30 e 300 MHz, e 300 MHz e 3 GHz respectivamente.

Essas sonoboias, apresentam alta flexibilidade para o local de utilização e possuem transmissão sem fio em tempo real com as aeronaves. No entanto, normalmente são descartáveis, apresentam alto custo para aquisição [11] e ainda demandam aeronaves com

capacidade de lançar e se comunicarem com esses dispositivos.



Figura 1.4: Sonoboias sendo lançadas de uma aeronave [5].

Outra aplicação da transmissão sem fio para vigilância acústica submarina são as boias de vigilância fundeadas, como a mostrada na Figura 1.5. Tais boias apresentam a vantagem de permitirem monitorar uma extensa área de superfície oceânica de forma permanente ou temporária, com a capacidade de conectar vários dispositivos de vigilância, formando uma rede. Isto proporciona aos usuários a visibilidade sobre atividades ambientais potencialmente prejudiciais ou ilegais.



Figura 1.5: Boia de vigilância fundeada [6].

Além de incluírem conjuntos de hidrofones para monitorar assinaturas acústicas, as boias podem estar equipadas com RADAR, câmeras ópticas e térmicas estabilizadas por giroscópio, Sistema de Identificação Automática – *Automatic Identification System* (AIS), Sistema Global de Navegação por Satélite – *Global Navigation Satellite System* (GNSS), aplicativo integrado de comando e controle, sistemas de geração de energia e comunicações.

Esses recursos permitem o rastreamento de diversas formas, incluindo de embarcações que não transmitam sinal AIS.

Os dados do sistema podem ser transmitidos para estações de comando terrestres ou embarcadas via UHF/VHF, sistemas celulares, ou satélite, dependendo da localização.

Apesar de haver informações desse equipamento na página da empresa *Ocean Power Technologies* (OPT) que o fabrica, nesta não é informado quais países que fazem uso dessas boias.

Um exemplo adicional de aplicação de boias para vigilância acústica é apresentado em [12], onde um conjunto de boias com sensores acústicos é instalado em uma hidrovia na cidade de Morehead – Carolina do Norte – EUA, para alerta de possíveis ameaças por meio embarcações nas proximidades do porto local, porém, a transmissão de dados entre as boias é realizada por meio da comunicação acústica e uma das boias do conjunto transmite via satélite dados para instalações em terra.

Como complemento a vigilância acústica praticada atualmente no Brasil, e para atender à necessidade da Marinha, este trabalho apresenta um projeto de vigilância acústica, que emprega um conjunto de boias fundeadas no leito do mar com uso de poitas. A vigilância compreende o monitoramento de ruídos de embarcações de superfície e submersas. A Figura 1.6 mostra o esquema deste projeto, com sensores acústicos, equipamentos de retransmissão dos dados acústicos e instrumentos auxiliares, descritos a seguir.

Nesse projeto, os dados acústicos brutos são pré-processados, e mantidos apenas sinais coerentes com ruídos de embarcações. São instalados AIS para transmissão da identificação da boia e recepção de dados eventualmente transmitidos por embarcações, GNSS para fornecer a sua localização, placas solares e baterias para suprir energia, Unidade Central de Processamento – *Central Processing Unit* (CPU) e memória para o processamento e armazenamento das informações transmitidas e recebidas, e antena UHF, para transmissão e recepção entre as boias e entre estas e navios ou outros meios que recebam as informações.

Para que esse sistema tenha ampla cobertura, deve ser modular, permitindo que

se adicionem boias onde se deseja ampliar o alcance e assim poderá servir de base na composição de uma rede nacional de sensoriamento acústico.

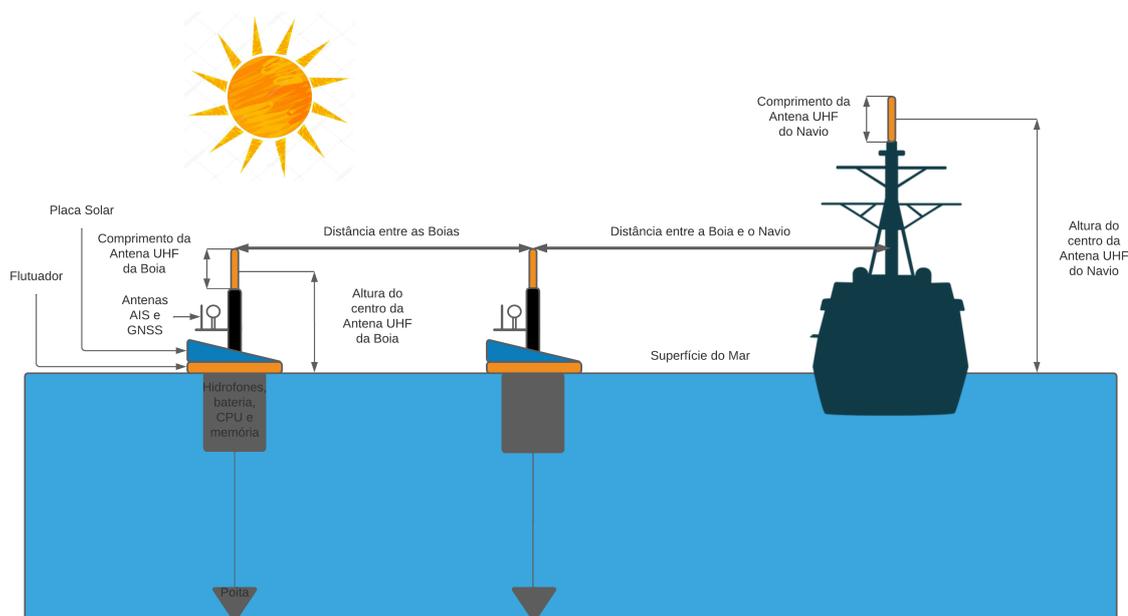


Figura 1.6: Esquema do projeto de vigilância acústica da costa brasileira.

A fim de que os navios que irão coletar os dados possam realizar essa tarefa sem a necessidade de se deslocarem demasiadamente, poupando tempo e recursos, o sistema será concebido tal que as boias tenham cobertura de, pelo menos, 20 milhas náuticas (37,04 km). Dessa forma, as mesmas deverão ser instaladas, espaçadas entre si de distâncias compatíveis com essa cobertura, e deverão ter capacidade para se comunicar nesse mesmo alcance com os navios que irão coletar os dados.

Para transmissão de dados, optou-se por utilizar um enlace de radiofrequência, tendo em vista que os serviços de comunicação celular não estão disponíveis em regiões no mar afastadas da costa, e as comunicações por satélite, apesar de proporcionarem alta mobilidade [13], apresentam custo elevado e tornam os usuários dependentes da confiabilidade e garantia de sigilo das empresas que prestam esses serviços. O enlace de radiofrequência, por outro lado, não demanda custo de mensalidade para transmissão e constitui uma rede militar própria para essa finalidade.

Apesar de não existirem projetos de vigilância acústica com o emprego de boias em operação no Brasil, existem projetos para fins meteorológicos e ambientais em operação. Como exemplos, podem ser citados o Programa Nacional de Boias (PNBOIA) [14] e o Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina na Baía de Santos (PMPAS-BS) [15].

O PNBOIA é um programa da MB, que tem como objetivo a coleta de dados oceanográficos e meteorológicos no Atlântico, por meio de uma rede de boias de deriva e fundeio rastreadas por satélite, em apoio às atividades de meteorologia e oceanografia do Brasil.

O PMPAS-BS é um programa da Petrobras em parceria com a MB desenvolvido para atender os requisitos do Ibama para o licenciamento ambiental da etapa 2 do Pré-Sal. Tem como objetivo a caracterização da paisagem acústica submarina e o monitoramento do nível de ruído submarino na região do pré-sal da Bacia de Santos e nas rotas de navegação preferenciais que servem à região. Dessa forma, esse projeto subsidia análises de risco à biodiversidade e estudos de avaliação de impactos sobre a biota marinha.

Para avaliar e propor a utilização da transmissão UHF no envio de sinais acústicos que serão adquiridos por hidrofones instalados em boias, no projeto de vigilância acústica da costa brasileira, este trabalho tem como objetivo calcular a perda de propagação fazendo o uso do modelo em Terra esférica [16, 17], para transmissões sobre a superfície do mar nas distâncias de 15 até 50 km, em mar calmo. Neste cálculo, consideram-se antenas com alturas de 3 até 50 m, sendo 3 m a altura das antenas instaladas nas boias, e de 3 até 50 m a altura das antenas instaladas nos navios que irão coletar os sinais acústicos adquiridos nas boias. Nas transmissões são utilizadas as frequências de 300 e 450 MHz, e 1, 2, e 3 GHz. Conforme a escala Beaufort [10], o estado de mar calmo é caracterizado por mar sem ventos e sem ondas.

Este trabalho ainda inclui a pesquisa da propagação considerando os diferentes estados do mar, e a proposta de um sistema de transmissão UHF para o projeto de vigilância acústica da costa brasileira por meio de testes com dados reais de hidrofones.

Nesta dissertação, o capítulo 2 apresenta a teoria e os resultados dos cálculos das perdas de propagação para transmissão UHF em mar calmo; o capítulo 3 aborda a pesquisa da propagação em diferentes estados do mar; o capítulo 4 expõe a metodologia e os resultados dos testes para transmissão UHF com dados reais de hidrofones; e o capítulo 5 contém as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Cálculos das perdas de propagação para transmissão UHF em mar calmo

2.1 Teoria dos cálculos das perdas de propagação

Os cálculos da perda de propagação são realizados fazendo uso do modelo em Terra esférica para comunicações em mar calmo em distâncias de 15 até 50 km, tendo em vista que, para as distâncias entre as boias e o navio avaliadas, a curvatura da Terra tem influência relevante na transmissão. Para cada caso, é identificado se a transmissão ocorre na zona de interferência ou de difração, para que o modelo de cálculo represente de forma mais precisa as perdas de propagação, e que estas possam ser analisadas em função das diferentes alturas dos centros das antenas em relação à superfície do mar, distâncias entre as antenas e frequências. Portanto, o objetivo desses cálculos é identificar como esses parâmetros influenciam nas perdas de propagação.

A Figura 2.1 apresenta o fluxograma dos modos de propagação. E são marcados em amarelo os que caracterizam a propagação utilizada nas transmissões para o projeto de vigilância acústica da costa brasileira, e utilizados para calcular as perdas, onde o modo de propagação dominante está relacionado com o ambiente e a frequência de propagação.

A Figura 2.2 mostra o esquema e as variáveis envolvidas para os cálculos das perdas na transmissão sobre a superfície do mar com reflexão em Terra esférica. A seguir, são apresentadas as fórmulas e os resultados em gráficos obtidos no aplicativo MATLAB.

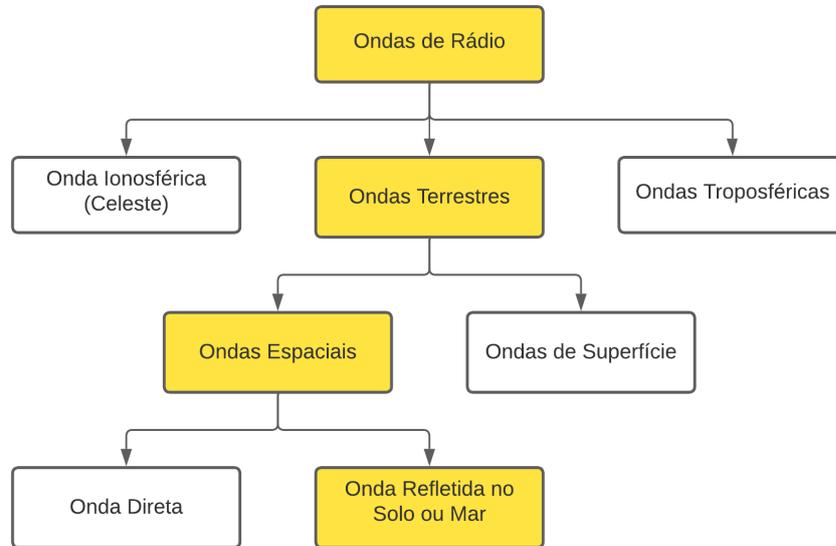


Figura 2.1: Modos de propagação [7].

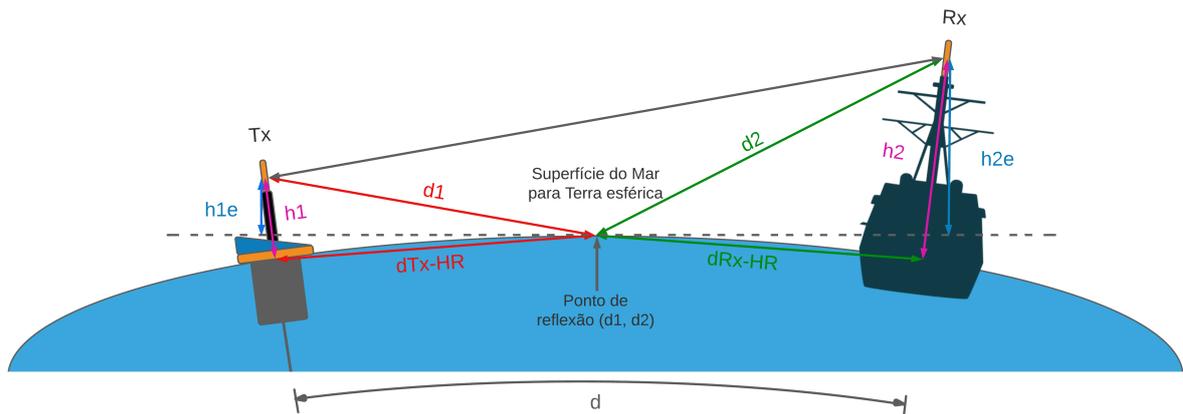


Figura 2.2: Esquema e variáveis envolvidas para os cálculos das perdas na transmissão sobre a superfície do mar com reflexão em Terra esférica.

A distância mínima d , em km, entre as antenas de transmissão (T_x) e recepção (R_x), para que seja considerado o modelo da Terra esférica, é dada por [16, 17]:

$$d \geq 15 \sqrt[3]{\lambda_m} \quad (2.1)$$

Onde λ_m é o comprimento de onda, em m, dado pela razão da velocidade de propagação do sinal (3×10^8 m/s) e sua frequência, em Hz.

Empregando a Equação (2.1) para as frequências limites inferior, de 300 MHz, e superior, de 3 GHz, obtêm-se, respectivamente: $d \geq 15$ km e $d \geq 6,96$ km.

A distância $d_{\text{Tx-HR}}$, em km, da antena da estação de transmissão ao horizonte-rádio, é dada por [16, 17]:

$$d_{\text{Tx-HR}} = \sqrt{2a_e h_1} \quad (2.2)$$

A distância $d_{\text{Rx-HR}}$, em km, da antena da estação de recepção ao horizonte-rádio é dada por [16, 17]:

$$d_{\text{Rx-HR}} = \sqrt{2a_e h_2} \quad (2.3)$$

Onde $h_{1(\text{ou } 2)}$ é a altura de transmissão (ou recepção), em km; a_e é o raio equivalente da Terra, em km, dado por $a_e = Ka = 8493,33$ km, a é o raio da Terra, em km, $a = 6370$ km; e K é o fator próprio para a região do enlace, sendo $K = 4/3$ para atmosfera padrão [16, 17].

Para a altura das antenas das boias, foi utilizado o valor de 3 m, que é próximo àquele do projeto da Raia Virtual de Tiro (RVT) [18] do Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP) da MB. Esse sistema opera entre 400 e 500 MHz, portanto, a frequência central desse intervalo, que é 450 MHz, também foi utilizada como um dos valores para os cálculos das perdas de propagação.

Para as diferentes alturas da antena do navio que irá receber os dados das boias foram propostos valores que abrangem a maioria dos mastros nos navios utilizados pela MB. Assim, foram calculadas as perdas de percurso na transmissão sobre a superfície do mar para distâncias de 15 até 50 km, nas frequências de 300 e 450 MHz e 1, 2 e 3 GHz, visando cobrir toda faixa de frequência UHF, para a altura do centro da antena UHF da boia de 3 m e a altura do centro da antena UHF do navio em 3, 10, 20, 30, 40 e 50 m da superfície do mar.

A Figura 2.3 apresenta o fluxograma proposto por este trabalho para identificar se a transmissão ocorre na zona de interferência ou na zona de difração.

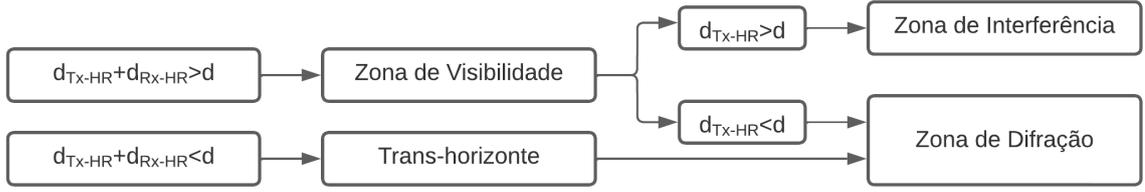


Figura 2.3: Fluxograma para identificar se a transmissão ocorre na zona de interferência ou na zona de difração.

Para todas as distâncias de 15 até 50 km, em que o transmissor T_x é uma boia, conclui-se que o receptor R_x , seja outra boia ou o navio, encontra-se na zona de difração da Terra esférica.

O percurso normalizado X entre as antenas é dado por [16, 17]:

$$X = 2,188 \beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d \quad (2.4)$$

As alturas normalizadas Y_1 da antena de transmissão e Y_2 da antena de recepção são dadas por [16, 17]:

$$Y_{1(\text{ou } 2)} = 9,575 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h_{1(\text{ou } 2)} \quad (2.5)$$

Para polarização vertical e frequência acima de 300 MHz sobre o mar, utiliza-se $\beta = 1$ [16, 17]; f é a frequência portadora de transmissão, em MHz; e $h_{1(\text{ou } 2)}$ é a altura de transmissão (ou recepção), em m.

A atenuação $F(X)$ devido à distância entre as estações transmissora e receptora é dada por [16, 17]:

$$F(X) = \begin{cases} 11 + 10 \log(X) - 17,6X; & \forall X \geq 1,6 \\ -20 \log(X) - 5,6488X^{1,425}; & \forall X < 1,6 \end{cases} \quad (2.6)$$

As atenuações ou ganhos $G(Y_1)$ devido a altura da antena de transmissão, e $G(Y_2)$ devido a altura da antena recepção são dadas por [16, 17]:

$$G(Y_{1(\text{ou } 2)}) = \begin{cases} 17,6(B - 1,1)^{1/2} - 5 \log(B - 1,1) - 8; & \forall B > 2 \\ 20 \log(B + 0,1B^3); & \forall B < 2 \end{cases} \quad (2.7)$$

Onde o parâmetro B é dado por [16, 17]:

$$B = \beta Y_{1(\text{ou } 2)} \quad (2.8)$$

A perda adicional de sinal $L_{d\text{dB}}$ na zona de difração é dada por [16, 17]:

$$L_{d\text{dB}} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \quad (2.9)$$

A perda no espaço livre FSL_{dB} é dada por [16]:

$$FSL_{\text{dB}} = 32,44 + 20 \log(d) + 20 \log(f_{\text{MHz}}) \quad (2.10)$$

A perda total de sinal no percurso L_{dB} é a soma das perdas de sinal na zona de difração e no espaço livre, e é dada por [16, 17]:

$$L_{\text{dB}} = L_{d\text{dB}} + FSL_{\text{dB}} \quad (2.11)$$

Para alguns casos em que o transmissor T_x é um navio, conclui-se que o receptor R_x , uma boia, encontra-se na zona de interferência por meio da aplicação do fluxograma da Figura 2.3, apresentado anteriormente. Para que nesses casos haja comunicação entre o navio e a boia, deve-se calcular a perda total, conforme as equações abaixo.

O ponto de reflexão (d_1, d_2) , em km, é dado por [16, 17]:

$$d_1 = \frac{d + bd}{2} \quad (2.12)$$

$$d_2 = \frac{d - bd}{2} \quad (2.13)$$

Onde os parâmetros adimensionais b , m e c são dados por [16, 17]:

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos\left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}}\right)\right); \forall m > 0 \quad (2.14)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \quad (2.15)$$

$$c = \frac{|h_1 - h_2|}{h_1 + h_2} \quad (2.16)$$

Para frequências acima de 10 MHz, as alturas equivalentes h_{1e} da antena de transmissão e h_{2e} da antena de recepção em relação a Terra plana são dadas por [16, 17]:

$$h_{1e} = h_1 - \frac{d_1^2}{2a_e} \quad (2.17)$$

$$h_{2e} = h_2 - \frac{d_2^2}{2a_e} \quad (2.18)$$

A menor altura h entre a superfície esférica e a linha de visada direta é dada por [16, 17]:

$$h = \frac{h_{1e}d_2 + h_{2e}d_1}{d} \quad (2.19)$$

A altura necessária h_{req} para se obter uma perda por difração nula é dada por [16, 17]:

$$h_{req} = 0,552\sqrt{\frac{d_1d_2\lambda}{d}} \quad (2.20)$$

Onde d_1 , d_2 , a_e devem ser utilizados em km para o cálculo de h , enquanto d_1 , d_2 , d devem ser utilizados em m para o cálculo de h_{req} .

Para $h \geq h_{req}$, a perda L_{dB} é igual a zero. No caso de $h < h_{req}$, deve-se calcular o raio equivalente da Terra modificado a_{em} , dado por [16, 17]:

$$a_{em} = 0,5 \left(\frac{d}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \right)^2 \quad (2.21)$$

Onde d deve ser utilizado em m.

A perda adicional L_{dB} no percurso é dada por [16, 17]:

$$L_{dB} = \left[1 - \frac{h}{h_{req}} \right] L_{h,dB} \quad (2.22)$$

Onde a perda $L_{h,dB}$ é calculada da mesma forma que L_{dB} para zona de difração pela Equação (2.9). Entretanto, utiliza-se a_{em} em km nas Equações (2.4) e (2.5) ao invés de a_e para calcular os novos X , Y_1 e Y_2 , e então recalcula-se $F(X)$, $G(Y_1)$, $G(Y_2)$ e B nas

Equações (2.6), (2.7) e (2.8). Por fim recalcula-se a perda total L_{dB} pela Equação (2.11), somando o resultado da Equação (2.22) com o resultado da Equação (2.10).

2.2 Resultados dos cálculos das perdas de propagação

A Tabela 2.1 apresenta as distâncias mínimas calculadas pela Equação (2.1), entre as antenas de transmissão e de recepção, para que seja considerado o modelo da Terra esférica nas frequências analisadas.

Tabela 2.1: Distâncias mínimas para faixa de UHF no modelo da Terra esférica.

Frequência f (MHz)	300	450	1000	2000	3000
Distância mínima d (km)	15,00	13,10	10,04	7,97	6,96

Tendo em vista que em 300 MHz a distância mínima é de 15 km, optou-se por realizar as análises partindo deste valor e chegando até 50 km, o que cumpre o objetivo do projeto de vigilância acústica da costa brasileira de alcance mínimo de 20 milhas náuticas (37,04 km).

As Figuras 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 mostram os gráficos das perdas de percurso calculadas em função das distâncias de 15 até 50 km, por meio das Equações (2.1) até (2.11), para transmissão da boia, com a altura da antena de 3 m, para o navio ou outra boia, com as alturas das antenas variando entre 3, 10, 20, 30, 40 e 50 m, nas frequências UHF de 300 e 450 MHz e 1, 2 e 3 GHz respectivamente.

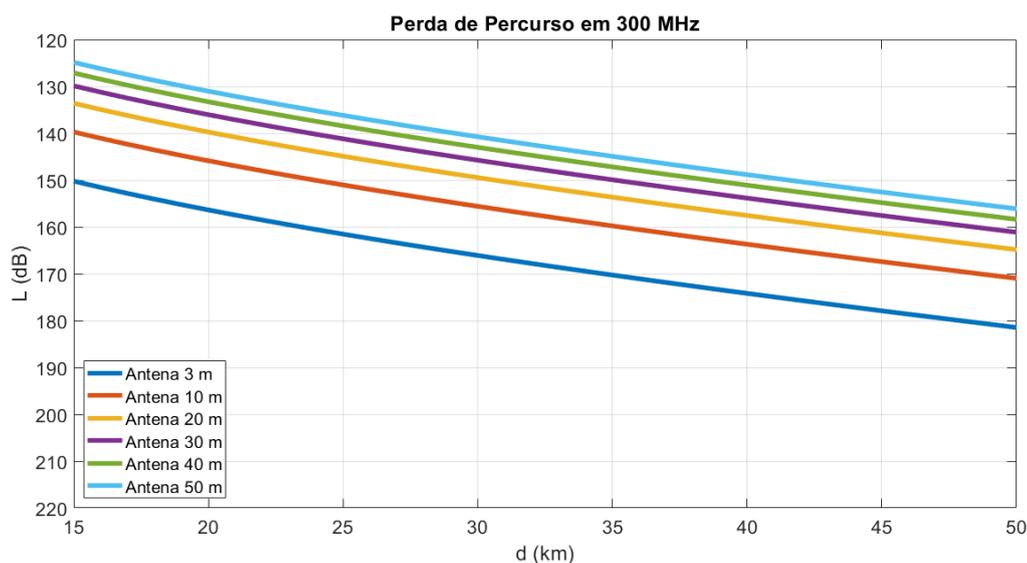


Figura 2.4: Gráfico da perda de percurso na frequência de 300 MHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.

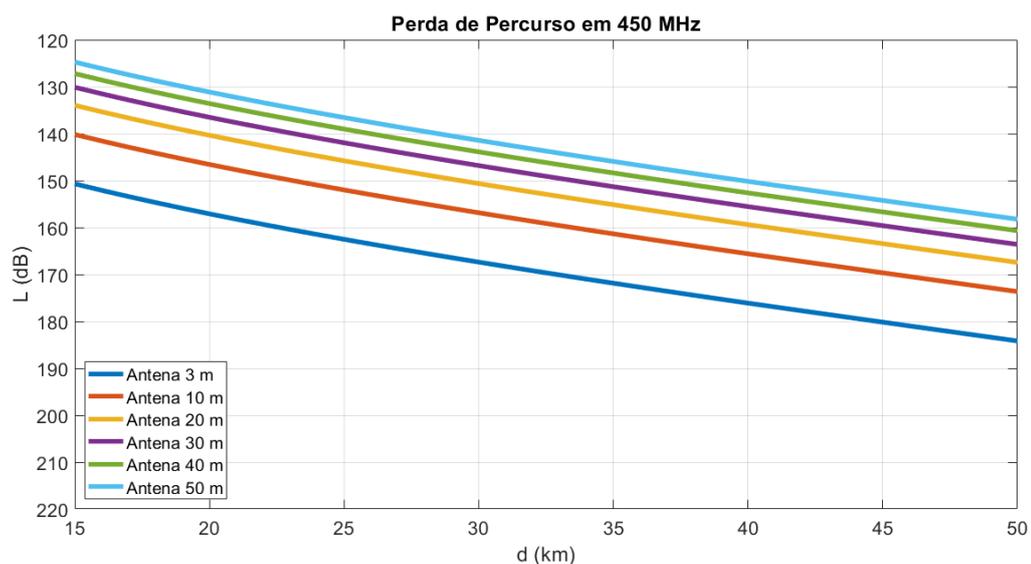


Figura 2.5: Gráfico da perda de percurso na frequência de 450 MHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.

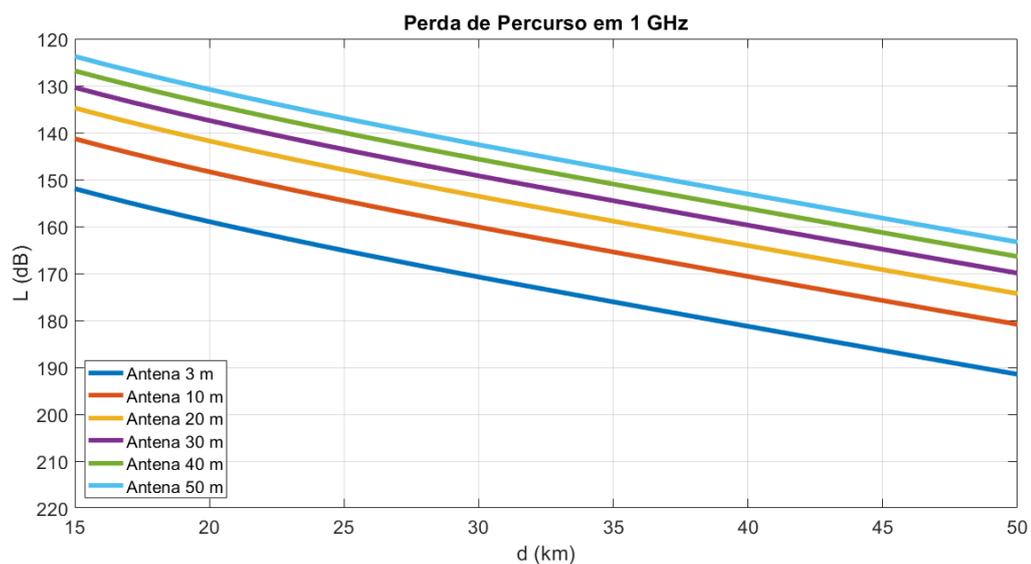


Figura 2.6: Gráfico da perda de percurso na frequência de 1 GHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.

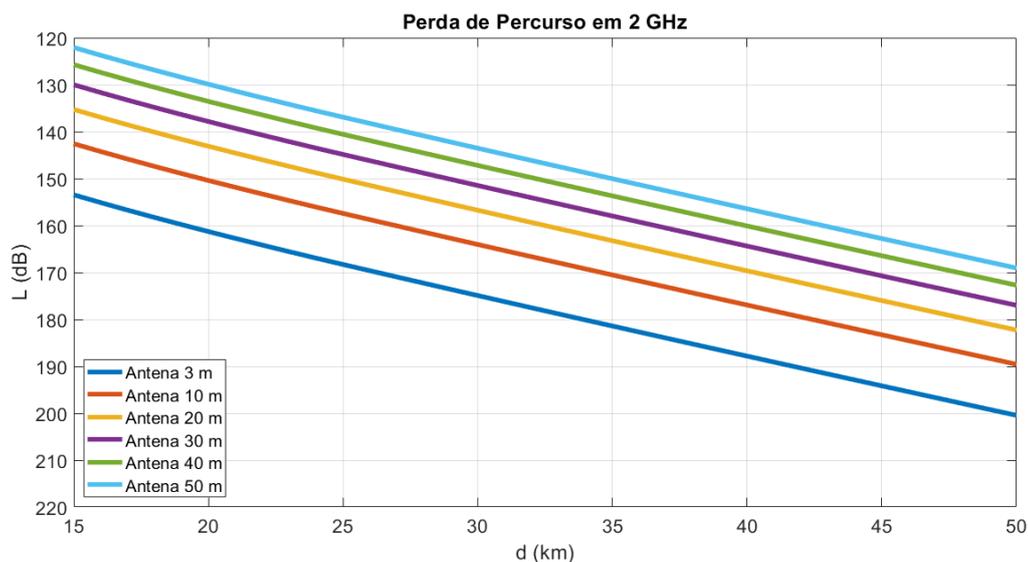


Figura 2.7: Gráfico da perda de percurso na frequência de 2 GHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.

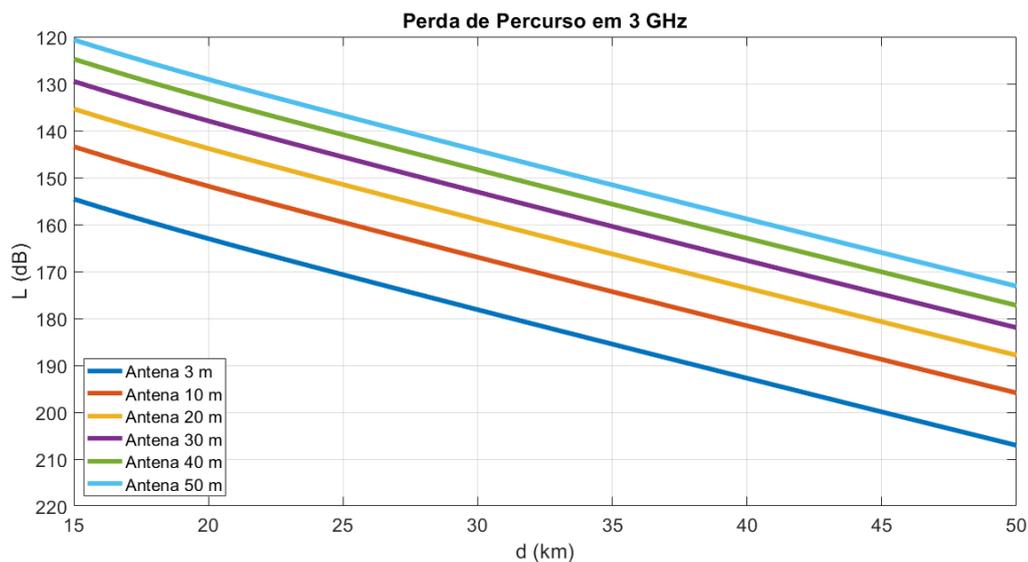


Figura 2.8: Gráfico da perda de percurso na frequência de 3 GHz em função da distância de transmissão de uma boia para diferentes alturas das antenas do receptor.

A Figura 2.9 mostra o gráfico das menores perdas de percurso encontradas para cada distância de transmissão de uma boia dentre as diferentes frequências e alturas das antenas do receptor analisadas.

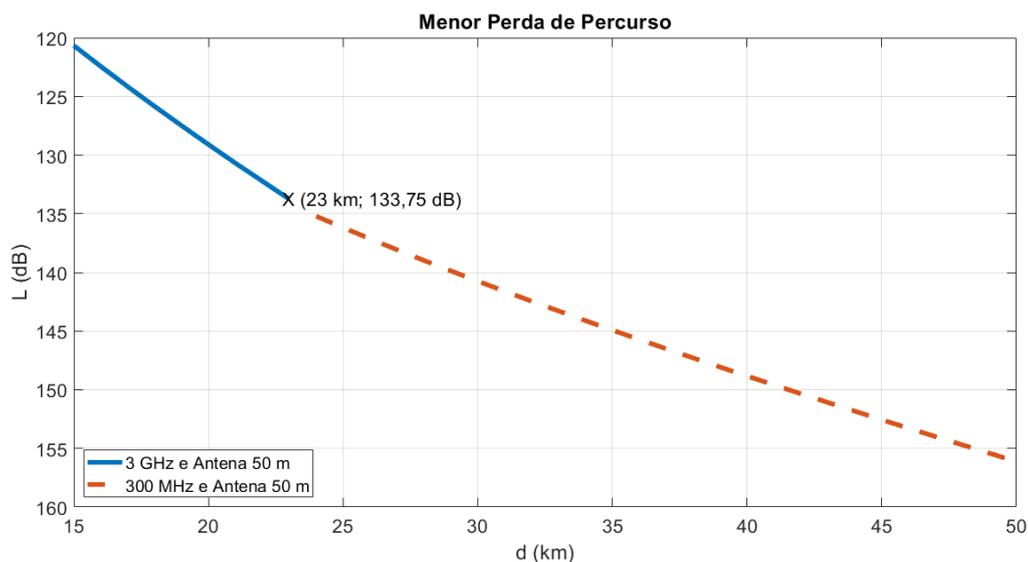


Figura 2.9: Gráfico da menor perda de percurso em função da distância para diferentes frequências e alturas das antenas do receptor.

É possível observar no gráfico da Figura 2.9 que de 15 até 23 km a menor perda de percurso se dá para frequência de 3 GHz, porém, a partir de 23 até 50 km, a menor perda de percurso se dá para frequência de 300 MHz. Em ambos os intervalos, as menores perdas de percurso encontradas são para a altura da antena do receptor de 50 m, nesse caso, um navio.

A Figura 2.10 mostra o gráfico da perda de percurso em função da altura da antena do receptor para transmissão de uma boia para distância de 20 milhas náuticas (37,04 km) nas frequências de 300 e 450 MHz e 1, 2 e 3 GHz.

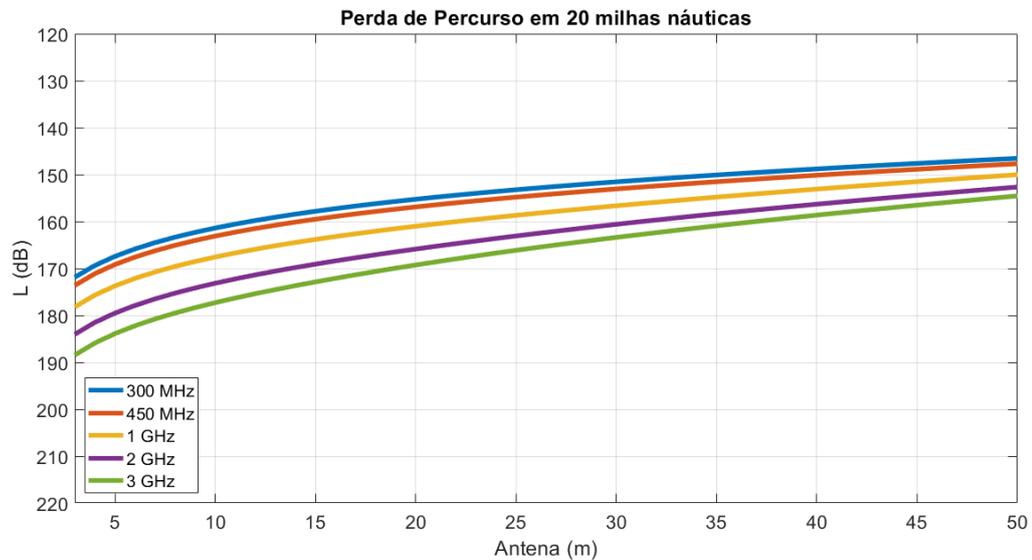


Figura 2.10: Gráfico da perda de percurso em função da altura da antena do receptor para transmissão de uma boia para distância de 20 milhas náuticas (37,04 km) nas diferentes frequências.

É possível observar no gráfico da Figura 2.10 que as perdas decrescem com a redução da frequência e com o aumento da altura da antena do receptor.

A Tabela 2.2 apresenta os casos em que as perdas de percurso na transmissão do navio para boia, calculadas por meio das Equações (2.12) até (2.22), são superiores às da boia para o navio. São apresentadas as perdas para transmissão do navio para a boia, as perdas para transmissão da boia para o navio e a diferença entre esses valores.

Tabela 2.2: Perdas de percurso para os casos em que a transmissão do navio para a boia foram superiores às da boia para o navio.

d (km)	L (dB)								
	Antena do navio = 50 m Frequência $f = 3$ GHz			Antena do navio = 50 m Frequência $f = 2$ GHz			Antena do navio = 40 m Frequência $f = 3$ GHz		
	Navio \rightarrow Boia	Boia \rightarrow Navio	Δ	Navio \rightarrow Boia	Boia \rightarrow Navio	Δ	Navio \rightarrow Boia	Boia \rightarrow Navio	Δ
15	123,00	120,66	2,33	123,18	122,07	1,10	125,07	124,76	0,31
16	124,16	122,44	1,73	124,31	123,73	0,58	-	-	-
17	125,25	124,16	1,09	125,37	125,34	0,03	-	-	-
18	126,28	125,84	0,43	-	-	-	-	-	-

Para esses casos da Tabela 2.2, deve-se considerar a maior perda de percurso, a fim de garantir que seja possível iniciar a comunicação do navio com a boia.

Capítulo 3

Pesquisa da propagação em diferentes estados do mar

Todo o estudo desenvolvido neste trabalho considera a situação de mar calmo, sem vento, correspondendo a $B = 0$ na escala Beaufort [10] mostrada na Tabela 3.1, ou seja, a superfície do mar funciona como um espelho d'água. Na situação em que $1 \leq B \leq 11$, variando de aragem (*light air*) a tempestade violenta (*violent storm*), respectivamente, com ventos na faixa 1-2 e 29-32 m/s, com ondas de alturas menores que 0,1 e 16 m, respectivamente, diversos estudos têm sido realizados, mas não se tem expressões prontas para o cálculo das perdas devido à rugosidade do mar, causando espalhamento de sinal, e ao sombreamento provocado pelas incidências mais rasantes.

Tabela 3.1: Escala Beaufort [10].

Beaufort wind scale	Mean wind speed		Limits of wind speed		Wind descriptive terms	Probable wave height	Probable maximum wave height	Seastate	Sea descriptive terms
	knots	m/s	knots	m/s		m	m		
0	0	0	<1	<1	Calm	-	-	0	Calm (glassy)
1	2	1	1-3	1-2	Light air	0.1	0.1	1	Calm (rippled)
2	5	3	4-6	2-3	Light breeze	0.2	0.3	2	Smooth (wavelets)
3	9	5	7-10	4-5	Gentle breeze	0.6	1.0	3	Slight
4	13	7	11-16	6-8	Moderate breeze	1.0	1.5	3-4	Slight - Moderate
5	19	10	17-21	9-11	Fresh breeze	2.0	2.5	4	Moderate
6	24	12	22-27	11-14	Strong breeze	3.0	4.0	5	Rough
7	30	15	28-33	14-17	Near gale	4.0	5.5	5-6	Rough - Very rough
8	37	19	34-40	17-21	Gale	5.5	7.5	6-7	Very rough - High
9	44	23	41-47	21-24	Strong gale	7.0	10.0	7	High
10	52	27	48-55	25-28	Storm	9.0	12.5	8	Very High
11	60	31	56-63	29-32	Violent storm	11.5	16.0	8	Very High
12	-	-	64+	33+	Hurricane	14+	-	9	Phenomenal

Em uma análise inicial, sabe-se que a reflexão no mar pode ser [16]:

Especular, quando

$$h_{\text{onda}} < \lambda / (8 \sin \alpha) \quad (3.1)$$

onde α é o ângulo de incidência do raio relativo ao solo, ou:

Difusa, quando

$$h_{\text{onda}} \geq \lambda / (8 \sin \alpha) \quad (3.2)$$

Para analisar a necessidade de considerar a rugosidade da superfície do mar no cálculo de propagação sobre o mesmo, deve-se verificar a pior condição, que é aquela onde $h_{\text{onda}} \geq 16$ m, que corresponde a $B = 11$ na escala Beaufort, como se vê na Tabela 3.1.

Como $h = 3$ m e $H = 3, 10, 20, 30, 40$ e 50 m, então pela Figura 3.1:

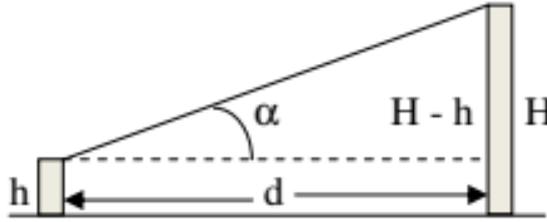


Figura 3.1: Determinação do ângulo de incidência.

$$\alpha = \arctg((H - h)/d) \quad (3.3)$$

Observa-se que quanto maior α (entre 0 e 90°), maior é o $\sin \alpha$ e menor é o limite de h_{onda} permitido para ocorrência a fim de que a reflexão possa ser considerada especular. Assim, como d varia de 15 até 50 km, α será maior para menor valor de d , portanto, $d = 15$ km e o maior valor de H ($= 50$ m).

Nesse caso: $\alpha = \arctg((50 - 3)/15000) = 0,1795^\circ$

Se $h_{\text{onda}} \geq \lambda / (8 \sin(0,1795^\circ))$, ou seja, $h_{\text{onda}} \geq 39,89\lambda$ tem-se que considerar a reflexão difusa. Para as diferentes frequências, este valor é calculado e comparado aos números da escala Beaufort, ambos mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Alturas de ondas máximas permitidas nas diferentes frequências e números da escala Beaufort associados.

	Frequência f (MHz)				
	300	450	1000	2000	3000
$h_{\text{onda}}(\text{m})$	39,89	26,60	11,97	5,98	3,99
Escala Beaufort (B)	-	-	$B < 10$	$B < 8$	$B < 6$

Assim, para pior situação, de 15 km de distância, e $H = 50$ m, observa-se que:

- Para $f = 300$ a 450 MHz, não há necessidade de se considerar a rugosidade;
- Para $f = 1$ GHz, não há necessidade de se considerar a rugosidade desde que $B < 10$ tempestade (*storm*);
- Para $f = 2$ GHz, não há necessidade de se considerar a rugosidade desde que $B < 8$ ventania (*gale*);
- Para $f = 3$ GHz, não há necessidade de se considerar a rugosidade desde que $B < 6$ brisa forte (*strong breeze*);

Observa-se, na Equação (2.1), que:

- Para $f = 300$ MHz, se $d > 15$ km, a Terra deve ser considerada esférica e
- Para $f = 3$ GHz, se $d > 6,96$ km, a Terra deve ser considerada esférica.

Como todos os cálculos desse capítulo são realizados supondo Terra plana (lisa ou rugosa), o cálculo é aproximado, uma vez que as distâncias desejadas serão maiores que 15 km, e a Terra deveria ser tomada como esférica, entretanto, o cálculo realizado nesta dissertação, sem considerar a rugosidade do mar, é verdadeiro para $h = 3$ m, $H \leq 50$ m, $f < 1$ GHz e $d < 15$ km. Se a frequência for maior e/ou a distância for maior, a altura limite cresce, também cresce o número da escala Beaufort associado, indicando que a solução só vale para estados de mar mais tranquilos. Se o estado de mar for mais revoltoso, irá afetar o campo recebido no extremo receptor devido ao espalhamento difuso da parcela incidente no mar.

Confirmando as conclusões anteriores, foram realizados os cálculos para todas as frequências e alturas consideradas, na distância de 15 km. Visto que nas frequências de 300 e 450 MHz a superfície pode ser considerada lisa, apenas as frequências de 1, 2

e 3 GHz, com os resultados para altura limite permitida da onda na superfície do mar, usando o critério de Rayleigh [16], são dadas na Tabela 3.3, juntamente com o número associado da escala Beaufort, indicando até onde é válida a suposição da reflexão especular. Para os casos que não são indicados valores para B , significa que a reflexão pode ser considerada especular, pois satisfaz a Equação (3.1).

Tabela 3.3: Limiares da reflexão especular nas diversas alturas da antena receptora em função da frequência.

Antena receptora H (m)	Frequência f (GHz)					
	1		2		3	
	h_{onda} (m)	B	h_{onda} (m)	B	h_{onda} (m)	B
10	80,36	-	40,18	-	26,79	-
20	33,09	-	16,54	-	11,03	10
30	20,83	-	10,42	10	6,94	8
40	15,20	11	7,60	9	5,07	7
50	11,97	10	5,98	8	3,99	6

No caso de Terra plana, mas rugosa, o espelhamento difuso fará com que os "raios espalhados que chegam ao receptor tenham amplitude pequena em relação ao raio direto, e pouco influenciarão na recepção do sinal" [16]. O mesmo não acontece em Terra esférica. Nesse caso, devido à complexidade do cálculo da perda quando a mesma apresenta reflexão difusa, muitos trabalhos têm sido encontrados na bibliografia. Dentre eles Barrick [19, 8] é muito referenciado. Tais trabalhos são de 1971 e tratam do estudo de propagação em frequência alta - *High Frequency* (HF), que é a faixa de radiofrequência de 3 a 30 MHz, e VHF acima do mar, chegando à conclusão de que as variações do estado do mar são desprezíveis abaixo de 2 MHz, mas produzem perda em excesso em cerca de 10 a 15 MHz. Na Figura 3.2, a perda básica de transmissão é fornecida em várias alturas de antenas em função do comprimento do enlace transmissor-receptor, em 10 MHz. O primeiro valor de perda é para o mar perfeitamente plano, coincidindo com número da escala Beaufort nulo (mar calmo), enquanto o segundo valor equivale a mar com $B < 7$, com ventos até 12,86 m/s. Observa-se que em pequenas distâncias a diferença de perda não chega a 2 dB, enquanto para a distância de 120 km, a diferença chega a 8 dB, dependendo da altura da antena, e 21 dB em 660 km. Para a faixa de alturas até 50 m e distâncias até 50 km, para $B < 7$, Barrick observa que a diferença não chega a 2 dB, entretanto, esses resultados são válidos para 10 MHz. Ele afirma que a perda será maior para mares mais revoltos ($7 \leq B \leq 11$), frequências mais altas e alcances mais longos.

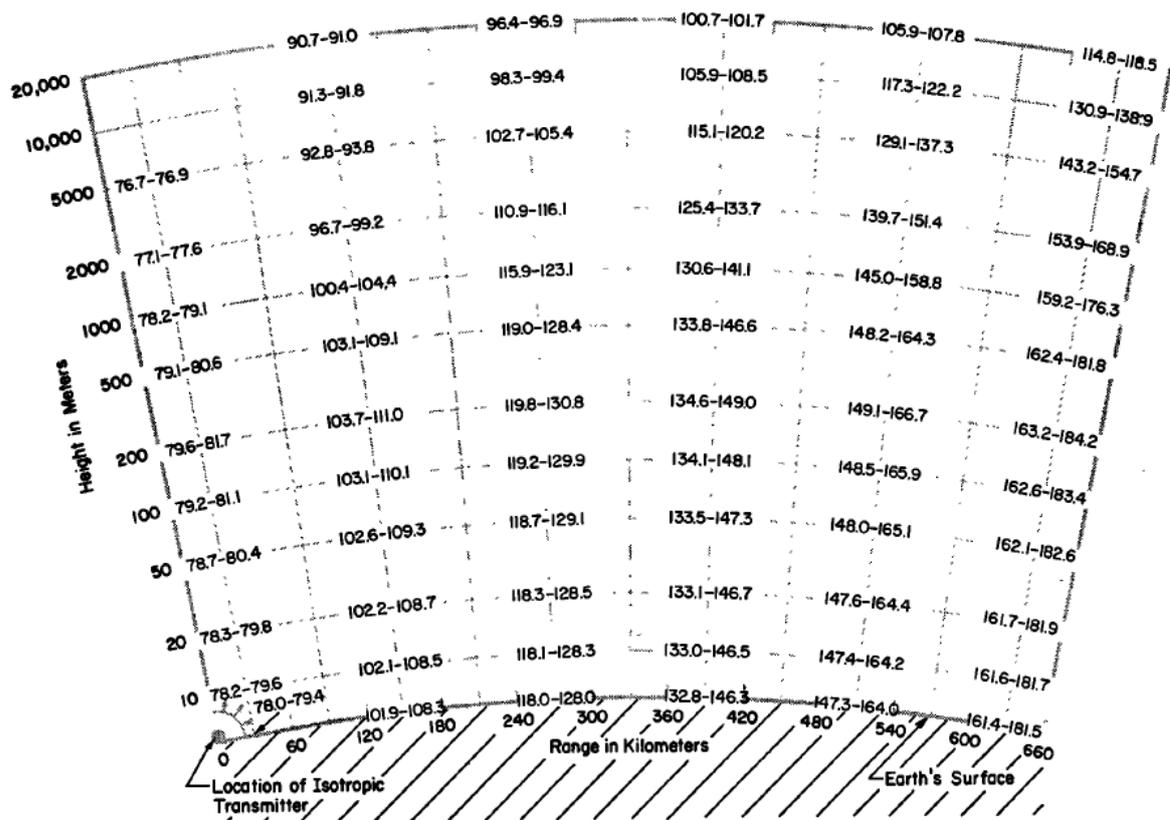


Figura 3.2: Perda básica de transmissão em várias alturas de antenas em função do comprimento do enlace transmissor-receptor, em 10 MHz [8].

Muitos outros autores têm estudado a propagação das ondas de rádio no ambiente marítimo. F. Ryan [20] estudou a propagação de micro-ondas sobre mares revoltos e afirma que entre antenas de baixa altitude, a predição dos campos eletromagnéticos é complicada devido a: i. superfícies do mar rugosas não planas causadas por ondas de vento e alturas das ondas; ii. sombreamento ou bloqueio da onda direta devido a cristas de ondas; iii. condições finitas de fronteira da superfície; iv. ondas de superfície (para polarização vertical); e v. efeitos de fronteira que levam a campos de ondas não-planares perto da interface ar-mar.

Muitos autores têm se baseado no modelo da equação parabólica, que fornece uma solução numérica eficiente. Dentre eles, Levy [21] propôs o modelo bidimensional, J. Y. Guo [22] analisou as características de propagação das ondas de rádio na superfície rugosa do mar, L. X. Guo [23] analisou a propagação em dutos de evaporação. Gao e demais autores [24] em 2019, empregaram o modelo tridimensional aleatório da superfície do mar da equação parabólica, introduzido para descrever a superfície rugosa do mar em detalhes, dando uma abordagem original para a introdução da superficialidade do mar na modelagem de propagação de ondas eletromagnéticas. No entanto, a fim de quantificar

melhor a contribuição deste método e medir a melhoria da rugosidade aleatória introduzida na modelagem da propagação de ondas eletromagnéticas, incluindo o efeito de sombra causado pelas ondas em baixos ângulos de incidência, Gao se propôs, futuramente, a dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

A partir de 2019, mais trabalhos e artigos têm apresentado estudos dos efeitos da rugosidade do mar sobre propagação de sinal sobre ele. Dentre eles: Mänz Nilsson [25], em 2021, desenvolveu sua dissertação considerando diferentes tipos de superfície de mar. A simulação emprega condições de fronteira para a impedância, e a superfície do mar pode tanto ser considerada plana como rugosa, usando o fator de redução de rugosidade de Miller-Brown para determinar a impedância superficial, como terreno irregular ou como superfície de mar rugoso, consistindo de aspectos de rugosidade de onda longa e de onda curta; Tang e Wang [26], em 2020, trataram a propagação da onda eletromagnética segundo a equação parabólica de dois caminhos (*2WPE - 2 Way Parabolic Equation*). Eles introduziram o modelo de superfície fractal melhorada para simular a influência do duto troposférico na propagação da onda eletromagnética sobre a superfície do mar; Xiangming [27] desenvolveu, em 2022, um novo método de propagação da onda de rádio, baseado na onda espalhada por uma superfície rugosa e a função de densidade de probabilidade da altura das ondas. O método incorpora o efeito do sombreamento pelas elevações das ondas.

Assim, vários artigos têm sido escritos nessa área, com diferentes focos e limitações, entretanto, ainda não se dispõe de equações para determinar a perda devido aos diferentes valores de altura das ondas do mar descritos na escala Beaufort.

Capítulo 4

Testes para transmissão UHF com dados reais de hidrofones

4.1 Aquisição e modulação dos sinais contendo dados reais de hidrofones

Dado que não se dispunha de dados acústicos experimentais de boias, a avaliação de transmissão UHF é realizada empregando-se os sinais adquiridos de um arranjo cilíndrico de hidrofones - *Cylindrical Hydrophone Array* (CHA) na comissão I do projeto Sonar Nacional Passivo (SONAP), que ocorreu de 17 a 22 de agosto de 2015 no Rio de Janeiro, pelo Grupo de Sistemas Acústicos Submarinos (GSAS) do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), disponibilizados para o Prêmio Talento do XII Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina (ETAS).

Esses sinais foram adquiridos através de experimentos com o objetivo de possibilitar o monitoramento acústico do tráfego das barcas Rio – Niterói e dos navios que demandam o porto de Rio de Janeiro. A posição aproximada do navio de pesquisa Aspirante Moura, de onde os sinais foram adquiridos, era latitude 22°54' S e longitude 43°09' W. A profundidade local era de 10 m a 15 m e a profundidade do arranjo era de 5 m.

A Figura 4.1 mostra o CHA utilizado na comissão SONAP-I, que consiste em um arranjo de barrotes (*staves*), agrupados de forma cilíndrica. O chamado barrote é a estrutura que aglomera os elementos (hidrofones) e os encapsula em material elastomérico com propriedades acústicas próximas a da água, e ainda realiza a função de protegê-los do contato direto com a água salgada.



Figura 4.1: Arranjo cilíndrico de hidrofones - *Cylindrical Hydrophone Array* (CHA) com 32 barrotes (*staves*) de 3 hidrofones da comissão SONAP-I [9].

O arranjo construído é composto de 32 barrotes, sendo que cada um possui três hidrofones. Os três hidrofones estão conectados em paralelo e o acesso é feito ao final desta ligação. O cilindro tem 1 m de diâmetro, espessura de 4 cm e a distância entre a parede externa do cilindro e a superfície interna do barrote é de 2,7 cm. O material do cilindro é de polietileno. O barrote é similar aos usados em arranjos dos submarinos da MB. Os hidrofones foram conectados em um conversor Analógico-Digital (A/D) através de cabos de 30 m, similar aos utilizados nos submarinos.

Na comissão, o CHA ficou sustentado por um guindaste no navio, com amarrações em duas extremidades. Os sinais recebidos pelos hidrofones, foram gravados e posteriormente digitalizados. O conversor A/D fez a aquisição de 32 canais simultâneos.

Os dados de hidrofones obtidos na comissão foram empregados na parte experimental deste trabalho, para os testes de transmissão UHF, que foram realizados no Laboratório de Antenas e Propagação (LAProp) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET) da Universidade Federal Fluminense (UFF). As antenas UHF [28] dos experimentos foram cedidas do projeto da RVT da MB.

É implementado um código em MATLAB para ler os dados do CHA, que são dispostos em uma matriz com 10000 linhas e 32 colunas, onde cada linha corresponde à medida de tensão da amostra e cada coluna um barrote de hidrofones. A partir desses dados, é gerado um gráfico da tensão versus amostra para os 32 barrotes de hidrofones, como pode

ser visto na Figura 4.2. É possível observar uma diferença no gráfico do barrote 8 em relação aos demais, que pode ser explicada por um erro no ganho na medida deste barrote.

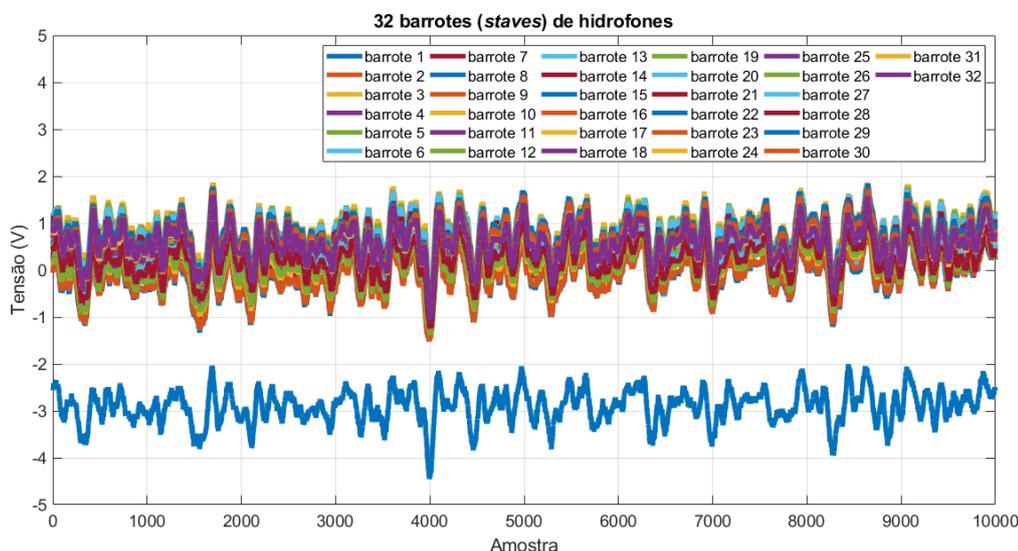


Figura 4.2: Gráfico da tensão versus amostra para os sinais dos barotes (*staves*) de hidrofones.

No LProp, esses dados são inseridos no aplicativo de programação gráfica LabVIEW, onde são realizadas a conversão paralelo para serial e a modulação em amplitude - *Amplitude Modulation* (AM) em banda básica, empregando como modulante uma onda retangular (*rect.*). Em seguida, os dados são convertidos no conversor Digital-Analógico (D/A) do sistema de aquisição de dados - *Data Acquisition* (DAQ) National Instruments NI USB-6212, com taxa de 250×10^3 amostras/s, e então analisados no osciloscópio Tektronix TBS1072B para verificar se correspondem aos sinais originais. O esquema para visualizar no osciloscópio os sinais dos barotes pode ser visto na Figura 4.3.

A Figura 4.4 mostra a montagem em laboratório para visualizar no osciloscópio os sinais dos barotes de hidrofones modulados. No osciloscópio é possível ver os sinais dos barotes em série, da mesma forma que são apresentados no LabVIEW, correspondendo aos sinais originais.

Para viabilizar a transmissão UHF dos dados reais de hidrofones e verificar o espectro de frequência do sinal que chegam à antena de transmissão, é montado o esquema da Figura 4.5, em que o sinal modulado da saída do DAQ, na forma analógica, assim como uma onda portadora proveniente do gerador de funções Anritsu MG3700A na frequência de 420 MHz, são inseridos nas entradas de um misturador (*mixer*) que opera na faixa de 100 a 2000 MHz. A tensão de modulação ($V_{\text{modulação}}$) é ajustada para 200 mV no LabVIEW, para não ultrapassar o limite máximo de corrente do misturador. Em seguida, o sinal da saída desse misturador é transmitido via cabo coaxial até o analisador de espectro Anritsu MS2034A.

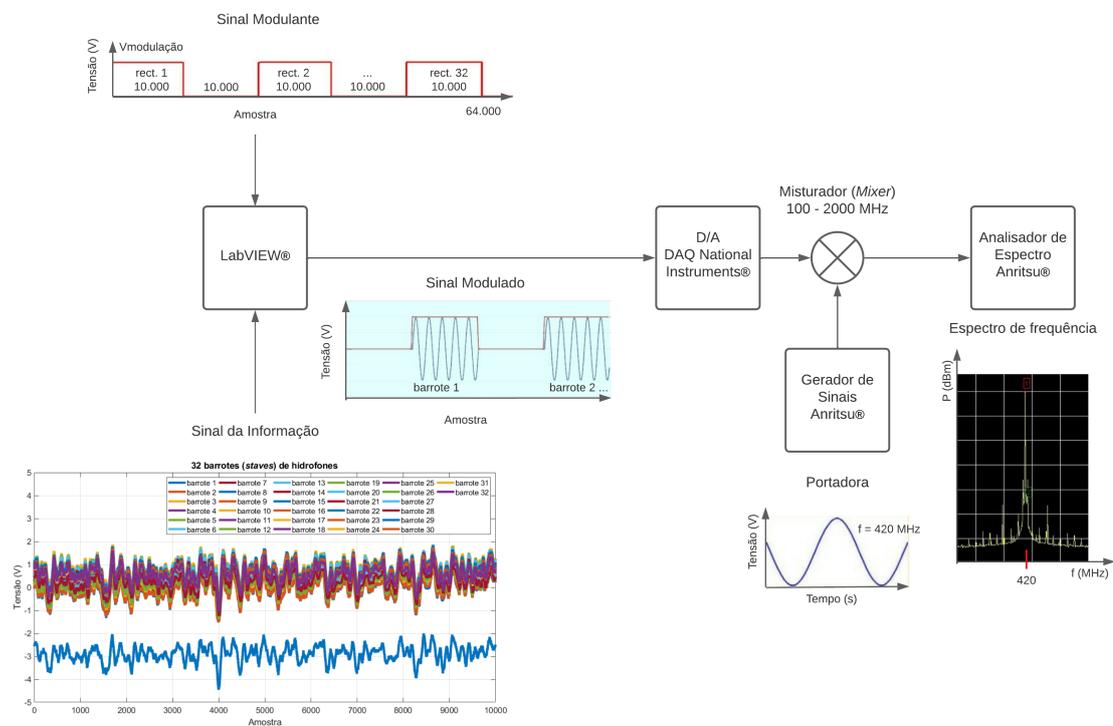


Figura 4.5: Esquema para visualizar o espectro de frequência do sinal que chega à antena de transmissão.

A Figura 4.6 mostra a montagem em laboratório para visualizar o espectro de frequência do sinal que chega à antena de transmissão, onde é possível ver todos os equipamentos utilizados.



Figura 4.6: Montagem em laboratório para visualizar o espectro de frequência do sinal que chega à antena de transmissão.

A Figura 4.7 mostra o espectro de frequência do sinal que chega à antena de transmissão.

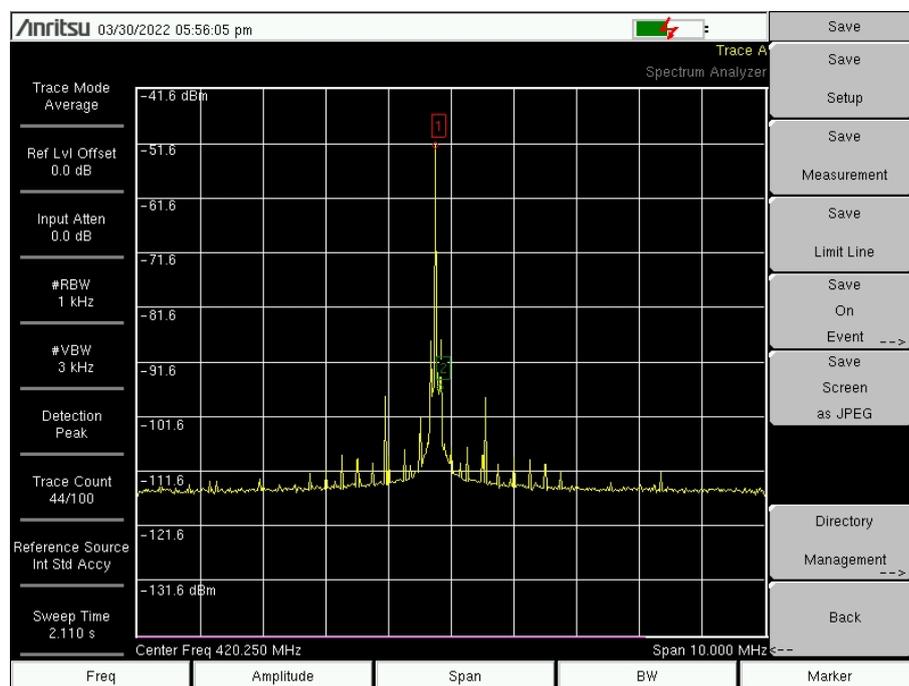


Figura 4.7: Espectro de frequência do sinal que chega à antena de transmissão.

4.2 Caracterização das antenas

Após a modulação e a conversão D/A dos sinais dos hidrofones, é necessário caracterizar as antenas que serão utilizadas para a transmissão. Esta caracterização consiste em verificar a perda de retorno das antenas através do analisador de espectro Anritsu MS2034A. O estudo desse parâmetro é importante, pois através dele é possível identificar qual a melhor frequência de operação da antena, além de sua largura de banda. Consequentemente, pode-se concluir se são adequadas ou não para aplicação.

Para a caracterização das antenas, faz-se necessário verificar se elas estão na região do Campo Distante.

A distância mínima entre o transmissor e o receptor RD , em m, para que as antenas estejam na região de Campo Distante, é dada por [29]:

$$RD = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

Onde D é a maior dimensão da antena, em m, e λ é o comprimento de onda, em m.

Para as antenas UHF da RVT da MB, que possuem aproximadamente 90 cm de comprimento, sendo utilizadas para transmitir em 410 MHz, obtém-se $RD = 2,21$ m. Portanto, são utilizadas distâncias superiores a 2,21 m entre o transmissor e o receptor para os testes.

Na avaliação da perda de retorno em dB, medida no analisador de espectro Anritsu MS2034A, um maior valor de perda de retorno indica que a quantidade do sinal que está sendo refletido de volta é menor [30]. O valor considerado adequado para utilização das antenas deve ser superior a 10 dB na faixa de frequência desejada.

Para evitar interferências na medida da perda de retorno e simular o ambiente real do projeto de vigilância, próximo ao mar, a medição foi realizada em campo aberto, próximo ao bloco H do campus da Praia Vermelha da UFF, como pode ser visto nas Figuras 4.8 e 4.10, que mostram as estruturas utilizadas para medição da perda de retorno das antenas 1 e 2 respectivamente.



Figura 4.8: Estrutura utilizada para medição da perda de retorno da antena 1 (identificação 146035038).

A Figura 4.9 mostra o gráfico da perda de retorno da antena 1 obtido na medição.

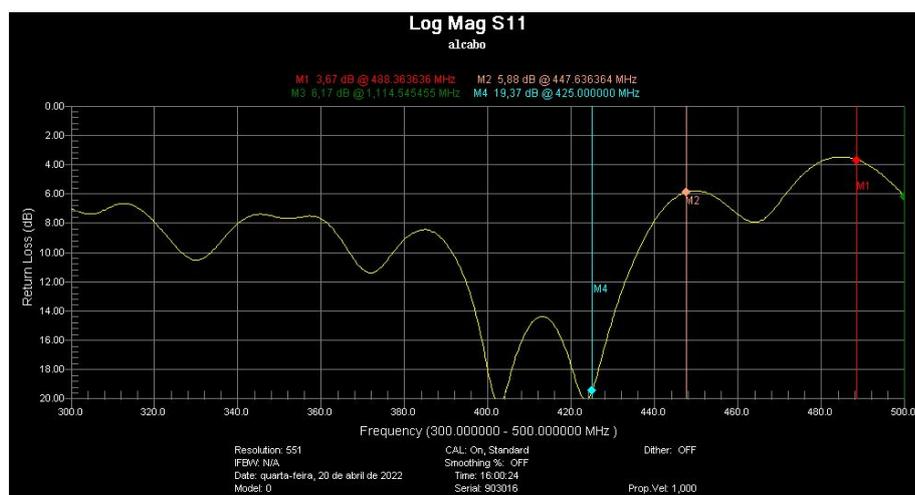


Figura 4.9: Gráfico da perda de retorno da antena 1.

É possível ver no gráfico da Figura 4.9 que a perda de retorno é superior a 10 dB em todo o intervalo entre 400 e 430 MHz. Portanto, a antena 1 é adequada para ser utilizada nos testes de transmissão UHF nessa faixa de frequência.



Figura 4.10: Estrutura utilizada para medição da perda de retorno da antena 2 (identificação 146035011).

A Figura 4.11 mostra o gráfico da perda de retorno da antena 2 obtido na medição.

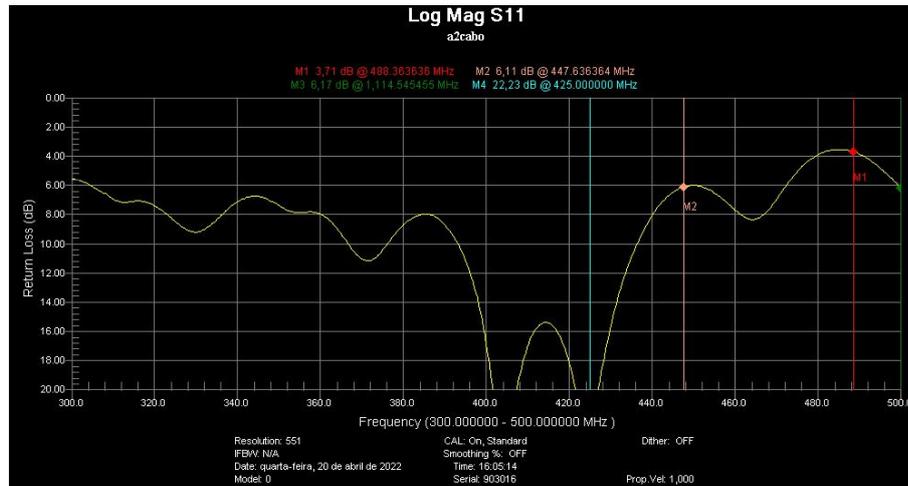


Figura 4.11: Gráfico da perda de retorno da antena 2.

Da forma análoga à antena 1, é possível ver no gráfico da Figura 4.11 que, para antena 2, a perda de retorno é superior a 10 dB em todo o intervalo entre 400 e 430 MHz. Portanto, a antena 2 também é adequada para ser utilizada nos testes de transmissão UHF nessa faixa de frequência.

4.3 Transmissão UHF em laboratório

Para transmissão UHF, no LProp, do sinal contendo os dados dos 32 barretes de hidrofones, o sinal é enviado da antena 1 (transmissora) para antena 2 (receptora), com a distância entre as antenas superior a 2,21 m, como calculado anteriormente pela Equação (4.1).

A onda portadora proveniente do gerador de funções Anritsu MG3700A é ajustada para frequência de 410 MHz e a antena 2 é conectada ao analisador de espectro Anritsu MS2034A para observar o espectro de frequência do sinal recebido, como pode ser visto no esquema da Figura 4.12.

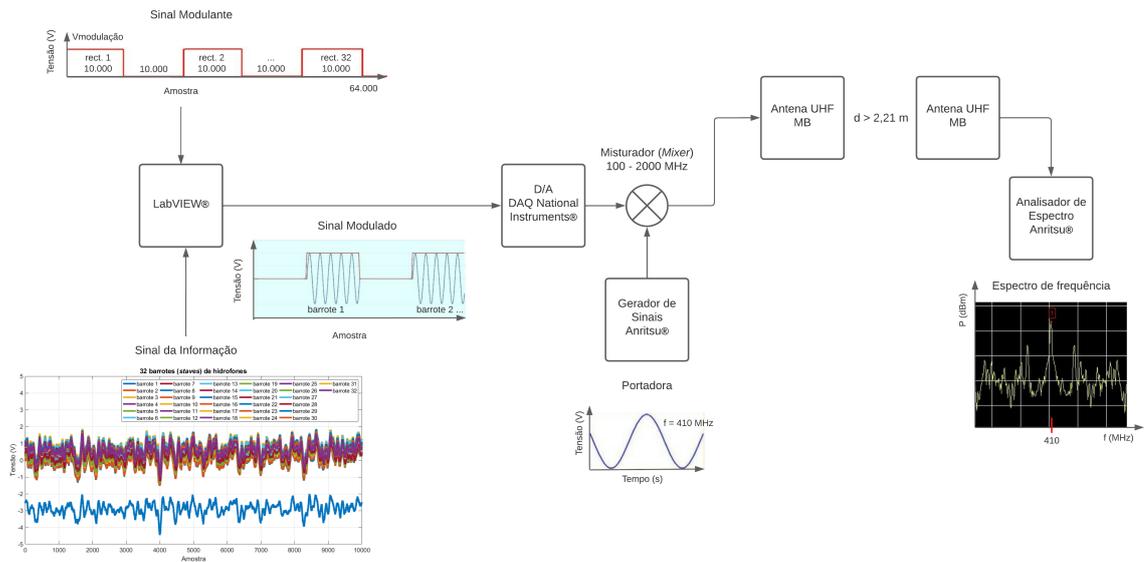


Figura 4.12: Esquema para transmissão UHF no laboratório dos sinais dos barrotes (*staves*) de hidrofones.

Durante a transmissão, o envio do sinal dos hidrofones é ligado e desligado no LabVIEW, assim, é possível comparar o espectro de frequência do sinal recebido nessas duas situações e garantir que o sinal está sendo transmitido.

A montagem em laboratório para transmissão UHF dos sinais dos barrotes de hidrofones pode ser vista na Figura 4.13.

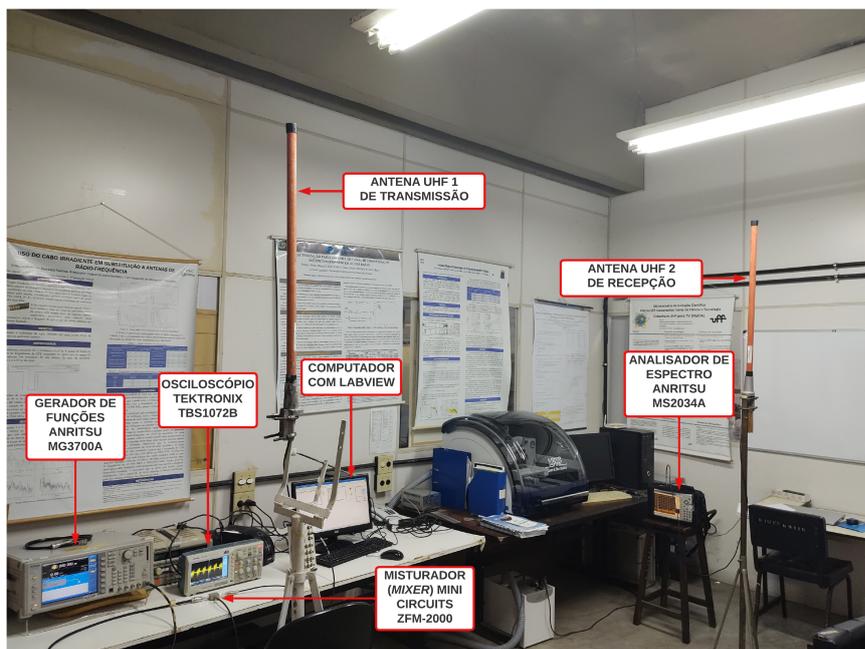


Figura 4.13: Montagem em laboratório para transmissão UHF dos sinais dos barretes (*staves*) de hidrofones.

A Figura 4.14 mostra o espectro de frequência da portadora.

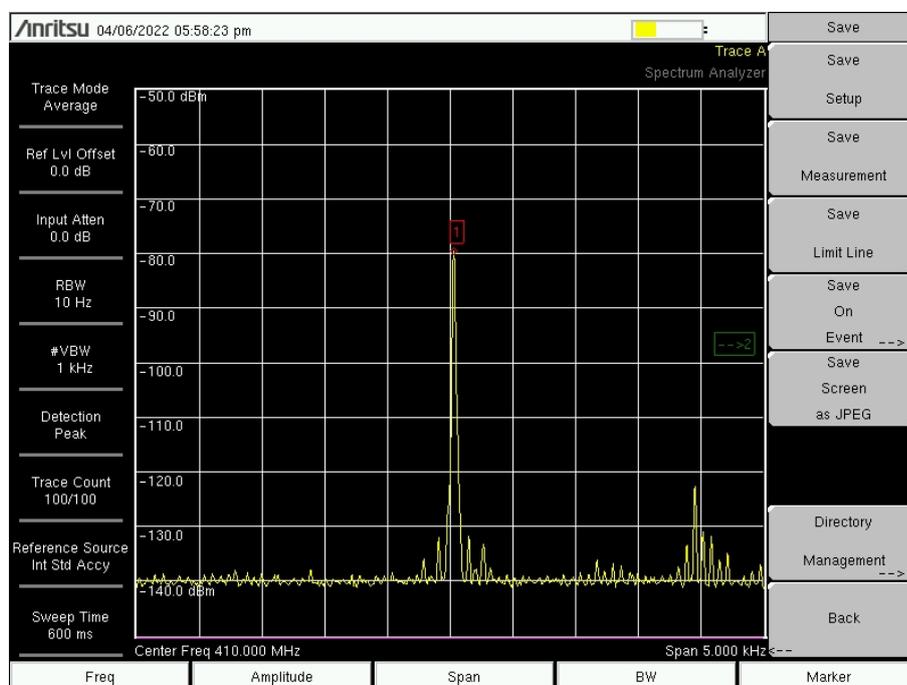


Figura 4.14: Espectro de frequência da portadora.

A Figura 4.15 mostra o espectro de frequência da portadora junto com os sinais dos barretes de hidrofones transmitidos.

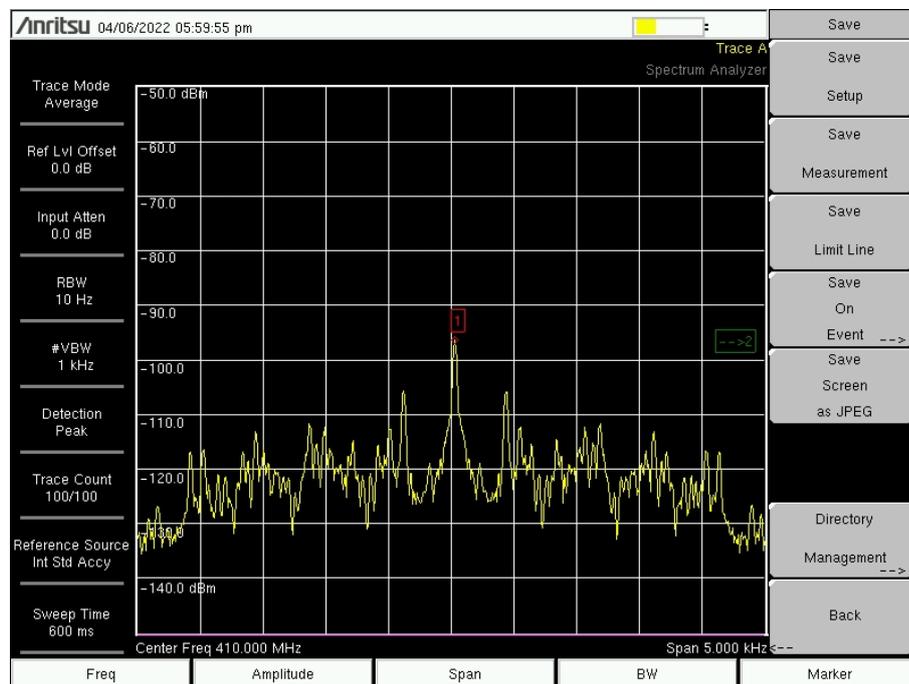


Figura 4.15: Espectro de frequência da portadora junto com os sinais dos barretes (*staves*) de hidrofones transmitidos.

Na Figura 4.15 pode-se ver um alargamento da base do espectro de frequência, na frequência de 410 MHz do sinal transmitido em relação ao espectro de frequência da portadora, presente na Figura 4.14, sendo assim, pode-se identificar a transmissão do sinal dos 32 barretes de hidrofones nos testes realizados.

É possível identificar no resultado das medidas, uma banda de 5 kHz para o sinal transmitido entre as antenas e a variação na amplitude de aproximadamente -80 dBm do sinal da onda portadora, para -95 dBm do sinal contendo os dados dos hidrofones, na frequência central de 410 MHz.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho inicialmente apresenta a área marítima a partir da costa do Brasil denominada Amazônia Azul [1], sua importância para o país e como é realizada atualmente a vigilância dessa área pela MB. Mostra exemplos da aplicação da vigilância acústica desde a Guerra Fria aos dias de hoje e cita exemplos da utilização no país de boias equipadas com sensores acústicos para fins meteorológicos e ambientais.

Dado que o Brasil não possui um sistema de vigilância permanente através do uso de sensores acústicos, é proposto um projeto de vigilância acústica da costa brasileira através de uma rede de hidrofones instalados em boias fundeadas, as quais transmitem para os navios da MB, via radiofrequência UHF, os sinais acústicos de navios de superfície e submarinos que venham a transitar na Amazônia Azul.

No cálculo das perdas de propagação na transmissão considerada neste projeto, são relacionadas equações das perdas na transmissão UHF sobre a superfície do mar calmo, sem ventos, no modelo de Terra esférica [16, 17], e essas perdas são calculadas para as distâncias de 15 a 50 km entre o transmissor e o receptor, com a altura das antenas das boias igual a 3 m, e a altura das antenas dos navios que irão coletar os dados variando entre 3, 10, 20, 30, 40 e 50 m, para as frequências de 300, 450 MHz e 1, 2 e 3 GHz.

Adicionalmente é realizada uma pesquisa da propagação em radiofrequência em diferentes estados do mar relacionados na escala Beaufort [10], onde são calculadas, de forma aproximada, as alturas das ondas a partir das quais é necessário considerar a influência da rugosidade do mar na propagação. O cálculo é efetuado para as frequências de 300, 450 MHz e 1, 2 e 3 GHz, na distância de 15 km e altura da antena do navio de 50 m, utilizando o modelo de Terra plana [16] disponível. Também são calculadas as alturas das ondas e os respectivos valores da escala Beaufort no limite para que a reflexão seja

especular, nas frequências 1, 2 e 3 GHz para as alturas da antena do navio de 10, 20, 30, 40 e 50 m, utilizando o critério de Rayleigh [16]. Ainda é mostrado o gráfico da perda básica da transmissão em várias alturas de antenas em função do comprimento do enlace entre transmissor-receptor, em 10 MHz, apresentado no trabalho de Barrick [8]. E são relacionados diversos trabalhos de autores que estudaram a propagação das ondas de rádio no ambiente marítimo.

Por fim, são realizados testes para transmissão UHF com dados reais de hidrofones, os quais foram adquiridos pela MB por meio de um arranjo cilíndrico com 32 barotes de três hidrofones cada, na medição de sinais acústicos de navios mercantes na Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro - RJ, e disponibilizados para o XII ETAS. Esses sinais foram modulados em AM em banda básica e transmitidos no LARProp entre um par de antenas UHF. Nos testes foram verificados suas formas de onda, medidas as perdas de retorno das antenas e obtidos o espectro de frequência da onda portadora e dos sinais transmitidos.

As contribuições deste trabalho estão relacionadas a seguir.

- Com base nos resultados dos cálculos das perdas de propagação:
 - Na mesma frequência de transmissão, pode-se observar nos gráficos das Figuras 2.4 a 2.8, que as perdas de percurso se elevam com o aumento da distância entre as antenas e com a redução da altura da antena do navio.
 - Para cada km acrescentado na distância entre as antenas, nas transmissões da boia para o navio, pode-se observar no gráfico da Figura 2.9, que para distâncias de 15 até 23 km, a frequência de 3 GHz com altura da antena do navio de 50 m apresenta a menor perda de percurso. Entretanto, para distâncias acima de 23 até 50 km, a frequência de 300 MHz com altura da antena do navio de 50 m é a que apresenta a menor perda de percurso. Isso se dá devido a atenuação pela distância $F(X)$, dada pela Equação (2.6), apresentar dois cálculos diferentes, dependendo do valor do percurso normalizado X , que é função da frequência f e da distância d .
 - Para a distância de 20 milhas náuticas (37,04 km) entre as antenas, pode-se observar, no gráfico da Figura 2.10, que as perdas decrescem com o aumento da altura da antena e com a redução da frequência de transmissão.

- A maior variação das perdas de percurso ocorre no caso da transmissão em 50 km entre a frequência de 300 MHz, com altura da antena do navio de 50 m (156,12 dB), e 3 GHz, com altura da antena do navio ou outra boia de 3 m (207,07 dB). No caso da transmissão em 20 milhas náuticas, a maior variação entre as perdas de percurso é para a antena do navio ou outra boia com altura de 3 m, sendo a menor perda de percurso para frequência de 300 MHz (171,89 dB) e a maior em 3 GHz (188,48 dB).
 - Nas transmissões em 20 milhas náuticas, a diferença entre as perdas para as frequências de 300 MHz (146,55 dB) e 450 MHz (147,69 dB) com antenas de 50 m de altura são desprezíveis. Porém, a diferença passa a ser relevante comparando as perdas na mesma frequência de 450 MHz, entre a transmissão com a antena de 50 m e a de 3 m (173,63 dB) de altura. Posto isto, é possível observar uma maior influência nas perdas para variação da altura das antenas do que na variação da frequência para estes casos.
 - Para as perdas de percurso nas transmissões do navio para boia de 15 a 18 km, é possível identificar alguns casos para antenas do navio de 40 e 50 m, nas frequências de 2 e 3 GHz, em que as perdas de percurso foram ligeiramente superiores às das transmissões da boia para o navio, como mostra a Tabela 2.2. Portanto, deve-se considerar a maior perda de percurso, a fim de garantir que seja possível a comunicação do navio com as boias.
- Com base na pesquisa da propagação em diferentes estados do mar:
 - Nas transmissões sobre a superfície do mar em frequências de 300 a 450 MHz não há necessidade de se considerar a rugosidade do mar para as perdas de propagação. No entanto, para as frequências de 1 a 3 GHz existem algumas condições de mar correspondentes à escala Beaufort [10] em que a influência das ondas deve ser considerada, como mostra a Tabela 3.2.
 - Diversos estudos têm sido encontrados para as transmissões em que os valores da escala Beaufort são diferentes de zero, porém, a expressão da perda introduzida pela rugosidade da superfície do mar ainda é objeto de estudo e não se dispõe de equações para determinar o acréscimo de perda devido ao espalhamento nas ondas para toda a faixa de frequências desejada neste trabalho.

- Com base nos testes para transmissão UHF com dados reais de hidrofones:
 - Apesar dos resultados dos cálculos indicarem que as frequências de 3 GHz e 300 MHz seriam as ideais para a transmissão próxima aos limites inferiores e superiores, respectivamente, das distâncias de 15 a 50 km avaliadas, a disponibilidade das antenas e equipamentos utilizados para os testes mostraram que sinais obtidos por hidrofones podem ser satisfatoriamente transmitidos na faixa de frequência entre 400 e 500 MHz, e possivelmente atingir distâncias superiores a 20 milhas náuticas (37,04 km) desejadas para o projeto proposto.
 - Para a aplicação prática, em longas distâncias no mar, é necessário que sejam utilizados amplificadores compatíveis com as perdas encontradas, e se faz necessário implementar todo sistema de recepção e decodificação, além de garantir que os equipamentos tenham proteção adequada para serem utilizados na superfície do mar.

As propostas de trabalhos futuros estão relacionadas a seguir.

- Estudo da transmissão sobre superfície do mar, realizando testes práticos nas distâncias e alturas das antenas compatíveis com as propostas para o projeto de vigilância acústica da costa brasileira.
- Análise da transmissão em diferentes estados do mar, realizando testes práticos com a medição das perdas de propagação para diversas condições de vento e ondas.

Parte deste trabalho foi publicado no artigo “Propagação de frequência ultra-alta sobre a superfície do mar aplicada à vigilância acústica da costa brasileira” na Revista Pesquisa Naval (2021) n. 33 [31].

Referências

- [1] BRASIL, M. do. *Amazônia Azul*. 2022. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/delareis/?q=amazoniazul>>.
- [2] NAVAL, P. *MB vai atualizar conhecimentos sobre acústica submarina e sistemas de sonar*. 2018. Disponível em: <<https://www.naval.com.br/blog/2018/06/10/mb-vai-atualizar-conhecimentos-sobre-acustica-submarina-e-sistemas-de-sonar/>>.
- [3] WIRE, B. *Thales vai fornecer sonares aerotransportados de guerra antissubmarina para EUA, Índia, Grécia e Dinamarca*. 2022. Disponível em: <<https://www.businesswire.com/news/home/20210429005723/pt/>>.
- [4] SEA, D. of Sound in the. *Sound Surveillance System (SOSUS)*. 2022. Disponível em: <<https://dosits.org/galleries/technology-gallery/locating-objects-by-listening-to-their-sounds/sound-surveillance-system-sosus/>>.
- [5] CURIOSIDADES, D. e. *Como os aviões encontram submarinos em águas profundas?* 2022. Disponível em: <<https://www.dicasecuriosidades.net/2018/09/como-os-avioes-encontram-submarinos-em-aguas-profundas.html>>.
- [6] OPT. *PB3 PowerBuoy*. 2022. Disponível em: <<https://oceanpowertechologies.com/platform/operation/pb3-powerbuoy/>>.
- [7] CASTELLANOS, P. V. G. *Caracterização do Canal de Propagação Radiomóvel - Fundamentos*. 2020. Universidade Federal Fluminense. TCE10978 - Caracterização do Canal de Propagação Radiomóvel.
- [8] BARRICK, D. E. Theory of hf and vhf propagation across the rough sea, 2, application to hf and vhf propagation above the sea. *Radio Science*, v. 6, n. 5, p. 527–533, 1971.
- [9] FONSECA, W. D.; RISTOW, J. P.; TECNOLOGICAS, W. S. Localização tridimensional de alvos com arranjo cilíndrico de hidrofones por meio do beamforming considerando o campo difratado. *XII Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina (ETAS)*, 2016.
- [10] OFFICE, M. *Beaufort wind force scale*. 2022. Disponível em: <<http://www.metoffice.gov.uk/weather/marine/guide/beaufortscale.html>>.
- [11] NAVAL, P. *Quanto custa uma sonoboia*. 2012. Disponível em: <<https://www.naval.com.br/blog/2012/02/22/quanto-custa-uma-sonoboia/>>.
- [12] RICE, J.; WILSON, G.; BARLETT, M.; SMITH, J.; CHEN, T.; FLETCHER, C.; CREBER, B.; RASHEED, Z.; TAYLOR, G.; HAERING, N. Maritime surveillance in the intracoastal waterway using networked underwater acoustic sensors integrated

- with a regional command center. In: IEEE. *2010 International WaterSide Security Conference*. [S.l.], 2010. p. 1–6.
- [13] FREITAS, L. de L. *Análise da Propagação Troposférica em Meios Inomogêneos Bidimensionais Marítimos Utilizando Traçado de Raios e Dados Meteorológicos de Boias Oceanográficas*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.
- [14] BRASIL, M. do. *PNBOIA*. 2022. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia>>.
- [15] PETROBRAS. *Comunicação Bacia de Santos*. 2022. Disponível em: <<https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/programa-ambiental/projeto-de-monitoramento-da-paisagem-acustica-submarina-pmpas.html>>.
- [16] BELLO, J. C. D. *Propagação de ondas eletromagnéticas-Teoria e Projetos*. [S.l.]: PUBLIT Editora, 2014.
- [17] ITU. *Recommendation ITU-R P.526-15: Propagation by diffraction*. Genebra, 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526-15-201910-I/en>>.
- [18] SOUZA, L. C. C. de. *Contribuições Ao Desenvolvimento Do Projeto Da Raia Virtual De Tiro Da Marinha*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- [19] BARRICK, D. E. Theory of hf and vhf propagation across the rough sea, 1, the effective surface impedance for a slightly rough highly conducting medium at grazing incidence. *Radio Science*, v. 6, n. 5, p. 517–526, 1971.
- [20] RYAN, F. J.; JOHNSON, J. T.; BURKHOLDER, R. J. A comparison of propagation over rough sea surfaces using mom and pwe methods. In: IEEE. *2014 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*. [S.l.], 2014. p. 1–1.
- [21] LEVY, M. *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. Londres, Reino Unido: Institution of Engineering and Technology, 2000.
- [22] GUO, J.; WANG, J.; LONG, Y. Analysis of radio propagation over rough sea surface with parabolic equation. *J. Commun*, v. 30, p. 47–52, 2009.
- [23] GUO, L.; LI, H.; YANG, C. Characteristics of radio wave propagation in the evaporation duct environment over the rough surface by the improved dmft algorithm. *Chin. J. Radio Sci*, v. 24, p. 414–421, 2009.
- [24] GAO, Y.; SHAO, Q.; YAN, B.; LI, Q.; GUO, S. Parabolic equation modeling of electromagnetic wave propagation over rough sea surfaces. *Sensors*, MDPI, v. 19, n. 5, p. 1252, 2019.
- [25] NILSSON, M. *Radio-wave propagation modelling over rough sea surfaces and inhomogeneous atmosphere*. Dissertação (Mestrado) — Karlstads Universitet, 2021.

- [26] TANG, L.; WANG, K. Modeling propagation over rough sea surface in duct environment by two-way parabolic equation. In: IEEE. *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. [S.l.], 2020. p. 1–3.
- [27] XIANGMING, G.; YUSHENG, Z.; HUI, Z.; SHIFENG, K. Modeling through sea surface and its application in the evaporation duct propagation. *Chinese Journal of Radio Science*, v. 37, n. 2, p. 183–188, 2022.
- [28] STEELBRAS. *AP10351 - Antena base UHF*. 2022. Disponível em: <<https://www.steelbras.com.br/wp-content/uploads/2019/10/AP10351-420-A-480-MHz-3dB.pdf>>.
- [29] RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [30] BALANIS, C. A. *Antenna theory: analysis and design*. [S.l.]: John wiley & sons, 2015.
- [31] CARDOSO, S. V.; SOUZA, L. P. de; MOTA, V. L. G.; MATOS, L. J. de; MAGRI, V. P. R. Propagação de frequência ultra-alta sobre a superfície do mar aplicada à vigilância acústica da costa brasileira. *Revista Pesquisa Naval*, n. 33, p. 67–73, 2021.