

ANTÔNIO WALKIR SIBANTO CALDEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ARRAY DE HIDROFONES LINEAR REBOCADO
PARA EXPERIMENTO NO MAR**

São Paulo

2017

ANTÔNIO WALKIR SIBANTO CALDEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ARRAY DE HIDROFONES LINEAR REBOCADO
PARA EXPERIMENTO NO MAR**

Relatório apresentado à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo como requisito da disciplina PMR2550 –
Projeto de Conclusão de Curso II

Área de Concentração: Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Linilson Rodrigues Padovese

São Paulo

2017

Catalogação-na-publicação

CALDEIRA, ANTÔNIO WALKIR SIBANTO
DESENVOLVIMENTO DE UM ARRAY DE HIDROFONES LINEAR
REBOCADO PARA EXPERIMENTO NO MAR / A. W. S. CALDEIRA -- São
Paulo, 2017.
126 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS 2.PROCESSAMENTO DE
SINAIS ACÚSTICOS 3.HIDROFONES 4.ACÚSTICA SUBMARINA
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

RESUMO

Este documento tem como objetivo descrever o projeto e o desenvolvimento de um arranjo linear de hidrofones rebocado por uma embarcação de pequeno porte visando detectar sinais acústicos para, através de processamento digital de sinais e implementação de algoritmos, calcular a direcionalidade da fonte acústica submarina. O projeto abrange a concepção mecânica do protótipo, as conexões elétricas associadas aos sensores e seus condicionadores, o processamento digital dos sinais recebidos e a implementação de algoritmos específicos para a geometria escolhida para o arranjo de hidrofones, além da descrição da metodologia utilizada para a validação do protótipo através de testes preliminares e experimento no mar.

Palavras-chaves: arranjo de hidrofones, acústica submarina, direcionalidade, processamento digital de sinais

ABSTRACT

This document aims to describe the design and development of a linear array of hydrophones towed by a small vessel to detect acoustic signals and calculate the directionality of the submarine acoustic source through digital signal processing and algorithm implementation. The project involves the mechanical design of the prototype, the electrical connections associated with the sensors and their conditioners, the digital processing of the received signals and the implementation of specific algorithms for the geometry chosen for the array of hydrophones, and also the description of the methodology used for validation of the prototype through preliminary tests and sea experiment.

Palavras-chaves: array of hydrophones, underwater acoustics, directionality, digital signal processing

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus, à minha família, e a todos aqueles que, assim como eu, são apaixonados por Acústica Submarina.

AGRADECIMENTOS

Dirijo meus agradecimentos:

Primeiramente a Deus, por permitir que eu transformasse o meu sonho em realidade.

Ao meu pai, Heraldo, minha mãe, Sandra, minha irmã, Ana Luiza e minha esposa, Camilla, por todo apoio dado antes e durante este trabalho, sendo sempre meu porto seguro nas horas mais difíceis.

A Marinha do Brasil, pela oportunidade de concluir este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecatrônica em uma instituição de ensino de excelência no país.

Ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), em especial ao Capitão-de-Fragata Hugo Chaves e Suboficial (RM1) Nonato, cujo entusiasmo e empenho foram essenciais durante todo o projeto, principalmente nos estágios no IEAPM onde pude aprender bastante sobre Acústica Submarina, e na realização dos testes dinâmicos do protótipo que permitiu concluir o trabalho com um sucesso plenamente satisfatório. Para eles, tenho uma eterna dívida de gratidão.

Agradeço profundamente ao engenheiro William Soares e ao Capitão-de-Fragata Barreira, ambos do Instituto de Pesquisas da Marinha, e ainda ao professor Felisberto, da Universidade de Algarve, pelos valiosos ensinamentos em Processamento de Sinais.

Ao Capitão-de-Mar-e-Guerra (RM1) Sbragio, do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, por ter me auxiliado no projeto mecânico do *array* e por aceitar em fazer parte da minha banca de avaliação do TCC.

Aos integrantes do Laboratório de Acústica e Meio Ambiente, em especial meu orientador, Linilson Padovese, e meus companheiros Hélder Santos e Victor Romero, cujos apoios em todas as etapas deste projeto foram indispensáveis para sua conclusão.

Aos técnicos Gilberto, Fidel e Carlos, da oficina da Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo, pelos auxílios na usinagem de algumas peças e pelas importantes observações que me ajudaram no esboço inicial do protótipo.

Por fim, agradeço a todos os meus colegas, da Marinha do Brasil e da Engenharia Mecatrônica que, de forma direta ou indireta, me ajudaram em todos estes anos e me motivaram a concluir este trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de <i>arrays</i> : (a) <i>array linear</i> , (b) <i>array circular</i> , (c) <i>array conforme</i> , (d) <i>array cilíndrico</i> e (e) <i>array esférico</i> . Extraído de [28].....	16
Figura 2 - Sistema Sonar proposto por Hayes, 1917. Extraído de [12].....	19
Figura 3 - Esquemático de uma detecção passiva de longo alcance de um submarino localizado em águas polares através de um sistema de vigilância acústica em uma região temperada. Extraído de [21].....	20
Figura 4 - Esquema dos experimentos propostos por Galante. Extraído de [5].....	21
Figura 5 - <i>Array</i> de hidrofones (esquerda) e módulo de proteção do hidrofone propostos por Parente e Ferraz. Extraído de [7].....	21
Figura 6 - Desenho Esquemática do <i>array</i> proposto por Pallayil. Extraído de [14].....	23
Figura 7 - <i>Torpedo Array</i> (esquerda) e <i>X-Array</i> desenvolvidos por Barkley et al. Extraído de [18].....	24
Figura 8 - Dispersão Esférica e Cilíndrica.....	26
Figura 9 - Ambiguidade cônica de um <i>array linear</i> . Adaptado de [33].....	34
Figura 10 - Esquema um sinal de ondas planas atingindo o <i>array</i> . Extraído de [10].....	35
Figura 11 - Função de abertura retangular, função de diretividade e a resposta angular através de um diagrama polar. Extraído de [23].....	37
Figura 12 - Função de diretividade sob o ponto de vista tridimensional. Extraído de [23].....	38
Figura 13 - Esquema de um sinal de ondas planas atingindo os elementos do <i>array</i> . Adaptado de [3].....	38
Figura 14 - Largura de Feixe de 3 dB. Adaptado de [4].....	42
Figura 15 - Redução da abertura por ocasião do direcionamento de feixe. Extraído de [4] ..	42
Figura 16 - Configuração conhecida como <i>Triplet Array</i> . Extraído de [26].....	46
Figura 17 - Emprego de <i>arrays</i> paralelos para resolução da ambiguidade. Extraído de [28]..	47
Figura 18 - Resolução da ambiguidade através da alteração de rumo. Extraído de [28].....	47
Figura 19 - Obtenção da localização estimada do alvo através de marcações sucessivas. Adaptado de [29].....	48
Figura 20 - Representação simplificada de um <i>array linear</i> rebocado. Extraído de [26].....	51
Figura 21 - Diagramas de irradiação do <i>array linear</i> para diferentes espaçamentos entre os hidrofones em comparação a um determinado comprimento de onda. Extraído de [23].....	53
Figura 22 - Espaçamento entre os hidrofones	54
Figura 23 - Esquema da seção frontal do <i>array</i>	58
Figura 24 - Esquema da seção traseira do <i>array</i>	59
Figura 25 - Estanqueidade na proa do <i>array</i>	60
Figura 26 - Estanqueidade na popa do <i>array</i>	60
Figura 27 - Cabo de reboque trincafiado com o cabo elétrico durante a inserção do protótipo no mar	61
Figura 28 - Cauda do <i>array</i>	62
Figura 29 - Foto do protótipo visto da seção frontal	63
Figura 30 - Foto do protótipo visto da seção traseira	63
Figura 31 - Foto do protótipo visto de cima	63
Figura 32 - Desenho esquemático do sistema eletrônico	65
Figura 33 - Hidrofone utilizado no projeto.....	66
Figura 34 - Pré-amplificadores utilizados no projeto	66

Figura 35 - Placa de áudio TASCAM US800	67
Figura 36 - Caixa de som submarina Aqua Symphony DARAVOC Underwater Speaker (MA001)	68
Figura 37 - Fonte acústica Lubell LL964	69
Figura 38 - Amplificador de potência Taramps TS800.1	69
Figura 39 - <i>Delay-and-sum Beamforming</i> . Extraído de [27].....	71
Figura 40 - Esquema simplificado do <i>Delay-and-sum Beamforming</i> . Extraído de [3].....	72
Figura 41 - <i>Filter-and-sum beamforming</i> . Extraído de [27].....	73
Figura 42 - Fluxograma da integração da parte eletrônica com os <i>softwares</i> implementados e desenvolvidos para este projeto.....	74
Figura 43 - Exemplo de propagação do som no a) campo distante e b) campo próximo. Extraído de [27]......	76
Figura 44 - Fluxograma da metodologia para validação do projeto.....	77
Figura 45 - Tanque para testes de estanqueidade	78
Figura 46 - Esquema utilizado para o teste no laboratório	79
Figura 47 - Vista fora d'água do esquema do teste estático no tanque de saltos da CEPEUSP84	
Figura 48 - Vista debaixo d'água do esquema do teste estático no tanque de saltos da CEPEUSP	84
Figura 49 - Embarcação Anchova, pertencente ao IEAPM, que rebocou o <i>array</i> durante os testes	89
Figura 50 - Visão geral da região do primeiro experimento. Adaptado do <i>Google Earth</i>	90
Figura 51 - Esgotamento de água da embarcação, um dos responsáveis pela geração de ruído	91
Figura 52 - Fonte acústica sendo colocada no mar pelo lado direito da embarcação.....	94
Figura 53 - Esquema do reboque do <i>array</i> de hidrofones vista de cima	96
Figura 54 - Embarcação responsável por emitir o sinal acústico	103
Figura 55 - Visão geral da região do segundo experimento. Adaptado do <i>Google Earth</i>	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Material X Impedância Acústica.....	57
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Índice de Diretividade para 2 elementos.....	31
Gráfico 2 - Índice de Diretividade para 3 elementos.....	32
Gráfico 3 - Índice de Diretividade para 4 elementos.....	33
Gráfico 4 - Diagrama polar da função de diretividade para 2, 3, e 4 elementos	40
Gráfico 5 - Diagrama polar da função de diretividade para 2, 3, e 4 elementos para um direcionamento de feixe de 45° em relação ao eixo do <i>array</i>	43
Gráfico 6 - Função de diretividade para diversos tipos de janelamento.....	45
Gráfico 7 - Espectrograma obtido por estudos do LACMAM. Cedido pelo Professor Dr. L. Padovese e calculado por <i>software</i> próprio desenvolvido no laboratório.	49
Gráfico 8 - Resposta em Frequência para magnitude e fase do filtro FIR utilizado	80
Gráfico 9 - Espectrograma do primeiro hidrofone a receber o sinal sem filtro emitido à frente do <i>array</i>	80
Gráfico 10 - Espectrograma do primeiro hidrofone a receber o sinal filtrado emitido à frente do <i>array</i>	81
Gráfico 11 - Resultado da direcionalidade do sinal, sem filtro, emitido pelo celular à frente do <i>array</i>	81
Gráfico 12 - Resultado da direcionalidade do sinal filtrado emitido pelo celular à frente do <i>array</i>	82
Gráfico 13 - Resultado da direcionalidade do sinal emitido pelo celular atrás do <i>array</i>	82
Gráfico 14 - Resultado da direcionalidade do sinal emitido a 90° do eixo do <i>array</i>	83
Gráfico 15 - Espectrograma do ruído presente na piscina do CEPEUSP.....	85
Gráfico 16 - Espectrograma do ruído presente na piscina do CEPEUSP, com banda de frequência mais estreita, em que é possível verificar os ruídos na frequência de 60, 120, 180, 240, 300, 460, 420, 480 e 540 Hz.....	85
Gráfico 17 - Espectrograma dos impactos de um objeto metálico na piscina da CEPEUSP ...	86
Gráfico 18 - Espectrograma do sinal gerado pelo Audacity.....	86
Gráfico 19 - Espectrograma do sinal emitido na piscina do CEPEUSP.....	87
Gráfico 20 - Espectrograma do sinal emitido na piscina do CEPEUSP com banda de frequência estreita, para visualização dos sinais de até 500 Hz	87
Gráfico 21 - Espectrograma do ruído detectado pelo <i>array</i> , sem a presença de fontes acústicas de interesse	91
Gráfico 22 - Espectrograma de um ruído de baixa frequência gerado pela lançamento de uma âncora.....	92
Gráfico 23 - Espectrograma de um sinal emitido por golfinhos.....	92
Gráfico 24 - Espectrograma de um chirp emitido por baleias	93
Gráfico 25 - Espectrograma de um sinal de frequência constante emitido por baleias.....	93
Gráfico 26 - Espectrograma do chirp de baixa frequência emitidoa por uma fonte acústica...	94
Gráfico 27 - Espectrograma do chirp de alta frequência emitido por uma fonte acústica	95
Gráfico 28 - Espectrograma do sinal constante em baixa frequência emitido por uma fonte acústica	95
Gráfico 29 - Espectrograma do sinal constante em alta frequência emitido por uma fonte acústica	95
Gráfico 30 - Direcionalidade obtida do sinal de 1000 Hz	97

Gráfico 31 - Função diretividade para o sinal de 1000 Hz e outros parâmetros referentes ao <i>array</i> no gráfico retangular.....	97
Gráfico 32 - Função diretividade para o sinal de 1000 Hz e outros parâmetros referentes ao <i>array</i> no gráfico polar.....	98
Gráfico 33 – Direcionalidade obtida do sinal de 1500 Hz	98
Gráfico 34 - Função diretividade para o sinal de 1500 Hz e outros parâmetros referentes ao <i>array</i> no gráfico retangular.....	99
Gráfico 35 - Função diretividade para o sinal de 1500 Hz e outros parâmetros referentes ao <i>array</i> no gráfico polar.....	99
Gráfico 36 - Direcionalidade obtida do sinal de 2000 Hz	100
Gráfico 37 - Função diretividade para o sinal de 2000 Hz e outros parâmetros referentes ao <i>array</i> no gráfico retangular.....	100
Gráfico 38 - Função diretividade para o sinal de 2000 Hz e outros parâmetros referentes ao <i>array</i> no gráfico polar.....	101
Gráfico 39 - Direcionalidade obtida do sinal de 6500 Hz	101
Gráfico 40 - Função diretividade para o sinal de 6500 Hz e outros parâmetros referentes ao <i>array</i> no gráfico retangular.....	102
Gráfico 41 - Função diretividade para o sinal de 6500 Hz e outros parâmetros referentes ao <i>array</i> no gráfico polar.....	102
Gráfico 42 - Sinal emitido no segundo experimento no mar.....	104
Gráfico 43 - Sinal de 1000 kHz emitido na frente do <i>array</i>	105
Gráfico 44 - Sinal de 1500 Hz emitido na frente do <i>array</i>	105
Gráfico 45 - Sinal de 2000 Hz emitido na frente do <i>array</i>	106
Gráfico 46 - Sinal de 1000 Hz emitido próximo ao <i>broadside</i> do <i>array</i>	107
Gráfico 47 - Gráfico retangular para frequência de sintonia do <i>array</i> de 2 kHz e do sinal incidente de 1 kHz, com ângulo de incidência de 0°	107
Gráfico 48 - Gráfico polar para frequência de sintonia do <i>array</i> de 2 kHz e do sinal incidente de 1 kHz, com ângulo de incidência de 0°	108
Gráfico 49 - Sinal de 1500 Hz emitido próximo ao <i>broadside</i> do <i>array</i>	108
Gráfico 50 - Gráfico retangular para frequência de sintonia do <i>array</i> de 2 kHz e do sinal incidente de 1,5 kHz, com ângulo de incidência de 0°	109
Gráfico 51 - Gráfico polar para frequência de sintonia do <i>array</i> de 2 kHz e do sinal incidente de 1,5 kHz, com ângulo de incidência de 0°	109
Gráfico 52 - Sinal de 2000 Hz emitido próximo ao <i>broadside</i> do <i>array</i>	110
Gráfico 53 - Gráfico retangular para frequência de sintonia do <i>array</i> e do sinal incidente de 2 kHz, com ângulo de incidência de 0°	110
Gráfico 54 - Gráfico polar para frequência de sintonia do <i>array</i> e do sinal incidente de 2 kHz, com ângulo de incidência de 0°	111
Gráfico 55 - Sinal de 1000 Hz emitido atrás do <i>array</i>	112
Gráfico 56 - Sinal de 1500 Hz emitido atrás do <i>array</i>	112
Gráfico 57 - Sinal de 2000 Hz emitido atrás do <i>array</i>	113
Gráfico 58 - Sinal de 2000 Hz emitido atrás do <i>array</i> incidindo em uma direção próxima do <i>broadside</i>	113
Gráfico 59 - Gráfico retangular para frequência de sintonia do <i>array</i> e do sinal incidente de 2 kHz, com ângulo de incidência de -20°	114
Gráfico 60 - Gráfico polar para frequência de sintonia do <i>array</i> e do sinal incidente de 2 kHz, com ângulo de incidência de -20°	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEAPM	Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
IPqM	Instituto de Pesquisas da Marinha
LACMAM	Laboratório de Acústica e Meio Ambiente
U. A.	Unidade Arbitrária
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
CEPEUSP	Centro de Práticas Esportivas da Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1.0 Introdução	15
2.0 Objetivos.....	17
3.0 Motivações	18
4.0 Estado da Arte	19
5.0 Fundamentação Teórica.....	25
5.1 Equação do Sonar Passivo	25
5.2 Perdas na Transmissão.....	25
5.3 Ruído.....	28
5.4 Frequência de Trabalho	28
5.5 Sensibilidade	29
5.6 Ganho do <i>Array</i> e Índice de Diretividade	29
5.7 Função de Diretividade de um <i>array</i>	34
5.7.1 Filtro Espacial	34
5.7.2 <i>Array</i> Linha Contínuo	34
5.7.3 <i>Array</i> Linha Discreto.....	38
5.7.4 Direcionamento de Feixe (<i>beam steering</i>)	40
5.7.5 Ponderação dos hidrofones do <i>array</i> (<i>shading</i>)	43
5.8 Detecção, ambiguidade e localização	45
6.0 Requisitos de Projeto	49
7.0 Mecânica.....	51
7.1 Espaçamento entre hidrofones	52
7.2 Número de hidrofones	54
7.3 Escopo do <i>array</i>	54
7.4 Direcionalidade do hidrofone	55
7.5 Diâmetro do <i>array</i>	56
7.6 Material do <i>array</i>	57
7.7 Concepção do protótipo	58
8.0 Eletrônica.....	64
8.1 Hidrofones	66
8.2 Pré-Amplificadores	66
8.3 Placa de Aquisição	67
8.4 Sistema de emissão do sinal.....	68

9.0 Processamento Digital de Sinais.....	70
9.1 <i>Beamforming</i>	70
9.1.1 <i>Delay-and-sum Beamforming</i>	71
9.1.2 <i>Filter-and-sum Beamforming</i>	73
9.1.3 <i>Frequency-Domain Beamforming</i>	73
9.1.4 <i>Softwares</i> implementados e desenvolvidos para o projeto.....	73
10.0 Validação	75
10.1 Metodologia	76
10.2 Testes de estanqueidade.....	77
10.3 Testes no ar	78
10.4 Testes estáticos na água	83
10.5 Primeiro teste dinâmico no mar	87
10.5.1 Ruído	90
10.5.2 Golfinhos.....	92
10.5.3 Baleias	93
10.5.4 Fonte acústica.....	93
10.6 – Segundo teste dinâmico no mar	103
10.6.1 Sinais emitidos na frente do <i>array</i> de 1000, 1500 e 2000 Hz	105
10.6.2 Sinais emitidos próximo ao <i>broadsides</i> do <i>array</i> de 1000, 1500 e 2000 Hz.....	106
10.6.3 Sinais emitidos atrás do <i>array</i> de 1000, 1500 e 2000 Hz.....	111
11.0 Conclusão	115
12.0 Sugestões para trabalhos futuros	117
13.0 Referências	118
APÊNDICE A – ALGORITMOS UTILIZADOS PARA ESTUDOS DE PARÂMETROS DO ARRAY	121
APÊNDICE B – DESENHO DE CONJUNTO.....	125

1.0 Introdução

A introdução do submarino como artefato de guerra e as respectivas medidas de guerra anti-submarino visando detectar e neutralizar esta ameaça contribuíram para grandes avanços tecnológicos dos sistemas acústicos marinhos. O desenvolvimento de um *array* de hidrofones teve origem nesta necessidade bélica e visa aprimorar estes sistemas de detecção de sinais acústicos provenientes do ambiente subaquático.

Um hidrofone é um transdutor que funciona como receptor, cujos terminais são conectados a um circuito amplificador visando obter um sinal elétrico relacionado ao nível acústico contido na superfície da estrutura mecânica do transdutor. Ou seja, transforma uma onda mecânica acústica submarina em sinal de voltagem, que posteriormente pode ser digitalizado, armazenado e analisado.

Um *array* de hidrofones consiste em um conjunto de hidrofones espaçados e interligados eletricamente, e que são largamente empregados em aplicações que requerem a determinação da direitividade acústica. Dependendo da aplicação, um *array* pode ser fixo, tanto no fundo quanto em outras profundidades quando conectado a uma bóia, ou móvel, podendo estar fixado no casco do navio ou rebocado através de um cabo de reboque por uma embarcação.

O *array* de hidrofones desenvolvido neste trabalho é um sistema sonar passivo. O termo sonar (*Sound Navigation Ranging*) é usado para designar o ramo da engenharia que trata da aplicação da acústica submarina no uso e exploração dos mares. Os sistemas que empregam o som submarino são denominados, genericamente, sistemas sonar [2].

Os sonares passivos não são dotados de um emissor de sinais e são capazes de determinar, em um primeiro momento, a direção do sinal propagado, mas não a localização do alvo. As principais vantagens de um sonar passivo estão relacionadas com o maior alcance e, no caso específico de um submarino, uma maior capacidade de não ser detectado por navios inimigos, isto é, manter-se oculto.

Os sonares ativos, por outro lado, emitem pulsos sônicos que ecoam no alvo e retornam para serem recebidos pelos hidrofones. Como as características do sinal emitido são conhecidas, sabendo-se a velocidade de propagação da onda e medindo-se o tempo de retorno deste sinal é possível calcular, com relativa precisão, a distância do alvo.

Além disso, um *array* pode admitir diferentes formas geométricas que são divididas, basicamente, em três categorias: linear, planar e volumétrica [22]. A escolha pela melhor

geometria e disposição dos transdutores no *array* vai depender do propósito do seu emprego, da plataforma em que o *array* será instalado ou rebocado, e das opções de algoritmos de processamento, adequadas às características dos sinais e interferências separáveis através de filtros espaciais.

Na figura 1 há alguns exemplos de geometrias utilizadas para arranjos de sensores. O *array* linear é utilizado extensivamente nos sonares rebocados, de varredura lateral e de flanco. O *array* circular é utilizado em sonares de casco e sonobóias. O *array* conformado é empregado em sonares de torpedos e submarinos e, por fim, os *arrays* cilíndricos e esféricos são aproveitados em sistemas sonar de grandes submarinos e navios de superfície [28].

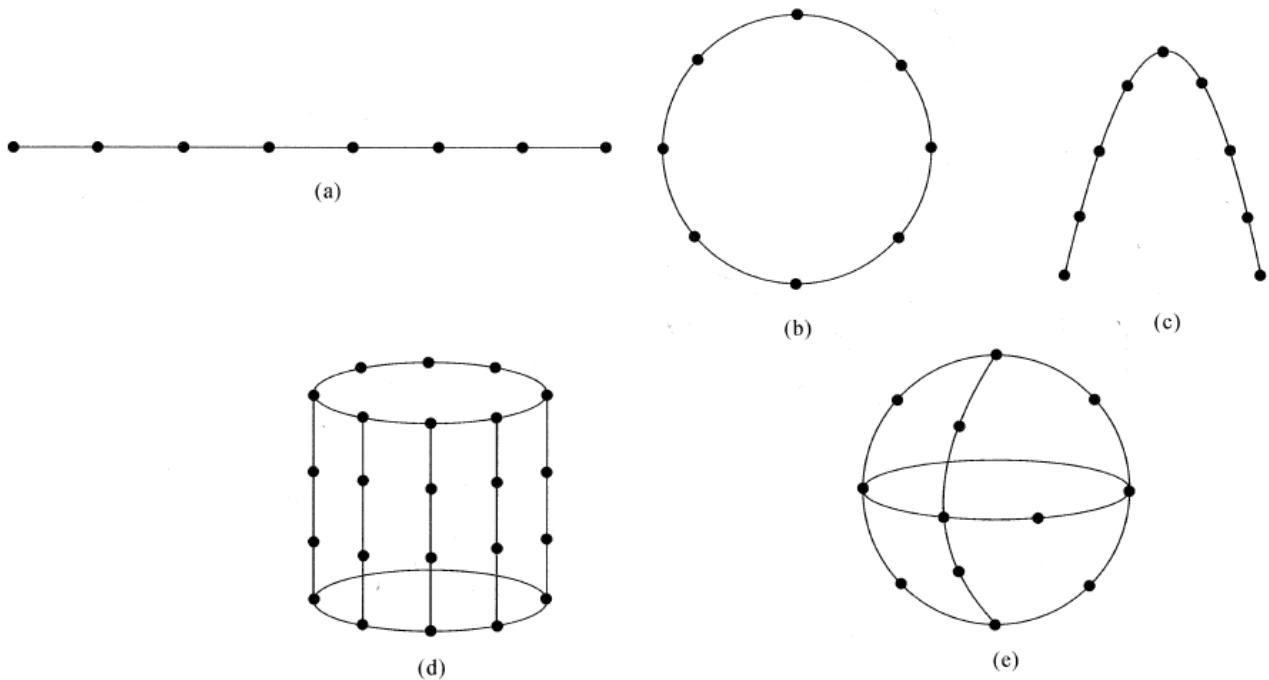


Figura 1 - Exemplos de *arrays*: (a) *array* linear, (b) *array* circular, (c) *array* conforme, (d) *array* cilíndrico e (e) *array* esférico. Extraído de [28].

Parente [7] afirma que o *array* de hidrofones possui duas funções básicas: a discriminação espacial contra ruídos e a determinação da direção de chegada dos sinais. Para o caso específico da detecção de submarinos pelos navios, cujos níveis de sinal são baixos, a obtenção de uma relação sinal-ruído satisfatória somente será possível com a utilização de um *array*.

Diversos *arrays* ou conjuntos de *arrays* foram implementados para outros fins além do propósito de guerra anti-submarino, como por exemplo a estimativa das propriedades geoacústicas do fundo do mar, tomografia acústica submarina, monitoramento de animais marinhos, tais como baleias, golfinhos ou cardume de peixes, dentre outras aplicações.

2.0 Objetivos

O projeto consiste no desenvolvimento de um *array* de hidrofones linear, horizontal e rebocado por uma embarcação de pequeno porte com o objetivo de detectar e calcular a direcionalidade de fontes acústicas submarinas a partir de análise realizada através do processamento digital de sinais.

A concepção mecânica do protótipo será realizada de modo a atender aos requisitos de projeto, que estão alinhados com as necessidades do Laboratório de Acústica e Meio Ambiente (LACMAM), da Universidade de São Paulo, para pesquisas na área de acústica.

Serão levados em consideração os aspectos que vão definir a capacidade do *array* de obter uma relação sinal-ruído capaz de detectar e definir a direcionalidade de um determinado sinal cuja frequência esteja dentro da frequência de interesse do *array*, sem negligenciar alguns fatores que podem contribuir para minimizar o ruído nas proximidades do *array* e reduzir as perdas da intensidade do sinal.

Após esta fase, serão realizadas as conexões elétricas dos sensores. Serão definidos os filtros necessários para evitar a ocorrência de *aliasing*, os pré-amplificadores para amplificarem os sinais provenientes dos hidrofones, e a placa de aquisição que fará a conversão analógico-digital dos sinais.

Com a concepção mecânica e elétrica do protótipo, serão desenvolvidos *softwares* necessários para a aquisição do sinal e seu respectivo processamento, de maneira a aplicar algoritmos que realizam a técnica de *beamforming* para detectar a direção de recepção do sinal.

Por fim, serão realizados testes de validação do protótipo, envolvendo testes de laboratório e de campo, quando é avaliado se os resultados obtidos estão compatíveis com os objetivos propostos.

O projeto tem a missão primordial de desenvolver um *array* de hidrofones a fim de contribuir para o desenvolvimento de pesquisa na área de acústica submarina.

3.0 Motivações

Os *arrays* de hidrofones desenvolvidos no Brasil foram concebidos para uma posição fixa no mar, seja na superfície, no fundo ou em alguma profundidade específica. Os submarinos da Marinha do Brasil contam com arranjos de hidrofones em seu casco para detecção de alvos. Entretanto, não há registro de trabalhos voltados ao desenvolvimento de *arrays* de hidrofones rebocados no país que contemplem, de forma detalhada, todos os subsistemas deste equipamento e experimentos para validação.

Comparado ao *array* fixo, o dispositivo rebocado possui a capacidade de não estar restrito a uma área específica, permitindo a detecção e localização de fontes sonoras próximas a uma embarcação em movimento. Com relação aos arranjos fixos ao casco, [19] cita algumas vantagens como, por exemplo:

- O comprimento do *array* é independente do tamanho da plataforma de reboque, podendo ser enrolado em um sarilho;
- Os sistemas, sejam eles passivos ou ativos, podem ser posicionados em camadas abaixo da superfície do mar cujas condições possam favorecer a propagação do som, aumentando-se a probabilidade de detecção;
- O *array* pode ser distanciado da plataforma de reboque através, apenas, do aumento do cabo de reboque, adquirindo a vantagem de redução da interferência dos ruídos irradiados pela embarcação;
- A manutenção do *array* pode ser realizada de forma independente, sem comprometer a operacionalidade da embarcação.

Embora haja algumas desvantagens, como limitação da detecção do sinal durante manobras da embarcação rebocadora e a necessidade de uma plataforma de reboque mais complexa para *arrays* de maiores dimensões [19], é possível notar a importância deste tipo de dispositivo em virtude da praticidade em sua aplicação e da sua maior capacidade de detectar frequências mais baixas.

4.0 Estado da Arte

Lasky et al. [12] apontam que o desenvolvimento dos primeiros *arrays* de hidrofones rebocados por uma embarcação teve o seu início durante a Primeira Guerra Mundial com o objetivo de neutralizar os submarinos inimigos, até então armas extremamente letais e dificilmente detectáveis.

Lemon [11] aponta que durante a Primeira Guerra Mundial, a Marinha Norte-Americana implementou testes bem-sucedidos de detecção de submarinos utilizando-se quatro *arrays* com doze hidrofones transportados no navio de guerra USS Jouett, sendo dois *arrays* rebocados um de cada lado e dois *arrays* montados no casco da embarcação, seguindo o projeto proposto por Hayes, um militar da Marinha. Este sistema de detecção tinha um alcance de 2000 jardas (cerca de 1829 metros), distância adequada para um ataque de submarino durante a Primeira Guerra Mundial.

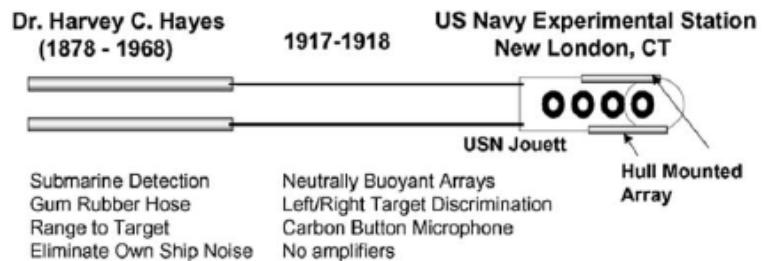


Figura 2 - Sistema Sonar proposto por Hayes, 1917. Extraído de [12].

No período entreguerras, a pesquisa e desenvolvimento relacionados ao *array* de hidrofones não tiveram avanços consideráveis. Durante a Segunda Guerra Mundial, quando Hitler invadiu a Dinamarca, um ex-oficial de salvamento da Marinha da Dinamarca C. Holm fugiu para os Estados Unidos e ofereceu os seus serviços à Marinha Norte-Americana, que culminou no projeto conhecido como *Project General*. Este projeto consistia na implementação de dois *arrays* rebocados, um de cada lado de um navio mercante, onde cada *array* possuía um sistema de detecção de torpedo e explosivos para destruir este armamento.

Em 1943, Ewing e Worzel descobriram o canal DSC (*Deep Sound Channel*), também conhecido como SOFAR (*Sound Fixing And Ranging Channel*) que é uma região de águas profundas no oceano cujo eixo é definido como a profundidade onde a velocidade do som é mínima. Acima deste eixo, a velocidade do som aumenta principalmente devido ao aumento da

temperatura, e abaixo do eixo a velocidade do som aumenta devido ao aumento da pressão hidrostática.

Se uma fonte sonora está localizada nas proximidades deste eixo, a energia acústica transmitida fica retida no interior desta região. Assim, a propagação do som oscila em torno do eixo do DSC e pode ser propagada por milhares de quilômetros.

Durante a Guerra Fria, com o intuito de explorar esta particular propriedade do perfil de velocidade do som na água, os Estados Unidos criaram um projeto multibilionário de sistema de detecção acústica submarina chamado SOSUS (*Sound Ocean Surveillance System*), que eram compostos por *arrays* de hidrofones com o propósito de monitorar os submarinos nucleares soviéticos, que detinham mísseis balísticos capazes de causar uma destruição considerável a longo alcance [21].

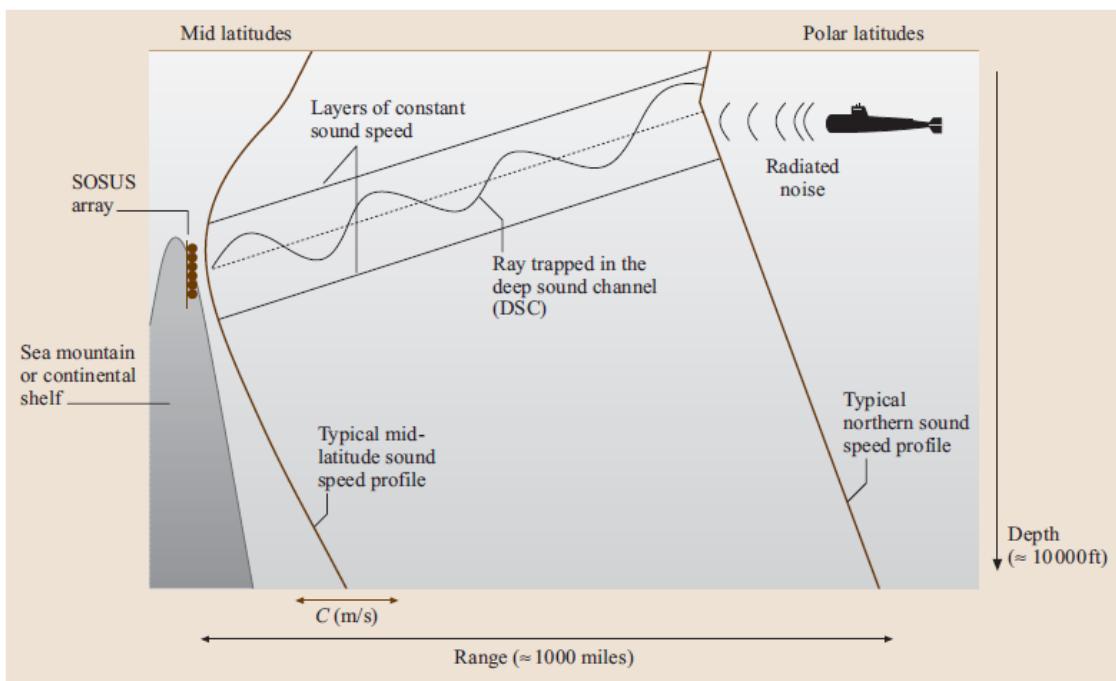


Figura 3 - Esquemático de uma detecção passiva de longo alcance de um submarino localizado em águas polares através de um sistema de vigilância acústica em uma região temperada. Extraído de [21].

Galante [5] utilizou um *array* fixo de aplicação geral em águas rasas, constituído por 24 hidrofones espaçados de 0,6 metros conectados em paralelo, de propriedade do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), para detecção de sinais acústicos de um navio com fonte sonora conhecida. Além disso, foi empregado um hidrofone de características conhecidas próximo ao *array*, de maneira a ser utilizado como padrão de comparação, possibilitando a correta aferição dos dados obtidos pelo *array*.

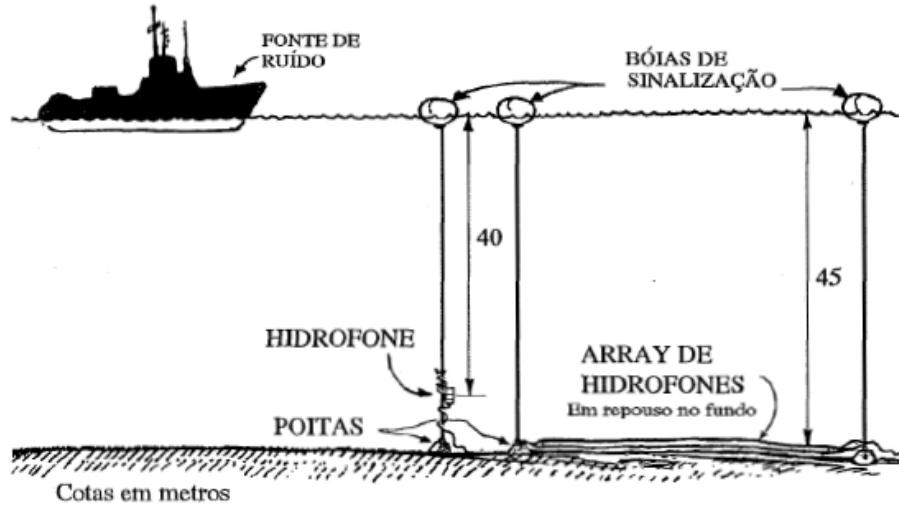


Figura 4 - Esquema dos experimentos propostos por Galante. Extraído de [5].

Parente e Ferraz [7] realizaram um importante trabalho no desenvolvimento de um *array* de hidrofones realizado pelo Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIOc) da COPPE/UFRJ, com apoio do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e do Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP), organizações militares pertencentes à Marinha do Brasil.

O projeto consistiu no desenvolvimento de um *array* de 16 hidrofones em linha interligados por um cabo de pequeno diâmetro, mas suficiente para suportar o peso do próprio *array* e do lastro adicional na extremidade final, sendo a outra extremidade do cabo conectada a um sistema de aquisição instalado em uma embarcação de pequeno porte.

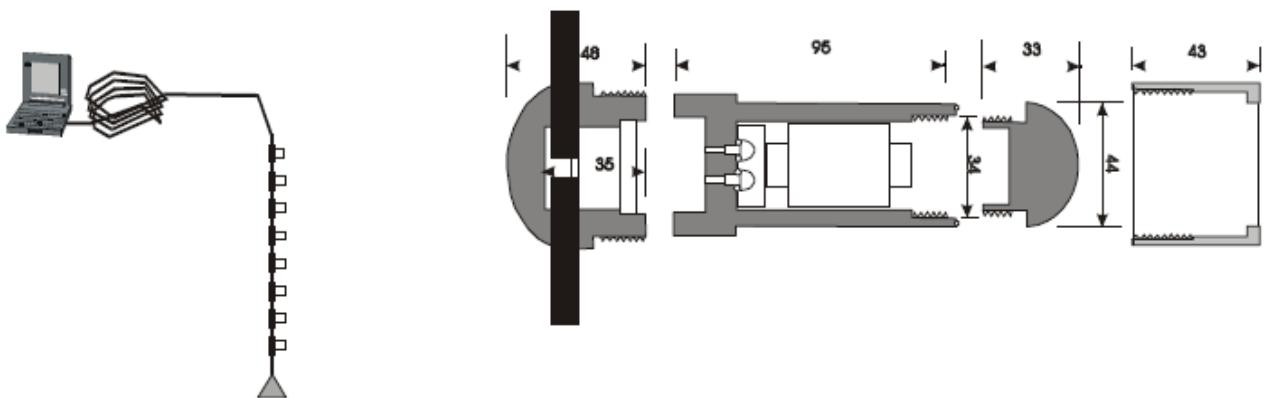


Figura 5 - *Array* de hidrofones (esquerda) e módulo de proteção do hidrofone propostos por Parente e Ferraz. Extraído de [7].

Santana [10] também concebeu o desenvolvimento de um *array* de 16 hidrofones para realização de testes ao sul da Ilha dos Franceses, em Arraial do Cabo, com o propósito de

comparar os ruídos dos elementos do *array* fixado no mar através de pequenas bóias e um hidrofone rebocado por uma pequena lancha.

Também foi realizado um teste comparativo com um hidrofone omnidirecional da Raia de Acústica Submarina da Marinha no IEAPM, também em Arraial do Cabo, com o propósito de verificar o ganho do *array* na relação sinal-ruído.

Brensing et al. [9], em seu artigo, ressaltou a importância do método de diferença de fase para a localização da fonte sonora. Através de seus estudos, verificou-se que, quanto menor o tempo de atraso na diferença de fase, melhor a resolução de marcação da fonte sonora. A maior vantagem deste método encontra-se na possibilidade de manter uma menor distância entre os hidrofones.

Holmes et al. [13], motivado pela qualidade dos resultados obtidos utilizando-se as técnicas de abertura sintética e inspirado pela tecnologia dos veículos submarinos autônomos (AUV), concluiu que a técnica de abertura sintética, necessária para baixas frequências quando as dimensões do detector acústico precisam ser maiores, utilizando a Transformada de Hankel teria um resultado eficiente e seria economicamente viável utilizando-se um veículo autônomo submarino rebocando um *array* de hidrofones.

Pallayil [14] realizou uma importante análise visando reduzir o diâmetro do *array*, diminuindo consequentemente o seu volume e peso. O objetivo deste projeto era obter um peso para o *array* não maior do que 2 quilos e possibilitar o reboque do *array* por um veículo autônomo submarino.

Para este estudo, foi projetado um *array* contendo 11 super elementos, onde cada super elemento continha seis hidrofones conectados em série e outros componentes eletrônicos.

Este *array* de hidrofones é chamado de digital porque é capaz de realizar a conversão analógico digital no interior do próprio *array* e enviar os dados digitalizados para a embarcação através da interface RS422.

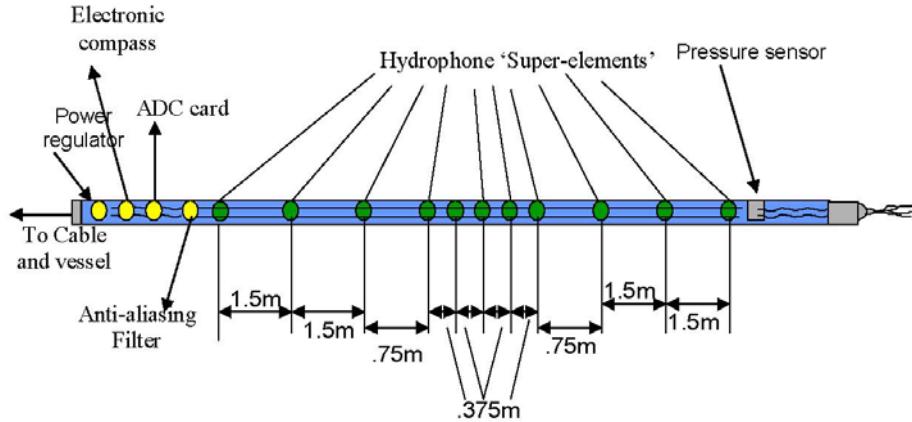


Figura 6 - Desenho Esquemática do *array* proposto por Pallayil. Extraído de [14].

Culver et al. [16], em seu artigo, concebeu um estudo referente à influência da dispersão de bolhas de ar no ganho do *array*. O ganho do *array* é considerado como a relação sinal-ruído proveniente de um *array* de hidrofones em comparação à relação sinal-ruído de um único hidrofone.

Os resultados de medição e simulação indicaram que os efeitos das bolhas geradas na esteira da embarcação que reboca o *array* de hidrofones não somente atenuam o sinal a ser detectado como prejudicam a relação sinal-ruído, reduzindo o ganho do *array*.

A teoria e a simulação provenientes de seu estudo permitem prever qual profundidade um *array* consegue ser rebocado por um navio com características das ondas acústicas conhecidas sem comprometer o ganho proporcionado pelo *array*.

Tran et al. [17] realizou um estudo de grande valor para a Biologia Marinha ao estudar a aplicação de um coerente sistema de recepção de sinal acústico implementado em um *array* horizontal rebocado para localização das baleias cachalote na Nova Inglaterra, nos Estados Unidos.

Enquanto procuram alimentos, estas baleias executam mergulhos profundos durante alguns minutos emitindo cliques de banda larga com curta duração, cujas frequências variam de alguns Hertz para mais de 30 kHz.

Cada clique apresenta uma estrutura multipulso proveniente das reflexões do sinal acústico geradas pelos lábios fônicos fora do frontal e dos sacos aéreos distais que delimitam o órgão do espermacete de uma baleia cachalote.

Desta forma, o intervalo de interpulso é capaz de mensurar o comprimento do órgão do espermacete que está fortemente relacionado com o tamanho de uma baleia cachalote [15].

Barkley et al. [18] desenvolveram dois *arrays* volumétricos, *Torpedo Array* e *X-Ray*, com o propósito de monitorar e realizar pesquisas acerca da população de cetáceos.

O *Torpedo Array* consiste em uma forma simplificada com quatro hidrofones montados no interior de uma casca cilíndrica de PVC igualmente espaçados entre si, enquanto o *X-Ray* possui os quatro hidrofones alojados dentro de estruturas de alumínios ligadas ao corpo do *array* formando-se uma configuração semelhante à letra “X”.

Durante os testes, verificou-se que o *Torpedo Array* alcançava resultados satisfatórios na relação sinal-ruído com uma velocidade do rebocador de até 9 nós, enquanto o *X-Ray* apresentava um aumento indesejável de ruído para velocidades acima de 6 nós.

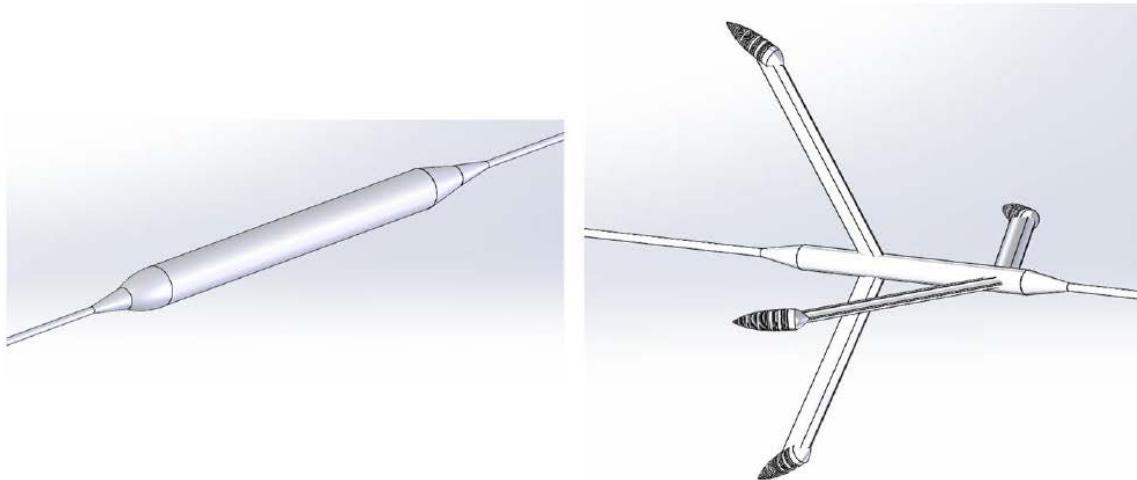


Figura 7 - *Torpedo Array* (esquerda) e *X-Array* desenvolvidos por Barkley et al. Extraído de [18].

5.0 Fundamentação Teórica

5.1 Equação do Sonar Passivo

A equação abaixo descreve o funcionamento de um sonar passivo.

$$DT = SL - TL - (NL - AG)$$

As abreviações compreendem os seguintes significados:

- DT (*Detection Target*) – Limiar de Detecção;
- TL (*Transmission Loss*) – Perda na Transmissão;
- NL (*Noise Level*) – Nível de Ruído;
- AG (*Array Gain*) – Ganho do Array; e
- SL (*Source Level*) – Nível da Fonte Sonora.

O limiar de detecção representa um nível adicional de sinal de saída do sensor que permita a detecção do sinal acústico.

As perdas na transmissão representam uma medida quantitativa da redução da intensidade do som entre a fonte sonora e o receptor.

O nível de ruído corresponde ao sinal obtido na saída do elemento transdutor cuja característica principal é a sua natureza aleatória e pode ser um ruído eletrônico, que muitas vezes é minimizado durante a concepção do projeto e é praticamente desprezível, e um ruído acústico, cuja fonte pode estar relacionada com fenômenos naturais associados à região, atividade humana ou vida marinha.

O ganho do *array* é uma medida que depende de fatores como a direção de chegada e a frequência do sinal, a geometria e frequência de trabalho do arranjo, e o número de elementos. Por fim, o nível da fonte sonora é a intensidade acústica emitida pela fonte.

5.2 Perdas na Transmissão

As perdas de propagação, no geral, dependem de cinco fatores:

- Refração, devido a gradientes de velocidade;
- Absorção por perda em forma de calor;
- Deflexão e reverberação por partículas suspensas;
- Reflexão no fundo e na superfície; e
- Dispersão, que ocorre à medida que o som se afasta de sua origem.

Em geral, os maiores componentes destas perdas são a dispersão do som e a absorção. A dispersão, ou espalhamento, pode ser de dois tipos: esférico ou cilíndrico. O espalhamento esférico ocorre quando uma fonte está localizada em um meio ilimitado e sem perdas, a energia é irradiada igualmente em todas as direções e a energia total, P , que é a multiplicação da intensidade sonora pela área de propagação, atravessa esferas de diferentes diâmetros sem sofrer alterações com o alcance. Portanto:

$$P = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2 = \dots 4\pi r_r^2 I_r$$

Para $r_1 = 1m$ tem-se: $TL = 10 \log\left(\frac{4\pi r^2}{4\pi}\right) = 10 \log r^2 = 20 \log r$, sendo r dado em metros.

O espalhamento cilíndrico, por outro lado, ocorre quando uma fonte é limitada por planos paralelos separados de uma distância h , e a energia total P será constante ao propagar-se nas superfícies cilíndricas, com o incremento do raio e decremento da intensidade sonora. Portanto:

$$P = 2\pi r_1 h_1 I_1 = 2\pi r_2 h_2 I_2 = \dots = 2\pi r h I_r$$

Novamente, para $r_1 = 1m$ e h constante, tem-se: $TL = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_r}\right) = 10 \log r$, sendo r dado em metros.

A figura 8 ilustra estes dois tipos de espalhamento:

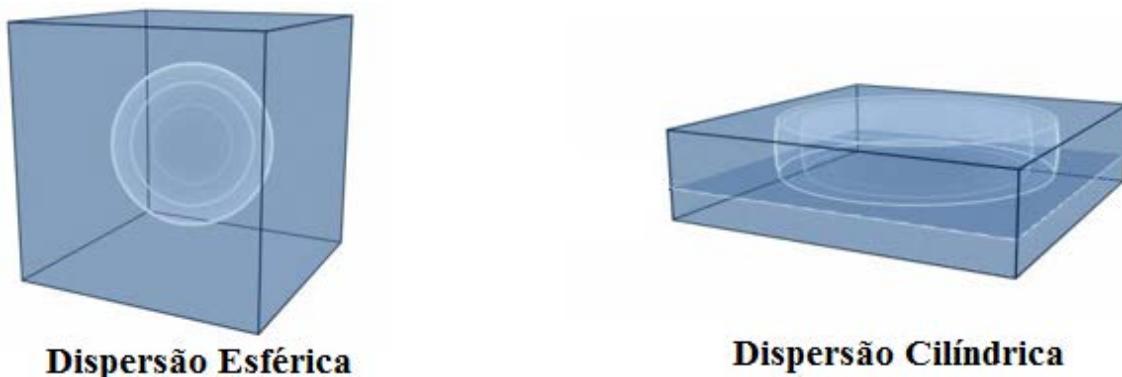


Figura 8 - Dispersão Esférica e Cilíndrica

As perdas por absorção ocorrem devido a dois mecanismos principais: viscosidade e relaxação molecular. As perdas devido a viscosidade estão presentes tanto em água doce quanto água salgada e dependem basicamente da frequência. As perdas devido a relaxação molecular estão presentes somente em água salgada, e este mecanismo reduz as moléculas para íons induzidos através da pressão do som.

O coeficiente de absorção α depende, em maior grau, de dois fatores: frequência e temperatura. Em [26] é realizada uma aproximação para este coeficiente que pode ser utilizada para uma faixa de frequências de 500 Hz a 100kHz:

$$\alpha = 0,05f^{1,4}$$

No caso específico do *array*, atenção deve ser dada para a propriedade da impedância acústica dos materiais que fazem o encapsulamento dos hidrofones, pois este fator está associado à reflexão do som durante a sua propagação na interface entre dois meios distintos.

Quando o som é propagado em um meio elástico, a compressão desta região provoca o aparecimento de uma força que tenderá a expandi-lo. Esta região sofre a expansão, provoca a compressão das camadas adjacentes e torna-se rarefeita. A rarefação provoca o aparecimento de uma força de restauração tendendo ao retorno da posição de equilíbrio, resultando em uma nova compressão.

As camadas adjacentes comportam-se da mesma forma, e o resultado deste fenômeno é a transmissão de energia mecânica potencial, e o movimento das partículas do fluido acompanham este fenômeno, havendo, portanto, um componente cinético na energia mecânica transmitida.

Considerando uma onda sonora plana com amplitude de pressão acústica P :

$$P = \rho c U,$$

em que ρ é a densidade do meio, c a velocidade do som no meio e U é a amplitude da velocidade das partículas do fluido.

Diferentemente da velocidade do som, que se refere à velocidade com que a energia acústica é transmitida e é característica do meio, a velocidade da partícula do fluido refere-se à vibração das partículas em torno de uma posição de equilíbrio.

O fator de proporcionalidade ρc é denominado impedância acústica específica do meio (Pa s/m) e está associada à resistência ou dificuldade que o material opõe à passagem do som. Quando as ondas sonoras atravessam uma interface entre dois materiais diferentes, se eles possuírem a mesma impedância acústica, não ocorre reflexão e a onda é transmitida ao segundo material. Se existir diferença de impedância acústica, é esta diferença que origina uma maior reflexão das ondas sonoras.

Portanto, uma das maiores preocupações durante a construção do protótipo que vai acomodar os elementos transdutores é verificar se sua impedância acústica é próxima à da água, de modo a minimizar as perdas durante a propagação do som na interface entre dois meios.

5.3 Ruído

A função principal de um sistema sonar é determinar a presença, ou ausência, de sinais acústicas de interesse que ocorrem em meio a outros sinais existentes no ambiente de operação. Nos sistemas ativos, este sinal de interesse é o eco que é recebido em meio à reverberação e ao ruído, enquanto nos sistemas passivos é o ruído gerado pelo alvo, que deve ser detectado na presença de outros ruídos no ambiente.

Wenz [1] classifica os ruídos em quatro classes: ruído irradiado, ruído ambiente, ruído próprio do sistema e ruído de reverberação, sendo que este último, que consiste no espalhamento do sinal transmitido pelo sonar ao voltar ao receptor, aplica-se somente a sonares ativos.

O ruído ambiente é todo o ruído circundante proveniente do ambiente, como por exemplo ruídos produzidos por crustáceos, peixes, mamíferos marinhos, chuva, vulcões submarinos e maremotos.

O ruído próprio de um sistema acústico é aquele gerado pelos hidrofones que compõem o arranjo receptor, pelos circuitos a eles interligados, pelas vibrações mecânicas dos hidrofones provocadas pelo casco e estruturas de suporte dos hidrofones e de emissão sonora da própria embarcação que contém o sonar, seja ele rebocado ou instalado no casco, ou do próprio sonar. Exemplos mais comuns são os ruídos produzidos pelo fluxo de água no arranjo de hidrofones, e aqueles gerados pelos motores e hélices da embarcação rebocadora.

O ruído irradiado refere-se à saída acústica de um veículo, que pode ser um navio de superfície, submarino, torpedo, AUV, e que são de grande interesse tanto para projetistas e usuários de sonares passivos, por ser a fonte de sinal para estes sistemas, quanto para os alvos em potencial, que procuram medir estes ruídos e minimizá-los ou mascará-los na esperança de reduzir as chances de detecção ou identificação da plataforma pelo sonar passivo adversário.

5.4 Frequência de Trabalho

A frequência de trabalho, também conhecida como frequência de sintonia do *array*, é a frequência do sinal oriundo da fonte acústica de interesse para o projeto do *array*. Esta

frequência pode ser calculada através da fórmula $f_t = \frac{c}{2d}$, sendo c a velocidade do som no mar e d o espaçamento entre hidrofones.

A velocidade de propagação do som é uma grandeza característica do meio e, para cálculo da frequência de sintonia, foi utilizado um valor aproximado de 1500 m/s.

Contudo, vale ressaltar que, para a água do mar, a velocidade de propagação do som é calculada em função da temperatura, salinidade e pressão (geralmente convertida em profundidade), com diferentes graus de precisão e condições de validade. Por exemplo, uma expressão válida para temperatura T na faixa de 0 a 35 °C, salinidade S de zero a 45 ppt (*parts per thousand*) e profundidade D de zero a 1000m é a seguinte [2]:

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

5.5 Sensibilidade

Para um sinal de ondas planas, a pressão acústica altera-se somente na direção de propagação do som e é constante ao longo do plano normal a esta direção. Esta pressão, quando propagada nas superfícies dos elementos sensores piezolétricos, produzirá um sinal elétrico correspondente nos terminais de saída do transdutor. A relação entre a tensão de saída nos terminais do *array* por unidade de pressão é definida como a sensibilidade do *array*, expressa em dB, conforme exposta abaixo [26]:

$$S = 10 \log\left(\frac{V_0(t)}{p(t)}\right)^2 = 20 \log\left(\frac{V_0(t)}{p(t)}\right)$$

5.6 Ganho do Array e Índice de Diretividade

Um *array* é composto por alguns sensores, cada um realizando uma medição independente do campo sonoro. Uma combinação inteligente dos sinais de saída de cada sensor pode permitir um incremento na relação sinal-ruído, ou seja, ao combinar todas as medições, deseja-se reforçar o sinal de interesse e atenuar os ruídos indesejáveis [27].

O ganho do *array* pode ser definido como a melhoria na relação do sinal-ruído de um *array* comparada à relação sinal-ruído obtido por apenas um hidrofone, conforme simplificada na seguinte equação [26]:

$$AG = 10 \log \frac{(S/N)_{array}}{(S/N)_{hidrofone}}$$

Contudo, há uma grande dificuldade em mensurar esta variável em virtude da complexidade em conhecer as coerências do sinal e ruído através das dimensões do *array*.

Por isso, são feitas aproximações para facilitar os cálculos, considerando os sinais acústicos recebidos como ondas planas, enquanto o ruído presente no meio é isotrópico. Este Ganho do *Array* específico também é chamado de Índice de Diretividade e a fórmula utilizada para seu cálculo é composta da seguinte maneira [25]:

$$DI = \frac{n}{1 + \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(n-i) \cos[2\pi fid(\frac{\sin \Phi_0}{c})] \sin(\frac{2\pi fid}{c})}{\frac{2\pi fid}{c}}}$$

Sendo:

n o número de elementos (hidrofones) presentes no *array*;

f a frequência do sinal;

d o espaçamento entre os hidrofones;

c a velocidade do som no mar; e

Φ_0 o ângulo de chegada do sinal.

A fórmula do Índice de Diretividade descrita acima foi utilizada para realizar a análise dos ganhos do *array* para diferentes números de elementos, e estes ganhos foram comparados para três diferentes ângulos de chegada do sinal de ondas planas: 0° , 45° e 90° , sendo estes ângulos referentes ao eixo perpendicular ao eixo do *array*. Os gráficos a seguir foram feitos no Matlab, levando-se em consideração a equação acima para diferentes relações entre a frequência do sinal e a frequência de trabalho do arranjo de hidrofones ($\frac{f}{f_t}$). O código encontra-se no ANEXO A.

A velocidade do som no mar foi estimada em 1500 m/s. A distância entre os hidrofones foi estipulada em 375 mm, o que confere uma frequência de trabalho f_t de 2000 Hz, conforme a relação $f_t = \frac{c}{2d}$. Em virtude da limitação da disponibilidade de hidrofones por parte do Laboratório de Dinâmica e Instrumentação, os resultados obtidos foram referentes a utilização de 2, 3 e 4 hidrofones.

Para N=2:

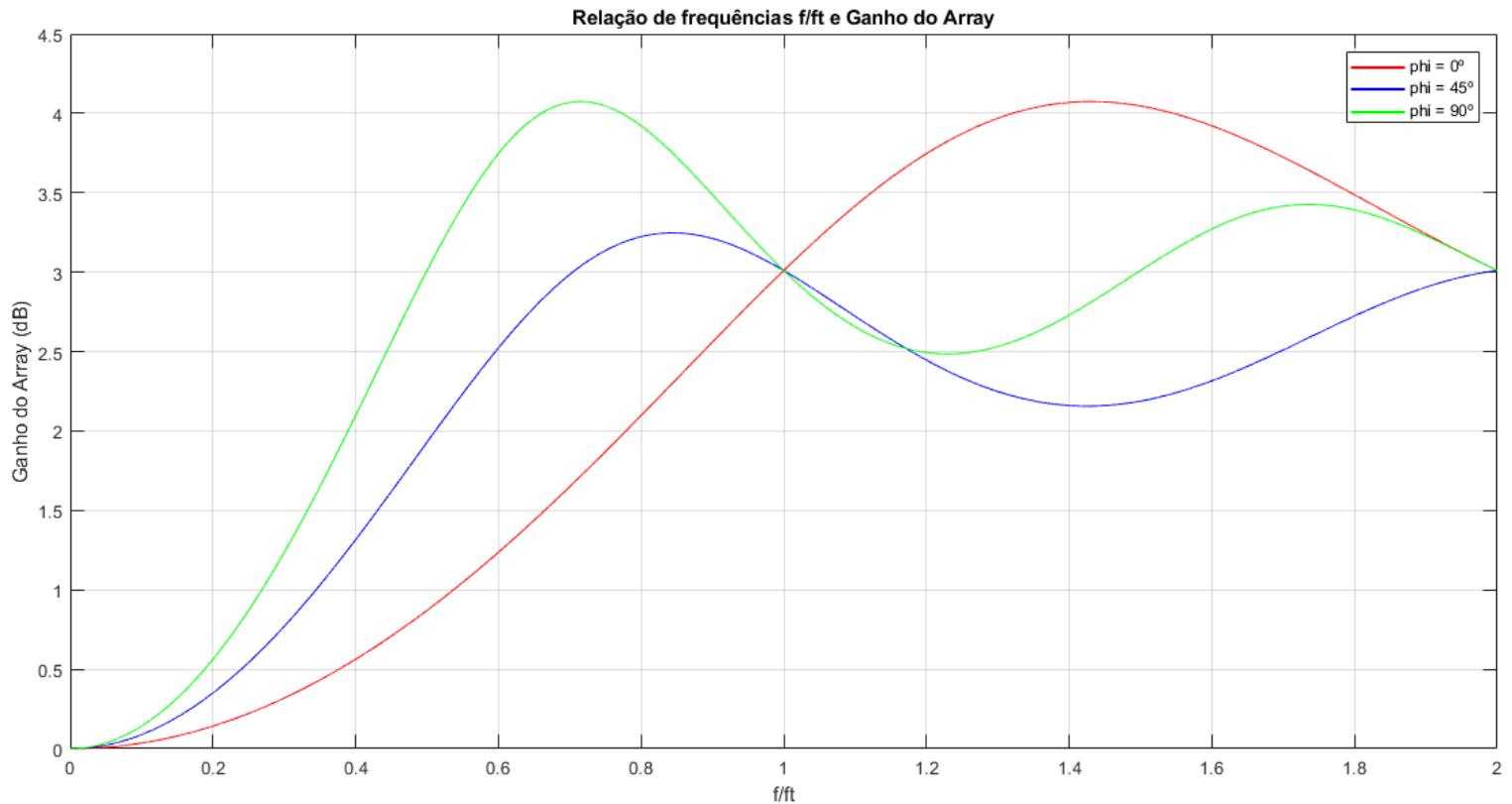


Gráfico 1 - Índice de Diretividade para 2 elementos

Dados obtidos para $\frac{f}{f_t} \leq 2$:

Máximo Ganho para phi = 0°	4.074 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 0°	1.430
Máximo Ganho para phi = 45°	3.248 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 45°	0.844
Máximo Ganho para phi = 90°	4.074 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 90°	0.715

Para N=3:

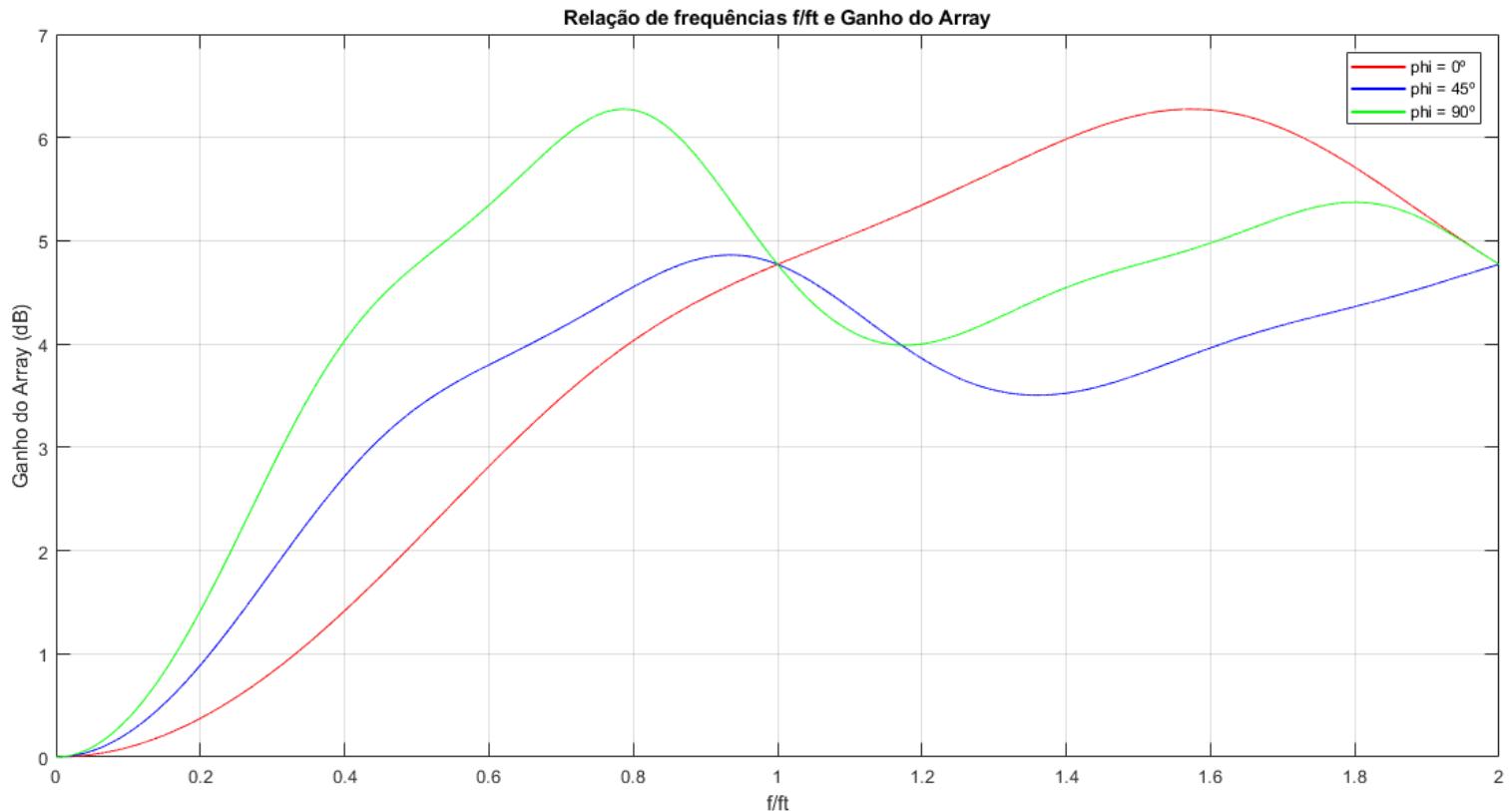


Gráfico 2 - Índice de Diretividade para 3 elementos

Dados obtidos para $\frac{f}{f_t} \leq 2$:

Máximo Ganho para phi = 0°	6.275 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 0°	1.573
Máximo Ganho para phi = 45°	4.862 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 45°	0.935
Máximo Ganho para phi = 90°	6.275 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 90°	0.787

Para N=4:

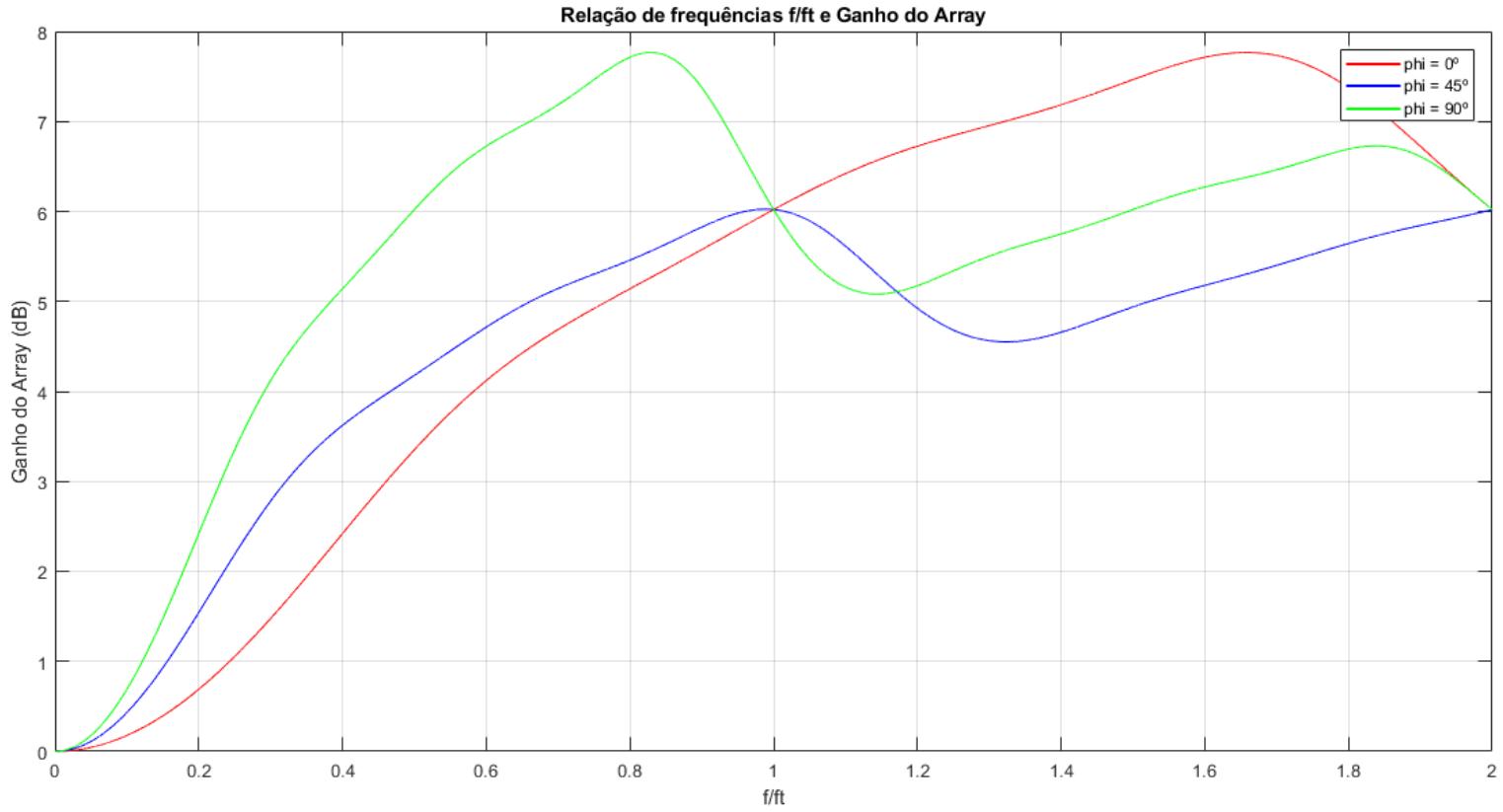


Gráfico 3 - Índice de Diretividade para 4 elementos

Dados obtidos para $\frac{f}{f_t} \leq 2$:

Máximo Ganho para phi = 0°	7.766 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 0°	1.658
Máximo Ganho para phi = 45°	6.025 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 45°	0.989
Máximo Ganho para phi = 90°	7.766 dB
Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi = 90°	0.829

Observa-se que, para o caso em que a frequência f é igual à frequência de trabalho, ou seja, $f = f_t = \frac{c}{2d}$, tem-se que a função sinc torna-se nula e o Índice de Diretividade fica igual a $10 \log n$, ocasião em que as três curvas para diferentes ângulos de chegada do sinal encontram-se em um mesmo ponto do gráfico.

5.7 Função de Diretividade de um *array*

5.7.1 Filtro Espacial

A função de diretividade está associada à capacidade do *array* funcionar como um filtro espacial que, de forma análoga ao filtro no domínio da frequência, reduz os níveis de ruído, permite a resolução de sinais de direções distintas e possibilita a medição de sinais senoidais individuais, desempenhando a função de um filtro espacial que refina a detecção, a resolução e a estimativa de direção de sinais de ondas planas [6].

Há dois aspectos primordiais no design do *array* que determina a sua performance como filtros espaciais. Primeiramente, a sua geometria estabelece restrições na operação do *array*. No caso específico dos *arrays* lineares, o processamento de sinal utilizado para a detecção da fonte acústica é capaz de calcular somente um componente angular, fazendo com que a solução apresente uma ambiguidade cônica, também conhecida como ambiguidade esquerda-direita, conforme ilustrada na figura 9.

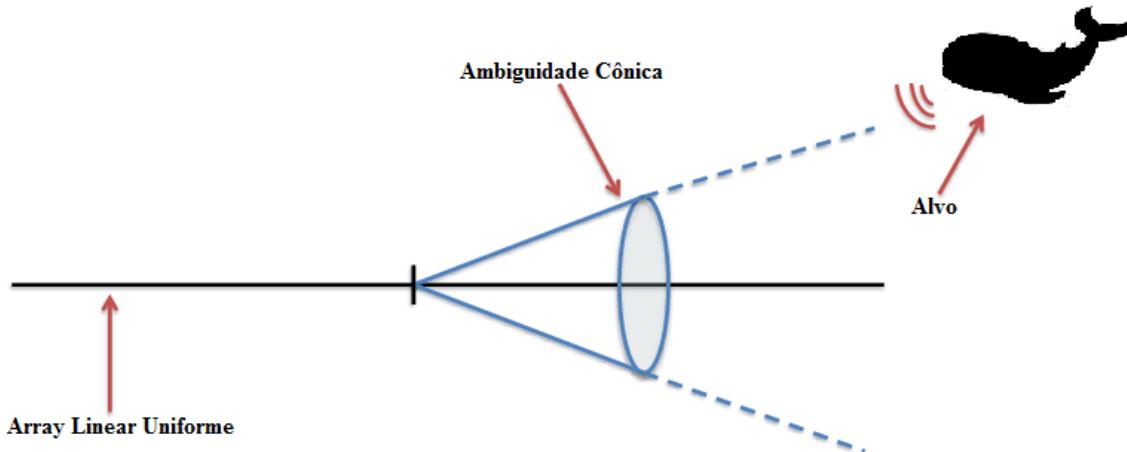


Figura 9 - Ambiguidade cônica de um *array* linear. Adaptado de [33].

O segundo aspecto está relacionado às funções peso que são atribuídas aos dados de saída de cada sensor. A escolha destes pesos determina as características do filtro espacial do *array* para uma dada geometria. Este processo de alteração é conhecido como ponderação (*shading*).

5.7.2 *Array* Linha Contínuo

Para uma melhor compreensão das equações da função de abertura e da função de diretividade de um *array* de hidrofones, é necessário um estudo mais aprofundado do

comportamento de um *array* linha contínuo na situação em que este recebe um sinal de ondas planas vinda de uma determinada direção.

Burdic [23] considerou a resposta angular de um *array* linear contínuo de comprimento L , para uma onda plana como função da direção de chegada deste sinal. Alinhando-se o eixo do hidrofone com o eixo x , e sabendo-se que Ψ é o ângulo entre a direção de chegada e o eixo perpendicular ao eixo do hidrofone, o sinal recebido em algum ponto do *array* estará em função somente de Ψ .

Considerando o sinal na origem como $s(t)$, tem-se que os sinais nos outros pontos do eixo x estão atrasados ou avançados em relação ao sinal na origem pela diferença de $(x \sin \Psi)/c$. Portanto, pode-se escrever o sinal em função de dois parâmetros, t e x , da seguinte maneira: $s(t, x) = s(t + \frac{x \sin \Psi}{c})$, sendo c a velocidade do som no mar.

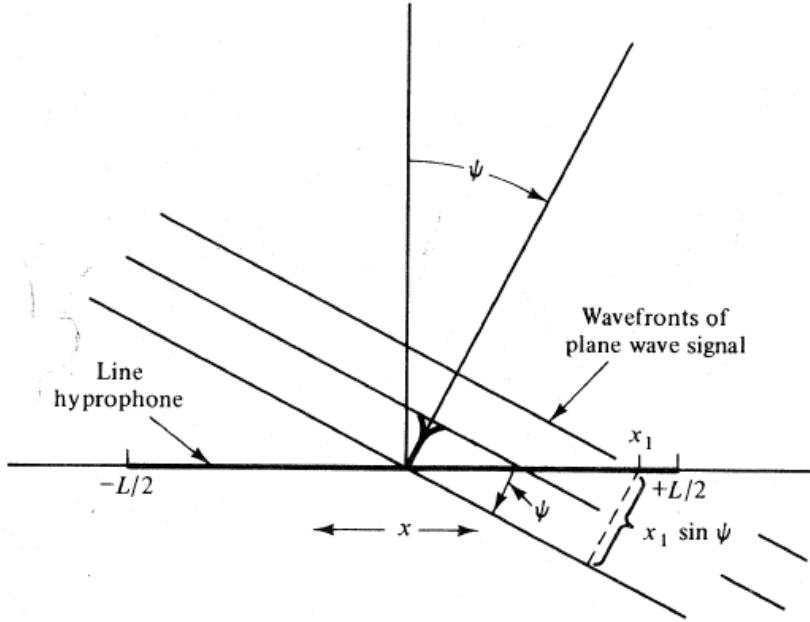


Figura 10 - Esquema um sinal de ondas planas atingindo o *array*. Extraído de [10].

A saída do hidrofone é obtida pela integração da resposta do sinal ao longo do tempo. Portanto, se $g(x)dx$ é a resposta do *array* a um sinal unitário em x , a saída total resultante de ondas planas a um ângulo Ψ é:

$$s_0(t, \Psi) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) s(t + \frac{x \sin \Psi}{c}) dx$$

A função $g(x)$ é conhecida como função de abertura. Assumindo-se que $s(t)$ possui uma Transformada de Fourier para o domínio da frequência, $S(f)$, tem-se que:

$$s\left(t + \frac{x \sin \Psi}{c}\right) \leftrightarrow S(f) e^{(\frac{j2\pi f x \sin \Psi}{c})}$$

A saída do hidrofone pode ser expressada, então, como:

$$s_0(t, \Psi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{(j2\pi f x \sin \Psi / c) + j2\pi f t} df \right] g(x) dx$$

Rearranjando, tem-se que:

$$s_0(t, \Psi) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} g(x) e^{(j2\pi f x \sin \Psi / c)} dx \right] e^{j2\pi f t} df$$

A integral dentro dos colchetes é equivalente à Transformada de Fourier da função de abertura $g(x)$ do domínio x para o domínio representado pela variável u , em que $u = \frac{(\sin \Psi)}{\lambda}$.

Esta Transformada é chamada de função de diretividade, definida como:

$$G(u) = G(f, \Psi) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) e^{j2\pi x u} dx$$

Substituindo esta Transformada na equação anterior, tem-se que:

$$s_0(t, \Psi) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) G(f, \Psi) e^{j2\pi f t} df$$

Considerando o sinal de ondas planas, no domínio da frequência, como uma função impulso de amplitude unitária, obtem-se:

$$s(t) = e^{j2\pi f_0 t} \leftrightarrow S(f) = \delta(f - f_0)$$

Assim:

$$s_0(t, \Psi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(f - f_0) G(f, \Psi) e^{j2\pi f t} df = G(f_0, \Psi) e^{j2\pi f_0 t}$$

A função de diretividade $G(f_0, \Psi)$ define a configuração da resposta do filtro espacial a uma frequência f_0 obtida pelo hidrofone. Para o caso da função de abertura retangular, cuja amplitude é constante para uma distância L e zero para os demais casos, tem-se que:

$$g(x) = \frac{1}{L} rect\left(\frac{x}{L}\right)$$

E a função de diretividade correspondente é:

$$G(u) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{+\infty} rect\left(\frac{x}{L}\right) e^{j2\pi x u} dx = sinc(uL)$$

Esta transformada é de razoável emprego para a detecção de ondas planas simples e um campo de ruído isotrópico [10].

Como $u = \frac{(\sin \Psi)}{\lambda}$, nota-se que esta variável encontra-se no intervalo:

$\frac{-1}{\lambda} \leq u \leq \frac{1}{\lambda}$. Como Ψ varia no intervalo de $[0, 2\pi]$, a função de diretividade torna-se

igual para Ψ e $\pi - \Psi$, ou seja, $G(\Psi) = G(\pi - \Psi)$. Portanto, esta relação prova que a resposta angular do sensor é ambígua, sendo a mesma para alvos localizados nos ângulos Ψ ou $\pi - \Psi$.

A figura 11 exibe a função de abertura retangular, com a sua respectiva transformada para a função de diretividade e a resposta angular através de um diagrama polar.

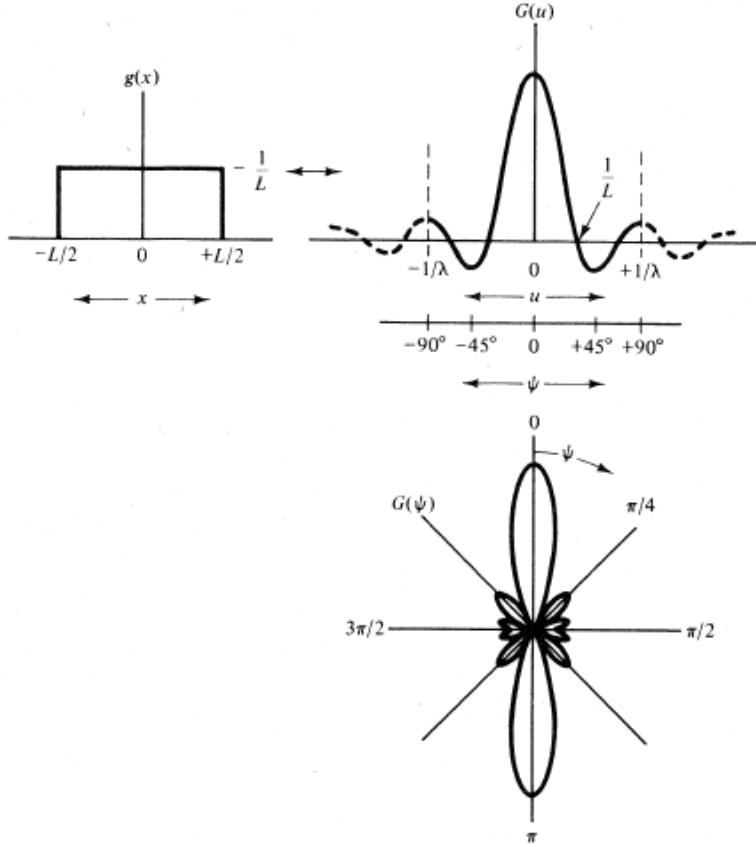


Figura 11 - Função de abertura retangular, função de diretividade e a resposta angular através de um diagrama polar. Extraído de [23].

Através da função de diretividade da figura anterior, é possível notar que o primeiro zero ocorre para $u = \frac{1}{L} = \frac{(\sin \Psi)}{\lambda}$. Portanto, pode-se definir a largura do lóbulo principal, que é a medida da resolução angular obtida pelo hidrofone, como: $\Psi_B = \sin^{-1} \frac{\lambda}{L}$. Desta equação, observa-se que a resolução angular pode ser melhorada aumentando-se o comprimento L ou reduzindo-se o comprimento de onda λ .

A figura 12 mostra a função de diretividade sob o ponto de vista tridimensional. Para facilitar a visualização, somente o lóbulo primário é mostrado na figura, onde é possível perceber que este lóbulo foi revolucionado em torno do plano x.

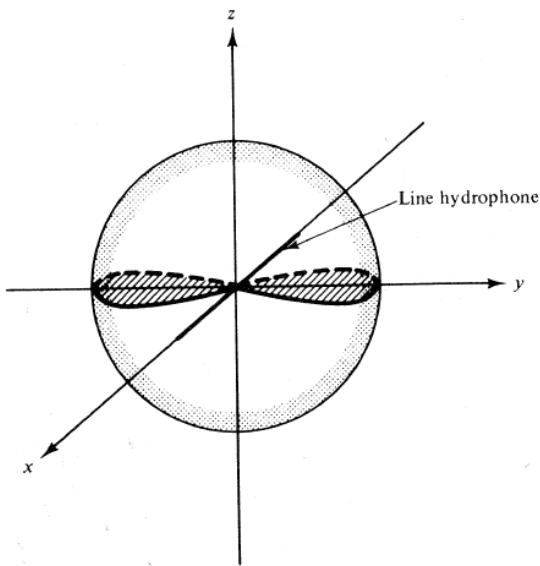


Figura 12 - Função de diretividade sob o ponto de vista tridimensional. Extraído de [23].

5.7.3 Array Linha Discreto

Será considerado, para o caso do *array* linear discreto, o espaçamento uniforme dos hidrofones alinhado com a direção x , conforme a figura 13.

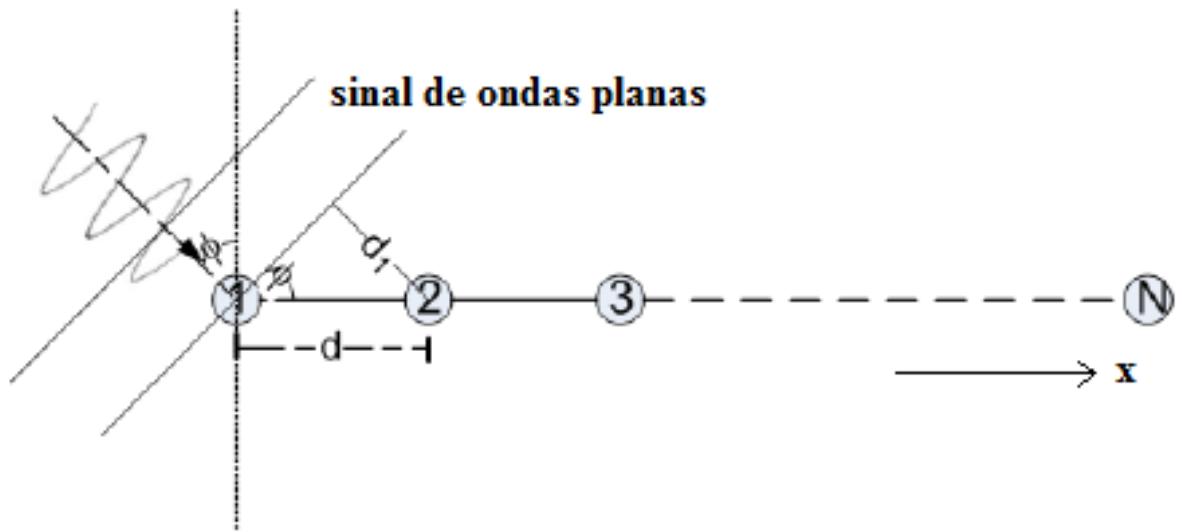


Figura 13 - Esquema de um sinal de ondas planas atingindo os elementos do *array*. Adaptado de [3].

O resultado de simplesmente somar as saídas dos sensores de um *array*, com atrasos no tempo correspondentes a cada saída, possui as características de um filtro espacial.

Para investigar as propriedades de espaço e frequência deste somatório, Nielsen [25] considerou um sinal de ondas planas, em um campo distante, meio isotrópico, propagando-se em um vetor unitário de direção u como:

$$s(n) = e^{j2\pi f n / f_s}$$

O sinal atrasado no tempo para o i -ésimo sensor é:

$$x_i(n) = e^{j(\frac{2\pi f n}{f_s} + kr_i u)}, \text{ para } i = 1, \dots, M, \text{ sendo:}$$

n uma variável associada à amostra;

$k = \frac{2\pi f}{c}$ o número de onda, grandeza que representa o número de comprimentos de onda por unidades de distância;

f_s a frequência de amostragem; e

r_i o vetor distância entre a fonte sonora e o vetor i .

Somando-se todos os sinais, tem-se:

$$y(n) = \sum_{i=1}^M x_i(n) = e^{j2\pi f n / f_s} \sum_{i=1}^M e^{jkr_i u}$$

O produto escalar $r_i \cdot u$, para este caso, será igual a $(i-1)d \sin \phi$. Assim:

$$y(n) = e^{j2\pi f n / f_s} \sum_{i=1}^M e^{jk(i-1)d \sin \phi}$$

O somatório representa a função diretività e pode ser escrito em uma forma fechada e normalizada para uma ponderação uniforme dos sensores da seguinte maneira:

$$|B(f, \phi)| = \left| \frac{\sin(\frac{\pi f M d}{c} \sin \phi)}{M \sin(\frac{\pi f d}{c} \sin \phi)} \right|$$

Utilizando-se esta fórmula, foi realizada uma comparação da diretività, quando a frequência do sinal recebido é igual à frequência de trabalho, para 2, 3 e 4 hidrofones, na direção perpendicular ao eixo do arranjo, como pode ser observado no gráfico 4. O código, implementado no Matlab, encontra-se no ANEXO A.

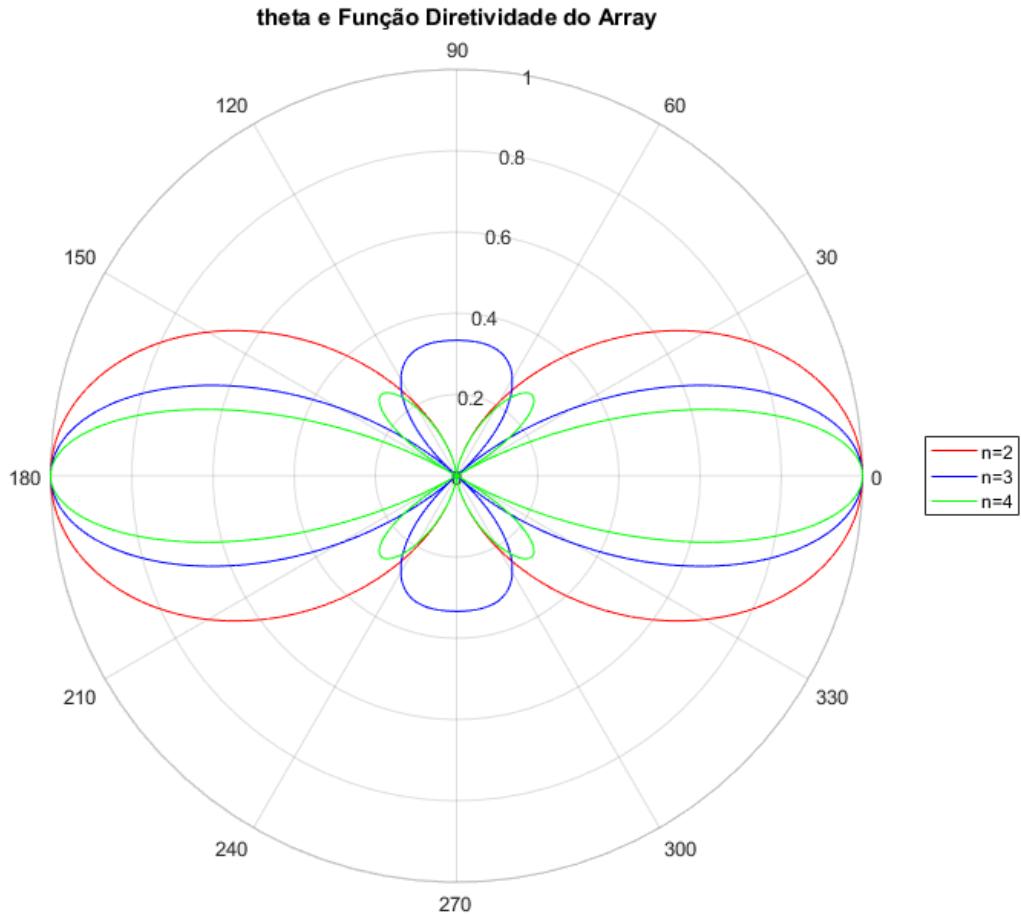


Gráfico 4 - Diagrama polar da função de diretividade para 2, 3, e 4 elementos

5.7.4 Direcionamento de Feixe (*beam steering*)

A função de diretividade anterior está associada à resposta máxima ao eixo perpendicular ao *array*, também conhecido como *broadside*. Contudo, é fundamental que haja procedimentos que permitam ao *array* selecionar a direção que deseja priorizar para a detecção. O direcionamento do lóbulo principal para o ângulo correto pode ser feito, basicamente, de duas formas:

- processo mecânico, em que o *array* sofre um deslocamento angular de toda a sua estrutura física; e
- processo eletrônico empregando algoritmos que desloca o lóbulo principal do *array* para o ângulo desejado, através da imposição de atrasos, no tempo, adequados para cada elemento do *array*, permitindo o acompanhamento do alvo, além de possibilitar a variação da largura do lóbulo principal com o intuito de formar um feixe de largura apropriada à aplicação desejada. Utilizando-se uma progressão linear de retardos, é possível implementar um sistema de *array* com feixe de varredura, sem alterar o posicionamento do *array*.

Na figura 13, verifica-se que o sinal acústico chega atrasado, entre os hidrofones 1 e 2, com um valor igual a $\tau_{1-2} = \frac{d \sin \phi}{c}$, e entre o primeiro e último hidrofone este atraso é de $\tau_{1-N} = (N - 1) \frac{d \sin \phi}{c}$.

Utilizando-se a Transformada de Fourier, um atraso no tempo pode ser representado do seguinte modo:

$$\mathcal{F}(x(t)) = X(f)$$

$$\mathcal{F}(x(t - t_0)) = X(f)e^{-2\pi f t_0}$$

A saída correspondente ao hidrofone i será: $X_i(f) = S(f)e^{-j2\pi f(i-1)\tau_{\phi_0}}$, em que $\tau_{\phi_0} = \frac{d \sin(\phi_0)}{c}$ e $S(f)$ é a Transformada de Fourier do sinal acústico.

Verificando-se que $jk(i-1)d \sin \phi = j2\pi f(i-1)\tau_{\phi}$, tem-se que:

$$y(n) = e^{j2\pi f n / f_s} \sum_{i=1}^N e^{jk(i-1)d \sin \phi} e^{j2\pi f(i-1)\tau_{\phi_0}}$$

$$Y(f, \phi_0, \phi) = S(f) \sum_{i=1}^N e^{\frac{j2\pi f(i-1)d \sin \phi_0}{c}} e^{\frac{j2\pi f(i-1)d \sin \phi}{c}}$$

Novamente, para uma ponderação uniforme dos sensores, a forma fechada e normalizada para o somatório das saídas dos sensores será:

$$|B(f, \phi, \phi_0)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi f M d}{c}(\sin \phi - \sin \phi_0)\right)}{M \sin\left(\frac{\pi f d}{c}(\sin \phi - \sin \phi_0)\right)} \right|$$

Vale ressaltar, ainda, que a alteração do ângulo para a máxima resposta do sensor acarreta em mudanças na largura do feixe do lóbulo principal. Este parâmetro é definido pelos feixes nos quais a potência radiada é metade do valor de potência na direção de máxima radiação, ou seja, $|B(u)|^2 = 0.5$. Assim, $|B(u)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ e $I = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ dB} = -3 \text{ dB}$, razão pela qual também é chamada de largura de feixe de 3 dB.

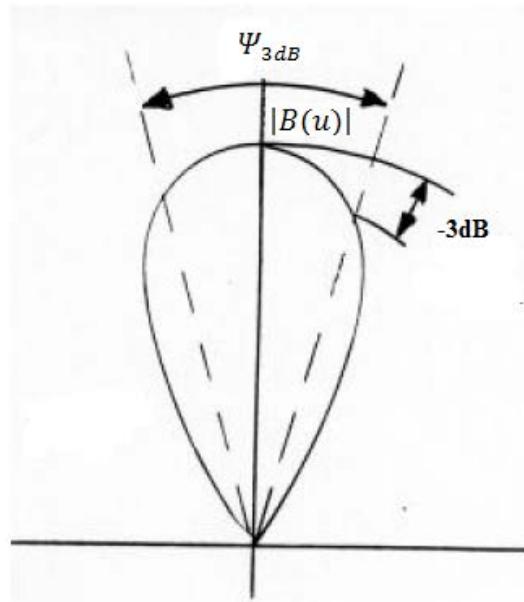


Figura 14 - Largura de Feixe de 3 dB. Adaptado de [4].

A largura do feixe depende dos mesmos parâmetros da resolução angular do feixe, ou seja, é diretamente proporcional ao comprimento de onda do sinal e inversamente proporcional ao tamanho do *array*, e o seu valor também depende da função de abertura escolhida. Reduzindo-se a abertura, aumenta-se a largura do feixe, prejudicando a precisão na detecção da direcionalidade do sinal.

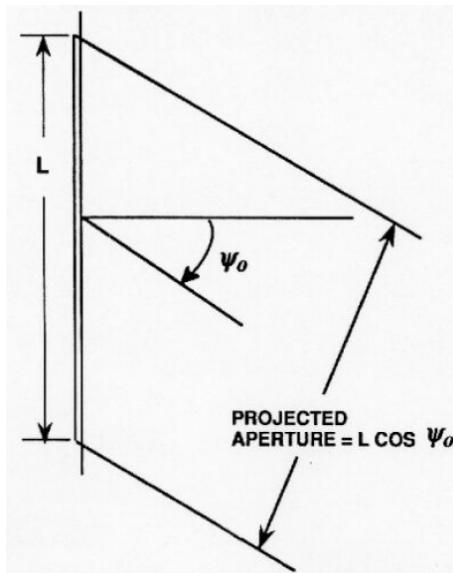


Figura 15 - Redução da abertura por ocasião do direcionamento de feixe. Extraído de [4].

O gráfico 5 realiza a comparação da função de direitividade para um *array* de 2, 3 e 4 elementos, para um direcionamento de feixe de 45° em relação ao eixo físico do *array*. É possível perceber que a largura do feixe, quando comparada com o gráfico 4, sofre uma grande

degradação, o que pode ser bastante prejudicial na precisão da direcionalidade do sinal para um *array* de poucos elementos.

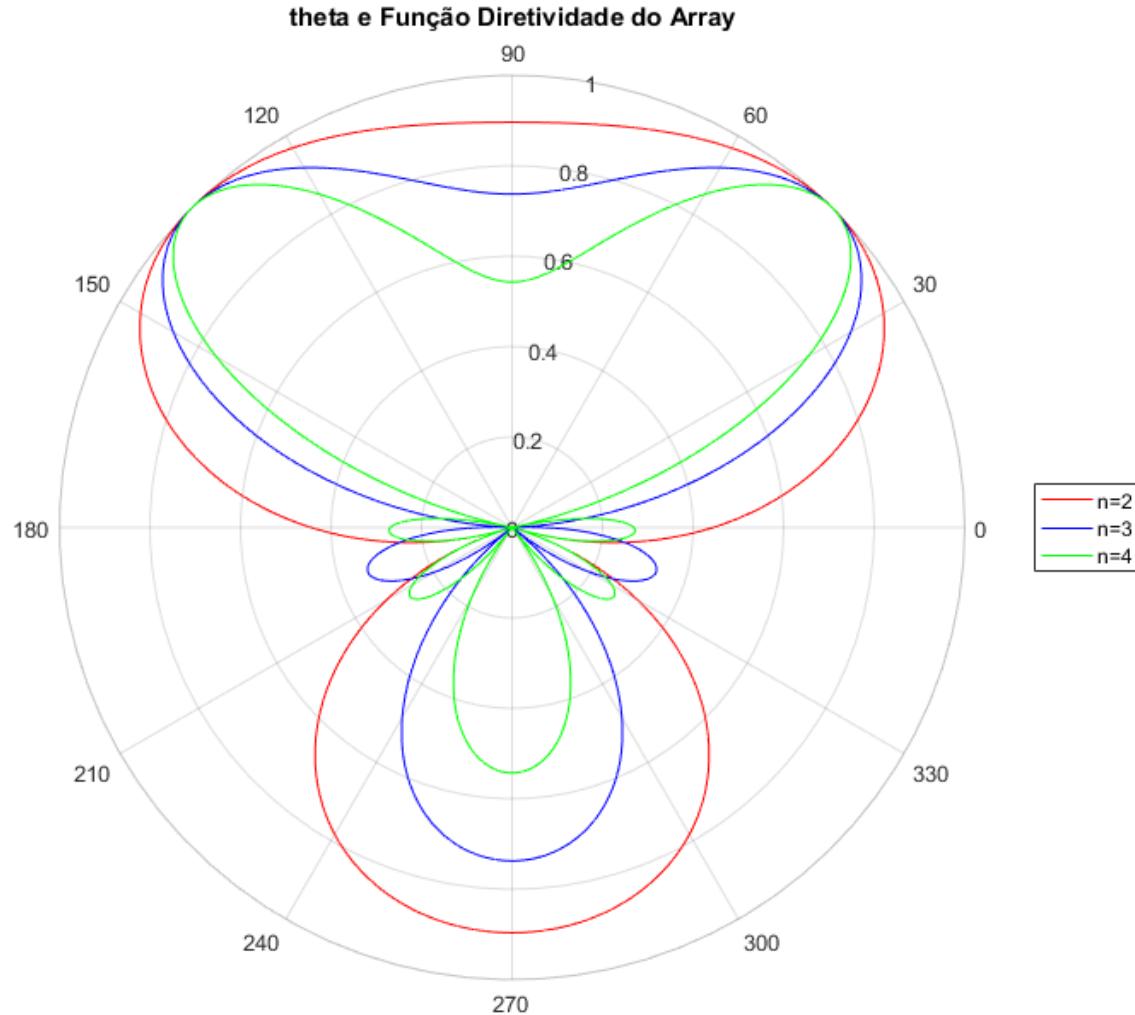


Gráfico 5 - Diagrama polar da função de diretividade para 2, 3, e 4 elementos para um direcionamento de feixe de 45° em relação ao eixo do *array*

A perda de diretividade é ainda maior quando deseja-se direcionar o feixe para sinais incidentes no mesmo eixo do arranjo, na direção conhecida como *endfire*. Neste caso, é importante que o *array* de hidrofones realize um giro de forma mecânica, o que em alguns casos não é muito prático. Portanto, este é um dos principais problemas encontrados quando se adota a geometria linear de um arranjo de sensores [30].

5.7.5 Ponderação dos hidrofones do *array* (*shading*)

A ponderação é definida como um processo de modificação da configuração da função de abertura de um *array* linear discreto e que é baseada na propriedade de filtro espacial

associado ao *array*. A relação de transformada entre a função de abertura e função de direcionalidade provê uma alternativa conveniente para investigar o efeito da configuração da função de abertura nas características dos lóbulos secundários.

Quando o sinal é composto por ondas interferentes provenientes de ângulos fora do lóbulo principal da função diretividade, na presença de um campo de ruído não isotrópico, torna-se necessário a redução dos níveis dos lóbulos secundários a níveis mais baixos do que os decorrentes da função de abertura retangular [6].

A alteração do formato da função abertura e, consequentemente, da função de diretividade, deve ser feita após análise criteriosa da relação de compromisso estabelecida entre os níveis de lóbulos secundários e o alargamento do lóbulo principal. Como a energia envolvida é a mesma, a redução dos níveis de lóbulos secundários acarretará no alargamento do lóbulo principal. O objetivo, portanto, é garantir o maior estreitamento possível do lóbulo principal que proporcione níveis de lóbulos secundários razoáveis o suficiente para não prejudicar a análise dos dados.

Desta forma, cada sinal proveniente do sensor será multiplicado por esta ponderação, representada pela função w_i . Realizando-se o somatório destes sinais, tem-se que:

$$Y(f, \phi_0, \phi) = \sum_{i=1}^N w_i X_i(\Omega) e^{\frac{j2\pi f(i-1)d \sin \phi}{c}} = S(f) \sum_{i=1}^N w_i e^{\frac{j2\pi f(i-1)d \sin \phi_0}{c}} e^{\frac{j2\pi f(i-1)d \sin \phi}{c}}$$

Através desta fórmula, e sabendo-se que o somatório representa a função de diretividade, é possível comparar os diversos tipos de janelamento existentes de maneira a adotar aquele que for mais conveniente para o sinal obtido.

O gráfico 6 realiza uma comparação entre alguns janelamentos comumente utilizados em processamento de sinais, para um sinal com a frequência igual a frequência de trabalho e para o número de elementos igual a 4.

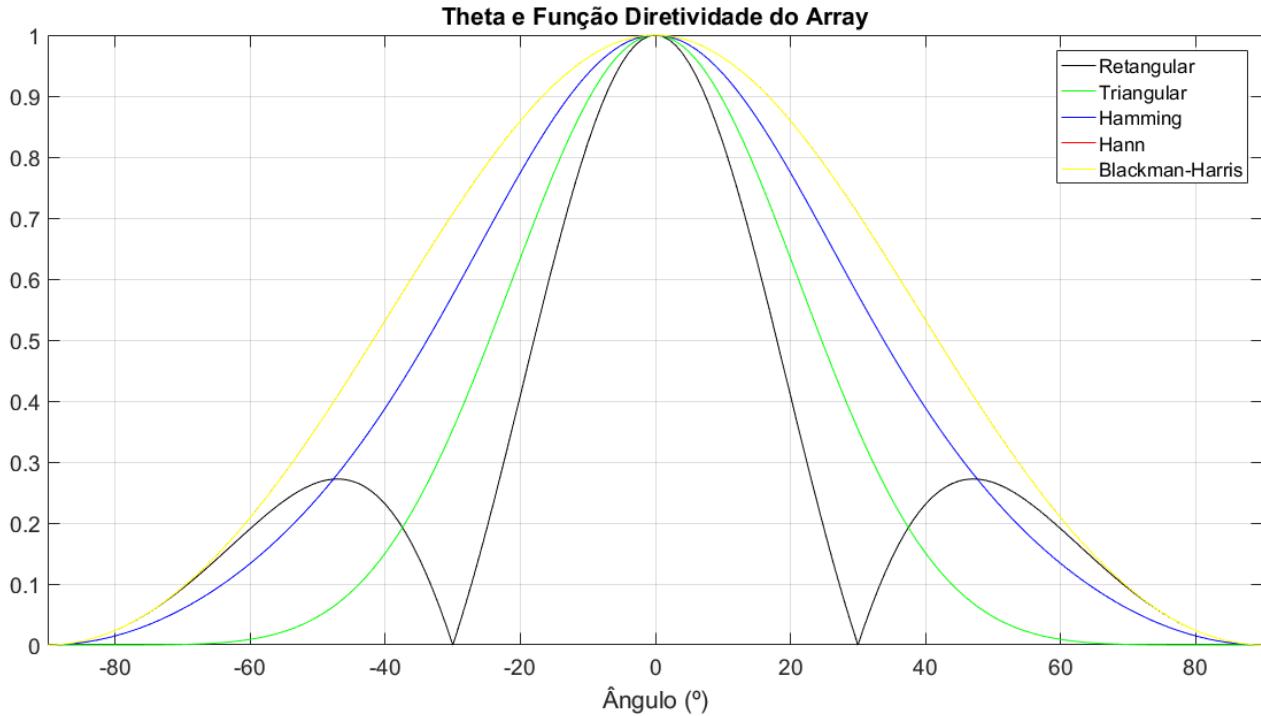


Gráfico 6 - Função de diretividade para diversos tipos de janelamento

Com este gráfico, é possível observar que, para um número pequeno de elementos, tanto a função retangular quanto triangular podem ser ótimas opções no processamento, sendo que a primeira garante uma melhor direcionalidade, enquanto a segunda consegue uma melhor redução dos lóbulos secundários. Neste caso específico, os janelamentos Hann e Blackman-Harris ficaram, praticamente, coincidentes.

5.8 Detecção, ambiguidade e localização

A função primordial de um arranjo de sensores acústicos é a detecção do sinal acústico refletido ou emitido pela fonte acústica de interesse. Após detectado, este sinal pode ser processado digitalmente de maneira a obter a sua direção de propagação em relação à proa do arranjo de sensores. Caso seja realizado um monitoramento deste alvo através de suas sucessivas marcações do mesmo, é possível estimar sua localização.

No caso de uma embarcação que emprega sonares passivos, a localização pode ser estimada através de um acompanhamento da fonte acústica de interesse, obtendo-se marcações sucessivas do alvo e realizando-se algumas técnicas para estimar a sua velocidade através da classificação de sinais, como o LOFAR (*Low Frequency Analisys and Recording*) e DEMON (*Detection of Envelope Modulation on Noise*) [30].

Embora estas técnicas não sejam abordadas neste trabalho, pois são geralmente de emprego exclusivamente militar, ressalta-se a importância de obter a direção de propagação do sinal para estimar a localização do alvo, quando esta informação é de suma importância para o propósito do emprego de um arranjo de sensores.

Conforme mencionado anteriormente, um *array* linear apresenta uma ambiguidade cônica, também conhecida como ambiguidade esquerda-direita para contatos na superfície do mar, fazendo com que apenas uma coordenada angular possa ser determinada e, portanto, não é possível determinar, em um primeiro momento, se o sinal acústico está a bombordo ou a boreste do *array*.

Contudo, há diversas técnicas que podem ser aplicadas para resolver o problema da ambiguidade. Uma delas é a utilização de três hidrofones igualmente posicionados na mesma seção transversal do *array*, conforme exposto na figura 16.

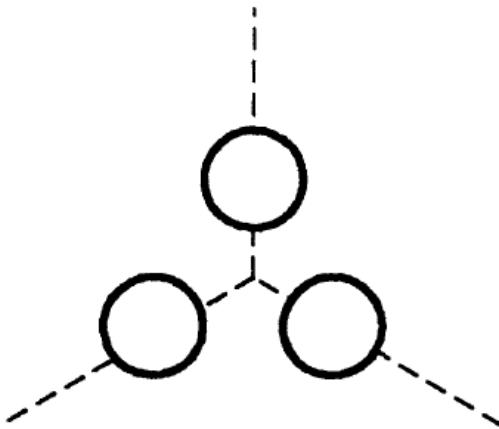


Figura 16 - Configuração conhecida como *Triplet Array*. Extraído de [26].

Nesta configuração, como cada atraso no tempo pode ser calculado nos três pares de hidrofone, a ambiguidade pode ser solucionada independentemente de rotação do *array*. Entretanto, este dispositivo requer um maior diâmetro do *array* de maneira a acomodar os três elementos e produzir atrasos no tempo mensuráveis [26].

Outra forma de resolver o problema da ambiguidade é através da utilização de dois *arrays* lineares idênticos e paralelos, utilizando-se novamente o princípio de atrasos no tempo que ocorrem entre os dois *arrays*, como pode ser observado na figura 17.

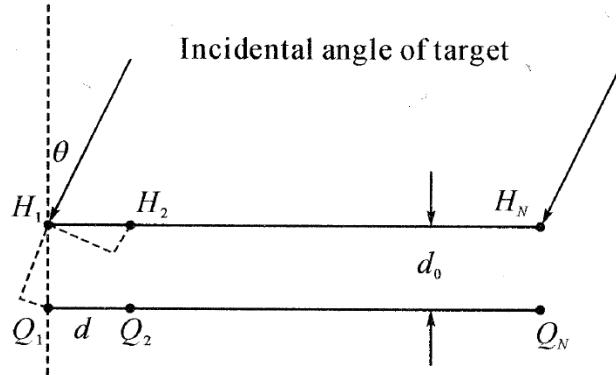


Figura 17 - Emprego de *arrays* paralelos para resolução da ambiguidade. Extraído de [28].

Uma dificuldade neste caso é manter o espaçamento constante entre os dois *arrays*, principalmente durante manobras da plataforma que transporta os referidos sensores e quando os *arrays* são de grandes dimensões.

Uma terceira técnica, e que pode ser aplicada utilizando-se somente dois hidrofones, é alterar o rumo da embarcação com o intuito de obter ângulos relativos a uma nova direção do navio, permitindo realizar uma comparação entre os ângulos que resolve o problema da ambiguidade.

Por exemplo, na figura 18, se o ângulo de recepção do sinal for igual a α , e a embarcação realizar uma alteração de rumo com ângulo relativo de θ , então o alvo estará à esquerda se o novo ângulo detectado for $\alpha - \theta$, e estará à direita se o novo ângulo for de $\alpha + \theta$, considerando que o sinal acústico terá propagação constante. Para um *array* de pequenas dimensões, o tempo de execução da manobra é relativamente pequeno e não vai prejudicar a recepção do sinal.

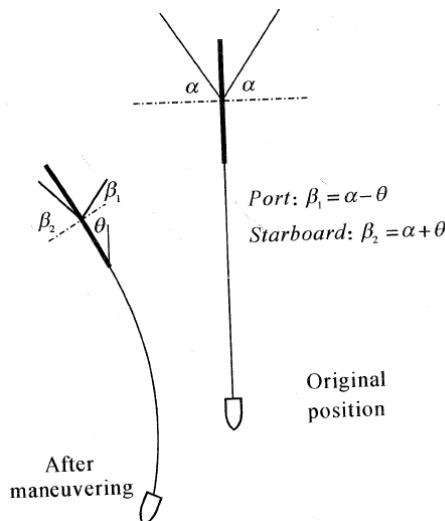


Figura 18 - Resolução da ambiguidade através da alteração de rumo. Extraído de [28].

O esquema a seguir mostra como pode ser estimada a localização de uma baleia a partir de um *array* linear horizontal rebocado por uma embarcação. Foram assumidas duas hipóteses: a baleia encontra-se, aproximadamente, na superfície do mar, e ela encontra-se praticamente no mesmo lugar durante as medições. Nas primeiras medições, em virtude da ambiguidade esquerda-direita, há duas possíveis localizações da baleia. Após efetuada a manobra da embarcação, é possível resolver o problema da ambiguidade e estimar a sua correta localização.

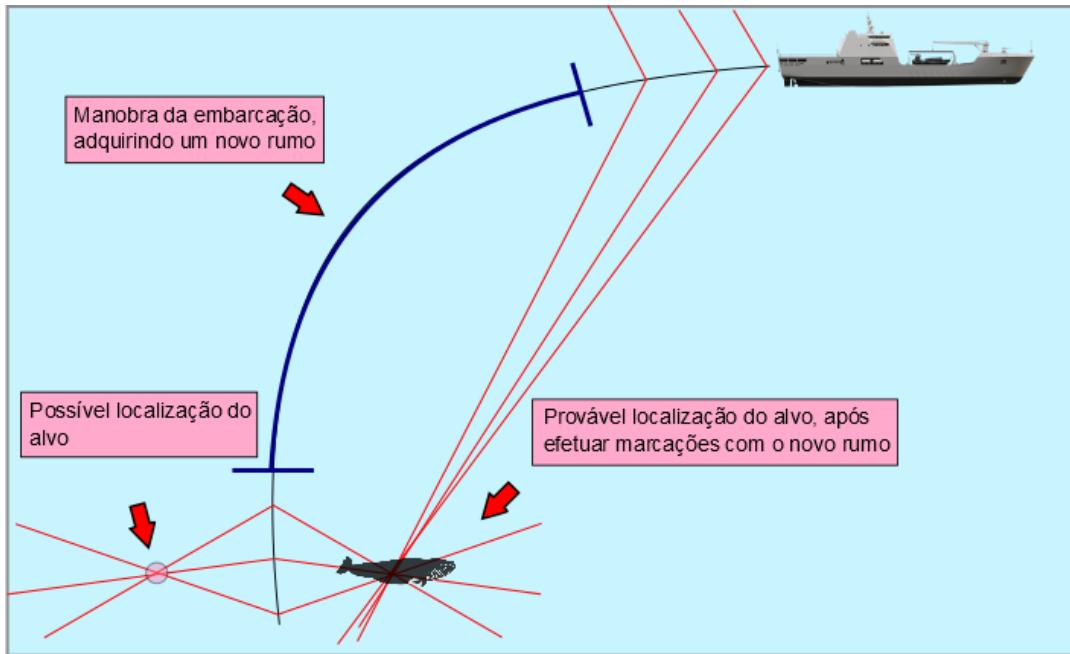


Figura 19 - Obtenção da localização estimada do alvo através de marcações sucessivas. Adaptado de [29].

6.0 Requisitos de Projeto

Para iniciar o desenvolvimento do projeto, serão definidos os seguintes requisitos de projeto:

- Frequência de trabalho: 2000 Hz.

A frequência de trabalho escolhida foi de 2 kHz, tendo em vista que, segundo dados de detecção acústica obtidos durante alguns anos pelo LACMAM, a maior parte dos eventos acústicos submarinos de interesse ocorrem em torno desta frequência, ou a frequências menores.

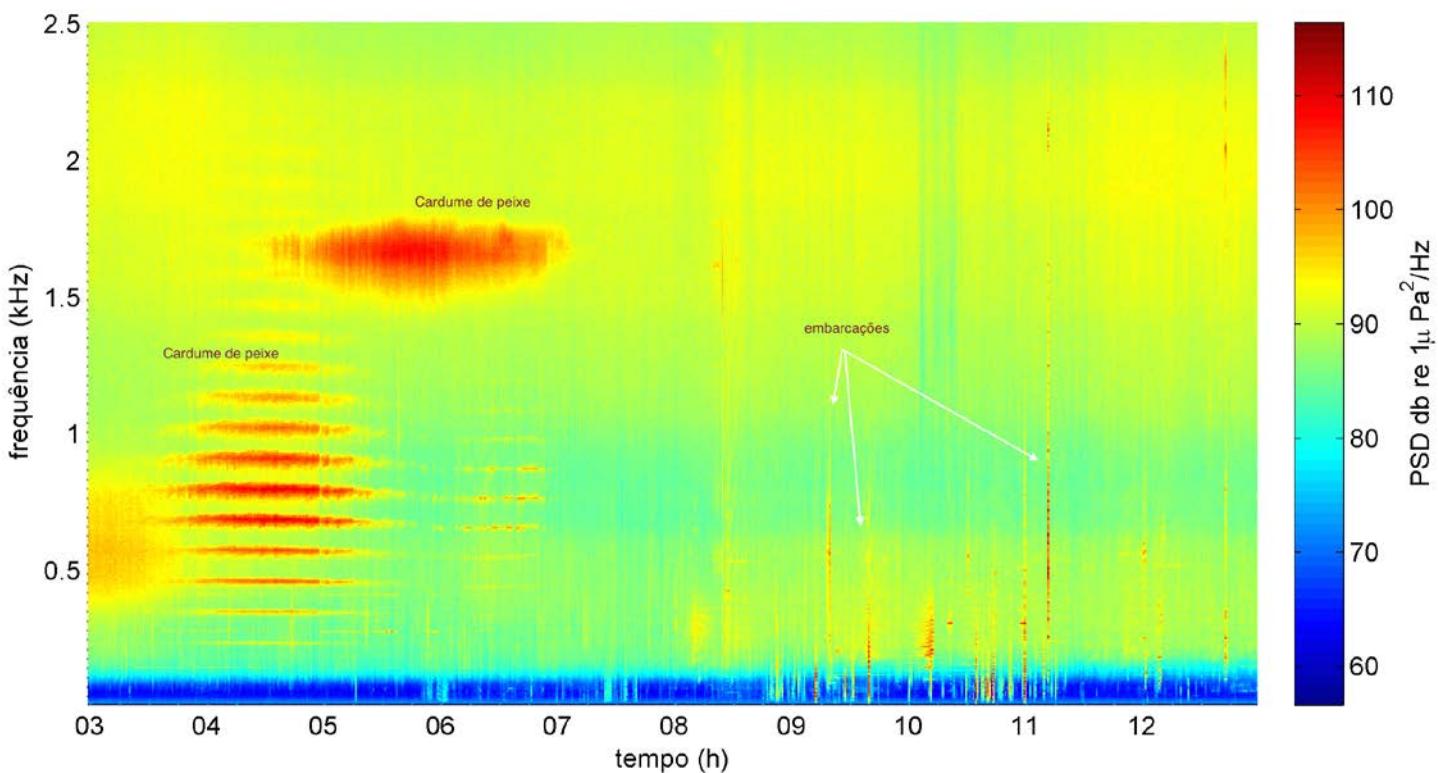


Gráfico 7 - Espectrograma obtido por estudos do LACMAM. Cedido pelo Professor Dr. L. Padovese e calculado por *software* próprio desenvolvido no laboratório.

- Número de Elementos: 2.

Será projetado um *array* com dois hidrofones em virtude da limitação de disponibilidade. Embora seja o menor número possível para um *array* de sensores, é suficiente para atender a este projeto e, caso haja necessidade de aumentar a capacidade de detecção e precisão na direcionalidade do sinal em projetos futuros, pode-se utilizar o mesmo conceito implementado neste presente trabalho para uma maior quantidade de hidrofones, com pouca ou nenhuma alteração.

➤ Baixo nível de ruído próprio.

Tal necessidade requer a minimização dos ruídos acústicos através de um melhor acabamento hidrodinâmico e cuidados a serem tomados durante a construção física do protótipo, que permita a detecção do sinal desejado.

➤ Facilidade de manuseio, manutenção e transporte.

O *array* deve ser construído de maneira a permitir que possa sofrer alterações futuras em suas configurações internas, em caso de necessidade de alteração de algum requisito, ou nas suas configurações externas, caso haja a necessidade de alteração de uma seção do *array* para prover um melhor acabamento hidrodinâmico ou alteração de uma entrada ou saída de conectores, e prover uma maior facilidade nos casos de manutenção preventiva. Além disso, deve ser um protótipo prático para lançamento e recolhimento a partir de uma pequena embarcação, e fácil de ser transportado para uso.

➤ Detecção:

O *array* deve ser capaz de detectar ondas acústicas sintetizadas e emitidas através de um projetor acústico, na faixa de amplitude de 110 a 180 dB (referente a 1 metro da fonte e 1 μ Pa), na faixa de frequência de 10 a 2000 Hz e, posteriormente, calcular a direção do sinal relativo à proa do *array*. Como serão utilizados apenas 2 sensores, o *array* deve ser, pelo menos, capaz de identificar se este sinal vem da frente ou de trás do *array*. O protótipo foi projetado para baixas velocidades de reboque, sendo inferior a 8 nós.

➤ Estanqueidade: O *array* foi projetado para baixas profundidades, devendo ser capaz de prover estanqueidade a uma profundidade de até 5 metros.

➤ Baixo custo.

O orçamento para a construção do protótipo deve ser realista e viável, levando-se em consideração os recursos financeiros disponíveis. Desta forma, os materiais do sistema mecânico serão obtidos no mercado nacional e os equipamentos eletrônicos utilizados como os hidrofones, pré-amplificadores e placa de aquisição de sinal serão disponibilizados pelo LACMAM.

7.0 Mecânica

A figura 20 mostra uma representação simplificada de um *array* linear rebocado.

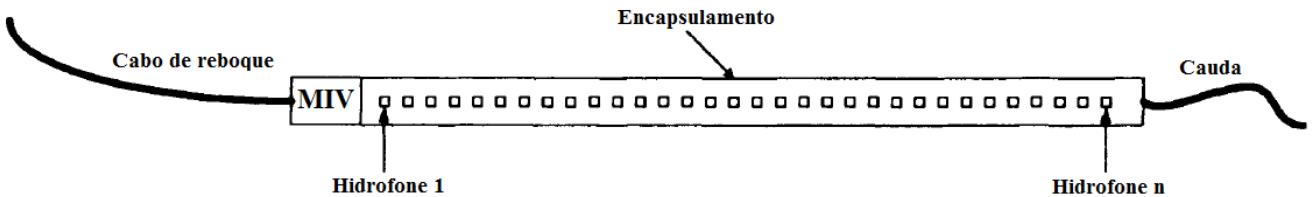


Figura 20 - Representação simplificada de um *array* linear rebocado. Extraído de [26].

Um *array* linear rebocado típico possui um determinado número de hidrofones conectados a um circuito eletrônico que faz a pré-amplificação, amostragem e digitalização de suas saídas.

Os hidrofones são protegidos do meio externo através de um encapsulamento, como por exemplo uma mangueira plástica de alta resistência à tração, cujo interior é preenchido por um líquido que tenha as propriedades acústicas as mais próximas possíveis da água com o intuito de reduzir a impedância acústica que prejudica a passagem de som entre dois meios distintos.

O cabo de reboque conecta o *array* à plataforma de reboque presente na embarcação e estimar o seu comprimento é de vital importância para evitar que a embarcação rebocadora induza ruídos indesejáveis aos sensores. Além disso, deve-se garantir que o cabo vai suportar todo o arrasto hidrodinâmico da estrutura do *array*.

A plataforma de reboque, por sua vez, geralmente conta com um sarilho que faz o armazenamento, lançamento e recolhimento do cabo de reboque e do *array* de hidrofones quando necessário.

O Módulo de Isolamento de Vibração (MIV) é responsável pela redução das vibrações causadas pela tração do cabo de reboque e do movimento do navio, atuando como um absorvedor de choque no acoplamento mecânico entre o *array* e o sistema de reboque.

Por fim, a cauda do *array* faz o acabamento hidrodinâmico do sistema sonar rebocado e tem o propósito de prover maior arrasto na movimentação do *array*, garantindo a linearidade do *array*, mantendo-o esticado e sem curvaturas, e uma maior estabilidade no reboque do arranjo, reduzindo vibrações induzidas no sistema sonar.

A etapa inicial de um projeto de *array* envolve o propósito no qual o *array* será destinado, de modo a determinar a frequência de trabalho, o ganho necessário e a direcionalidade desejada, e em que condições ele será operado, como por exemplo a embarcação que efetuará o reboque, a velocidade de operação desta embarcação e as condições do ruído ambiente nas quais o *array* estará sujeito.

Conhecendo-se estes parâmetros e outras informações auxiliares de interesse para o projetista, é possível definir algumas características físicas do *array*, como o espaçamento entre os hidrofones, número de hidrofones no *array*, escopo do *array*, direcionalidade de cada hidrofone e o diâmetro do *array*.

7.1 Espaçamento entre hidrofones

O espaçamento entre os hidrofones depende, prioritariamente, da frequência de trabalho do *array*. Quanto maior a proximidade entre os elementos, maior será a frequência do sinal que o *array* conseguirá processar sem a ocorrência de *aliasing* espacial.

O *aliasing* espacial corresponde à indicação de existência de sinal em uma direção que não existe sinal, quando há ocorrência de lóbulos com a mesma amplitude do lóbulo principal, conhecidos como *grating lobes*. Para evitar possíveis problemas de *aliasing* espacial e a ocorrência de *grating lobes*, para uma faixa de direcionamento de feixe de -90° a 90°, deve-se atender ao seguinte critério: $d \leq \lambda/2$ [22].

A influência do espaçamento entre os hidrofones no padrão de irradiação do *array* pode ser observado na figura 21. Estes padrões são referentes ao eixo perpendicular ao eixo do *array*.

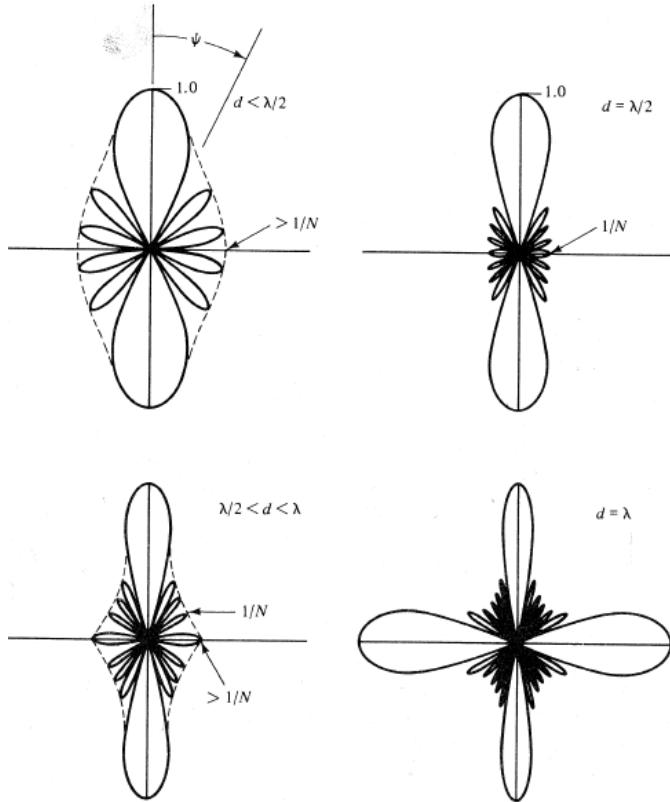


Figura 21 - Diagramas de irradiação do *array* linear para diferentes espaçamentos entre os hidrofones em comparação a um determinado comprimento de onda. Extraído de [23].

Para frequências inferiores à frequência de trabalho, observa-se que há uma ligeira degradação da performance do filtro, com uma largura do feixe maior e níveis de lóbulos secundários maiores em relação à frequência de trabalho.

Quando $d = \lambda/2$, a frequência do sinal acústico é igual a frequência de trabalho do *array* e há uma otimização da performance do filtro, em que os níveis dos lóbulos secundários são menores e a largura do feixe é menor.

Para frequências superiores à frequência de trabalho, o desempenho do *array* como filtro espacial é degradada significativamente, como pode ser observado no caso em que $d > \lambda/2$, quando os lóbulos secundários começam a sofrer um aumento. Para $d = \lambda$, o filtro espacial não consegue mais discriminar dois alvos distintos localizados em $\Psi = 0$ e $\Psi = \pi/2$, por exemplo, degradando a performance do filtro.

Para este trabalho, como deseja-se trabalhar com uma frequência de trabalho de 2 kHz, o espaçamento necessário para os hidrofones é de 37,5 cm. Este espaçamento foi garantido prendendo os hidrofones a uma rede de nylon, tracionada nas duas pontas do protótipo, em dois ganchos de cada lado. A figura 22 mostra este espaçamento.



Figura 22 - Espaçamento entre os hidrofones

7.2 Número de hidrofones

Conforme visto anteriormente, o número de hidrofones interfere, diretamente, no índice de diretividade e na função de diretividade do *array*, ou seja, quanto maior o número de elementos, maior será a capacidade de detecção do sinal e maior será a precisão da sua direção. Com o espaçamento entre os hidrofones definido, o número de elementos vai estar diretamente associado ao comprimento do *array*.

Além disso, um número maior de elementos permite que o *array* consiga trabalhar com frequências menores, pois é possível, durante o processamento, utilizar somente determinados elementos do *array*, sendo possível realizar combinações com diferentes espaçamentos. Conforme já mencionado, aumentando-se o espaçamento, diminui-se a frequência de trabalho.

Este projeto contará com apenas 2 hidrofones, porém para trabalhos futuros será possível aumentar o número de sensores e pré-amplificadores com a mesma carcaça do protótipo, precisando somente trocar o cabo elétrico por outro que contenha mais fios condutores.

7.3 Escopo do *array*

O escopo do *array* define o espaçamento que deve ser dado, através do cabo de reboque, entre o *array* e a plataforma de reboque [33]. Quanto menor esta distância, maior será a interferência do ruído causado pela embarcação, tanto o ruído associado ao seu maquinário quanto à hidrodinâmica, prejudicando a detecção de ruídos de baixa frequência pelos sensores.

Por outro lado, um largo comprimento do cabo de reboque pode acarretar em maiores tensões no cabo, o que vai requerer um maior esforço no reboque do dispositivo, além de vibrações induzidas no cabo que podem aumentar o ruído próprio do *array*.

Além disso, quanto maior o cabo de reboque, maior será a dificuldade em manter o *array* em uma profundidade desejada, e maior será a profundidade onde o *array* estará posicionado. A relação entre a profundidade do *array* e o comprimento do cabo de reboque depende de uma série de fatores, como a cauda do *array* e a velocidade do reboque, e pode ser estimada experimentalmente.

Para os testes realizados no mar, foi utilizado um cabo de reboque de 16 metros. Embora tenha sido insuficiente para impedir a influência dos sons produzidos pela embarcação no ruído detectado pelo *array*, este comprimento foi adequado para impedir que o *array* ficasse a profundidades maiores que 5 metros e para evitar que outras embarcações passassem por cima do protótipo, tendo em vista que o local onde foram feitos os testes possui um intenso tráfego marítimo de embarcações, em virtude da pesca, do turismo e da Marinha.

O material do cabo de reboque ideal para aplicações náuticas é o polipropileno, em virtude de apresentar boa durabilidade, capacidade de tração, elasticidade, excelente flutuabilidade, baixa absorção de água e, além disso, possui tecnologia anti-UV, permitindo sua exposição ao sol. Para os testes, foram utilizados cabos de propileno trançado de 8mm de diâmetro, que possuem uma carga de ruptura próxima de 10 kN e garantem, com uma boa margem de segurança, o reboque do equipamento.

7.4 Direcionalidade do hidrofone

As características de direcionalidade de um hidrofone estão intimamente associadas à maneira como o transdutor responde a um sinal acústico advindo de uma determinada direção, ou seja, representa a capacidade do elemento transdutor focar a energia de um sinal em uma direção específica e suprimir interferências e ruídos em outras direções. Atualmente, já existem trabalhos que utilizam hidrofones direcionais, embora este emprego não seja muito comum.

Neste trabalho, foram disponibilizados somente hidrofones omnidirecionais, ou seja, hidrofones que são sensíveis para qualquer direção.

7.5 Diâmetro do *array*

A força de arrasto provocada pelo deslocamento do *array* em um fluido aumenta o ruído próprio do *array*, prejudicando a relação sinal-ruído do sonar. A força de arrasto pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$F = \frac{\rho c_d v^2 A}{2}$$

Sendo:

ρ a densidade da água do mar;

c_d o coeficiente de arrasto;

v a velocidade do *array*; e

A a área de seção transversal do *array*.

Portanto, quanto maior o diâmetro, maior será a força de arraste aplicada no *array*. Além disso, o peso também será maior, o que vai tornar a utilização do sonar passivo inconveniente para embarcações menores e submarinos, por exemplo.

Por outro lado, o diâmetro deve ser grande o suficiente para separar fisicamente os hidrofones da camada limite turbulenta adjacentes à superfície externa do tubo que envolve os sensores. Por esse motivo, geralmente os *arrays* rebocados possuem diâmetro na faixa de 40 a 80mm [24], principalmente quando as embarcações rebocadoras atingem grandes velocidades.

A limitação inferior do diâmetro está associada ao máximo tamanho entre os elementos e os pré-amplificadores associados. O máximo diâmetro da parte eletrônica, que é referente aos hidrofones, é de 25 milímetros.

Considerando este valor, os materiais disponíveis no mercado e o suporte mecânico a ser instalado no interior do protótipo, foi definido que o diâmetro interno será de 1 1/2" (38,1 milímetros), valor considerado suficiente para oferecer um espaço adequado para a configuração interna do *array* e, ao mesmo tempo, atender ao requisito de baixo ruído próprio.

O espaço restante é necessário para a passagem dos cabos elétricos, o preenchimento de óleo de rícino e passagem da rede de nylon que vai ter a dupla função de resistir à tração do reboque e manter o espaçamento constante entre os hidrofones.

7.6 Material do *array*

O material utilizado para o *array* depende, basicamente, da impedância acústica, da disponibilidade no mercado nacional e do custo-benefício. O material que atende, razoavelmente, estes três requisitos, é o PVC, que é de baixo custo e possui impedância acústica próxima da água, evitando maiores perdas de detecção. Portanto, foi utilizada uma mangueira de PVC para acondicionar os circuitos eletrônicos, e peças usinadas deste mesmo material para fazer o acabamento hidrodinâmico da popa do equipamento. A flexibilidade da mangueira facilita no lançamento e recolhimento a partir de uma embarcação de pequeno porte e no transporte do protótipo para outros lugares onde possa realizar o experimento de reboque.

Para o acabamento hidrodinâmico na proa do *array*, foi utilizada uma peça de liga metálica, no caso o latão, para suportar alta carga de tração nas peças, principalmente nos filetes da rosca. Apesar da grande diferença entre a impedância acústica do latão e a água, estas peças ficam razoavelmente distantes dos sensores e não causam interferência significativa na recepção do sinal.

Para preenchimento interno do dispositivo, foi utilizado óleo de rícino que, além de ter a impedância acústica muito próxima à da água, não é tóxico, poluente e nem cancerígeno.

A tabela a seguir mostra os materiais escolhidos e as respectivas impedâncias acústicas, além da impedância acústica da água para comparação.

Tabela 1 - Material X Impedância Acústica

Material	Impedância Acústica característica ($kgm^{-2}s^{-1} \cdot 10^6$)
Água	1,54
Óleo de Rícino	1,45
PVC	3,27
Latão	40,6

7.7 Concepção do protótipo

Baseando-se nos requisitos do projeto e no estudo dos parâmetros do *array*, foram realizados alguns esboços iniciais do protótipo, que serviram de base para o seu projeto mecânico, cujo desenho de montagem encontra-se no ANEXO B.

As peças na extremidade do *array*, tanto na seção frontal quanto na seção traseira, foram desenhadas de modo a compatibilizar a sua conexão com a mangueira de PVC de 38,1 mm de diâmetro.

Para facilitar na montagem, a seção frontal do *array* foi projetada para receber os cabos elétricos e o cabo de reboque, enquanto a seção traseira recebe a cauda do *array* e uma passagem para preenchimento interno de óleo. As figuras 23 e 24 mostram como foram esquematizadas cada seção.

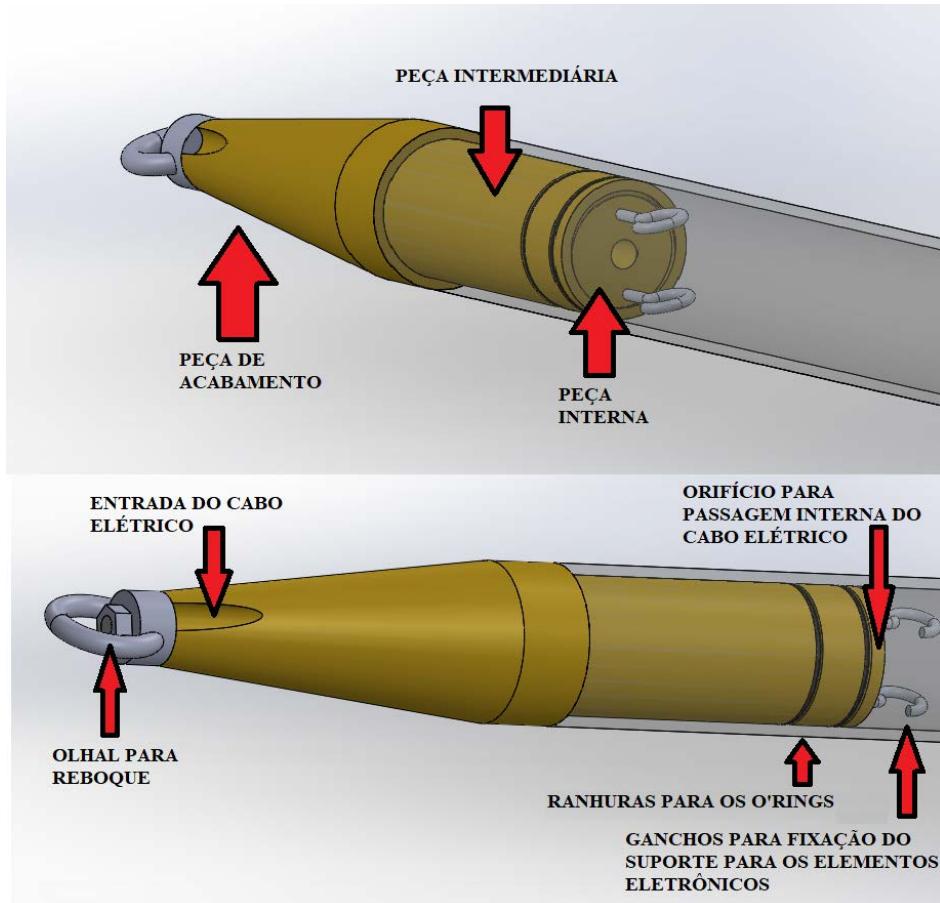


Figura 23 - Esquema da seção frontal do *array*

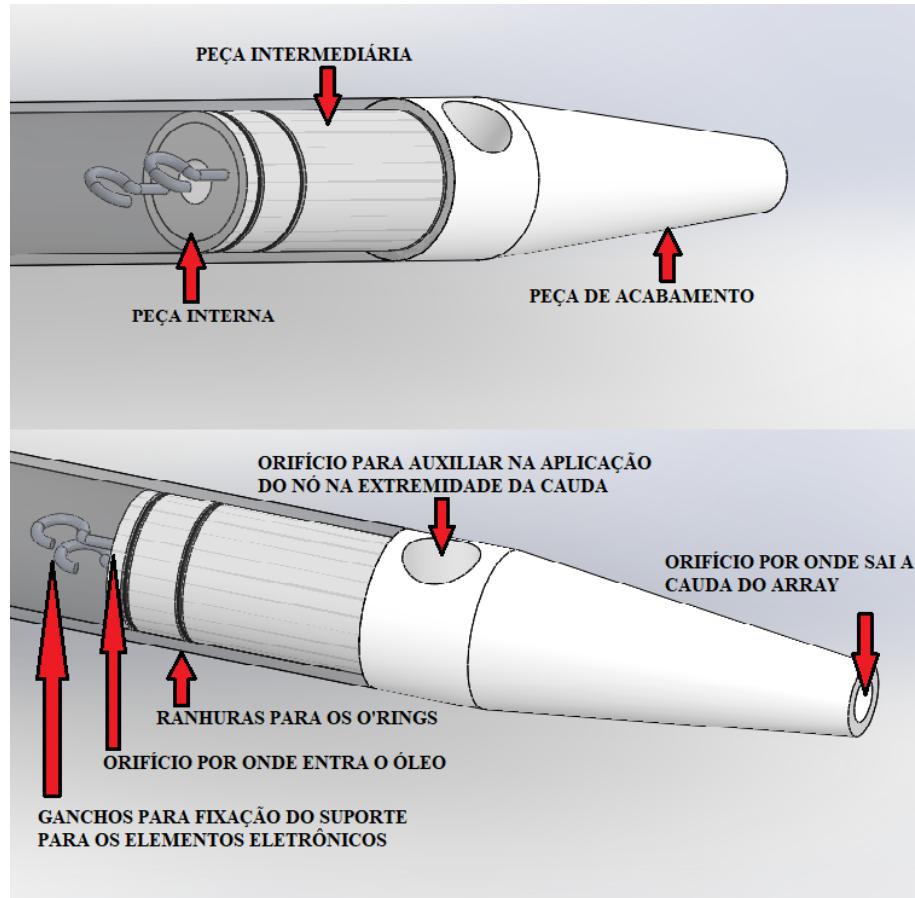


Figura 24 - Esquema da seção traseira do *array*

Importante ressaltar que, como as conexões entre as peças das extremidades e a mangueira não são permanentes, pode-se, futuramente, realizar a manutenção e modificação interna do sistema eletrônico para atender a um requisito diferente do proposto neste projeto, como a adição de mais hidrofones ou a alteração do espaçamento entre os sensores, ou a substituição das peças das extremidades.

Os seguintes aspectos foram considerados durante o projeto:

Estanqueidade: A estanqueidade é uma propriedade indispensável ao protótipo, tendo em vista que a entrada de água danificará as conexões elétricas em seu interior. Para garantir a estanqueidade, o primeiro passo foi identificar os possíveis locais por onde a água poderia entrar no arranjo.

Na proa, há três locais de entrada de água: no contato entre a mangueira e a peça intermediária, entre o prensa-cabo e a peça intermediária e entre o cabo elétrico e o prensa-cabo. O primeiro foi resolvido através de o'rings instalados em ranhuras externas à peça intermediária.

O segundo foi resolvido colando o prensa-cabo e sua rosca com araldite, tendo em vista que não há a intenção de trocar o prensa-cabo. O terceiro foi resolvido com uma borracha de vedação interna pertencente ao prensa-cabo da marca STECK, modelo PG-9, que veda a passagem de água após realizado o aperto do prensa-cabo no cabo elétrico.

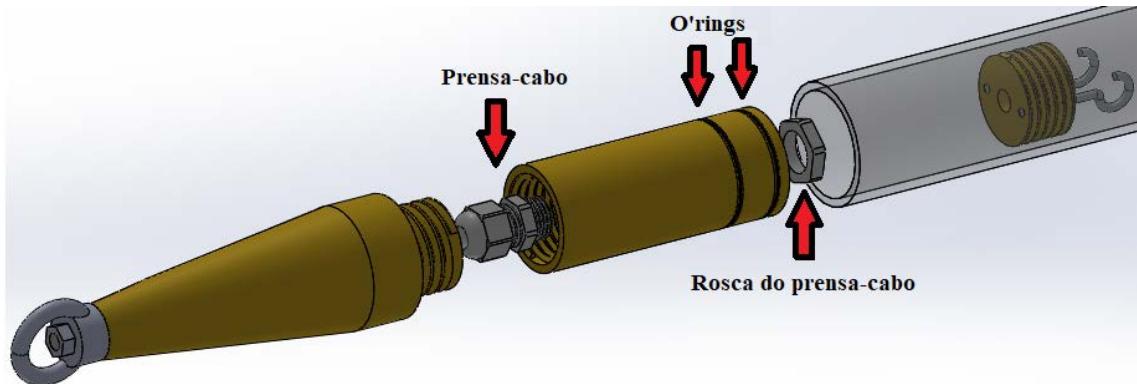


Figura 25 - Estanqueidade na proa do *array*

Na popa, por outro lado, há somente duas regiões de entrada de água. Assim como na proa, a região de contato entre a peça intermediária e a mangueira foi resolvida com os o'rings externos à peça.

A outra região é a rosca da peça de acabamento da popa, que também teve a sua estanqueidade garantida através de um o'ring, como pode ser observado na figura a seguir.

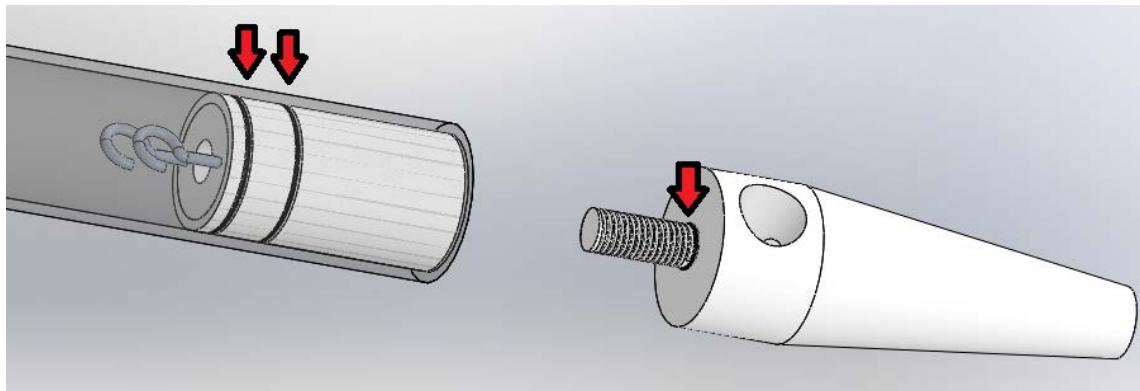


Figura 26 - Estanqueidade na popa do *array*

Estrutura contínua: O protótipo foi projetado para ser uma estrutura contínua, ou seja, uma única seção de mangueira vai agrupar todos os hidrofones e amplificadores, não sendo necessária a utilização de acoplamentos mecânicos para junção de módulos, reduzindo possíveis ruídos ou interferências de sinal.

Módulo de isolamento de vibrações: Para este projeto, em virtude das baixas velocidades de operação do protótipo durante os experimentos, um módulo de isolamento de vibrações não será necessário.

Estes módulos são necessários para *arrays* de maior porte que serão rebocados a grandes velocidades, geralmente de 15 a 20 nós, fazendo com que a geração de vórtices e instabilidades na cauda do *array* sejam as principais preocupações a serem resolvidas durante o projeto [20].

Como o *array* será de pequenas dimensões e está sendo projetado para baixas velocidades de reboque, são problemas que podem ser contornados com um bom acabamento hidrodinâmico, tanto na proa quanto na popa, além da cauda do *array*.

Contudo, para isolar mecanicamente o cabo elétrico e evitar que este ficasse tracionado durante a operação de reboque, foi realizada uma atividade marinheira de trincafiar, com abraçadeiras de nylon, uma seção menor do cabo de reboque com relação a uma seção de cabo elétrico, de modo que somente o cabo de reboque seja tracionado no reboque.



Figura 27 - Cabo de reboque trincafiado com o cabo elétrico durante a inserção do protótipo no mar

Preenchimento de óleo: Durante o preenchimento de óleo, a principal preocupação é expulsar todo o ar contido no interior do equipamento. As bolhas causam um efeito de espalhamento e atenuação do som que podem prejudicar significativamente a propagação acústica, sendo que a magnitude destes efeitos depende de fatores como o comprimento de onda do sinal e o tamanho e densidade das bolhas.

Além disso, quando os hidrofones estão localizados na proximidade das bolhas, o espalhamento pode alterar a fase e a amplitude dos sinais recebidos. Neste sentido, tal efeito pode reduzir a correlação do sinal que atinge cada hidrofone e pode reduzir a capacidade de filtro espacial e ganho do *array* [16].

Desta forma, há somente um orifício designado para entrada de óleo e consequente saída de ar, e fica localizado na popa a fim de não aumentar a complexidade da montagem do protótipo, tendo em vista que a proa recebe o cabo elétrico e o cabo de reboque. Assim, a peça de acabamento da popa é rosqueada no restante da montagem assim que o óleo começa a escorrer para fora do protótipo, visando garantir a completa expulsão do ar em seu interior.

O preenchimento de óleo foi feito lentamente, com uma seringa, para que não surgissem bolhas presas em certos pontos do *array* que dificultassem sua saída até a extremidade. Para expulsar completamente o restante das bolhas do protótipo, este foi colocado em uma posição vertical, com a popa voltada para a parte de cima, de modo a esperar que as bolhas subissem até a extremidade da popa.

Acabamento hidrodinâmico: A cauda do *array* utilizada no projeto corresponde a um cabo de tração com 4mm de diâmetro e 10 metros de comprimento. O cabo é introduzido pelo orifício na ponta do acabamento da popa e sai pelo orifício de maior diâmetro, onde é aplicado um nó para que o mesmo esteja preso ao protótipo. O orifício de maior diâmetro é, posteriormente, tampado com uma fita isolante. Esta foi a melhor solução encontrada para reduzir o ruído hidrodinâmico.



Figura 28 - Cauda do *array*

Por fim, as figuras 29, 30 e 31 mostram o protótipo em seu estágio final, com todos os aspectos mecânicos e eletrônicos implementados.



Figura 29 - Foto do protótipo visto da seção frontal



Figura 30 - Foto do protótipo visto da seção traseira



Figura 31 - Foto do protótipo visto de cima

8.0 Eletrônica

A eletrônica envolvida neste projeto pode ser dividida em dois sistemas. O primeiro é o sistema de recepção do sinal, que envolve tanto o sistema eletrônico inserido no interior do *array* de hidrofones que detecta e amplifica os sinais detectados, quanto o sistema responsável por enviar os sinais digitalizados a um computador, permitindo o seu processamento através da implementação de *softwares* comerciais com o intuito de coletar as informações desejadas da fonte acústica de interesse, e que ficam fora do *array*.

O segundo é o sistema de emissão de sinal, que foram utilizados de acordo com o tipo de teste realizado e cujo propósito é amplificar e emitir os sinais previamente gerados em um dispositivo como um computador ou um celular, que serão detectados pelo sistema de recepção. Este sistema é representado, praticamente, por uma fonte acústica ligada a um amplificador de potência cujo sinal era previamente gerado no computador.

O sistema de recepção do sinal consiste nos seguintes elementos:

- 2 hidrofones, disponibilizados pelo LACMAM;
- 2 pré-amplificadores, sendo um para cada hidrofone, disponibilizados pelo LACMAM;
- 1 cabo elétrico de poliuretano de 4 condutores, encomendado pelo LACMAM; e
- Uma placa de áudio para aquisição de sinais, modelo TASCAM US800.

O cabo elétrico foi dividido em duas seções. A primeira seção foi conectada à placa de aquisição do sinal e seu tamanho dependeu do comprimento do cabo de reboque que foi utilizado nos testes, enquanto a segunda seção, de tamanho menor, foi responsável por adentrar o *array* e realizar todas as conexões necessárias em seu interior.

As duas seções foram interligadas através de uma emenda contrátil a frio PST, porém esta emenda pode ser substituída, posteriormente, por um conector cabo-cabo específico para este tipo de aplicação, que possui um prensa-cabo em cada extremidade e o' rings nas roscas do conector para garantir a estanqueidade do sistema.

Esta separação permite uma maior flexibilidade na utilização do sistema eletrônico pois, caso haja necessidade de aumentar o comprimento do cabo elétrico, basta trocar o cabo da primeira seção por um de maior comprimento, não interferindo nas ligações previamente realizadas no interior do *array*.

O esquema simplificado do sistema de recepção do sinal encontra-se na figura a seguir.

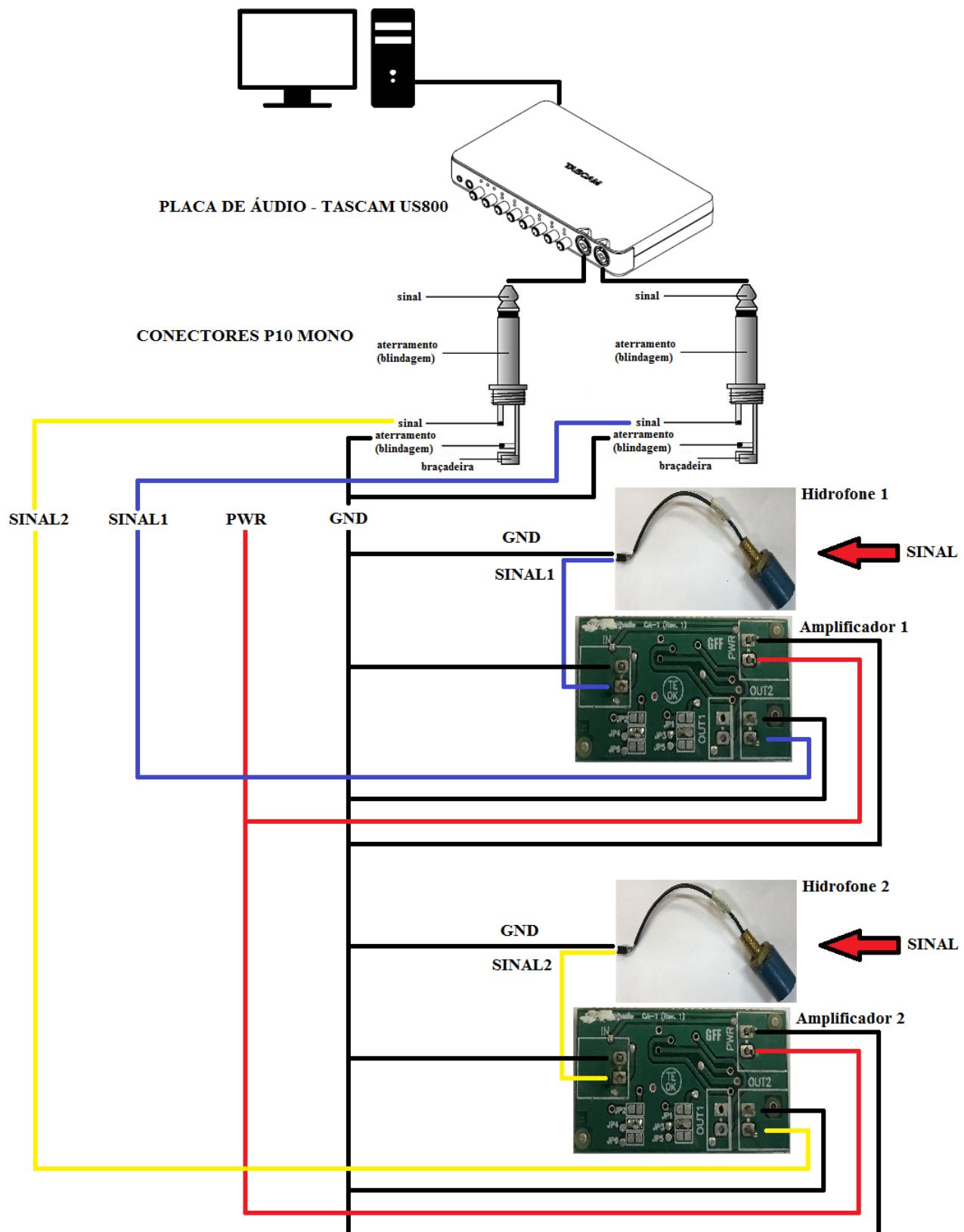


Figura 32 - Desenho esquemático do sistema eletrônico

8.1 Hidrofones



Figura 33 - Hidrofone utilizado no projeto

Os hidrofones utilizados neste experimento possuem as seguintes características:

- Sensibilidade: -198 dB rel 1V/ μ Pa
- Faixa de frequência: 5Hz a 20 kHz +- 3dB
- Profundidade de operação máxima: 200m
- Direcionalidade: omnidirecional

8.2 Pré-Amplificadores

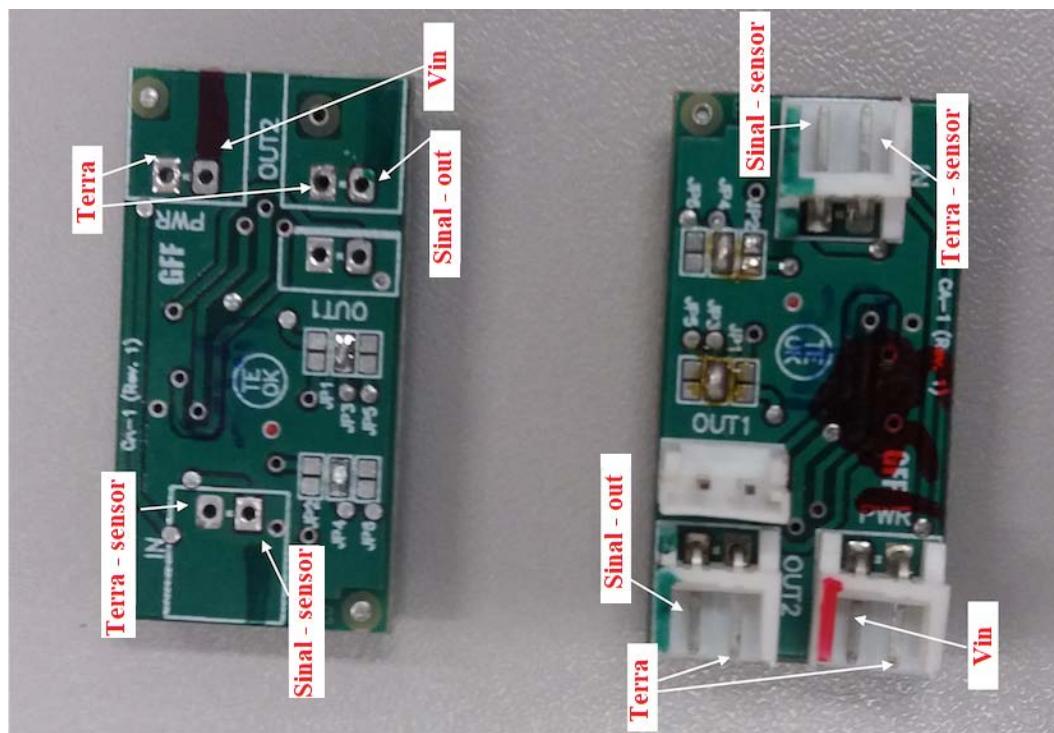


Figura 34 - Pré-amplificadores utilizados no projeto

Os pré-amplificadores utilizados para amplificar os sinais obtidos nos terminais de saída dos hidrofones possuem as seguintes características:

- Alimentação: 5 a 12V
- Corrente: 2,3mA
- Amplificação: 44 dB (360x)
- Banda de frequência: 5Hz a 50kHz

Para este projeto, foi utilizada uma bateria de 12V para alimentação dos pré-amplificadores.

8.3 Placa de Aquisição

A placa de aquisição utilizada foi a placa de áudio TASCAM US800, que conta com uma frequência de amostragem de até 96kHz e conta com 8 entradas e 6 saídas para conectores para áudio. A placa pode prover uma amplificação máxima de 44 dB.

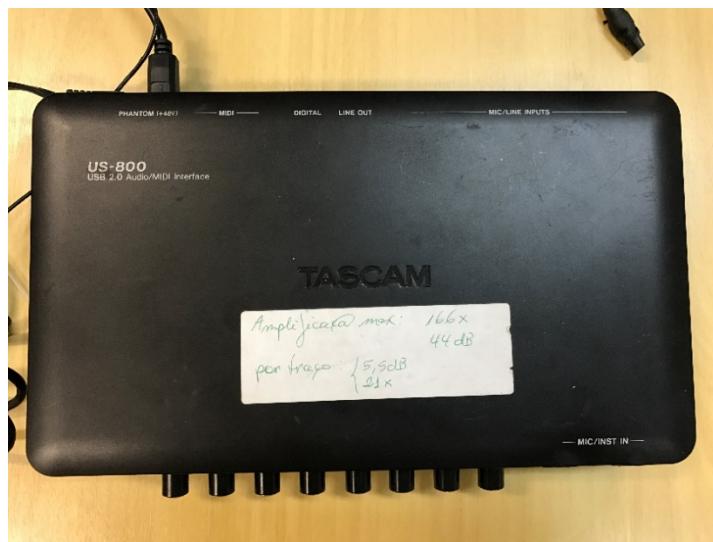


Figura 35 - Placa de áudio TASCAM US800

O cabo de alimentação da placa de áudio possui um adaptador cuja entrada é uma tensão de 110V/220V, e a saída é de 5V, com 2A. Nos testes no ar e na piscina, este cabo foi conectado a uma tomada. Nos testes realizados no mar, como não havia uma tomada de 110V ou 220V, o cabo de alimentação foi conectado a um inversor estático PROwatt SW 1000, que fornece este nível de tensão e é alimentado por uma bateria de 12V.

Um aspecto importante desta placa de áudio é que ela evita o problema de *aliasing*, que é uma sobreposição espectral que ocorre quando o teorema de Nyquist-Shannon não é obedecido. Segundo este teorema, para que seja preservada toda a informação contida no sinal,

é necessário que a frequência de amostragem seja superior ou igual a duas vezes a frequência máxima do sinal analógico.

Portanto, para este projeto, não foi necessário implementar um filtro analógico *anti-aliasing*. Importante ressaltar que o fenômeno descrito acima é diferente do *aliasing* espacial descrito no item 7.1.

8.4 Sistema de emissão do sinal

Para os testes na piscina, foi utilizada uma caixa de som submarina pertencente ao LACMAM, que foi ligada diretamente em um celular. Este equipamento é da marca Aqua Symphony DARAVOC Underwater Speaker (MA001), e conta com as seguintes características:

- Resposta em frequência: 100 a 10.000 Hz
- Potência máxima: 20 W
- Impedância: 4 ohms / 8 ohms

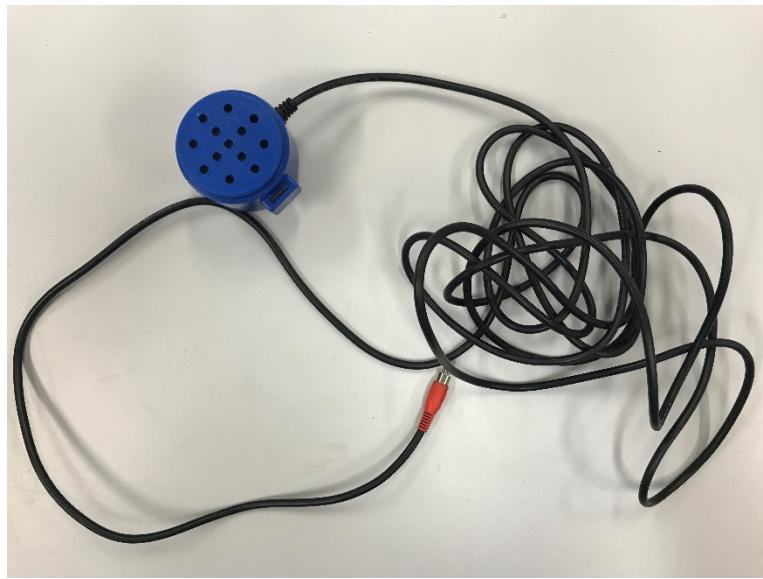


Figura 36 - Caixa de som submarina Aqua Symphony DARAVOC Underwater Speaker (MA001)

Para os testes no mar, foram utilizados a fonte acústica e amplificadores de sinal pertencentes ao IIEAPM. A fonte acústica empregada é uma Lubell LL964, que é um transdutor piezoelétrico submarino banda larga de alta potência, e é voltado para aplicações científicas e militares. Esta fonte com as seguintes características:

- Faixa de frequência: 200 Hz a 20 kHz;

- Nível de pressão da fonte: 180 dB re 1 μ Pa || 1m à 1 kHz
- Tensão máxima: 40 V rms
- Impedância: 64 ohms nominal



Figura 37 - Fonte acústica Lubell LL964

Esta fonte foi conectada a um amplificador de potência Taramps TS800.1 modelo 4 ohms, que conta como principais características:

- Tensão de alimentação: 9 VDC a 16 VDC
- Resposta de frequência: 10 Hz a 30 kHz (-1 dB)
- Número de canais: 1
- Potência máxima à 12,6 VDC e 4 ohms: 800 W rms
- Relação sinal/ruído: maior que 95 dB



Figura 38 - Amplificador de potência Taramps TS800.1

9.0 Processamento Digital de Sinais

O sinal elétrico analógico produzido nos terminais do hidrofone precisa ser digitalizado para permitir seu armazenamento e manipulação através de um dispositivo digital como o computador.

Esta conversão de sinais analógicos, que são contínuos no tempo e constituídos por uma sequência de infinitos pontos, em sinais discretos, representados por uma sequência finita de pontos, ocorre em um conversor analógico-digital, que neste caso está no interior da placa de áudio, através do processo de amostragem.

Este processo é separado em duas etapas. Na amostragem, o sinal contínuo é partitionado em instantes discretos de tempo. Na quantização, ocorre a discretização da amplitude, ou intensidade, do sinal.

Os sinais digitalizados podem, então, ser analisados através de duas perspectivas diferentes, no domínio do tempo ou da frequência, sendo ambas de grande importância na identificação de uma determinada fonte acústica com auxílio de um espectrograma.

Além disso, aproveitando-se do arranjo de sensores, o processamento de sinais pode ser utilizado para a estimativa do ângulo de chegada de um sinal em função da resposta de sensores espaçados segundo um arranjo, através de uma técnica conhecida como *beamforming*.

9.1 Beamforming

O *beamforming*, ou filtragem espacial, é uma técnica de processamento que consiste em receber um sinal proveniente de uma determinada direção de interesse e rejeitar sinais interferentes provenientes de direções indesejáveis, e é largamente empregada para a localização de uma fonte sonora. Sua área de aplicação é ampla, podendo ser utilizada em sistemas radar, sonar, comunicações, processamento de imagens, explorações geofísicas e astrofísicas e na biomedicina [8].

Este filtro espacial pode ser implementado através de um único sensor, caso este tenha uma resposta direcional em virtude de detalhes construtivos, ou através de um *array* de sensores, como é o caso deste trabalho.

A seguir, serão apresentados alguns algoritmos que são empregados para utilização desta técnica. Técnicas mais avançadas de *beamforming* não serão contempladas neste trabalho.

9.1.1 Delay-and-sum Beamforming

No domínio do tempo, o algoritmo mais empregado para o processamento espacial de sinais de *arrays* é o *Delay-and-sum Beamforming*, que consiste em somar, com os atrasos apropriados para cada hidrofone, o sinal acústico captado pelo transdutor de modo a reforçar o sinal e atenuar o efeito do ruído.

Este algoritmo baseando-se no conceito de interferência construtiva e destrutiva de ondas, em que sinais desalinhados no tempo têm uma tendência a anularem-se quando somados, ao contrário de sinais com o melhor alinhamento temporal entre eles que aumenta o sinal de saída. Desta forma, o ângulo cujo atraso vai maximizar a energia na saída do filtro equivale ao ângulo de incidência da frente de onda. O esquema a seguir mostra como funciona o algoritmo de atraso-e-soma.

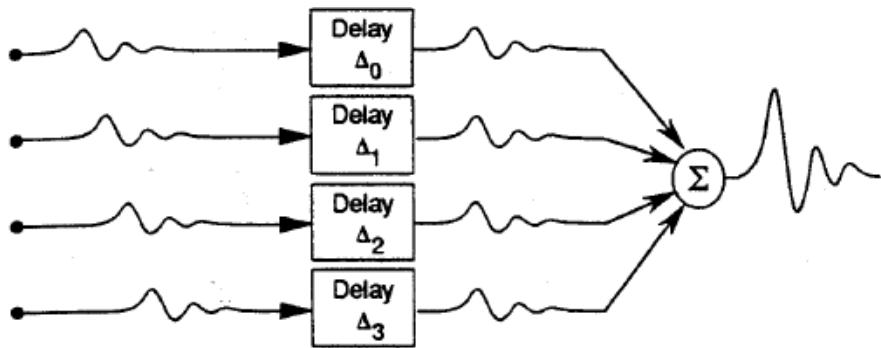


Figura 39 - *Delay-and-sum Beamforming*. Extraído de [27].

Assim, a saída de cada hidrofone no domínio do tempo será:

$$y_1(t) = s(t), \text{sendo } \tau_1 = 0$$

$$y_2(t) = s(t - \tau_2)$$

...

$$y_N(t) = s(t - \tau_N)$$

Desta forma, cada diferença geométrica proporcionada pelo ângulo ϕ é compensada pelos atrasos, fazendo com que o sinal de todos os hidrofones estejam em fase quando a direção do sinal for igual a ϕ . O valor para os atrasos que maximizam o sinal que chega nos hidrofones do *array* pode ser calculado. Além disso, estes sinais podem ser multiplicados por uma função peso, que vai influenciar os lóbulos primários e secundários da direitividade do *array*, conforme visto no item 5.7.5.

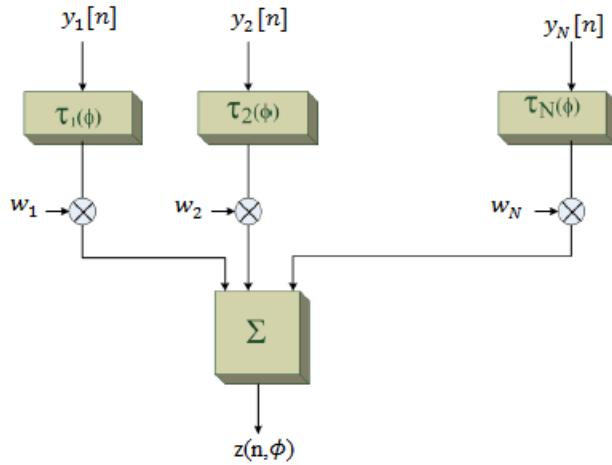


Figura 40 - Esquema simplificado do *Delay-and-sum Beamforming*. Extraído de [3].

O atraso no sinal do hidrofone i pode ser representado por $\tau_i(\phi) = k_{\phi i} T_s$, sendo T_s o período de amostragem e $k_{\phi i}$ é um número inteiro do número de amostras entre o primeiro hidrofone e o hidrofone i .

Além disso, pode-se calcular o número inteiro que representa a diferença do número de amostras entre hidrofones adjacentes m_ϕ através da relação $k_{\phi i} = (i - 1)m_\phi$. Desta forma, a soma de todos os sinais adquiridos por cada transdutor $z(n, \phi)$ pode ser calculada pela seguinte equação:

$$z(n, \phi) = \sum_{i=1}^N w_i y_i[n - (i - 1)m_\phi]$$

O atraso entre hidrofones adjacentes é igual a $\frac{d \sin(\phi)}{c} = m_\phi T_s = \frac{m_\phi}{f_s}$. Assim, $\sin(\phi) = \frac{m_\phi c}{d f_s}$. Portanto, $\left| \frac{m_\phi c}{d f_s} \right| \leq 1$. Isso significa que, quanto maior o espaçamento entre os hidrofones e a frequência de amostragem, maior será a faixa de números inteiros m_ϕ e, consequentemente, maior a faixa de ângulos ϕ possíveis para o direcionamento de feixe, permitindo uma maior precisão do ângulo.

Entretanto, como o espaçamento entre os hidrofones dependerá do comprimento de onda do sinal acústico de interesse para a análise de sinais, a única possibilidade de aumentar a faixa de ângulos para o direcionamento de feixe é através do aumento da frequência de amostragem, que pode ser obtida por técnicas de interpolação do sinal.

9.1.2 Filter-and-sum Beamforming

Esta técnica introduz um complemento ao *beamforming* de atraso-e-soma, e consiste em aplicar filtros apropriados na saída de cada sensor antes da aplicação dos atrasos e posterior soma dos sinais. Estes filtros podem ser temporais ou espaciais, e podem ser combinados de modo a otimizar o *beamforming*.

Os filtros temporais são aplicados quando uma determinada faixa de frequências de interesse é conhecida e deseja-se desprezar sinais emitidos por fontes acústicas presentes no momento da medição, ou para evitar o *aliasing* espacial. Os filtros espaciais, por sua vez, são vistos em sensores que não são omnidirecionais, e são aplicados quando há a necessidade de reforçar os sinais oriundos de uma determinada direção em detrimento de outras.

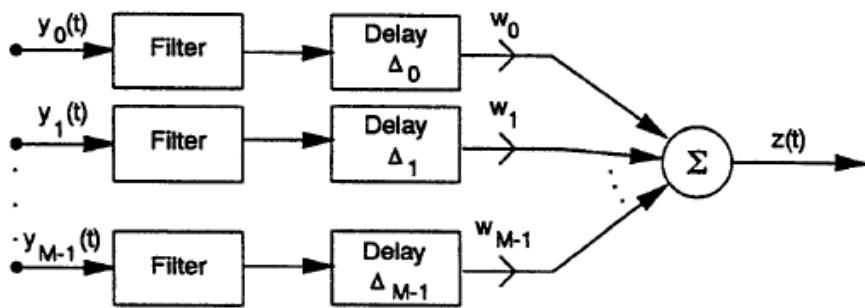


Figura 41 - *Filter-and-sum beamforming*. Extraído de [27].

9.1.3 Frequency-Domain Beamforming

Conforme visto anteriormente, o filtro espacial é obtido através do somatório de atrasos relativos a cada hidrofone. No domínio da frequência, os atrasos no tempo são substituídos por mudança de fase. O *beamforming* no domínio da frequência implementa todos os cálculos no domínio da frequência aplicando-se a transformada de Fourier na entrada, somando-se os atrasos correspondentes a cada sensor e implementando a transformada inversa de Fourier na saída.

Esta estratégia, embora pareça complicada, possui vantagens em algumas situações, especialmente quando utiliza-se algoritmos computacionais mais eficientes como o FFT (*Fast Fourier Transform*) [27].

9.1.4 Softwares implementados e desenvolvidos para o projeto

Em todos os testes, as gravações dos sinais foram realizadas através do *software* Audacity, que é um programa gratuito que permite criar, editar, gravar, importar e exportar diversos formatos de arquivos de áudio, além de possibilitar a análise dos sinais gravados

através de um spectrograma que pode ser configurado de acordo com o propósito do estudo do sinal, como o tamanho e o tipo do janelamento. Os spectrogramas apresentados nos testes realizados na água são referentes a este programa, sendo que o spectrograma superior é do primeiro hidrofone e, o inferior, do segundo hidrofone.

Por sua vez, para aplicar a técnica do *beamforming* e calcular a direcionalidade do sinal detectado foi utilizado o Matlab, importando-se trechos de gravações realizados pelo Audacity.

O algoritmo aplicado nos testes utilizou o conceito de atraso-e-soma no domínio do tempo mencionado anteriormente, sendo que foi implementado filtro digital passa-banda no próprio Matlab para processar somente o sinal desejado, além da utilização de interpolação do sinal de modo a melhorar a resolução espacial, conforme mencionado no item 9.1.1.

O fluxograma a seguir mostra como foi realizada a integração da parte eletrônica com os *softwares* utilizados e implementados neste projeto, exibindo todas as etapas necessárias para o cálculo da direção de um sinal analógico de interesse detectado no meio no qual o *array* de hidrofones está inserido.

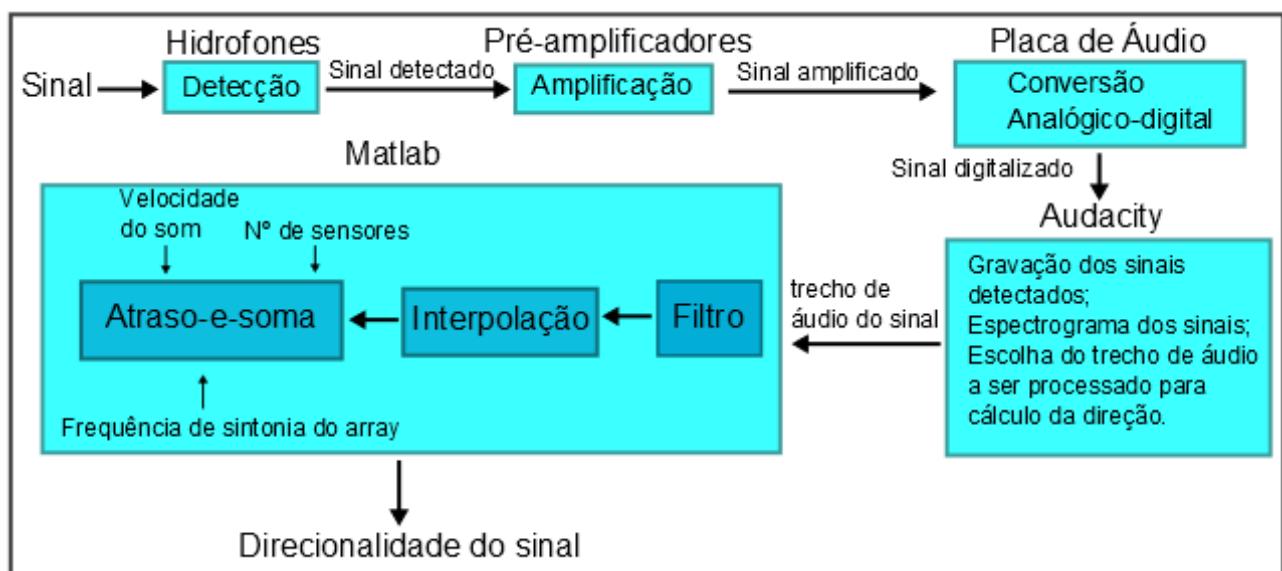


Figura 42 - Fluxograma da integração da parte eletrônica com os *softwares* implementados e desenvolvidos para este projeto

10.0 Validação

A validação do projeto consiste em verificar se o protótipo concebido é capaz de atender aos requisitos propostos. Desta forma, foram realizados testes de estanqueidade, estático e dinâmico. Os testes de estanqueidade foram realizados no LACMAM e visaram garantir a estanqueidade, com uma boa margem de segurança, para as condições reais de operação a mar aberto, levando-se em consideração que a pressão na água do mar é ligeiramente maior do que na água doce para uma mesma profundidade.

Os testes estáticos foram executados, primeiramente, no laboratório, sem o encapsulamento mecânico do protótipo final, com os hidrofones pendurados no ar e sem nenhum contato em sua superfície para evitar ruídos indesejáveis. Neste teste, foi verificado o funcionamento dos *softwares* utilizados para o projeto, tanto para detecção quanto para o cálculo da direção do sinal.

O próximo passo foi executar o teste em água doce, numa piscina, agora com o protótipo final, com as duas extremidades amarradas em dois pontos fixos no local do teste, visando verificar a detecção dos sinais emitidos embaixo d'água com o *array* já montado.

Os testes dinâmicos, por sua vez, foram realizados em condições reais de operação, em mar aberto, e tiveram como objetivo verificar o ruído detectado durante o experimento, detectar e identificar fontes acústicas de interesse, detectar os sinais emitidos artificialmente através de uma fonte acústica e, por fim, calcular a direcionalidade proveniente destes sinais artificiais.

Existem algumas diferenças relevantes entre os testes estáticos e dinâmicos. A primeira é que, nos testes estáticos, a reflexão do som nas superfícies próximas aos hidrofones interfere de forma significativa na aplicação do *beamforming*, e para estes casos, é necessário capturar um pequeno trecho inicial do sinal emitido.

A segunda está associada aos conceitos de campo próximo e campo distante. Campo próximo é a região na qual uma fonte está localizada próxima ao arranjo de sensores, e neste caso a frente de onda da propagação do som é, perceptivelmente, curvada em relação às dimensões do *array* e a direção de propagação vai depender da localização do sensor.

Nesta região, as trajetórias descritas pelas ondas sonoras de mesma frequência, a partir da fonte acústica, podem diferir de um valor igual a meio comprimento de onda e, com isso, há uma interferência destrutiva de ondas sonoras, provocando uma interferência que pode causar

o cancelamento da amplitude do sinal resultante, que depende geometricamente da posição do ponto considerado em relação às dimensões e a posição da fonte [10].

Existe uma distância mínima na qual não será mais possível para as ondas que percorrem as trajetórias mais longas, aquelas provenientes das extremidades da fonte, interferirem naquelas que percorrem as trajetórias mais curtas, que partem do centro da fonte. Esta distância depende das dimensões da fonte e da frequência emitida e definem o começo da região conhecida como campo distante.

Nesta região, a direção de propagação é aproximadamente igual para cada sensor, e a propagação do sinal pode ser aproximada para um plano de ondas.

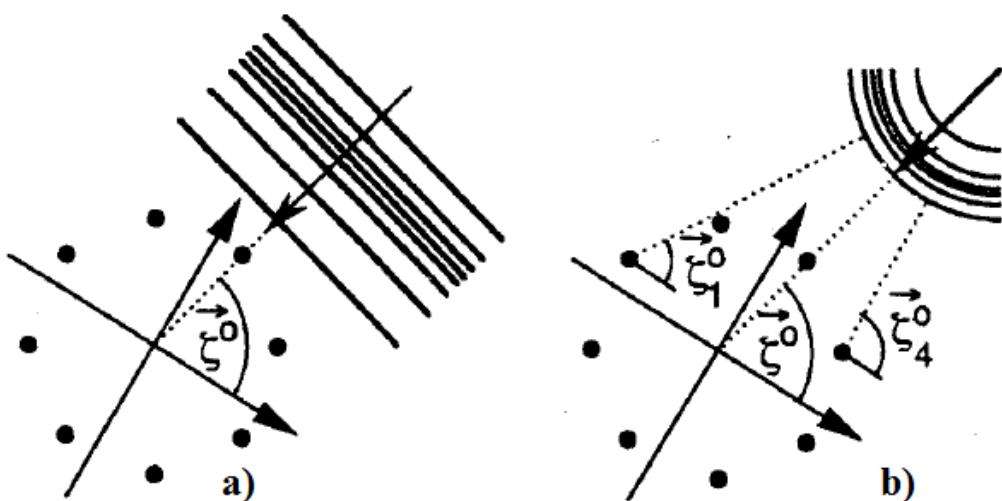


Figura 43 - Exemplo de propagação do som no a) campo distante e b) campo próximo. Extraído de [27].

Considerando-se os conceitos mencionados acima, é de se esperar que os testes dinâmicos tenham resultados mais satisfatórios quando comparados aos testes estáticos, por conta da razoável aproximação da propagação do som a uma onda plana e a quase inexistência de superfícies que possam vir a interferir na reflexão do som.

Importante destacar que, em virtude da falta de recursos materiais para a calibração dos hidrofones e do *array* como um todo, todos os estudos voltados para o cálculo da direção do som tiveram um caráter qualitativo, ou seja, a amplitude do sinal analisado está referenciada a uma unidade de medida arbitrária, sob a sigla U.A. (Unidade Arbitrária).

10.1 Metodologia

A metodologia para a validação do projeto pode ser observada no fluxograma a seguir.

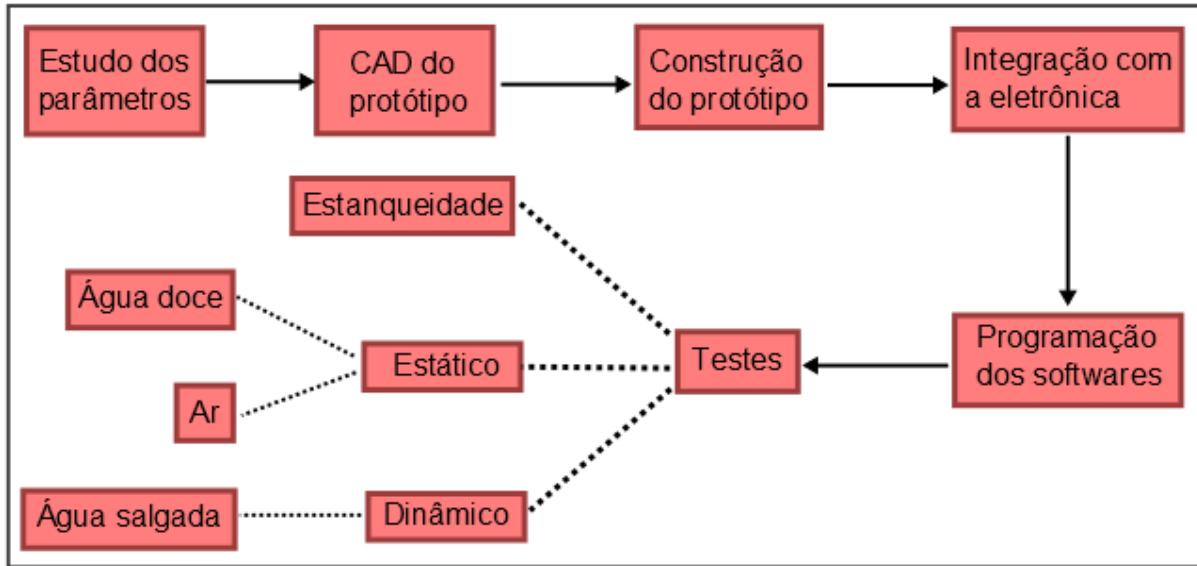


Figura 44 - Fluxograma da metodologia para validação do projeto

10.2 Testes de estanqueidade

Os testes de estanqueidade foram realizados em um tanque cilíndrico pertencente ao LACMAM, que possui uma manivela que pressuriza o tanque até a pressão desejada, e um manômetro que mede a pressão do tanque, que possui uma pressão de operação máxima de 35 bar, o equivalente a 350 metros de profundidade.

Durante os testes, o protótipo permanecia imerso neste tanque durante 24 horas aproximadamente, tempo considerado suficiente para verificar se o encapsulamento é capaz de evitar a entrada de água durante a sua operação.

O arranjo de hidrofones foi capaz de suportar profundidades de 20 metros em água doce, o que é mais do que suficiente para atender ao requisito proposto para suportar a profundidade desejada na água do mar de até 5 metros. Não foram realizados testes de estanqueidade para profundidades acima de 20 metros.



Figura 45 - Tanque para testes de estanqueidade

10.3 Testes no ar

Antes de imersão do protótipo na água, foram realizados testes de recepção do sinal no LACMAM, baseando-se no fato de que a curva de resposta em frequência dos hidrofones, tanto na água, quanto no ar, é aproximadamente igual para frequências de até 3kHz.

Desta forma, o teste consistiu em posicionar os hidrofones com um espaçamento adequado para recepção de um sinal de 2 kHz, considerando a velocidade do som no ar de 343 m/s, e suspensos no ar, evitando qualquer contato físico que criasse ruídos indesejáveis no sinal a ser processado.

O sinal de 2 kHz foi emitido através de um celular, que foi posicionado à frente, atrás e aproximadamente perpendicular ao *array*, de modo a verificar o funcionamento do algoritmo utilizado para o *beamforming*.

A figura 46 mostra o esquema utilizado para realização deste teste.



Figura 46 - Esquema utilizado para o teste no laboratório

No interior do laboratório há diversas superfícies próximas aos hidrofones onde o som sofrerá diversas reflexões, portanto foi selecionada uma pequena faixa do som gravado para análise da direcionalidade, que se inicia um pouco antes da geração do sinal e contém alguns pulsos senoidais emitidos.

O laboratório é afetado por diversas fontes de ruído de baixa frequência, principalmente a 60 Hz e seus harmônicos, em virtude de ruídos elétricos gerados quando conecta-se a placa de áudio na tomada, e dos diversos equipamentos eletrônicos presentes no interior do laboratório e nas proximidades, que podem prejudicar a obtenção do sinal desejado tanto pelas vibrações das máquinas rotativas quanto por induções eletromagnéticas.

Sendo assim, foi efetuada uma comparação entre a faixa de som sem filtro e com um filtro digital FIR passa-faixa, de 1900 a 2100 Hz, para trabalhar somente como sinal obtido pelo celular e eliminar grande parte do ruído presente no laboratório. O gráfico 8 mostra a curva de resposta em frequência, tanto para magnitude quanto para fase, do filtro implementado.

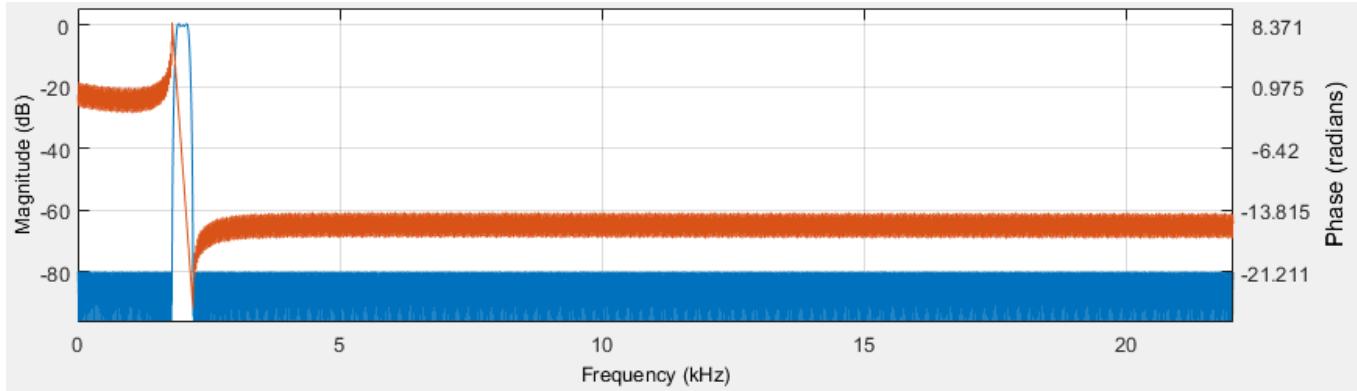
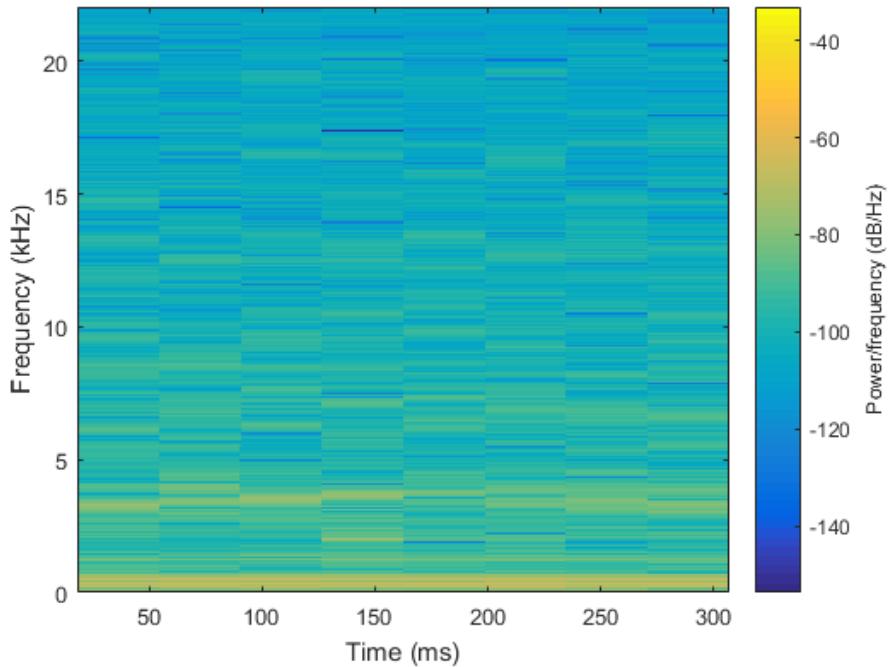


Gráfico 8 - Resposta em Frequência para magnitude e fase do filtro FIR utilizado

Os espectrogramas a seguir são referentes ao primeiro hidrofone, para o sinal sem filtro e com filtro, com a fonte acústica emitindo o sinal na frente do *array*. No espectrograma sem filtro, é possível observar uma faixa considerável de ruídos de baixa frequência de grande magnitude.



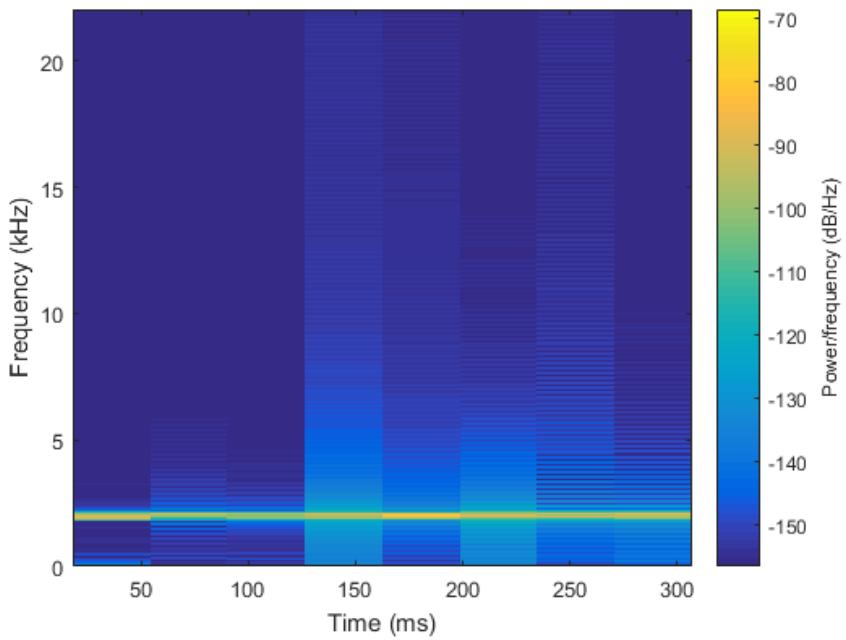


Gráfico 10 - Espectrograma do primeiro hidrofone a receber o sinal filtrado emitido à frente do *array*

Em virtude da presença indesejável de grandes níveis de ruídos no sinal sem filtro, o algoritmo *delay-and-sum beamforming* não apresenta um resultado adequado, como pode ser observado no gráfico 11.

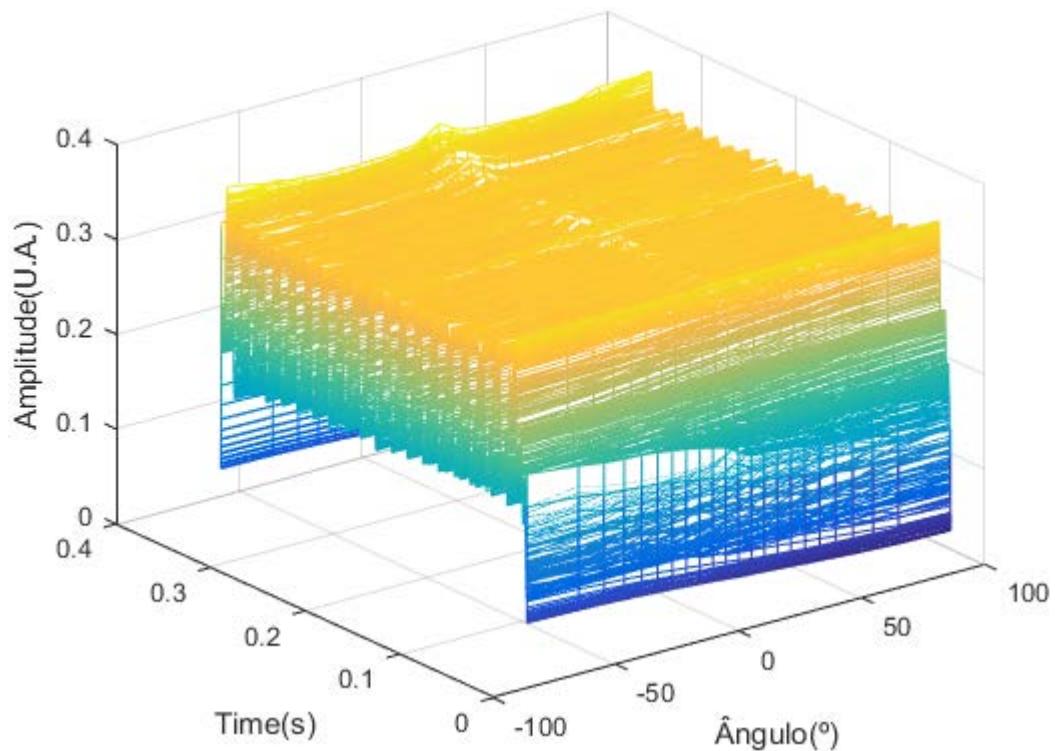


Gráfico 11 - Resultado da direcionalidade do sinal, sem filtro, emitido pelo celular à frente do *array*

O gráfico a seguir representa o cálculo da direção do sinal emitido à frente do *array*, com o sinal filtrado, sendo possível notar que a amplitude para ângulos positivos é significativamente maior.

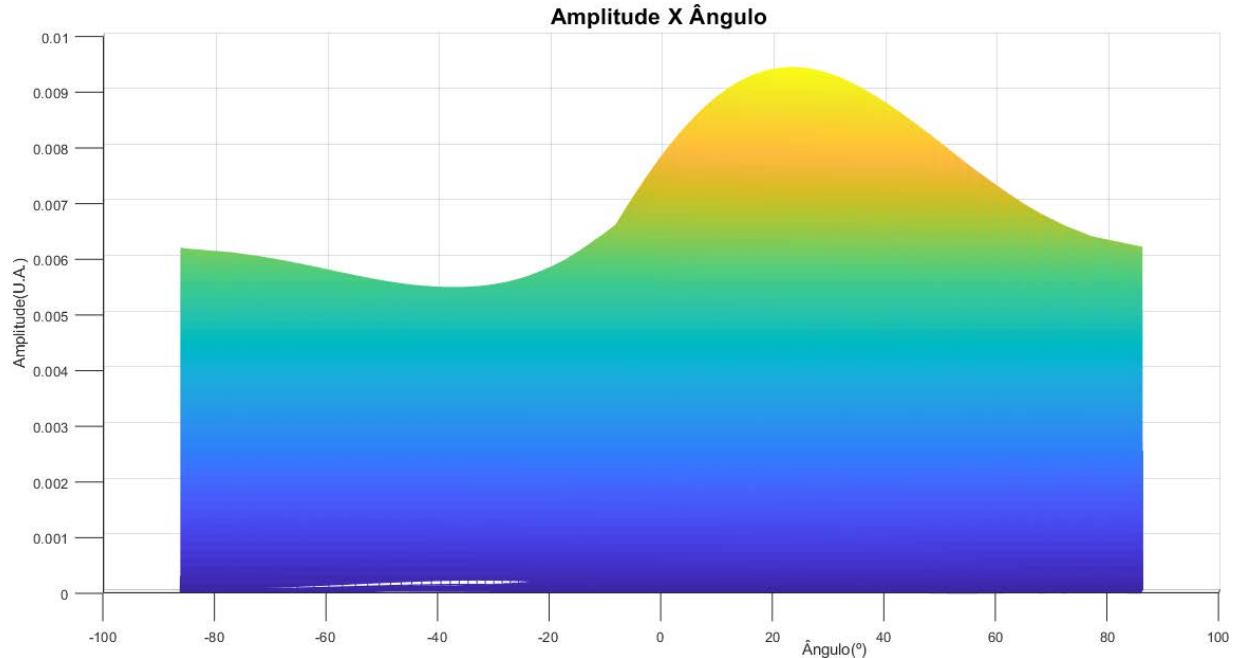


Gráfico 12 - Resultado da direcionalidade do sinal filtrado emitido pelo celular à frente do *array*

Quando o sinal é emitido atrás do *array*, espera-se que a amplitude do sinal relativa às direções negativas seja maior, como pode ser verificado no gráfico a seguir.

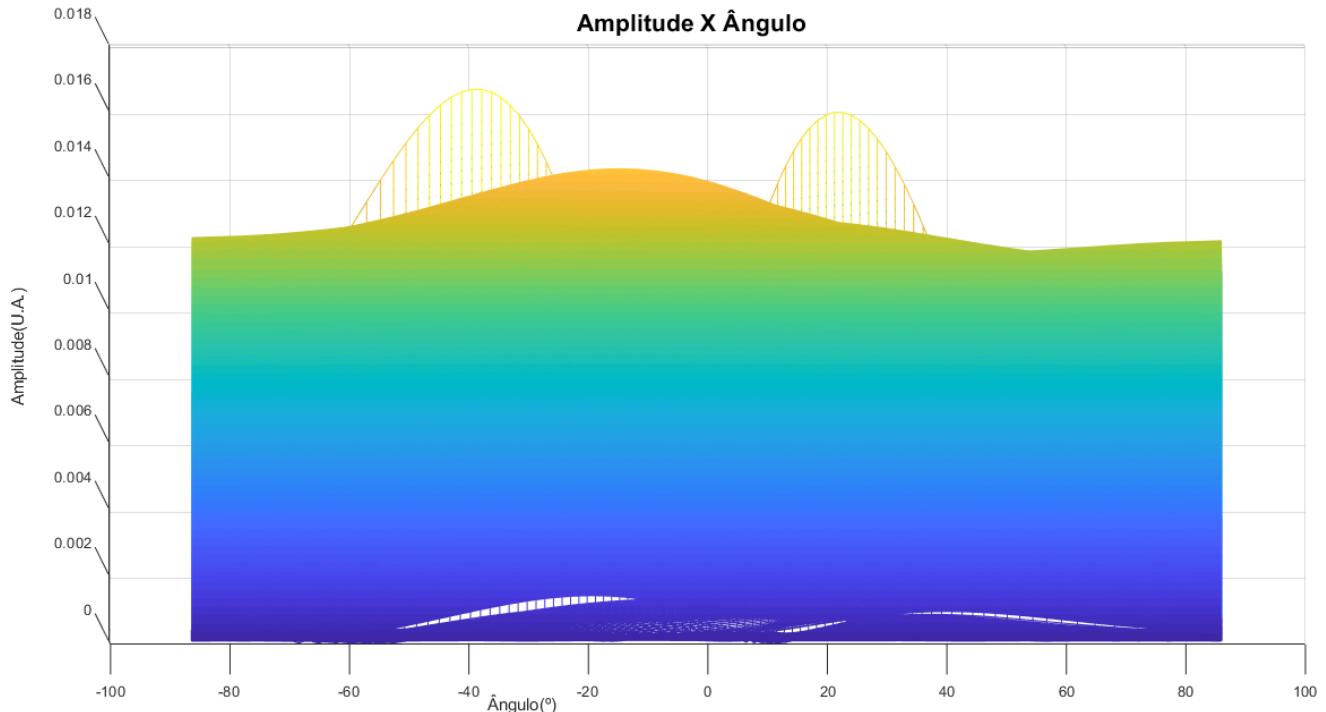


Gráfico 13 - Resultado da direcionalidade do sinal emitido pelo celular atrás do *array*

Por fim, foi realizado um teste com o sinal sendo propagado em uma direção perpendicular ao eixo do *array*, a uma distância aproximadamente igual entre os dois sensores, obtendo-se uma amplitude maior nas proximidades do ângulo de 0°.

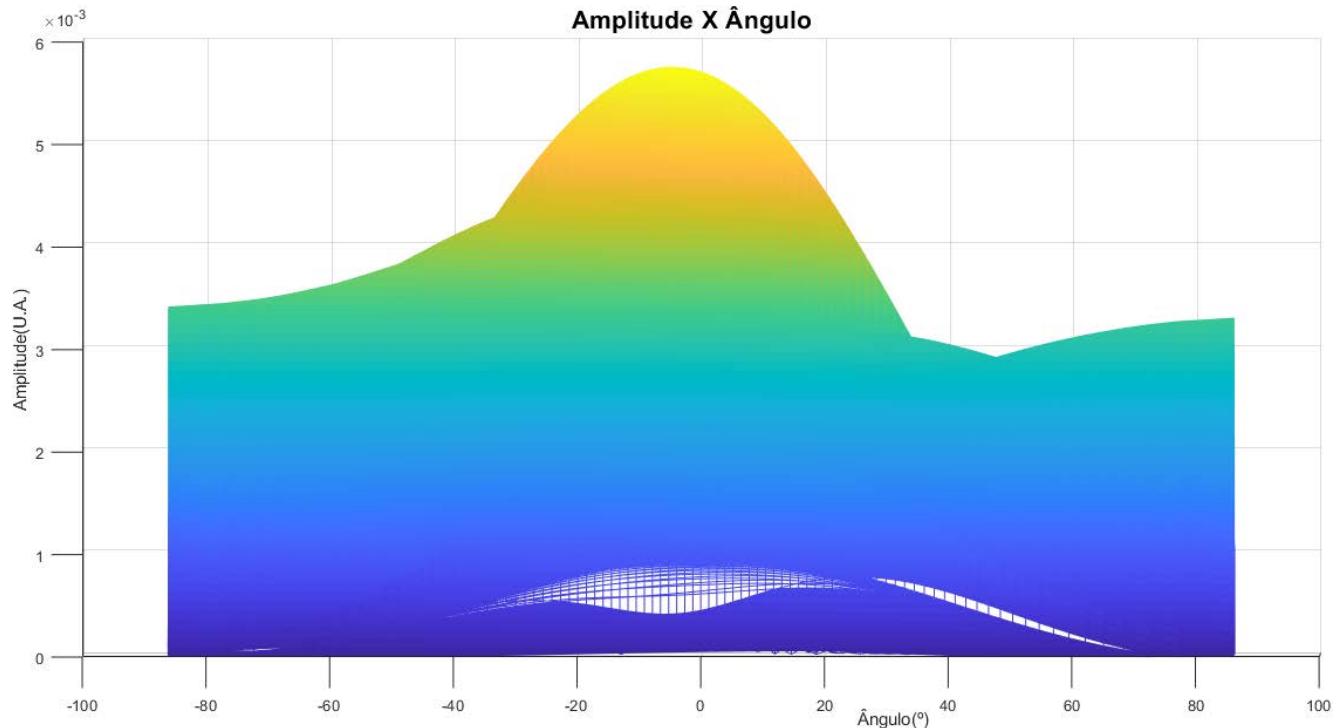


Gráfico 14 - Resultado da direcionalidade do sinal emitido a 90° do eixo do *array*

10.4 Testes estáticos na água

Os testes estáticos foram realizados no tanque de saltos do Centro de Práticas Esportivas da Universidade de São Paulo (CEPEUSP). Este tanque possui uma largura de 17 metros, comprimento de 23,5 metros e profundidade de 6 metros, sendo, portanto, ideal para este tipo de teste, pois permite que o sinal detectado possa ser analisado sem interferência das reflexões do som no fundo e nas paredes laterais nos primeiros pulsos emitidos pela fonte acústica.

O *array* foi amarrado de uma ponta a outra do tanque de saltos, enquanto o cabo da caixa de som submarina foi amarrado a uma garrafa pet com o intuito de manter a profundidade da caixa de som razoavelmente próxima da profundidade do *array*. As figuras a seguir mostram como este teste foi esquematizado.



Figura 47 - Vista fora d'água do esquema do teste estático no tanque de saltos da CEPEUSP

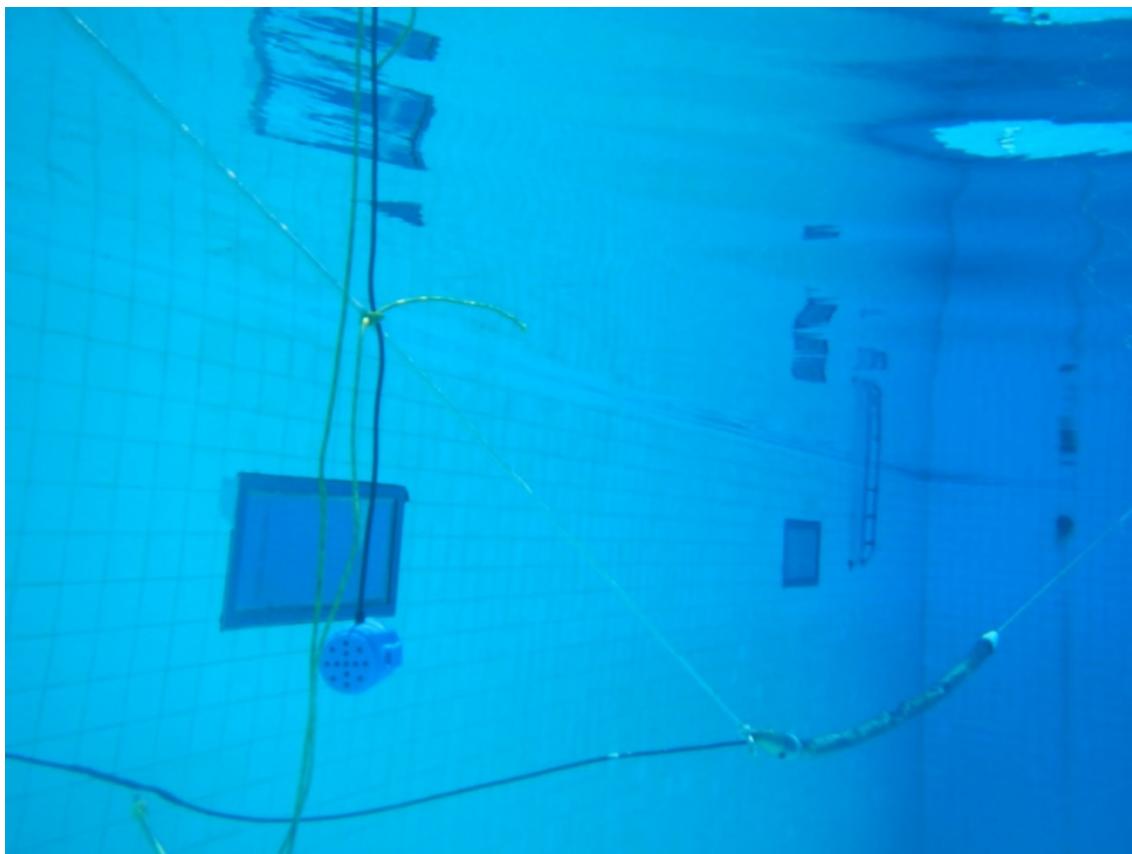


Figura 48 - Vista debaixo d'água do esquema do teste estático no tanque de saltos da CEPEUSP

Inicialmente, sem a emissão de sinal por parte da fonte acústica, verificou-se o ruído detectado pelos hidrofones. Os ruídos presentes estão mais intensos até uma faixa de frequência próxima de 500 Hz. Para frequências mais próximas de 1,5 kHz a intensidade do ruído é levemente reduzida, de 2 kHz para cima a presença de sinais mais ruidosos é menor.

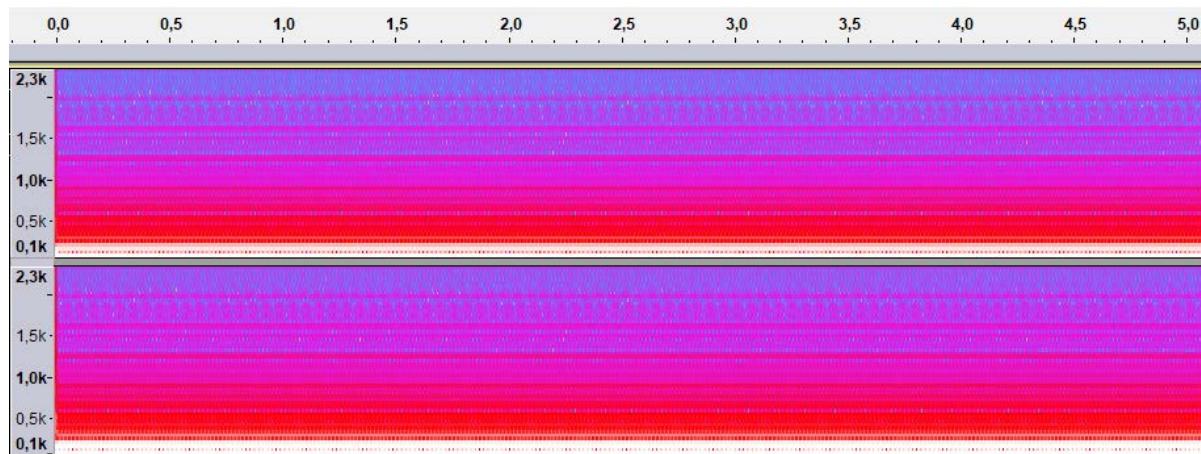


Gráfico 15 - Espectrograma do ruído presente na piscina do CEPEUSP

Em geral, estes ruídos de 60 Hz e seus harmônicos são causados pelos motivos citados nos testes no ar, mas principalmente devido aos ruídos elétricos que aparecem ao conectar a placa de áudio na rede elétrica. Utilizando-se uma banda de frequência mais estreita no Audacity, é possível visualizar estes harmônicos no espectrograma do sinal, conforme pode ser observado no gráfico a seguir.

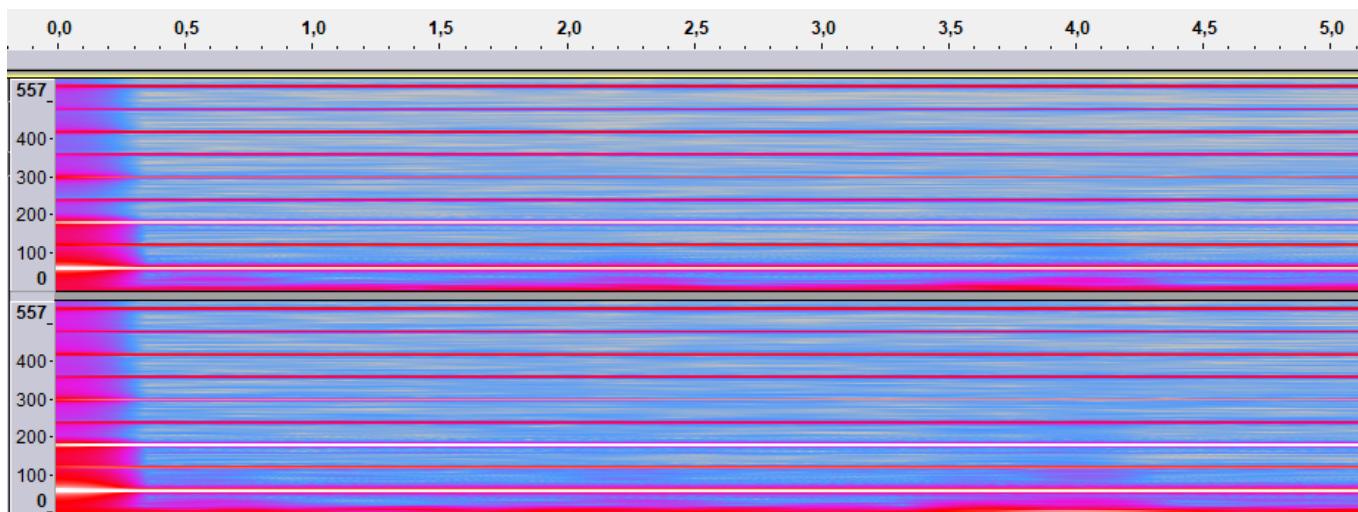


Gráfico 16 - Espectrograma do ruído presente na piscina do CEPEUSP, com banda de frequência mais estreita, em que é possível verificar os ruídos na frequência de 60, 120, 180, 240, 300, 460, 420, 480 e 540 Hz

O primeiro sinal emitido consistiu em impactos, na água, com um objeto metálico. No espectrograma a seguir, é possível identificar 2 tipos de impactos. O primeiro impacto é entre

o objeto e a superfície da água, representado pela seta vermelha. Após a imersão do metal na água, ocorre o segundo impacto, entre o objeto e a superfície lateral da piscina, representado pela seta verde. Estes fenômenos acústicos são caracterizados pelo curto período de tempo e pela ampla faixa de frequências contida nestes sinais.

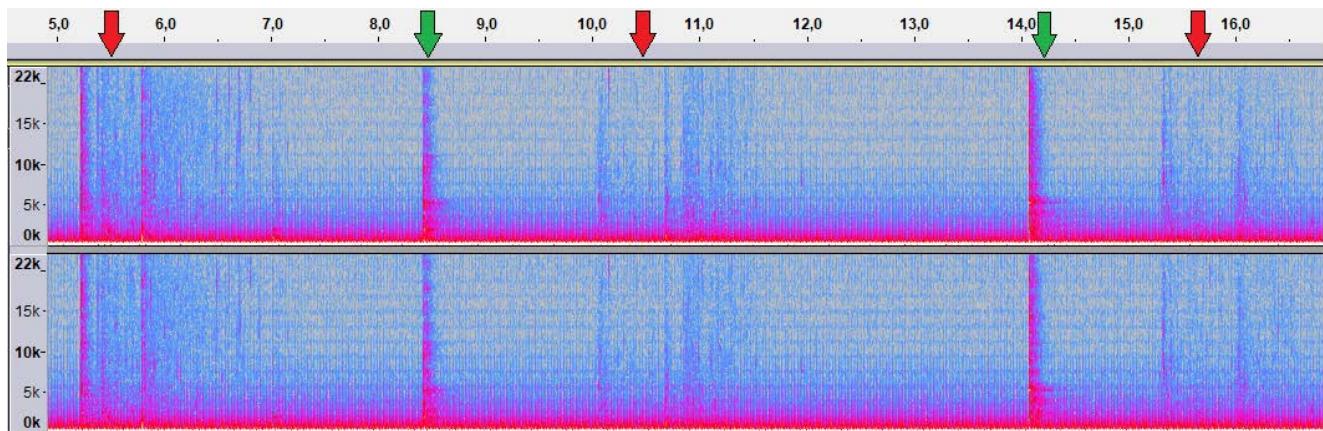


Gráfico 17 - Espectrograma dos impactos de um objeto metálico na piscina da CEPEUSP

O segundo sinal emitido neste teste foi criado pelo Audacity e transmitido pelo celular até a caixa de som submarina, e consiste em 6 eventos acústicos, com duração de 1 segundo, nas seguintes frequências: 100, 200, 500, 1000, 1500 e 2000 Hz.

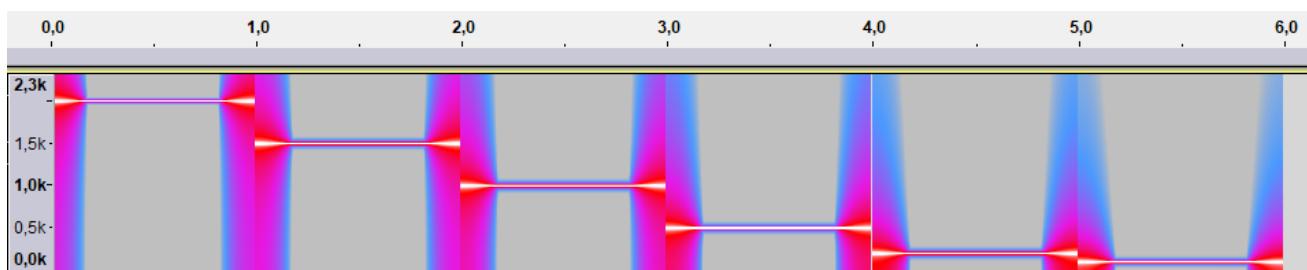


Gráfico 18 - Espectrograma do sinal gerado pelo Audacity

No espectrograma do sinal detectado pelos hidrofones, é possível identificar, com clareza, somente os sinais com frequências de 1000, 1500 e 2000 Hz. A presença dos intensos ruídos de baixa frequência mascara os demais sinais, que só conseguem ser visualizados utilizando-se uma banda de frequência estreita aplicando-se um *zoom* na faixa até 500 Hz.

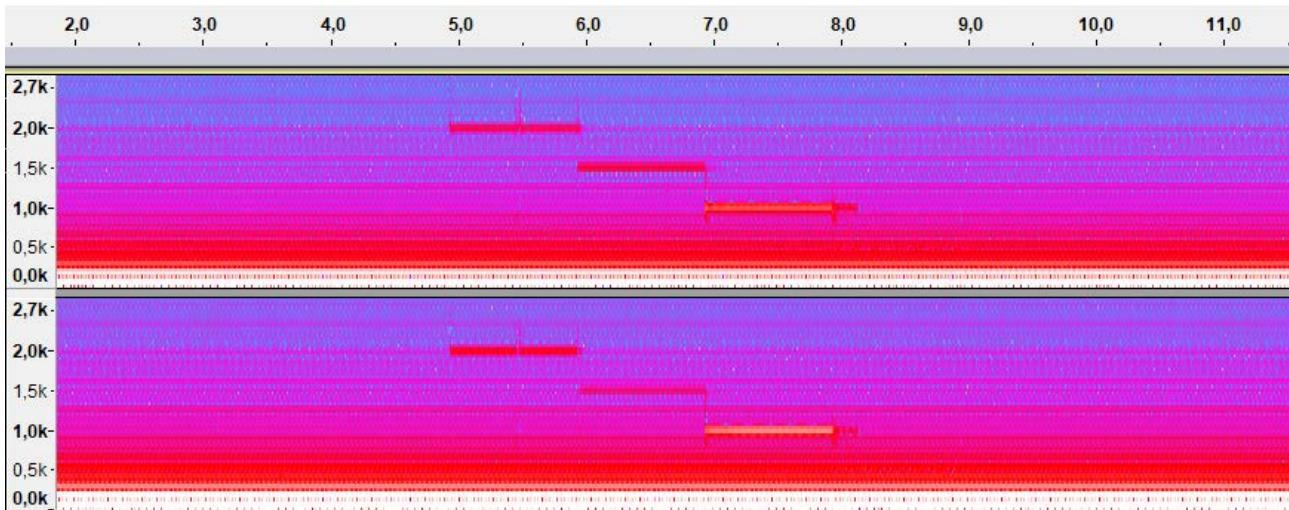


Gráfico 19 - Espectrograma do sinal emitido na piscina do CEPEUSP

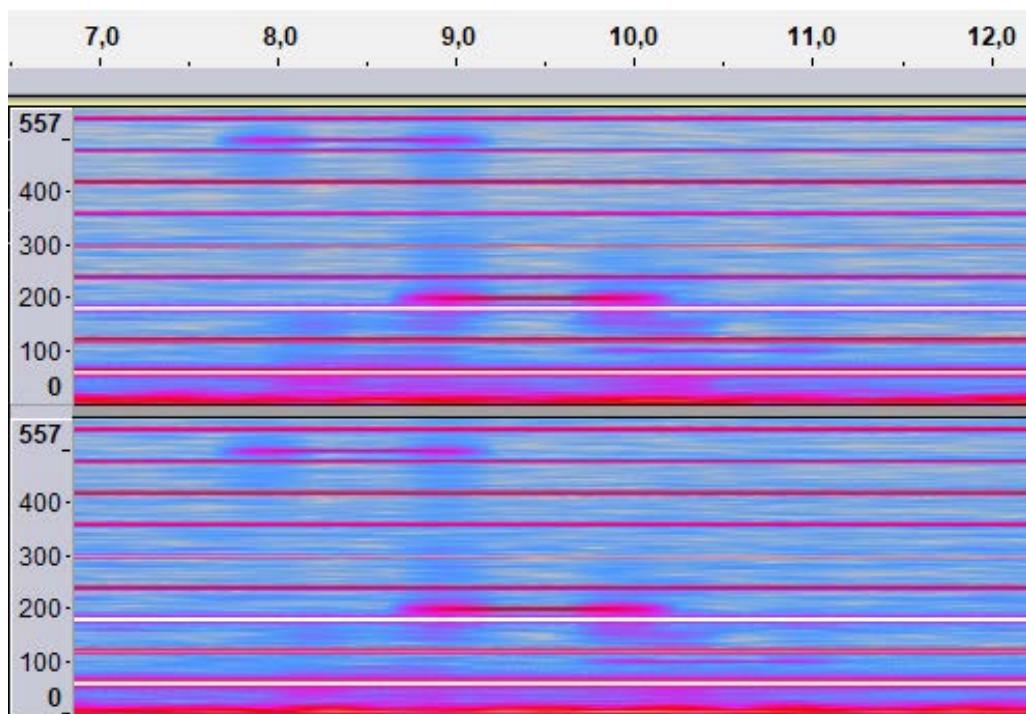


Gráfico 20 - Espectrograma do sinal emitido na piscina do CEPEUSP com banda de frequência estreita, para visualização dos sinais de até 500 Hz

10.5 Primeiro teste dinâmico no mar

Os testes dinâmicos com o protótipo foram realizados em Arraial do Cabo, cidade localizada na Região dos Lagos, no estado do Rio de Janeiro. Para compreender melhor os eventos ocorridos durante estes testes, é necessário explicar alguns fatores biológicos e climatológicos que influenciaram significativamente no resultado dos testes.

O primeiro teste foi realizado no dia no início do mês de setembro, e neste período o clima desta região é influenciada pelo fenômeno conhecido como ressurgência.

A ressurgência é o processo de movimento ascendente de águas das camadas mais profundas do oceano que é capaz de carregar nutrientes para a zona eufótica e fertilizar a base da cadeia trófica marinha, desencadeando um grande crescimento das populações de peixes e favorecendo a pesca [31].

Este fenômeno estende-se sobre a plataforma continental, deste a Ilha de Cabo Frio até a Baía de Guanabara, e ocorre, normalmente, no verão, de setembro a abril, apresentando variações interanuais, quando prevalecem os ventos leste e nordeste, causando a ressurgência de águas frias, cuja temperatura pode atingir uma faixa de 6°C a 18°C [31].

Outro fator importante, desta vez biológico, refere-se ao aparecimento de baleias jubarte nesta região. A baleia jubarte realiza uma migração anual sendo que, durante o verão, ela dirige-se para as águas polares para se alimentar e, durante o inverno, migra para águas tropicais e subtropicais para o acasalamento e nascimento de seus filhotes. No hemisfério sul, esta espécie chega por volta de junho e julho e permanecem até novembro e dezembro, quando retornam para as áreas de alimentação [32].

Em virtude destes fatores acima mencionados, foi possível observar e detectar diversos sons de baleias jubarte, golfinhos, peixes, além de sinais acústicos provenientes das embarcações pesqueiras e turísticas presentes no local.

Por conta de indisponibilidade, por parte do IEAPM, no momento do experimento, não foi possível utilizar alguns equipamentos que poderiam ser úteis no teste, como o velossom e o sensor de pressão. O velossom consegue calcular a velocidade do som no mar a partir de certos parâmetros, como a temperatura da água, enquanto o sensor de pressão permite calcular a profundidade do *array*. Na falta destes equipamentos, a velocidade do som no mar e a profundidade foram estimadas em 1500 m/s e 2 m, respectivamente.

O primeiro teste teve os seguintes propósitos:

- verificar o comportamento hidrodinâmico do *array* quando rebocado;
- verificar o ruído detectado durante os testes;
- detectar e calcular a direcionalidade de sinais previamente gerados e emitidos por uma fonte acústica; e

- detectar e analisar os eventos acústicos ocorridos nas proximidades da Ilha dos Franceses.

O meio utilizado para o reboque do protótipo foi a embarcação de apoio Anchova, de propriedade do IEAPM, que possui cerca de 12 metros de comprimento e 4 metros de largura.



Figura 49 - Embarcação Anchova, pertencente ao IEAPM, que rebocou o *array* durante os testes

A embarcação teve como local de saída o Cais da Praia dos Anjos, onde os barcos de passeio transportam turistas para as principais praias do município. A embarcação passou a rebocar o protótipo após passar pelo boqueirão, rumo à Ilha dos Franceses, onde a embarcação passou a circular para detectar os sons das espécies marinhas presentes no momento do experimento.

Durante a travessia, foi possível observar a presença de golfinhos, antes e depois do boqueirão. Baleias jubarte, por sua vez, foram avistadas à oeste da Ilha dos Franceses, próximo à Praia Grande.

Durante as operações de reboque, o protótipo teve um comportamento hidrodinâmico satisfatório, ou seja, o *array* manteve-se reto, na horizontal, e a uma profundidade aproximada de 2 metros.

A imagem a seguir mostra o local onde o teste foi realizado, detalhando regiões e as rotas de interesse para melhor compreensão deste experimento. A profundidade do trajeto realizado pela embarcação enquanto rebocava o *array* varia de 10 a 50 metros.



Figura 50 - Visão geral da região do primeiro experimento. Adaptado do *Google Earth*

10.5.1 Ruído

Diferentemente dos testes realizados no laboratório e na piscina do CEPEUSP, onde a presença de ruídos de 60 Hz e seus harmônicos dificulta a detecção de sons acústicos de interesse de baixa frequência, no mar é possível perceber que os ruídos nesta faixa são bastante minimizados.

Os ruídos detectados são compostos, com maior magnitude, por sons gerados pelos motores das embarcações, principalmente da própria embarcação que estava rebocando o protótipo, tendo em vista que foram utilizados 16 metros de cabo de reboque, e do ruído hidrodinâmico da embarcação rebocadora e do próprio *array*. Contudo, este último foi praticamente irrelevante comparado aos demais ruídos, atendendo ao requisito proposto de baixo ruído próprio do protótipo.

Outro ruído detectado com certa frequência, com um som semelhante ao de uma chuva, é decorrente do esgotamento de água da embarcação, conforme pode ser vista na figura abaixo.



Figura 51 - Esgotamento de água da embarcação, um dos responsáveis pela geração de ruído

Tais ruídos seriam minimizados aumentando-se o cabo de reboque e reduzindo-se a velocidade de reboque, que variou de 5 a 8 nós. No gráfico 21, os ruídos de baixa frequência (até 2kHz), que repetem-se a um certo intervalo de tempo, são gerados pela hélice da embarcação, enquanto os ruídos de alta frequência, que podem chegar até 15 kHz, são gerados pelo esgotamento de água.

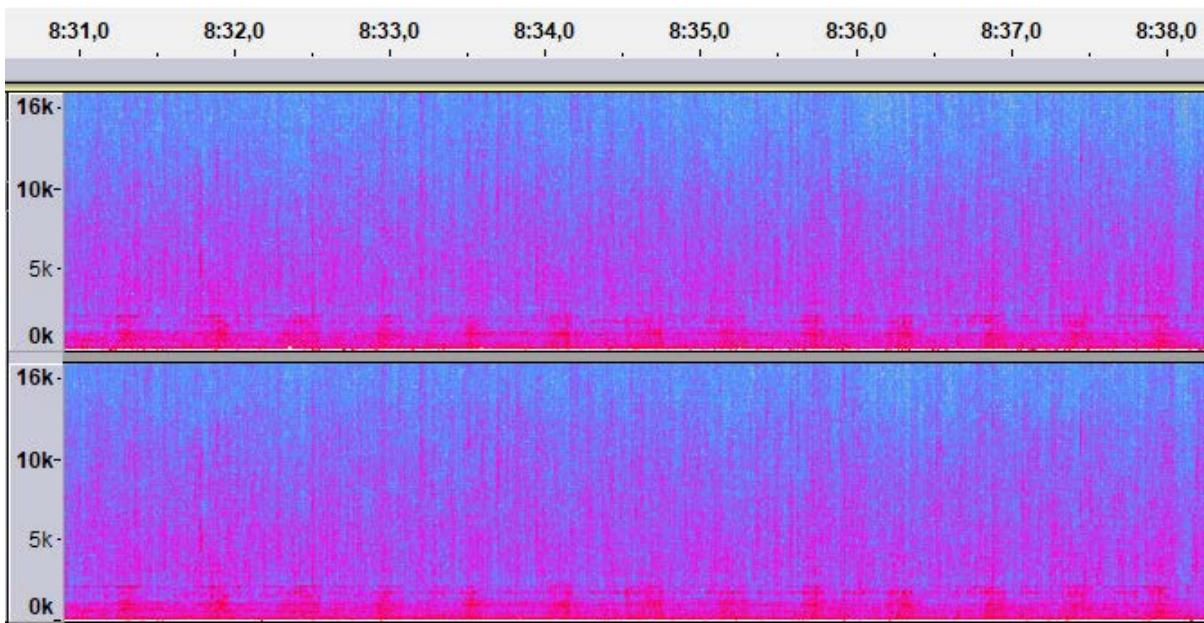


Gráfico 21 - Espectrograma do ruído detectado pelo *array*, sem a presença de fontes acústicas de interesse

Nas proximidades do Cais da Praia dos Anjos, também foi possível obter alguns ruídos ocasionados por outras embarcações, conforme pode ser observado pelo espectrograma a

seguir, que corresponde a um lançamento de uma âncora de um barco de pesca nas proximidades da operação de reboque, que gera um ruído de baixa frequência.

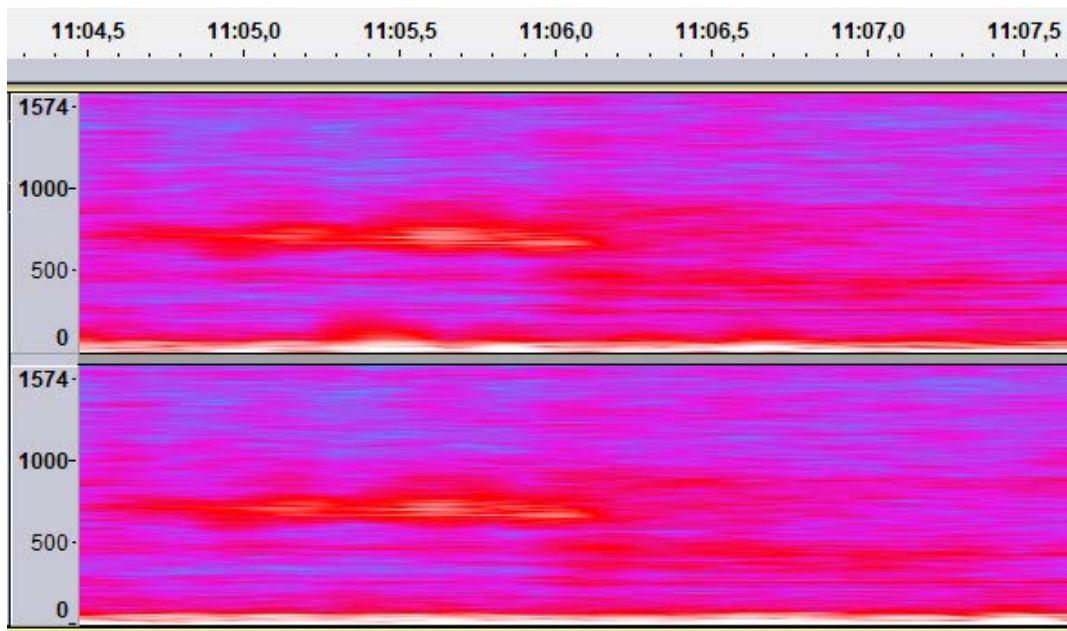


Gráfico 22 - Espectrograma de um ruído de baixa frequência gerado pela lançamento de uma âncora

Nestes testes, não foi verificada a relação dos níveis de ruído com a velocidade do reboque, sendo um importante estudo a ser realizado em futuros experimentos.

10.5.2 Golfinhos

Os sons emitidos pelos golfinhos foram detectados durante quase toda a travessia e são caracterizados por sinais de curta duração, de 0,3 segundos, na frequência de 5 kHz e eventualmente, também na frequência de 6,5 kHz, aproximadamente.

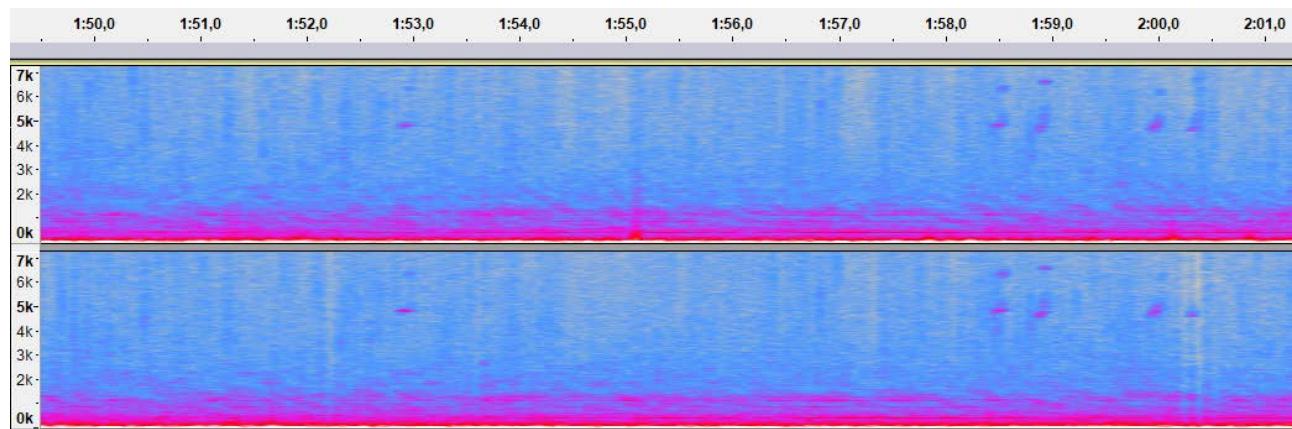


Gráfico 23 - Espectrograma de um sinal emitido por golfinhos

10.5.3 Baleias

As baleias, por outro lado, emitiram sons de baixa frequência em relação aos sons dos golfinhos. Foram detectados dois tipos de sons. O primeiro som é um chirp, ou seja, é um sinal cuja frequência varia com o tempo, em uma faixa de 325 a 375 Hz, com duração de 1,5 segundos e com repetições a cada 10 segundos, aproximadamente.

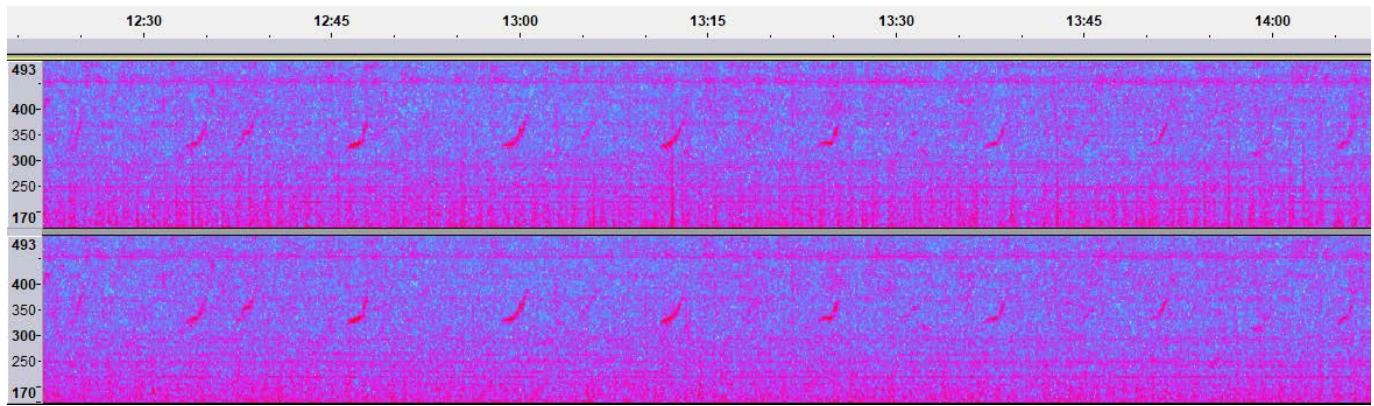


Gráfico 24 - Espectrograma de um chirp emitido por baleias

O segundo som possui uma frequência próxima de 350 Hz e chegou a durar alguns minutos durante as gravações.

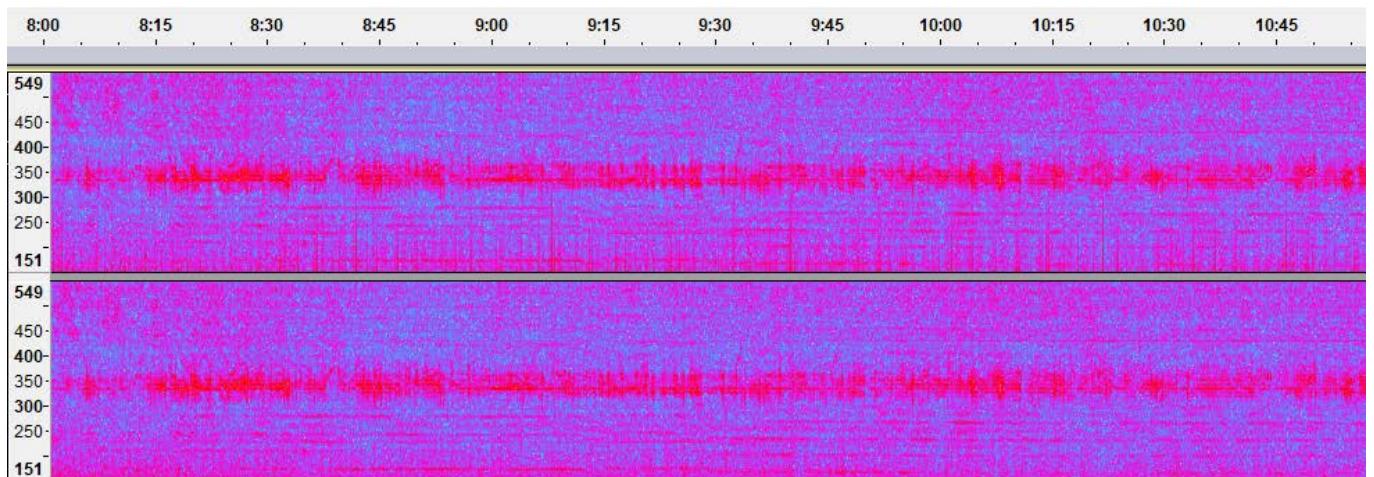


Gráfico 25 - Espectrograma de um sinal de frequência constante emitido por baleias

10.5.4 Fonte acústica

A fonte acústica foi colocada no lado direito da embarcação, a cerca de 2 metros de profundidade, conforme pode ser observada na figura 52.



Figura 52 - Fonte acústica sendo colocada no mar pelo lado direito da embarcação

A fonte acústica emitiu basicamente dois tipos de sons: um chirp e um sinal com frequência constante, sendo ambos repetidos durante algum intervalo de tempo. Estes sinais foram emitidos a faixas de frequências distintas. Os chirps foram enviados com faixas de 6 a 9 kHz, durando 1 segundo, e de 500 Hz a 2 kHz, durando 4 segundos, enquanto os sinais de frequência constante foram emitidos a 6,5 kHz, durando 1 segundo, e 1kHz, 1,5 kHz e 2 kHz que duraram 3 segundos. Os espectrogramas a seguir ilustram estes sinais emitidos e detectados pelo protótipo.

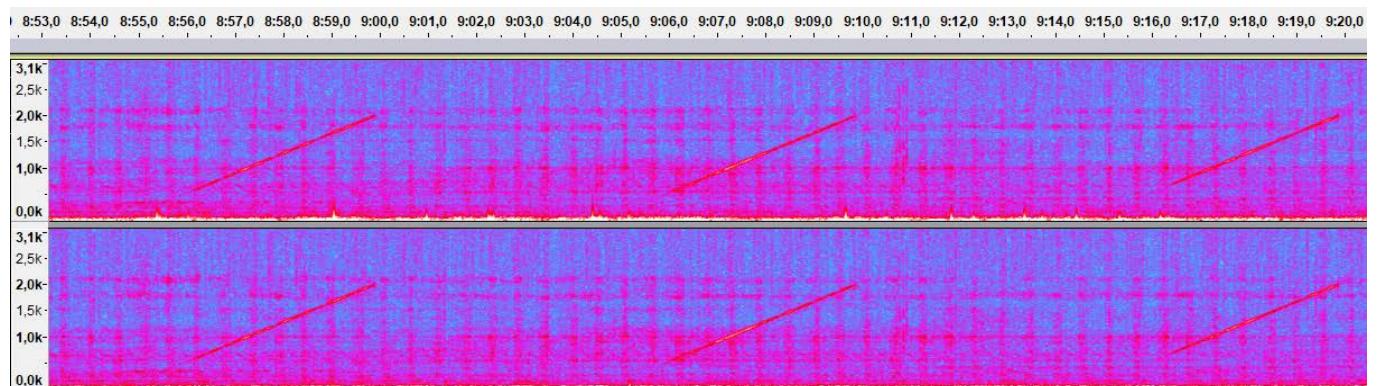


Gráfico 26 - Espectrograma do chirp de baixa frequênciemitidoa por uma fonte acústica

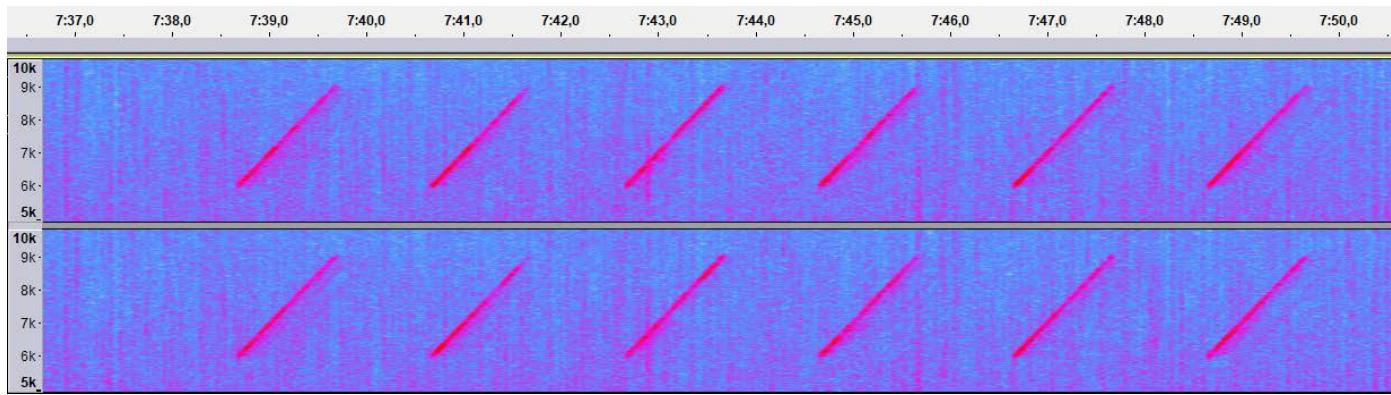


Gráfico 27 - Espectrograma do chirp de alta frequência emitido por uma fonte acústica

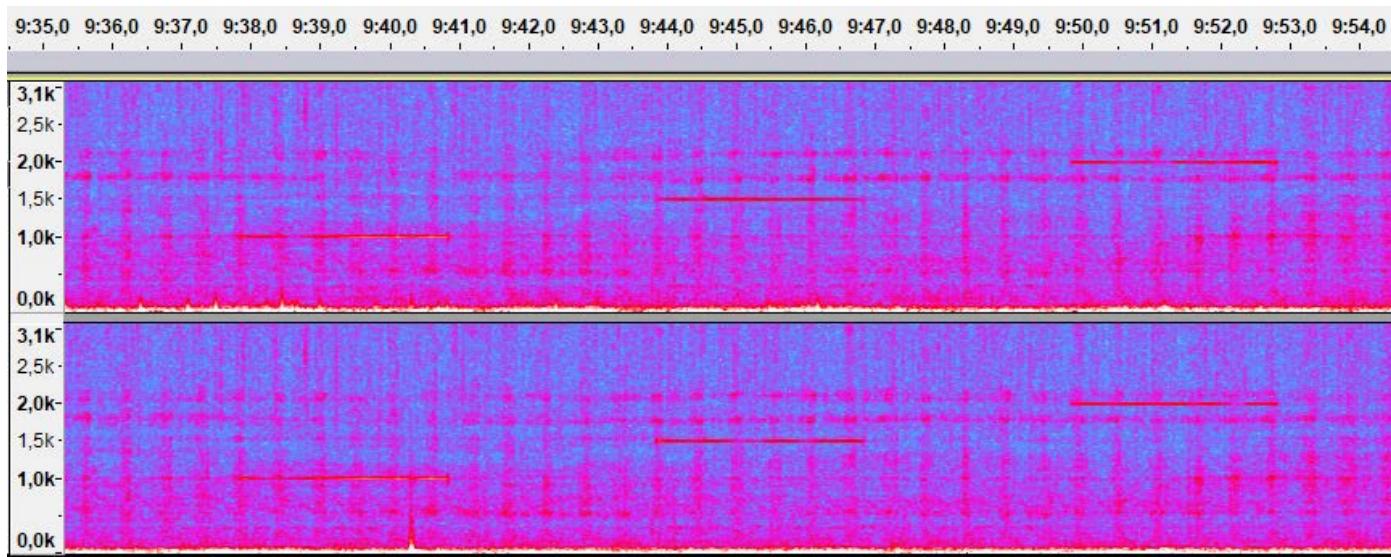


Gráfico 28 - Espectrograma do sinal constante em baixa frequência emitido por uma fonte acústica

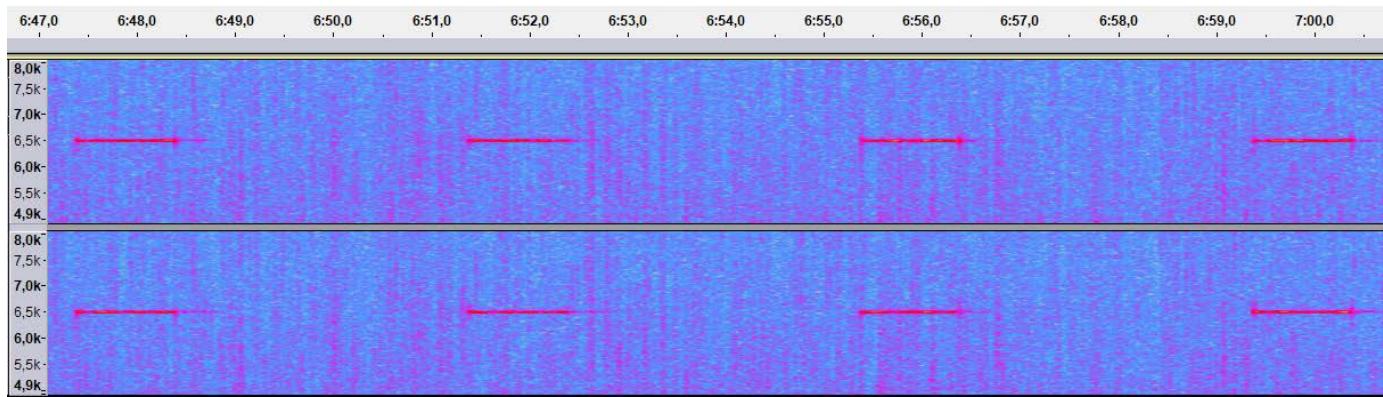


Gráfico 29 - Espectrograma do sinal constante em alta frequência emitido por uma fonte acústica

Além disso, também foi possível verificar a direcionalidade do sinal. Neste caso, contudo, a fonte acústica sempre emitiu da mesma posição relativa ao *array* de hidrofones, como na configuração mostrada a seguir. O ângulo de incidência do sinal é de aproximadamente 82,9°, relativo ao eixo perpendicular ao eixo do arranjo, e esta direção foi a mesma para todos os sinais emitidos durante a operação. A figura 53 mostra o esquema do reboque do protótipo vista de cima.

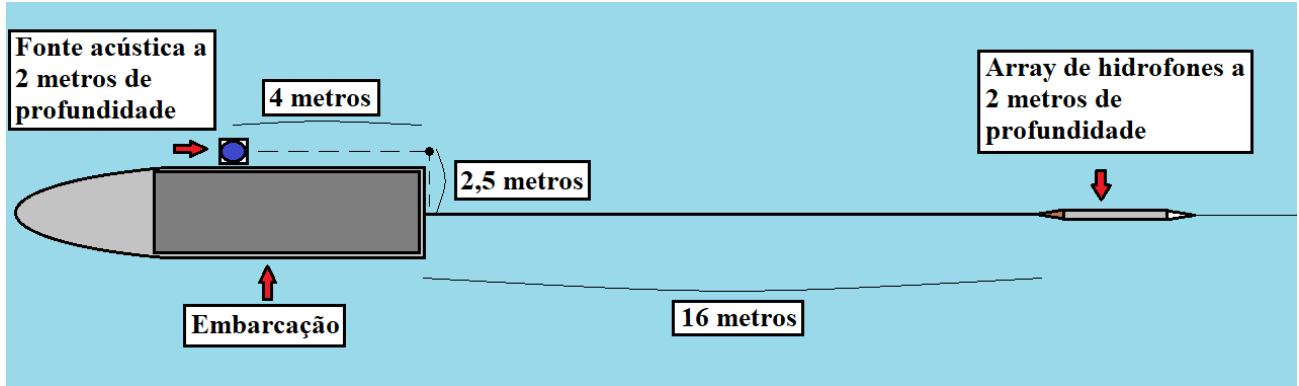


Figura 53 - Esquema do reboque do *array* de hidrofones vista de cima

As direcionalidades foram obtidas para os sinais de diferentes frequências e comparadas com a função diretividade normalizada simulada para as condições do experimento, tanto no gráfico polar quanto no retangular, considerando-se a frequência de sintonia do *array*, a frequência do sinal emitido, o número de hidrofones e o ângulo de direcionamento do feixe mencionado acima.

Pode-se observar que, para as frequências de 1000 e 1500 Hz, é possível ter certeza que os sinais vêm da frente do *array*, fato que não pode ser verificado para a frequência de 2000 Hz, quando há uma ambiguidade frente-trás, em virtude do *grating lobe*. Esta degradação está associada ao fato de que a direção de incidência do sinal está próxima do *endfire*.

No sinal de 1500 Hz, comparado ao sinal de 1000 Hz, também é possível verificar um lóbulo secundário com amplitude maior aos -90°.

Vale ressaltar que, em virtude da ambiguidade esquerda-direita de um *array* linear, os resultados mostrados a seguir contemplam uma faixa de ângulos de -90° a 90°.

➤ Sinal de 1000 Hz

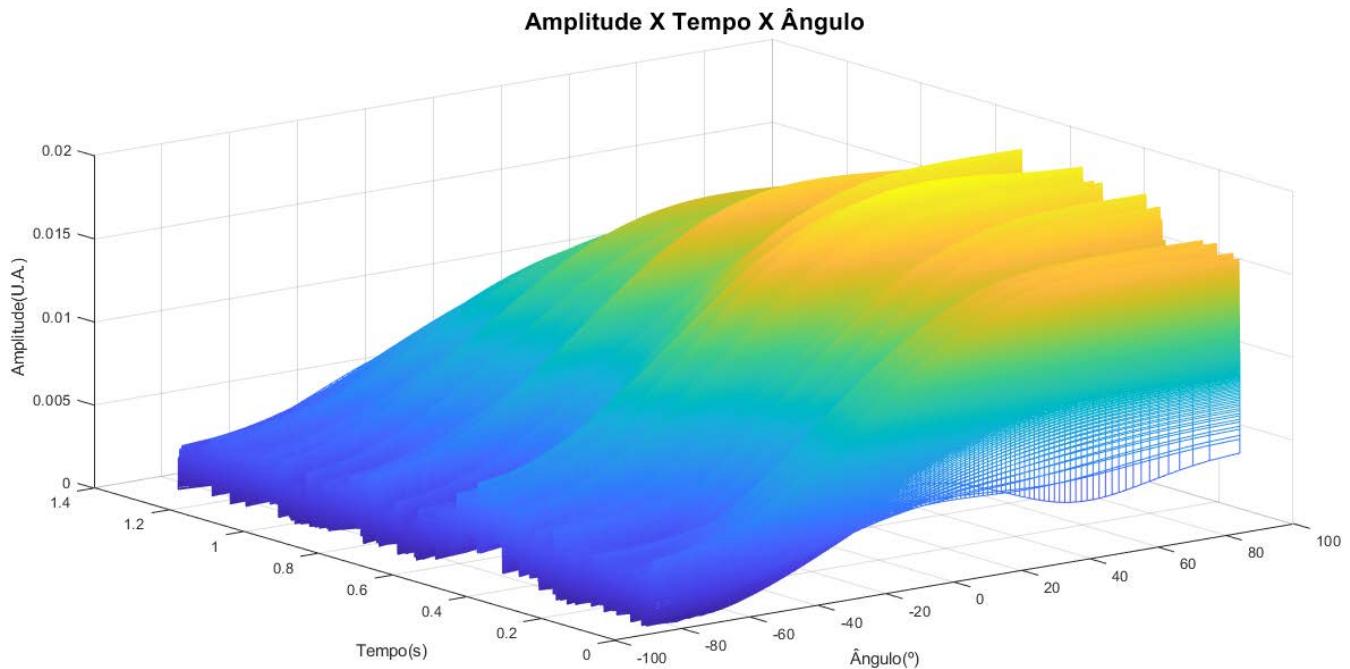


Gráfico 30 - Direcionalidade obtida do sinal de 1000 Hz

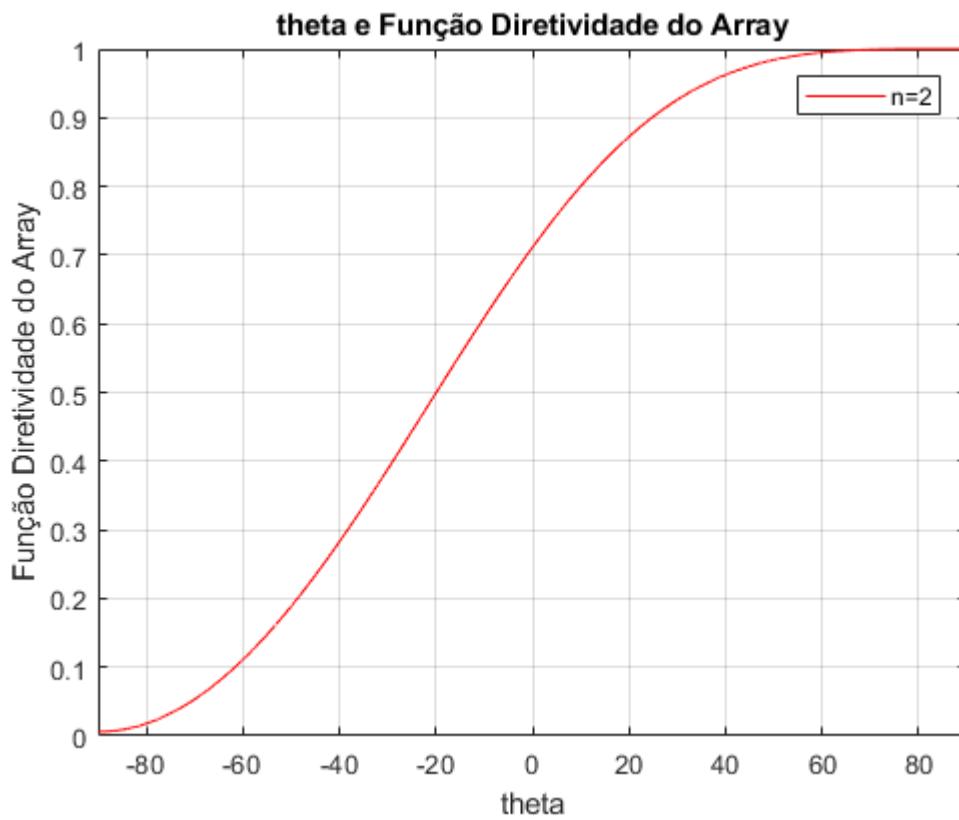


Gráfico 31 - Função diretividade para o sinal de 1000 Hz e outros parâmetros referentes ao *array* no gráfico rectangular

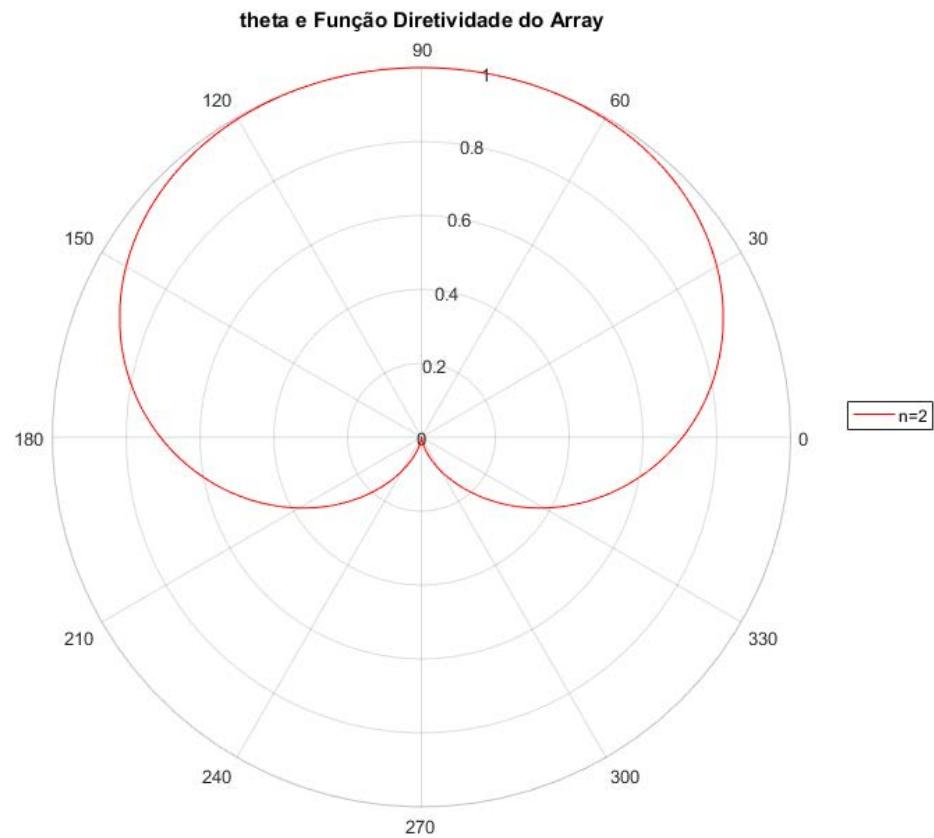


Gráfico 32 - Função diretividade para o sinal de 1000 Hz e outros parâmetros referentes ao *array* no gráfico polar

➤ Sinal de 1500 Hz

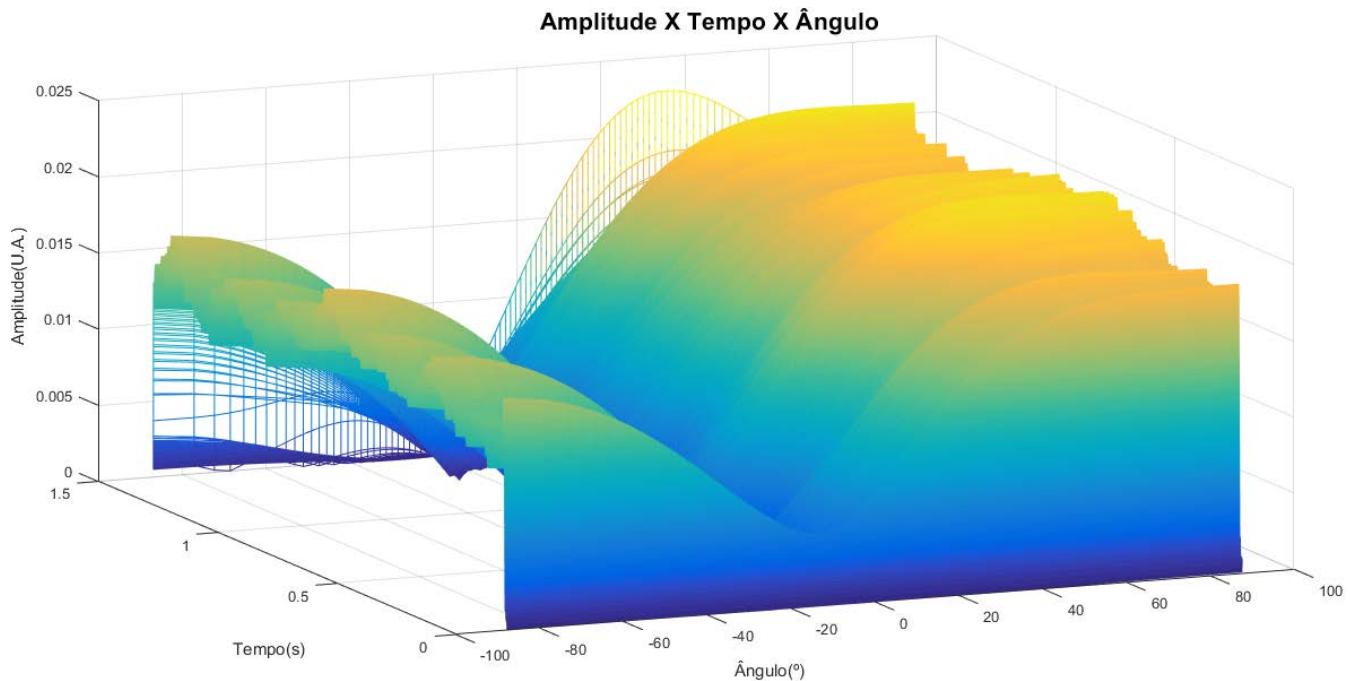


Gráfico 33 – Direcionalidade obtida do sinal de 1500 Hz

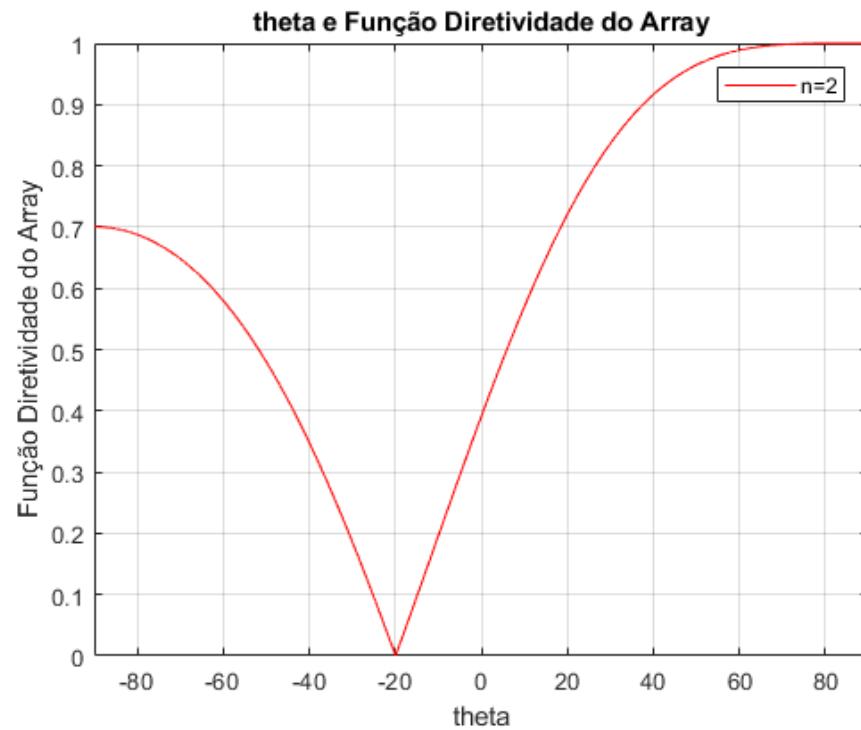


Gráfico 34 - Função diretividade para o sinal de 1500 Hz e outros parâmetros referentes ao *array* no gráfico retangular

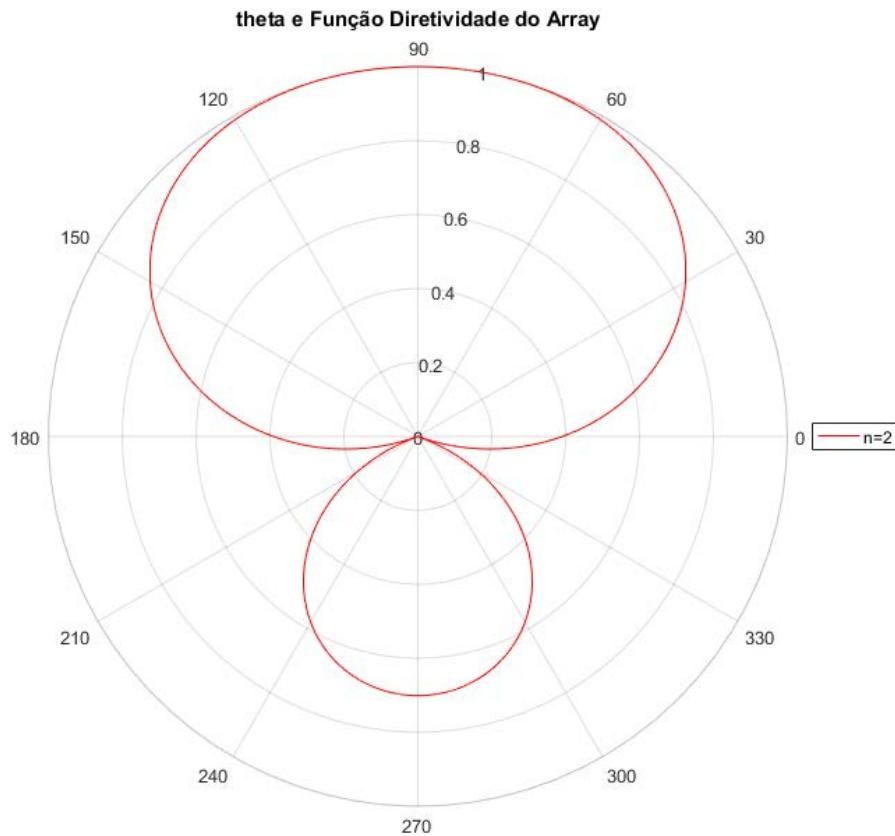


Gráfico 35 - Função diretividade para o sinal de 1500 Hz e outros parâmetros referentes ao *array* no gráfico polar

➤ Sinal de 2000 Hz

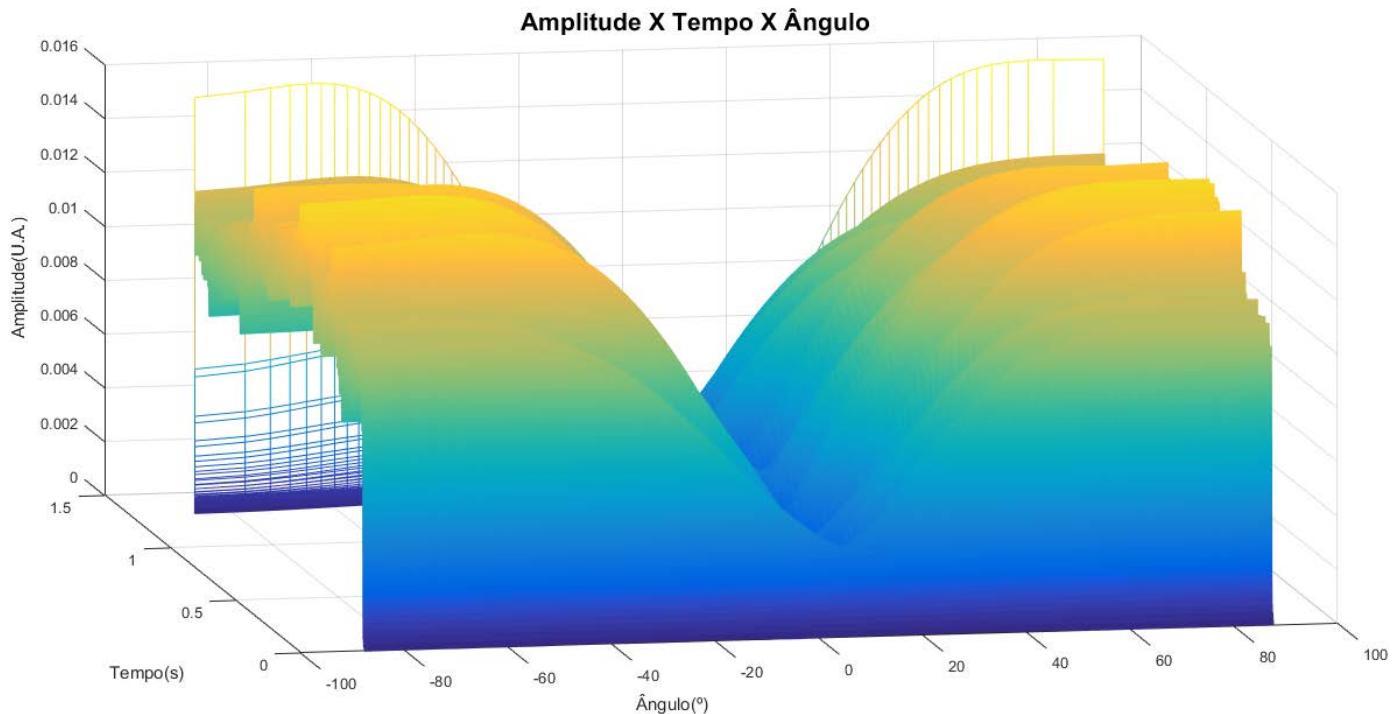


Gráfico 36 - Direcionalidade obtida do sinal de 2000 Hz

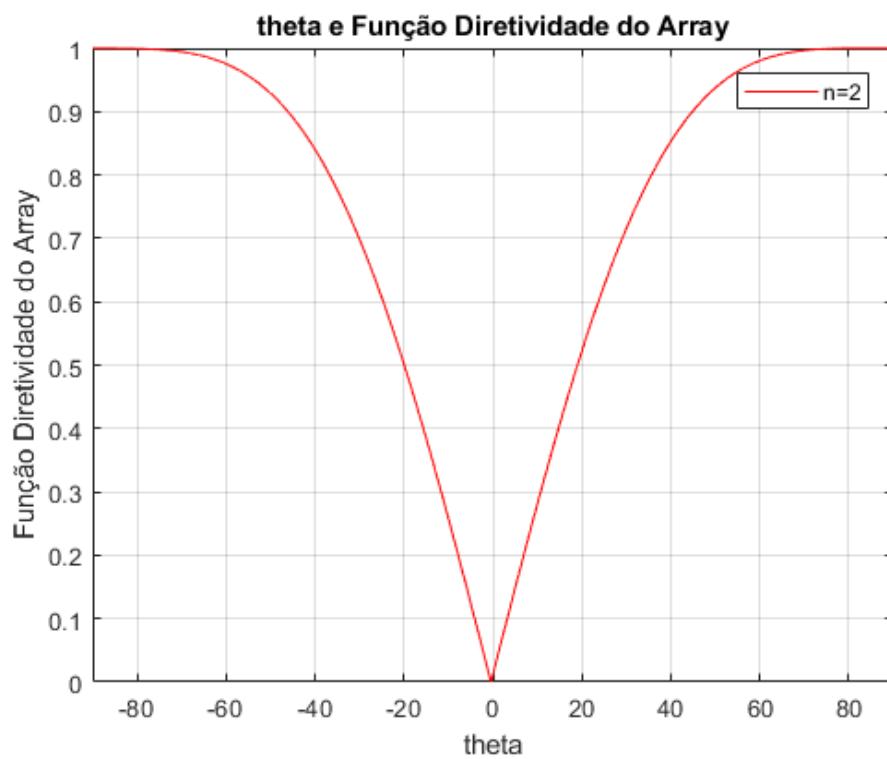


Gráfico 37 - Função diretividade para o sinal de 2000 Hz e outros parâmetros referentes ao *array* no gráfico retangular

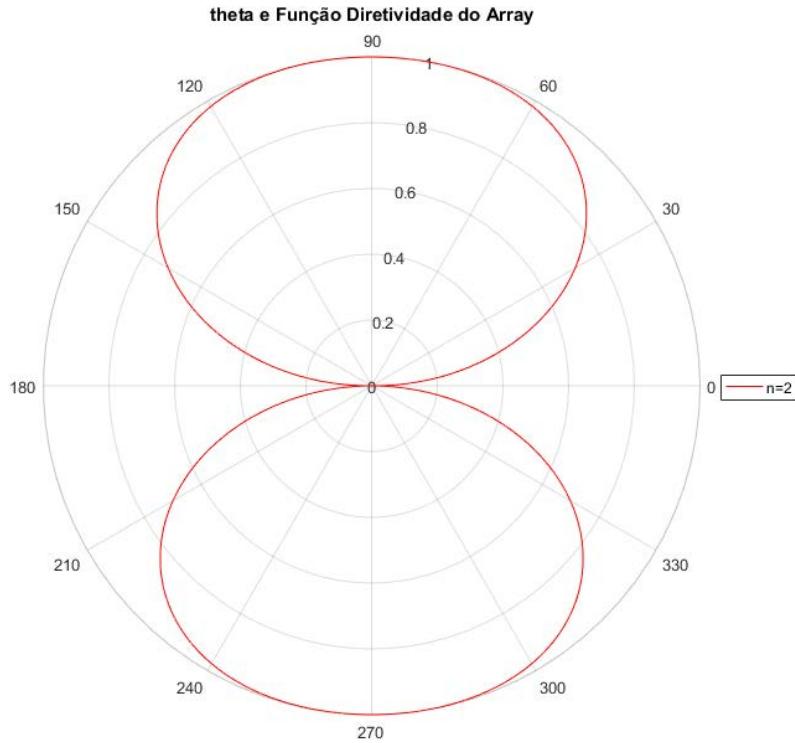


Gráfico 38 - Função diretividade para o sinal de 2000 Hz e outros parâmetros referentes ao *array* no gráfico polar

➤ Sinal de 6500 Hz

O *array* de hidrofones não foi projetado para frequências superiores a 2 kHz. Contudo, este sinal foi testado para verificar a ocorrência de *aliasing* espacial, através dos *grating lobes*, conforme pode ser verificado nos gráficos a seguir.

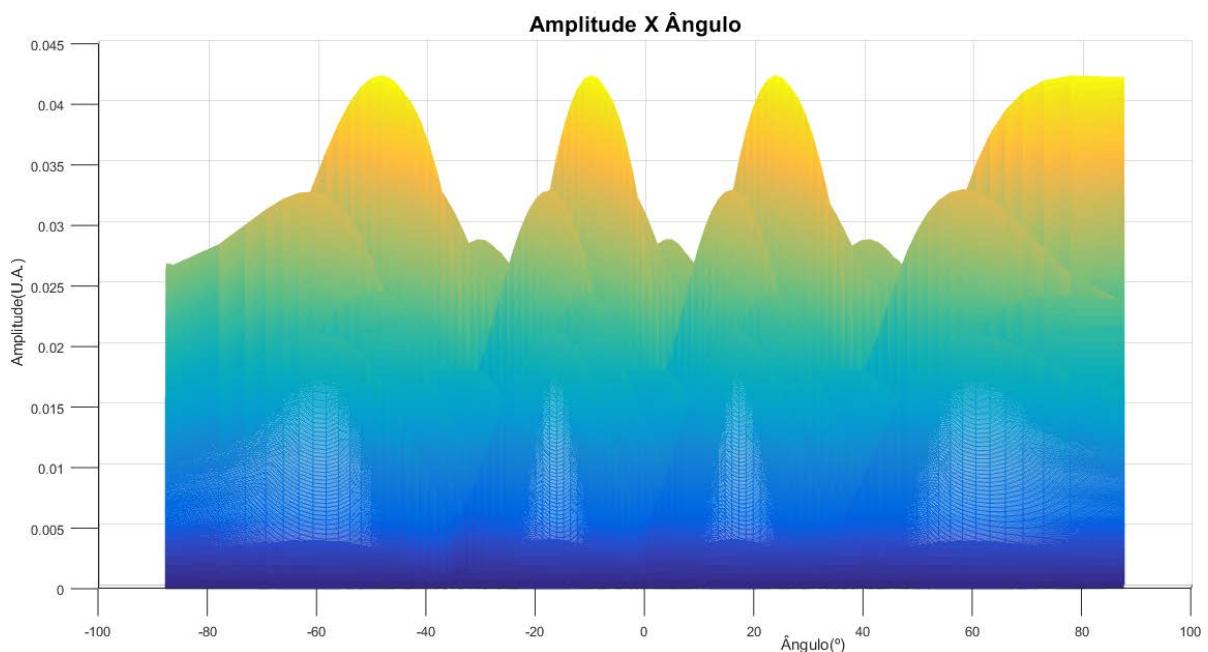


Gráfico 39 - Direcionalidade obtida do sinal de 6500 Hz

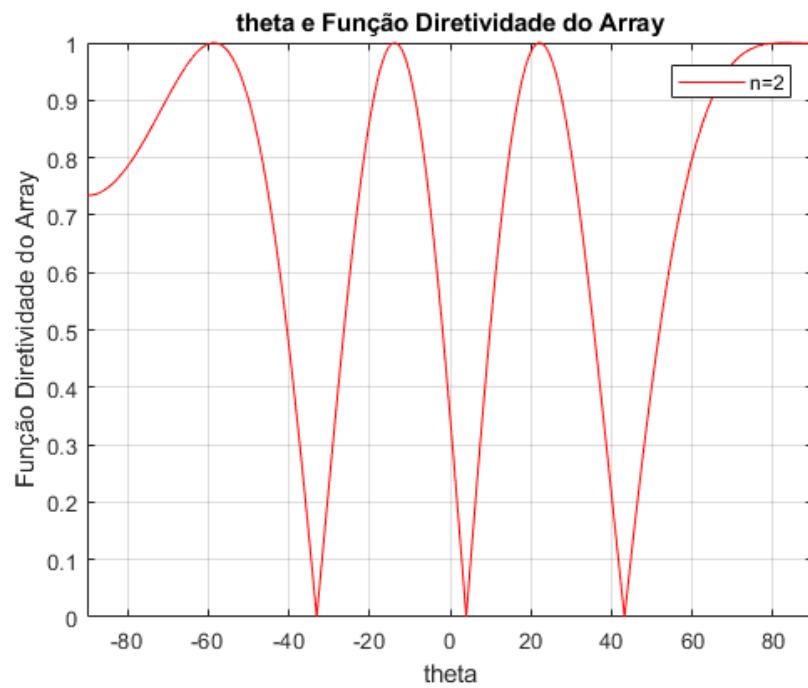


Gráfico 40 - Função diretividade para o sinal de 6500 Hz e outros parâmetros referentes ao *array* no gráfico retangular

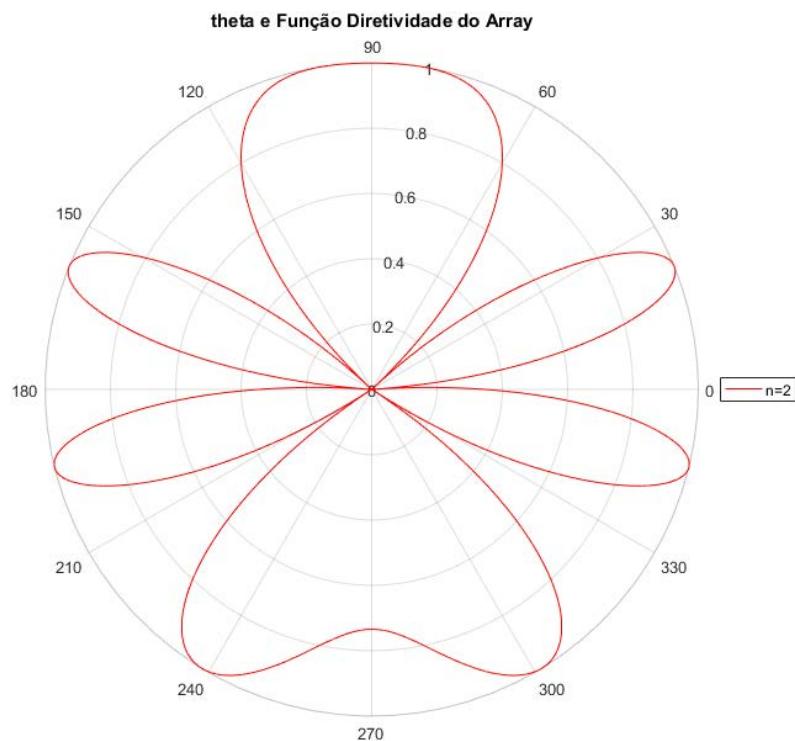


Gráfico 41 - Função diretividade para o sinal de 6500 Hz e outros parâmetros referentes ao *array* no gráfico polar

10.6 – Segundo teste dinâmico no mar

O segundo teste dinâmico no mar foi realizado no final do mês de setembro e teve como finalidade complementar os resultados obtidos no primeiro teste, focando no aspecto do cálculo da direcionalidade. Como no primeiro teste só foi possível utilizar uma embarcação, que seria responsável por rebocar o protótipo, a fonte acústica emitia sinais sempre da mesma direção.

Com o intuito de obter resultados provenientes de outras direções, foram solicitadas duas embarcações neste segundo experimento, sendo uma responsável por emitir o sinal acústico e outra responsável por rebocar o protótipo.

A embarcação que estava com a fonte acústica permaneceu imóvel, enquanto a outra embarcação navegava em sua volta. Este tipo de teste permitiu capturar sinais de diferentes direções. A embarcação que rebocou o protótipo foi a mesma do teste anterior, enquanto a outra era um pequeno bote pertencente ao IEAPM, como pode ser vista na figura a seguir.



Figura 54 - Embarcação responsável por emitir o sinal acústico

Diferentemente do primeiro teste, quando havia o interesse de detectar os sons dos animais marinhos, neste teste o local do experimento foi em uma região mais abrigada. A embarcação que emitia os sinais ficou mais próxima da Praia dos Anjos, enquanto a outra embarcação percorreu um trajeto entre esta praia e antes da Ilha do Farol e da Ilha dos Porcos. A figura a seguir ilustra o local deste segundo experimento.



Figura 55 - Visão geral da região do segundo experimento. Adaptado do *Google Earth*

Para analisar os resultados, o experimento foi todo gravado em tempo real e, a cada instante, passava-se as informações da posição relativa entre as embarcações. O sinal, que pode ser observado no espectrograma a seguir, foi emitido durante todo o experimento e consiste em três frequências espaçadas em um intervalo de 3 segundos: 1000, 1500 e 2000 Hz.

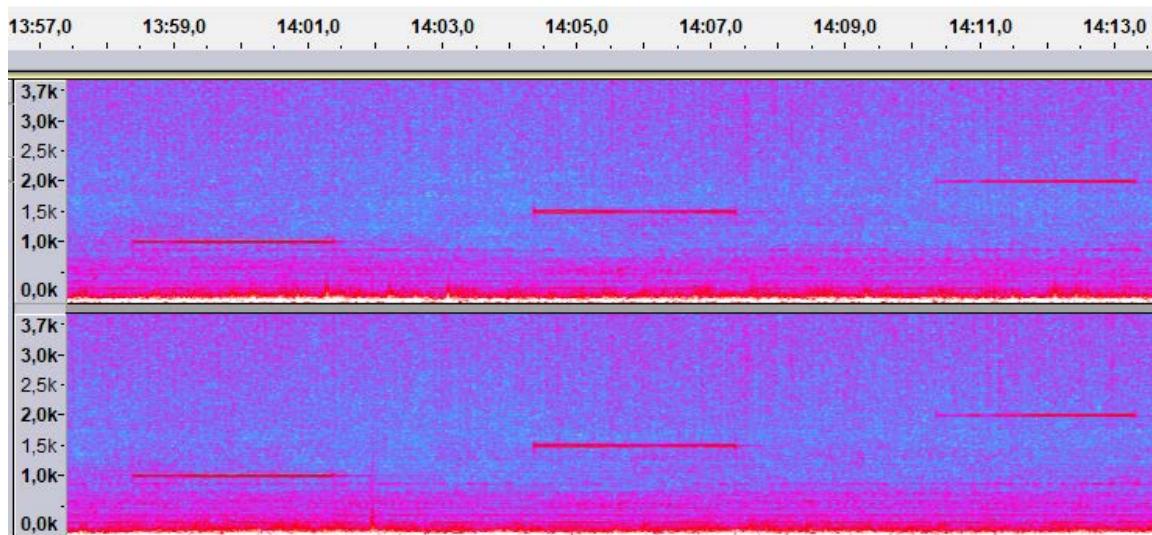


Gráfico 42 - Sinal emitido no segundo experimento no mar

10.6.1 Sinais emitidos na frente do *array* de 1000, 1500 e 2000 Hz

Os sinais emitidos na frente do *array* tiveram resultados parecidos com o primeiro teste, conforme pode ser observado nos gráficos a seguir. Estes dados foram adquiridos com a fonte acústica praticamente na proa da embarcação.

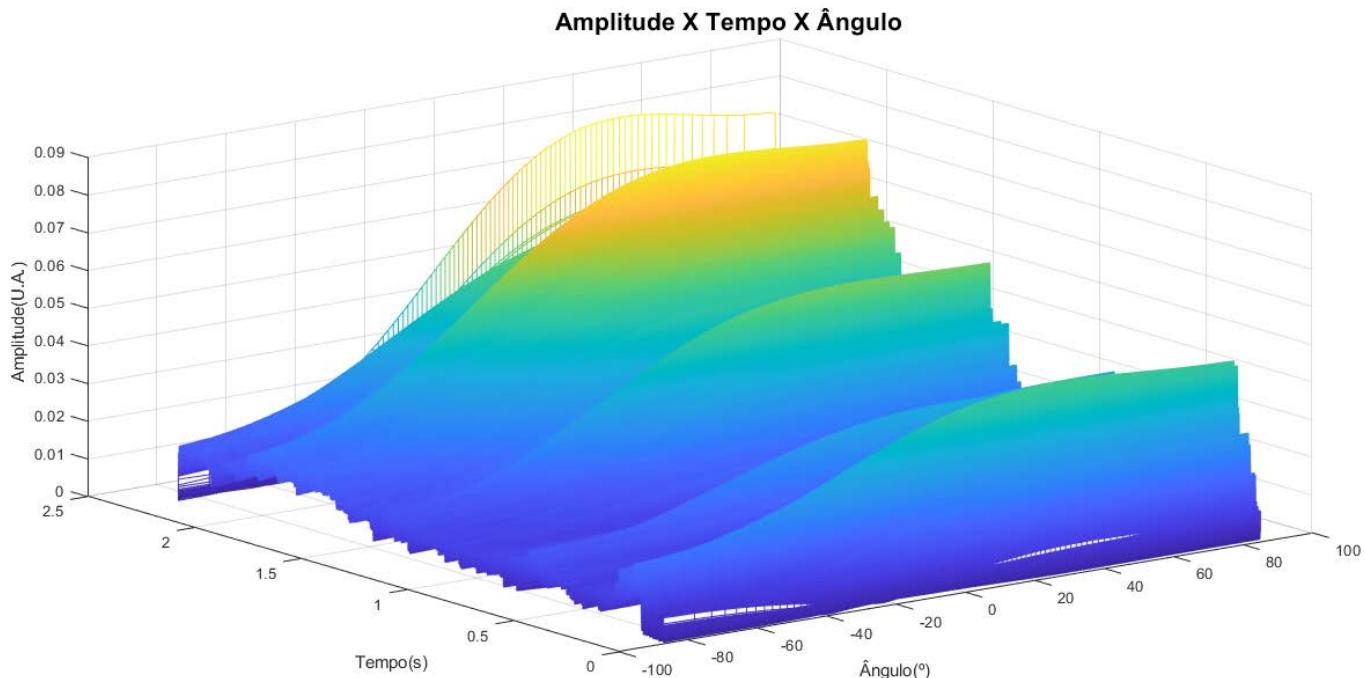


Gráfico 43 - Sinal de 1000 kHz emitido na frente do *array*

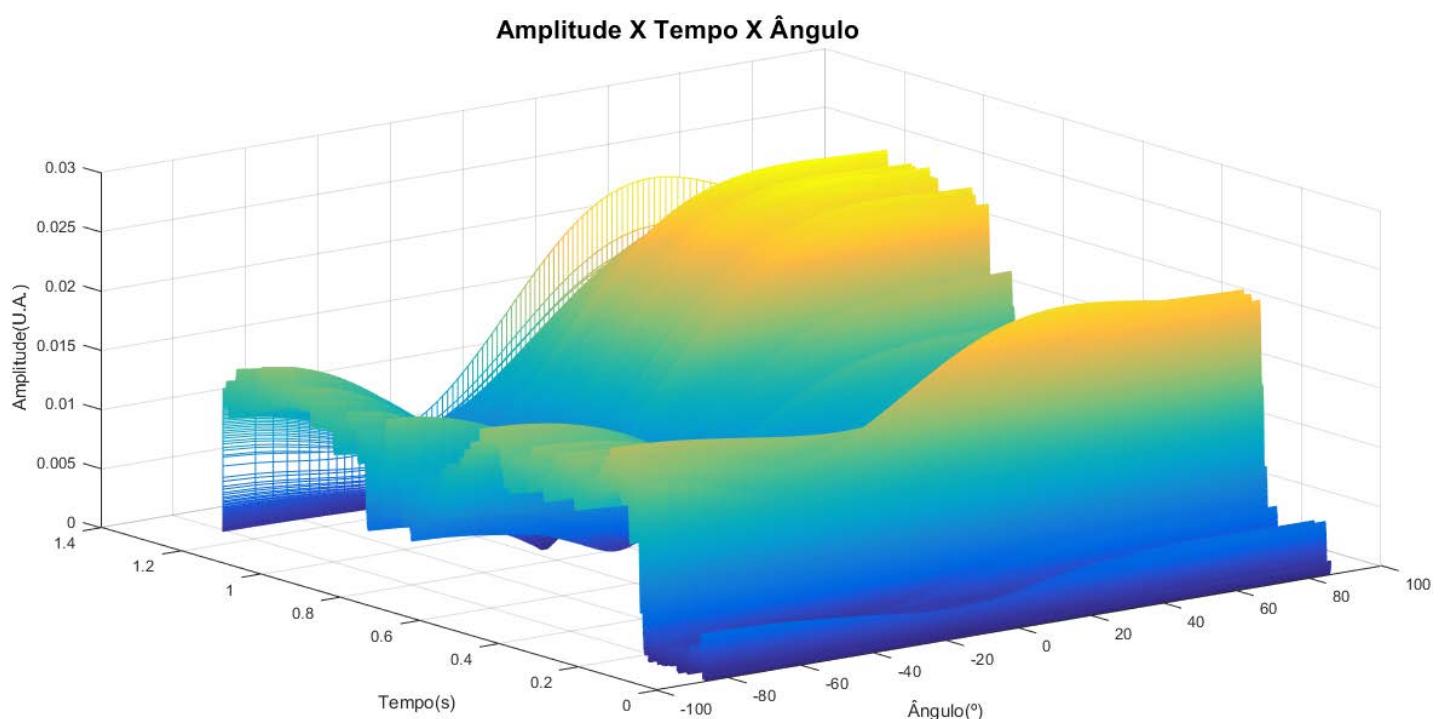


Gráfico 44 - Sinal de 1500 Hz emitido na frente do *array*

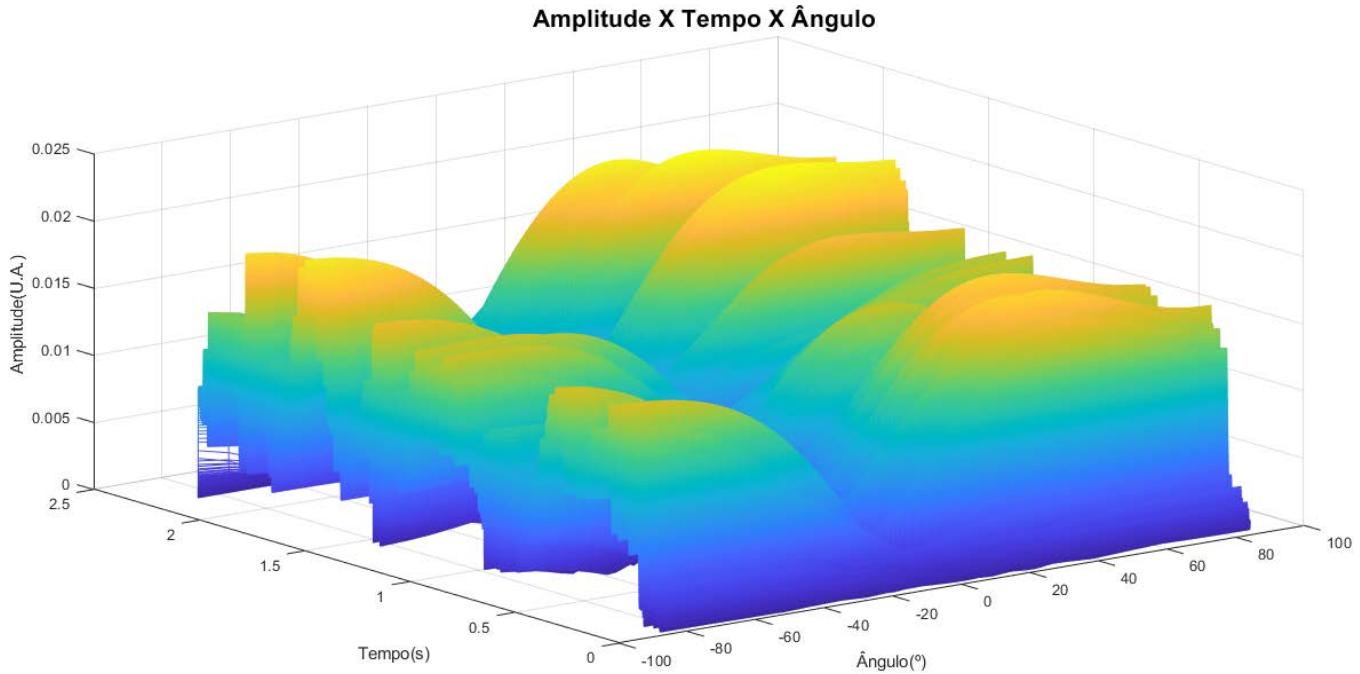


Gráfico 45 - Sinal de 2000 Hz emitido na frente do *array*

10.6.2 Sinais emitidos próximo ao *broadside* do *array* de 1000, 1500 e 2000 Hz

Os resultados dos sinais emitidos próximos ao *broadside* do *array* também foram coerentes, com uma concentração de energia próximo ao ângulo de 0°. Importante ressaltar que, como a embarcação estava navegando em linha reta durante o percurso, não ocorre uma simetria perfeita do sinal processado.

Comparando-se com os diagramas polares de cada situação, é possível observar um maior afunilamento do lóbulo principal quando a frequência do evento acústico se aproxima da frequência de sintonia do *array*, indicando uma melhor resolução angular do feixe no caso em que a frequência do sinal é de 2000 Hz.

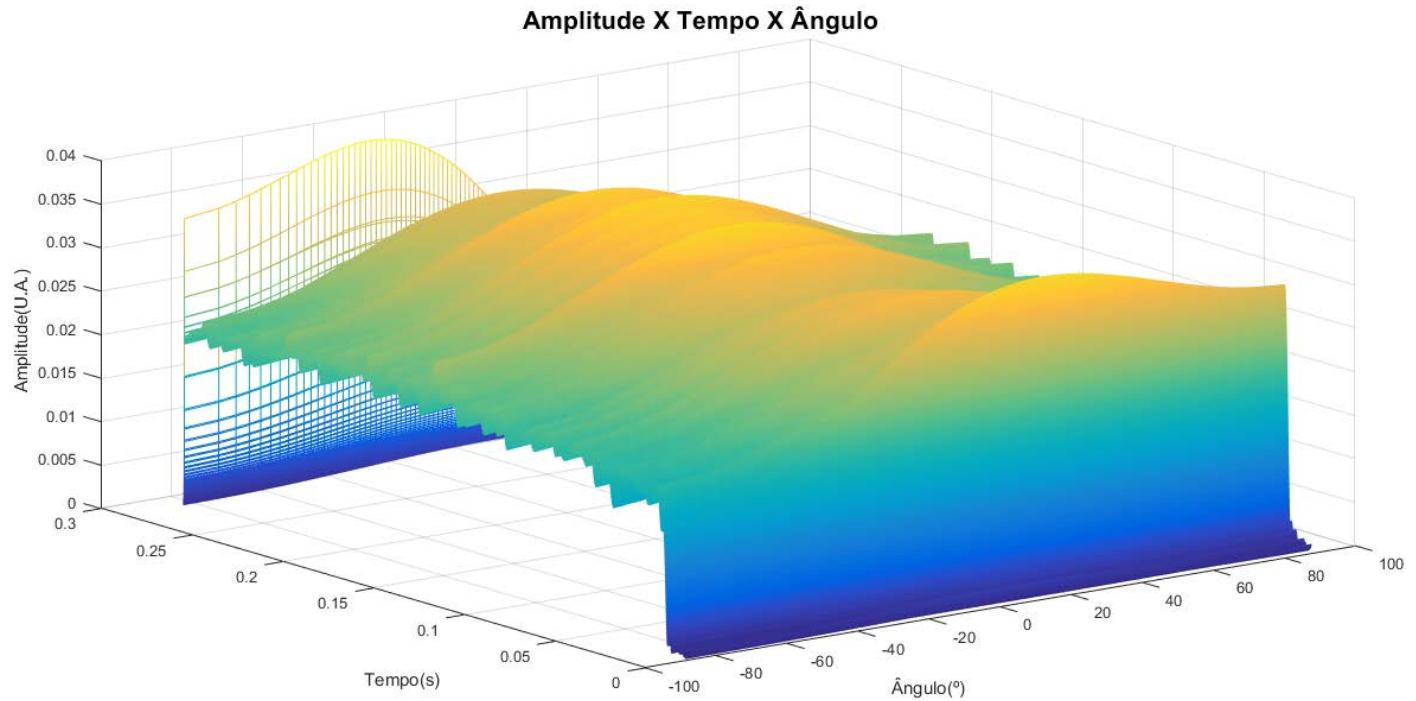


Gráfico 46 - Sinal de 1000 Hz emitido próximo ao *broadside* do *array*

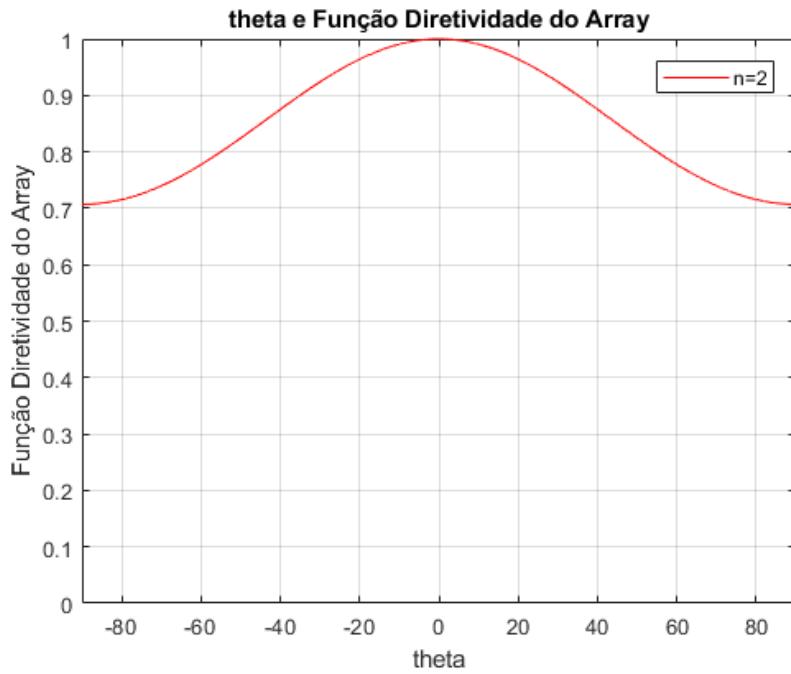


Gráfico 47 - Gráfico retangular para frequência de sintonia do *array* de 2 kHz e do sinal incidente de 1 kHz, com ângulo de incidência de 0°

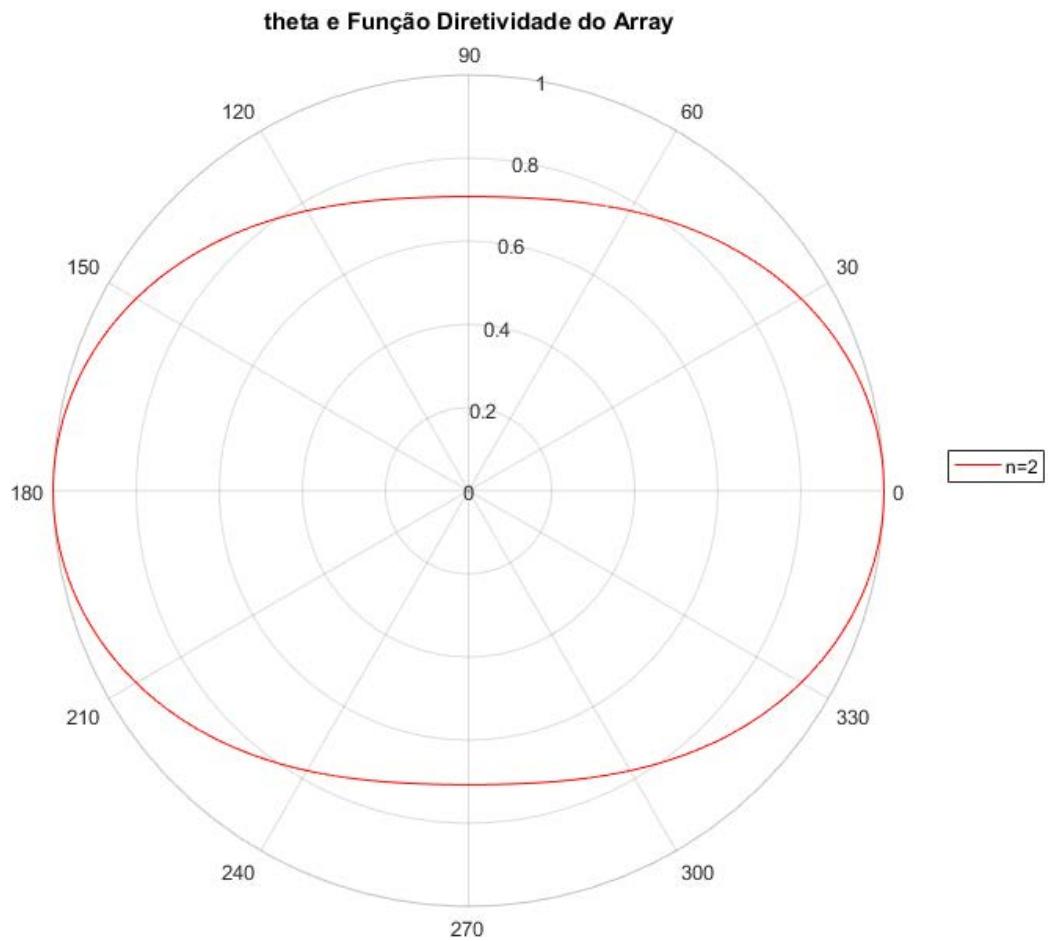


Gráfico 48 - Gráfico polar para frequência de sintonia do *array* de 2 kHz e do sinal incidente de 1 kHz, com ângulo de incidência de 0°

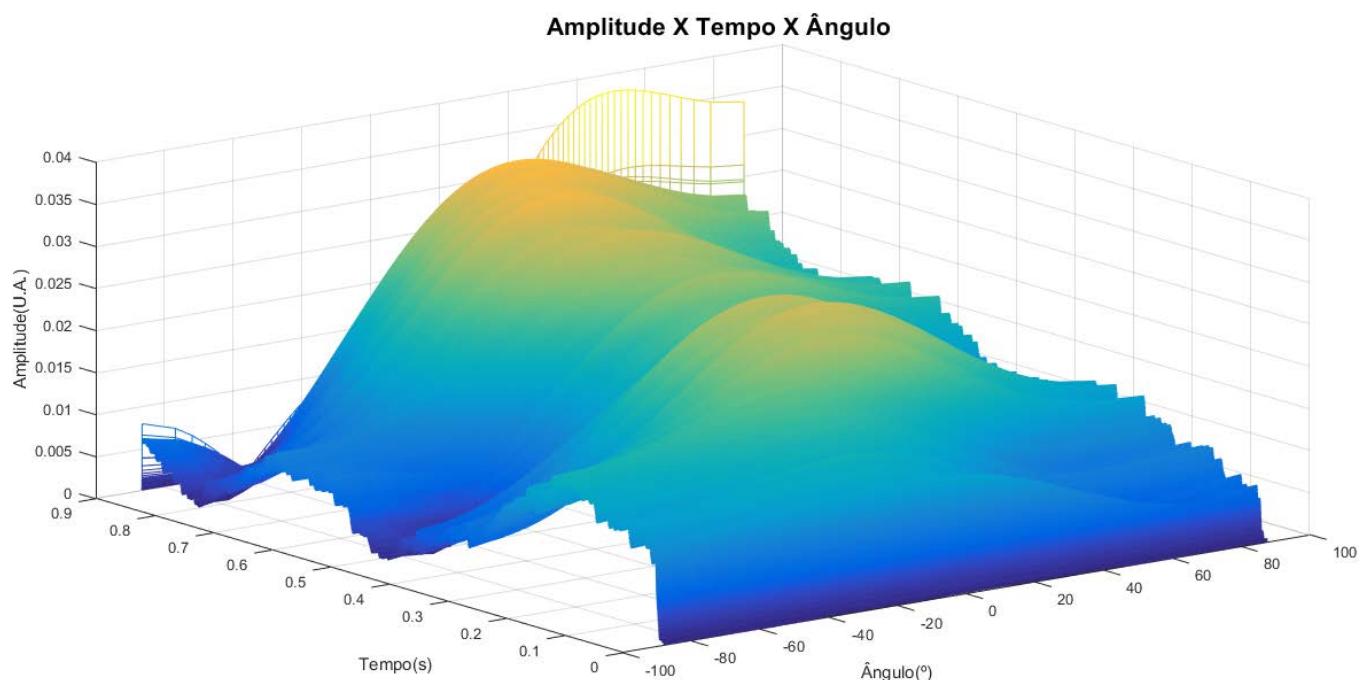


Gráfico 49 - Sinal de 1500 Hz emitido próximo ao *broadside* do *array*

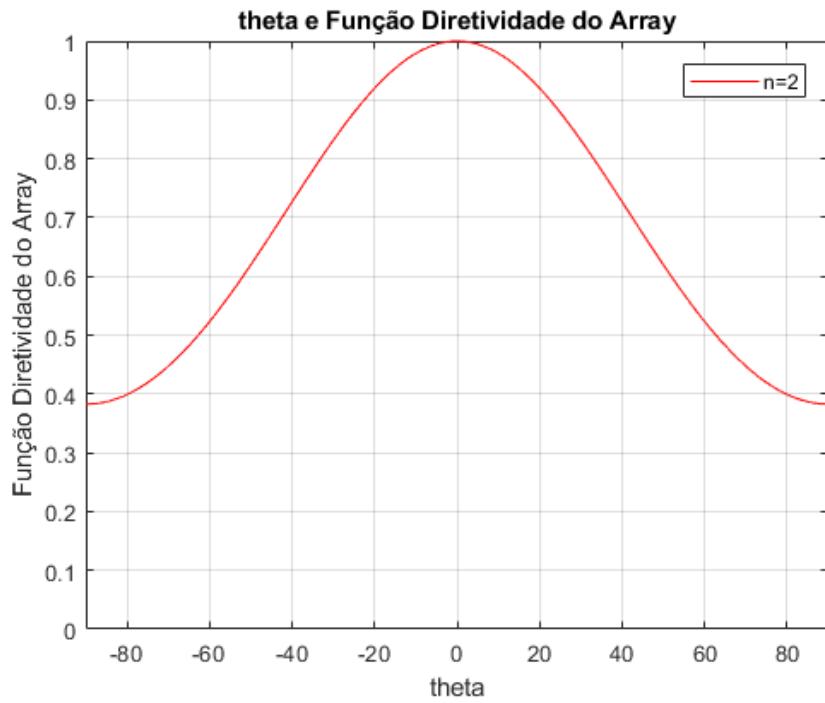


Gráfico 50 - Gráfico retangular para frequência de sintonia do *array* de 2 kHz e do sinal incidente de 1,5 kHz, com ângulo de incidência de 0°

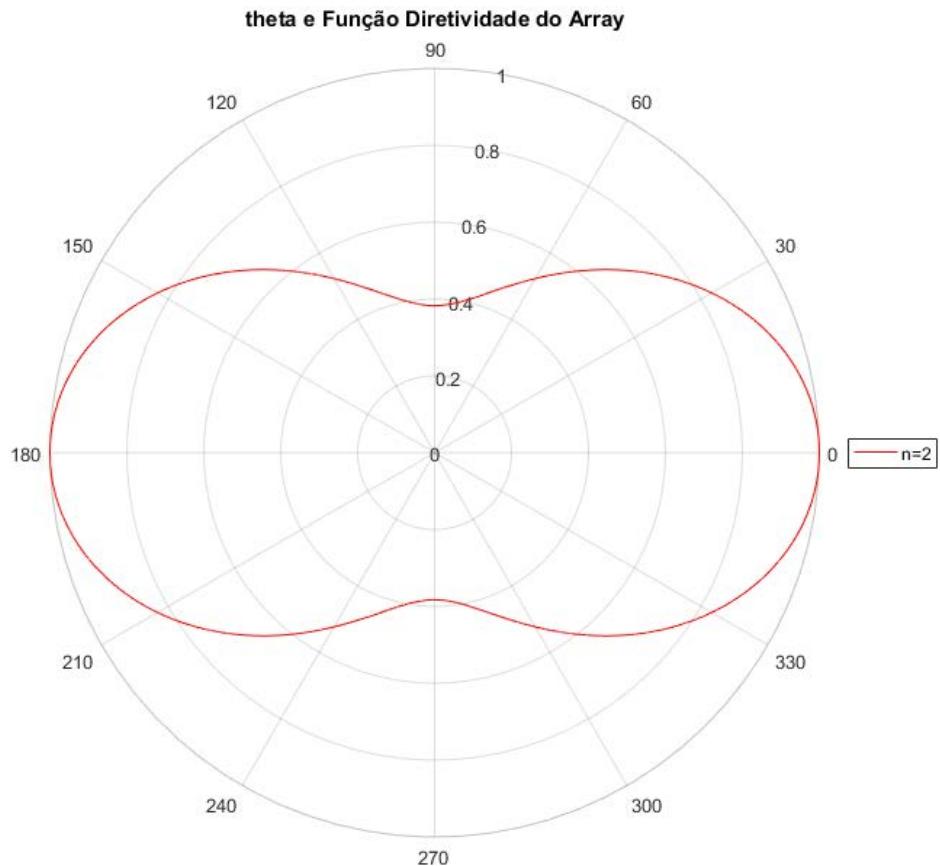


Gráfico 51 - Gráfico polar para frequência de sintonia do *array* de 2 kHz e do sinal incidente de 1,5 kHz, com ângulo de incidência de 0°

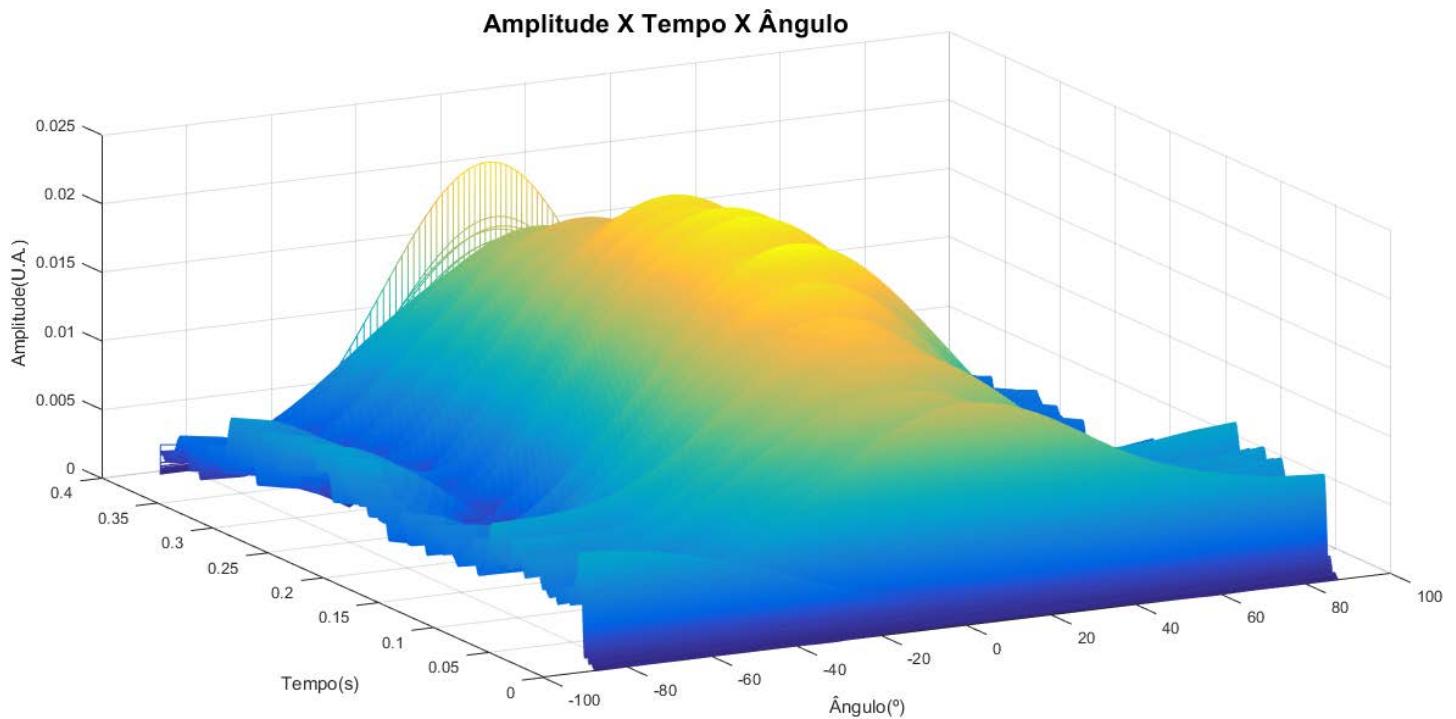


Gráfico 52 - Sinal de 2000 Hz emitido próximo ao *broadside* do *array*

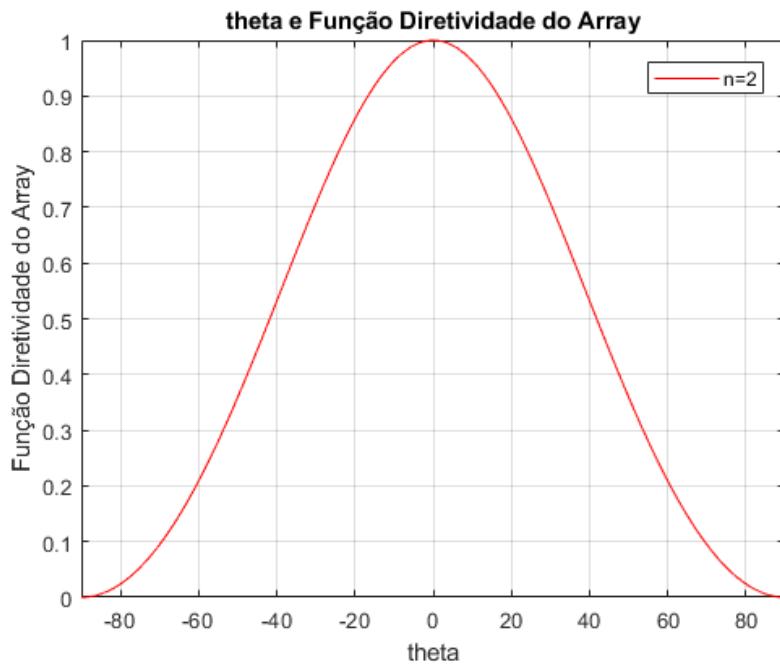


Gráfico 53 - Gráfico retangular para frequência de sintonia do *array* e do sinal incidente de 2 kHz, com ângulo de incidência de 0°

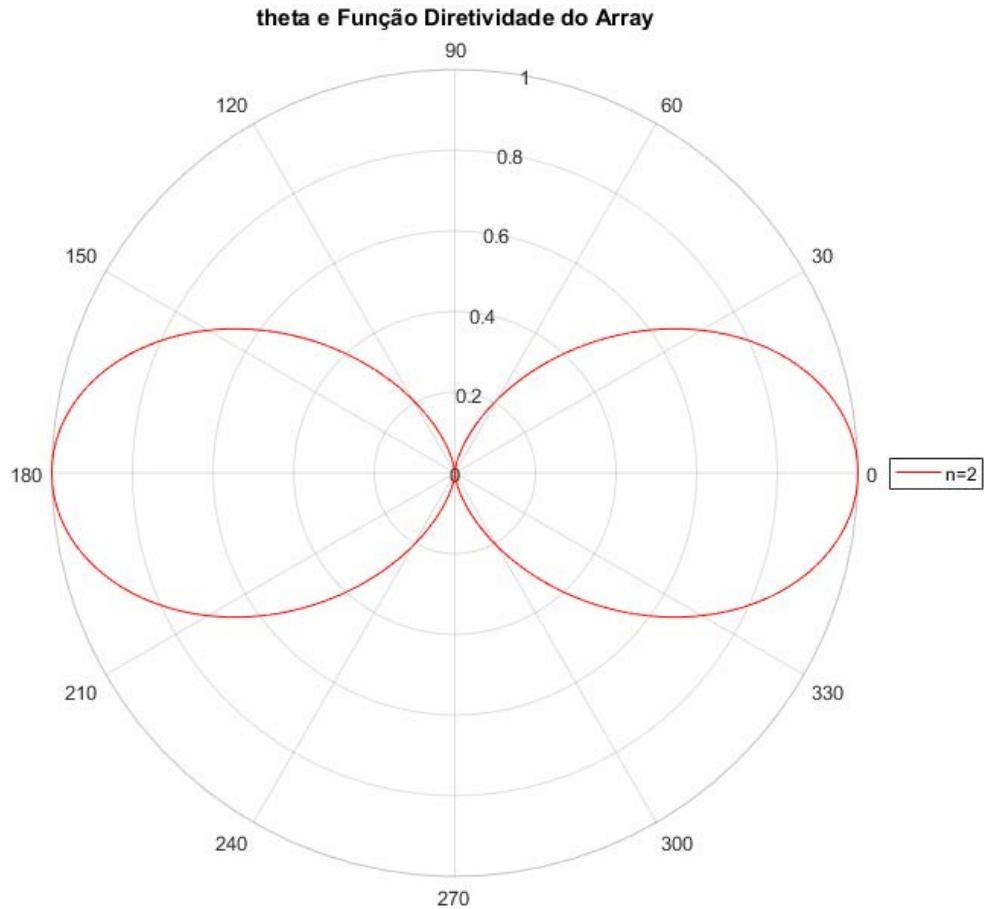


Gráfico 54 - Gráfico polar para frequência de sintonia do *array* e do sinal incidente de 2 kHz, com ângulo de incidência de 0º

10.6.3 Sinais emitidos atrás do *array* de 1000, 1500 e 2000 Hz

À exceção do fato de que as maiores amplitudes estão associadas aos ângulos negativos, os resultados obtidos para os sinais emitidos atrás do *array* são semelhantes àqueles obtidos para os sinais emitidos na frente, ou seja, para ângulos de 90º em relação ao *broadsides*, as frequências de 1000 e 1500 Hz apresentam resultados melhores do que na frequência de 2000 Hz, quando há uma ambiguidade frente-trás.

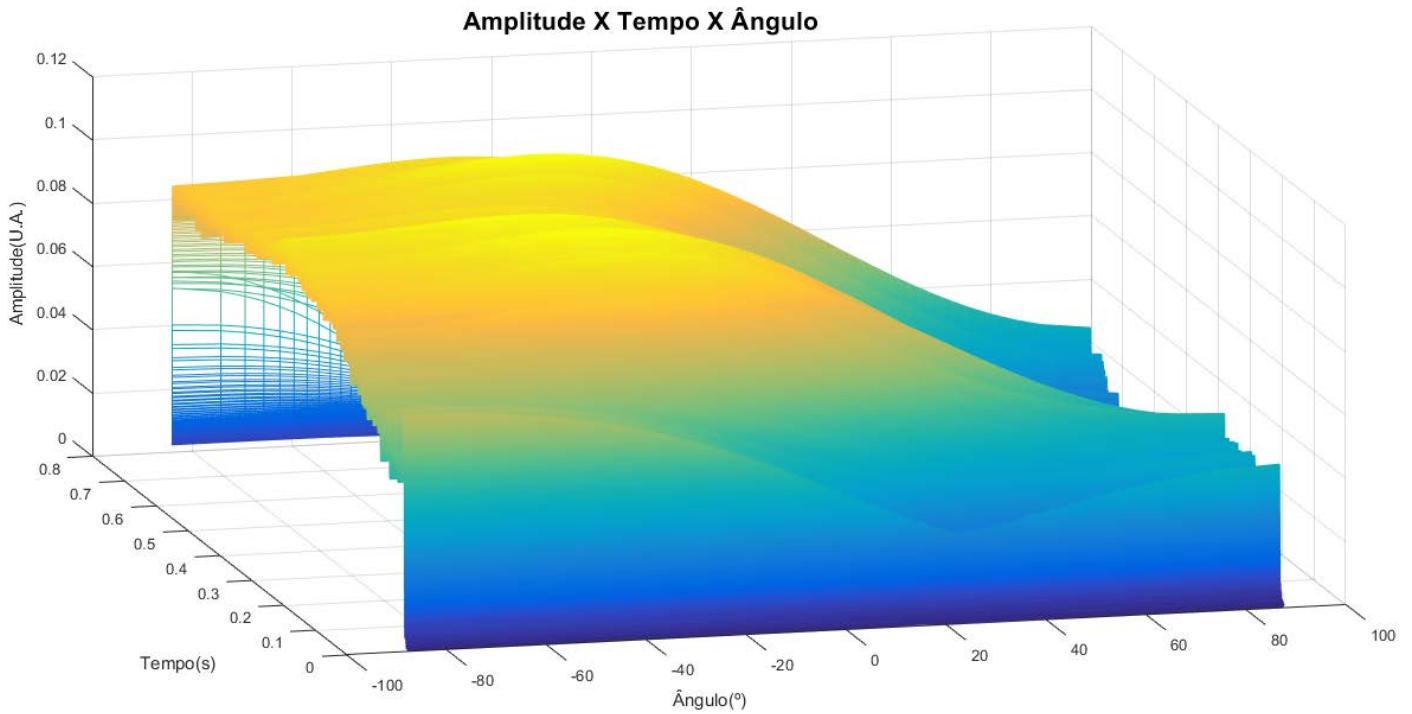


Gráfico 55 - Sinal de 1000 Hz emitido atrás do *array*

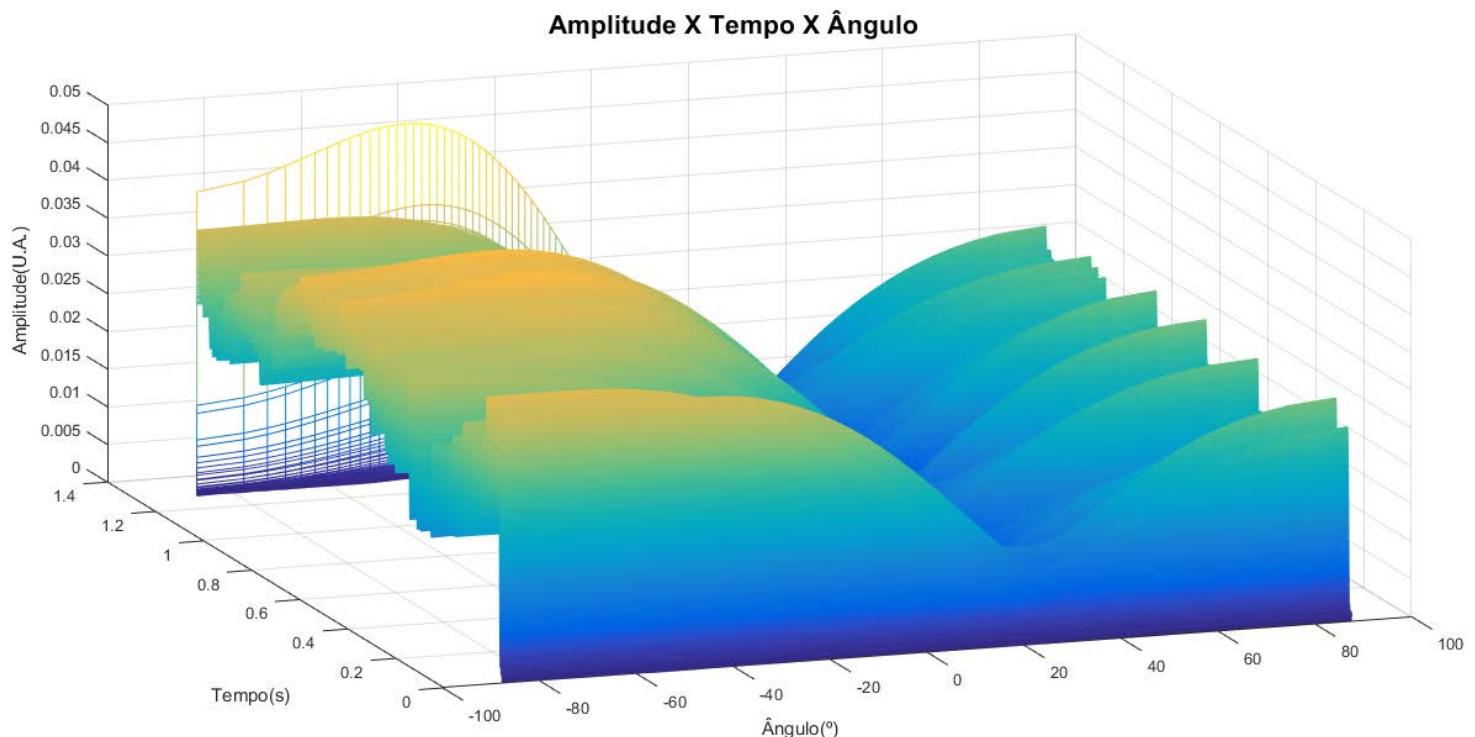


Gráfico 56 - Sinal de 1500 Hz emitido atrás do *array*

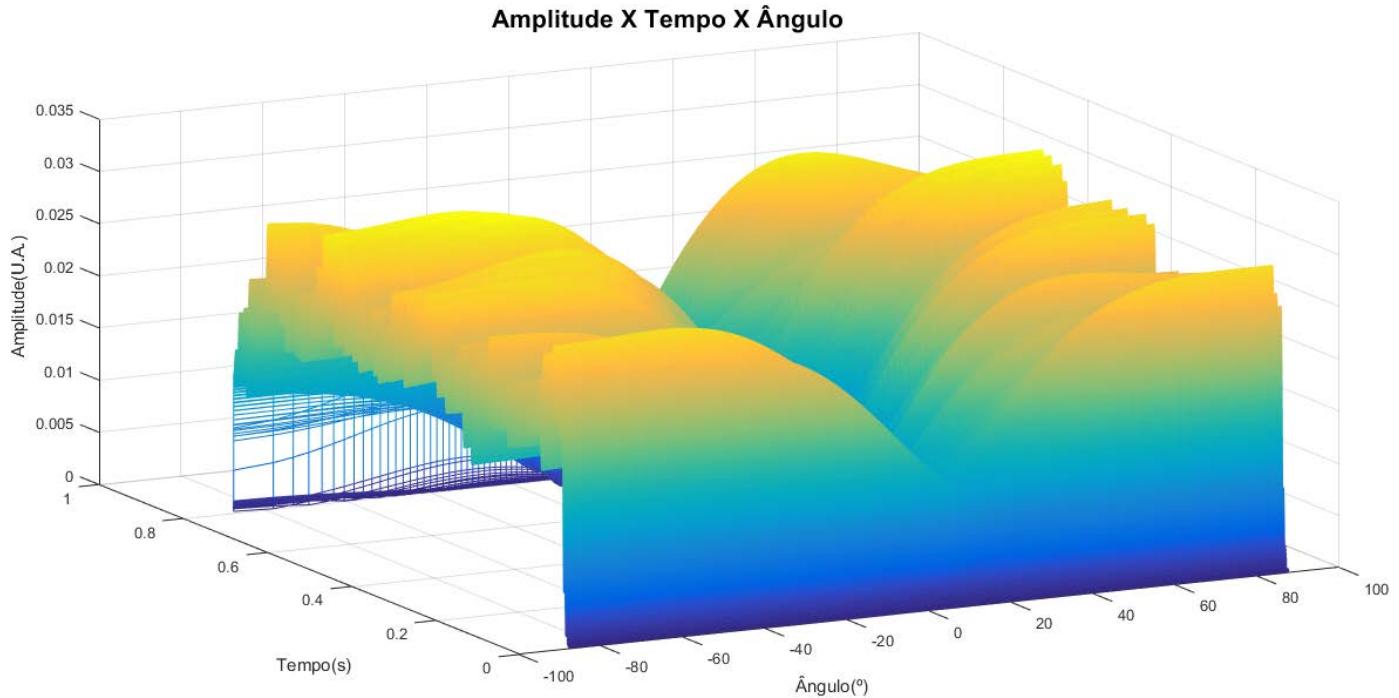


Gráfico 57 - Sinal de 2000 Hz emitido atrás do *array*

No gráfico a seguir, a direção do sinal acústico incidente do *array* era próxima do *broadside*, a aproximadamente 20°, conforme pode ser visto no gráfico abaixo. É possível perceber a melhora na resolução angular do feixe neste caso.

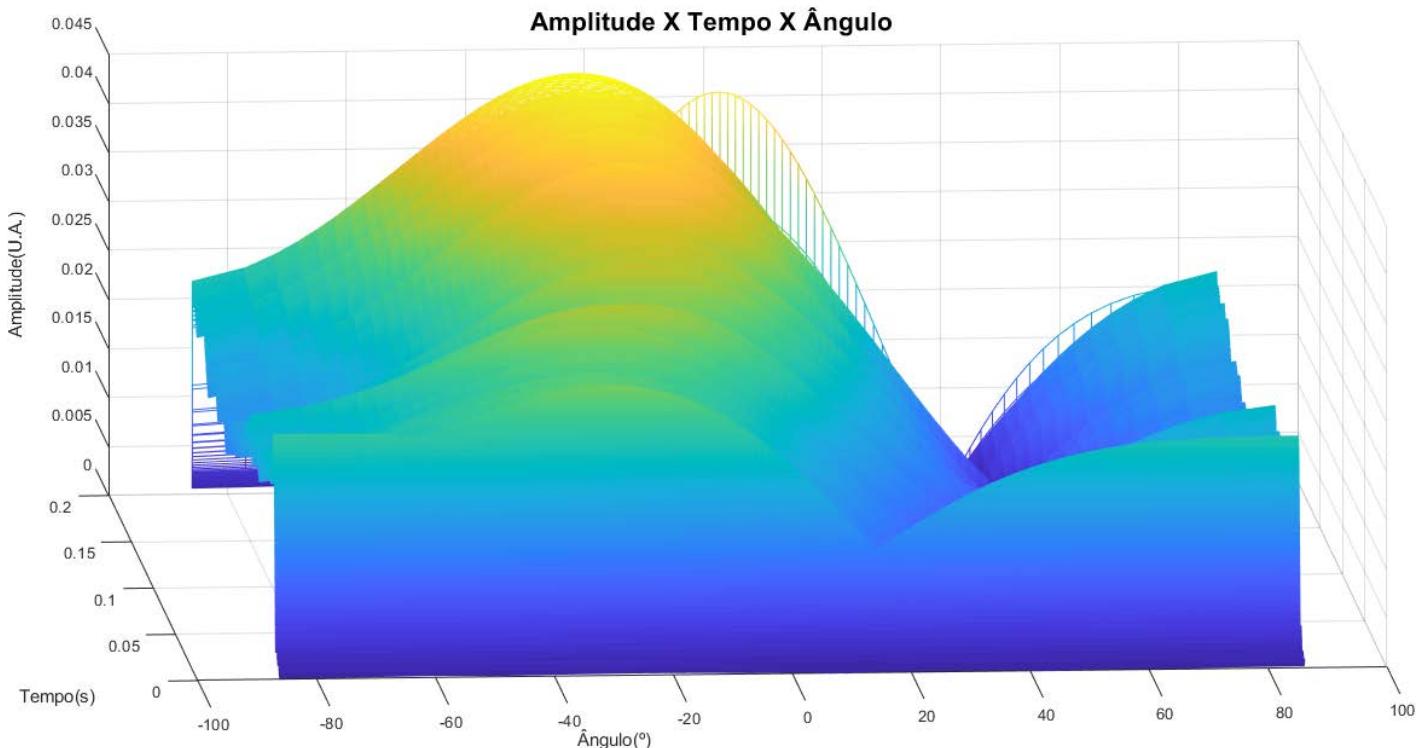


Gráfico 58 - Sinal de 2000 Hz emitido atrás do *array* incidindo em uma direção próxima do *broadside*

No gráfico anterior, é possível notar um lóbulo secundário de maior amplitude nos 90° . Realizando-se uma simulação com a frequência de sintonia e frequência do sinal incidente de 2 kHz e um ângulo de incidência de 240° (ou -20°), é possível verificar o mesmo resultado, como pode ser visto nos gráficos a seguir.

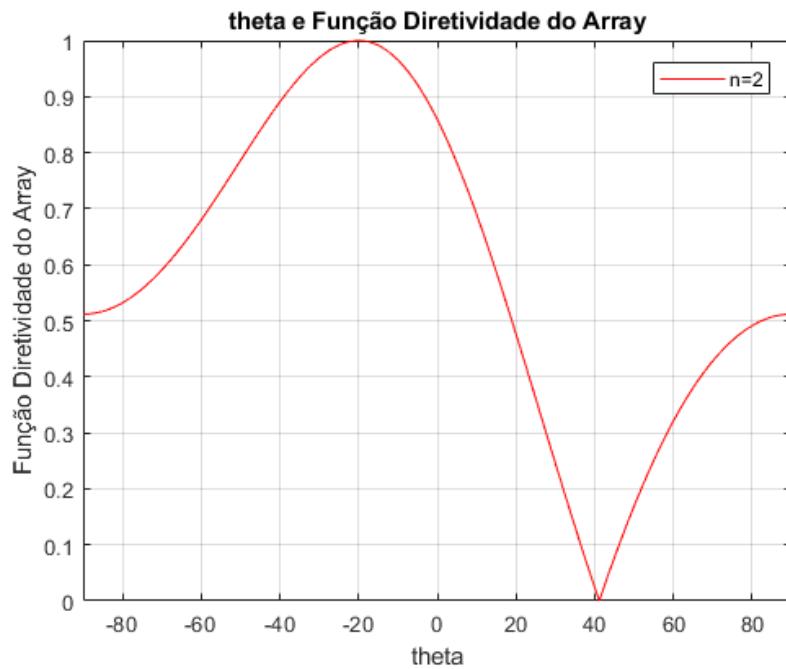


Gráfico 59 - Gráfico retangular para frequência de sintonia do *array* e do sinal incidente de 2 kHz, com ângulo de incidência de -20°

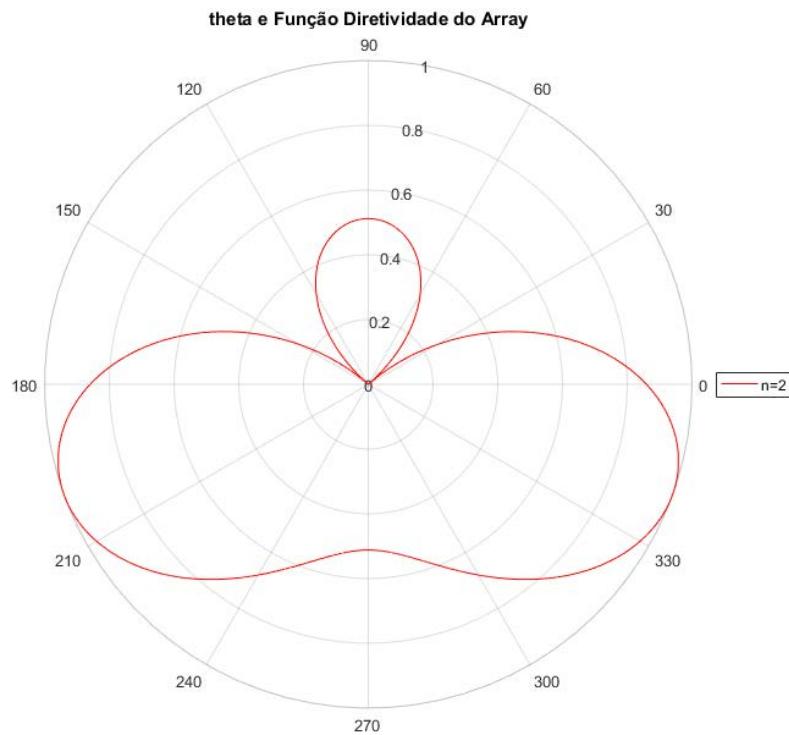


Gráfico 60 - Gráfico polar para frequência de sintonia do *array* e do sinal incidente de 2 kHz, com ângulo de incidência de -20°

11.0 Conclusão

Este trabalho teve como propósito o desenvolvimento de um *array* de hidrofones linear rebocado, visando detectar e calcular a direção do sinal emitido por uma fonte acústica em condições reais de operação, ou seja, em operações de reboque no meio marítimo.

O primeiro desafio deste projeto foi realizar um primeiro esboço da parte mecânica, de modo a decidir sobre diversos aspectos, como a entrada do cabo elétrico e do óleo de rícino, o material das peças, o acabamento hidrodinâmico e o tracionamento mecânico que permitiu posicionar os hidrofones com o espaçamento desejado.

A maior dificuldade nesta etapa foi garantir a estanqueidade do protótipo, pois foram realizadas dezenas de testes até chegar no resultado desejado, obtido após pequenas modificações do projeto inicial, como as ranhuras externas nas peças intermediárias das duas extremidades. Tal implementação foi necessária pois, inicialmente, a água entrava entre a mangueira e as peças das extremidades.

O segundo desafio foi, a partir da parte eletrônica desenvolvida, separadamente, no laboratório, promover a integração entre a mecânica e a eletrônica, inserindo todos os hidrofones, pré-amplificadores e fios elétricos no interior da carcaça do protótipo.

Após esta inserção, o último passo para finalizar a construção do *array* de hidrofones foi inserir o óleo de rícino no interior da mangueira, que é um procedimento que, embora de aparente facilidade, mostrou-se complicado e demorado, pois nem todas as bolhas conseguiam subir até a extremidade da popa, que ficava voltada para cima.

O preenchimento teve que ser feito de forma lenta, utilizando-se uma seringa, até a completa expulsão das bolhas que, conforme visto, são prejudiciais à detecção por parte do *array* de hidrofones.

O terceiro desafio foi desenvolver e implementar os *softwares* necessários para a aquisição do sinal digitalizado e posterior aplicação do *beamforming*, sendo necessário passar por diversos testes no laboratório até garantir o completo funcionamento dos *softwares* em condições reais de operação.

Os requisitos deste projeto foram alcançados e os objetivos atingidos de forma satisfatória, provendo um protótipo com baixo ruído próprio, com boa facilidade de manuseio, manutenção e transporte, a um custo adequado aos recursos disponíveis e sendo capaz de

detectar e calcular a direção de uma fonte acústica de interesse, de acordo com as limitações impostas pela quantidade de hidrofones disponíveis.

Além disso, deve-se levar em consideração os valiosos conhecimentos e experiências adquiridas e compartilhadas durante este projeto, que servirão de base para novos desafios voltados para a acústica submarina.

Foi possível observar, com estes resultados, uma das principais desvantagens de um *array* linear, que é a dificuldade em realizar o direcionamento de feixe nas proximidades do *endfire*, em virtude das perdas associadas à direitividade, além de verificar que esta perda também depende da frequência do sinal incidente, sendo que um sinal de 1000 Hz teve resultado mais satisfatório do que um sinal de 2000 Hz, na frequência de sintonia do arranjo.

Em contrapartida, também foi comprovado que, no *broadsides*, os resultados da direcionalidade apresentam melhor desempenho, sendo que, para frequências próximas à frequência de sintonia, o lóbulo principal apresenta uma melhor resolução angular do feixe.

Tendo em vista que este foi o primeiro projeto no Brasil voltado para um *array* de hidrofones linear rebocado, abrangendo as fases mecânica, eletrônica, processamento digital de sinais e experimentos para validação, o primeiro passo foi dado para que trabalhos futuros possam complementar e dar continuidade a este importante sistema sonar passivo, a fim de contribuir para os estudos relacionados à acústica submarina e à biologia marinha.

12.0 Sugestões para trabalhos futuros

Em virtude dos altos custos de um hidrofone, foram utilizados somente dois sensores neste projeto, o que não permite grandes precisões na detecção de um sinal acústico. Contudo, para projetos futuros, pode-se adicionar mais hidrofones e pré-amplificadores com a mesma carcaça do protótipo, devendo-se alterar somente o cabo elétrico para outro que contenha mais fios condutores.

Durante os testes realizados no mar, diversos equipamentos poderiam ter sido utilizados para auxiliar nos experimentos. Sensores de pressão poderiam ser acoplados externamente à mangueira para verificar a exata profundidade do *array* e, posteriormente, estudar a sua relação com a velocidade do reboque.

Outro equipamento que poderia ter sido implementado é o velosssom. Como o experimento foi realizado no período da ressurgência, quando a água do mar se encontra com temperaturas mais baixas, afetando a velocidade do som, este equipamento seria importante para atualizar os valores das variáveis no cálculo. Entretanto, estes equipamentos não estavam disponíveis no momento do experimento.

Um importante estudo associado ao ruído que pode ser realizado em experimentos futuros é analisar a influência da velocidade de reboque nos níveis de ruído próprio do *array* de hidrofones, para um certo comprimento do cabo de reboque.

Além disso, como um número maior de hidrofones garante uma melhor direcionalidade do sinal, pode ser necessária a utilização de GPS, tanto pela embarcação que reboca o *array*, quanto pela embarcação de apoio responsável pela fonte acústica, de modo a validar os resultados obtidos.

Outra sugestão pode ser implementar, a partir de conceitos abordados neste trabalho, outras formas de geometria, obtendo-se resultados mais satisfatórios do que um *array* linear como, por exemplo, resolvendo-se a ambiguidade esquerda-direita sem a necessidade de alterar o rumo da embarcação.

Por fim, a parte de processamentos de sinais pode ser aprimorada realizando-se a detecção e cálculo da direção das fontes acústicas em tempo real, ou utilizando-se outros *softwares* e técnicas mais avançadas de *beamforming*, garantindo um maior desempenho na obtenção dos resultados e informações mais complexas da fonte acústica de interesse.

13.0 Referências

1. WENZ, G. M. Review of Underwater Acoustics Research: Noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 51(3), pp. 1010-1024, 1972.
2. MINISTÉRIO DA MARINHA. Instituto de Pesquisas da Marinha. Princípios de Sonar. Rio de Janeiro, 1997, 248 p.
3. FELISBERTO, P. The Beamformer. Universidade do Algarve, 37 slides.
4. Spatial Signal Processing (Beamforming). Disponível em <<http://www.personal.psu.edu/faculty/m/x/mxm14/sonar/beamforming.pdf>>. Acesso em 01 de março de 2017.
5. GALANTE, G. M. F. Uso de conjuntos de hidrofones (arrays) em medições acústicas submarinas em águas rasas. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1992.
6. GALANTE, J. P. Métodos de alta resolução para determinação de direção de chegada em conjunto de hidrofones uniformemente espaçados. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.
7. PARENTE, C. E., FERRAZ, M. T. Desenvolvimento de um Array de Hidrofones. In: *Anais da IV ENCONTRO DE ACÚSTICA SUBMARINA* do IPqM, Rio de Janeiro, 1999.
8. VEEN, B. D. V., BUCKLEY, K. M. Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing Magazine*, pp. 4-24, Abril de 1988.
9. BRENSING, K., LINKE, K., TODT, D. Sound source location by difference of phase, on a hydrophone array with small dimensions. *Journal of the Acoustical Society of America* 109, 430-433, 2000.
10. SANTANA, W.G. Contribuições ao desenvolvimento de um arranjo de hidrofones para medições no mar. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
11. LEMON, S. G. Towed-Array History, 1917-2003. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, pp. 365-373, 2004.
12. LASKY, M., DOOLITTLE, R. D., SIMMONS, B. D., LEMON, S. G. Recent Progress in towed hydrophone array research. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, pp. 374-387, 2004.

13. HOLMES, J. D., CAREY W. M., LYNCH, J. F. Results from na autonomous underwater vehicle towed hydrophone array experiment in Nantucket Sound. *Journal of the Acoustical Society of America* 120(2), EL15-21, 2006.
14. PALLAYIL, V., CHITRE, M.A. and DESHPANDE, P. D. A Digital Thin Line Towed Array for Small Autonomous Underwater Platforms. *Acoustic Research Laboratory, Tropical Marine Science Institute, National University of Singapore, Singapore*, 2007.
15. ANTUNES, R., RENDELL, L., GORDON, J. Measuring inter-pulse intervals in sperm whale clicks: Consistency of automatic estimation methods. *Journal of the Acoustical Society of America* 127, pp. 3239–3247, 2010.
16. CULVER, R., PARK, J., LEIGHTON, T., COLES, D. The effect of nearby bubbles on array gain. *Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 3812–3826, 2011.
17. TRAN, D. D., HUANG, W., BOHN, A. C., WANG, D. Using a coherent hydrophone array for observing sperm whale range, classification, and shallow-water dive profiles. *Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 3352-3363, 2014.
18. BARKLEY, Y., BARLOW, J., RANKIN, S., D'SPAIN, G., OLESON, E. Development and Testing of Two Towed Volumetric Hydrophone Array Prototypes to Improve Localization Accuracy During Shipboard Line-transect Cetacean Surveys. *NOAA Technical Memorandum NMFS-PIFSC-49*, 2016.
19. BARBAGELATA, A., GUERRINI, P., TROIANO, L. Thirty Years of TOWED ARRAYS at NURC. *Oceanography* Vol. 21, No.2, pp. 24-33, 1008.
20. HOLMES, J. D. Investigation of ocean acoustics using autonomous instrumentation to quantify the water-sediment boundary properties. *Boston University*, 2003.
21. KUPERMAN, W. A., LYNCH, L. F. Shallow-water acoustics. *Physics Today* 57, 55-61, 2004.
22. TREES, H. L. V. Optimum Array Processing. PART IV of Detection, Estimation and Modulation Theory. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2004.
23. BURDIC, W. S. Underwater Acoustics System Analysis. *Prentice-Hall*, 1984.
24. POTTER, D. E., Constantin S., Badiu S. The ‘thinarray’; a lightweight, ultra-thin (8 mm od) towed array for use from small vessels of opportunity. *Underwater Technology 2000, Tóquio, Japão, Junho de 2000*.

25. NIELSEN, R. O. Sonar Signal Processing. Artech House, Boston, 1991.
26. WAITE, A. D. Sonar for Practising Engineers. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
27. JOHNSON, D. H., DUDGEON, E. D. Array signal processing: Concepts and techniques. Prentice-Hall, Inc., 1993.
28. LI, Q. Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications. Advanced Topics in Science and Technology in China, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
29. whales – The Waveform Diary. Disponível em < <http://www.michw.com/tag/whales/>>. Acesso em 11 de julho de 2017.
30. BOZZI, F. A. Conformação de feixe em sonar passivo para um arranjo cilíndrico de hidrofones. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
31. GURGEL, F. O. M. J. APLICAÇÕES DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA PARA AÇÕES DE RESPOSTA A INCIDENTES DE POLUIÇÃO POR DERRAME DE ÓLEO: ESTUDO DE CASO DA ENSEADA DOS ANJOS EM ARRAIAL DO CABO-RJ. Tese de M. Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
32. Projeto Baleia Jubarte. Disponível em < <http://www.baleiajubarte.org.br/projetoBaleiaJubarte/leitura.php?mp=aBaleia&id=99>>. Acesso em 09 de setembro de 2017.
33. STILES, Z. H. Dynamic towed array models and state estimation for underwater target tracking. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, Estados Unidos, 2013.

APÊNDICE A – ALGORITMOS UTILIZADOS PARA ESTUDOS DE PARÂMETROS DO ARRAY

Ganho do Array

```
%Programa para exibir um gráfico relacionando o Ganho do Array (Índice %de
Diretividade) com a relação entre uma determinada frequência e a
%frequência de sintonia, para três diferentes ângulos de chegada do
%sinal(phi=0°,45° e 90°)

clc %limpa a Command Window
clear %limpa as variáveis em uso
close %fecha todas as figures em aberto

%Entradas do sistema:
fs = input('Digite a Frequência de Sintonia (Hz) : ');
n = input('Digite o número de hidrofones : ');

%Velocidade do som no mar (m/s)
c=1500;

%Espaçamento entre os hidrofones (m)
d=c/(2*fs);

%Ângulo inicial de chegada do sinal;
phi=0*pi/180;

%Número de relação de frequências f/fs
nfreq=20000;

%Vetor Graphics vai armazenar todos os valores correspondentes de acordo
%com o número de passos, e ao final do método numérico vai plotar todos %os
gráficos necessários.
graphics1 = zeros(nfreq,4);

%Somatório
S=0;

%passo de relação de frequências
dfreq=0.0001;

%Frequência inicial a analisar o Ganho do Array
f=0;

for k=1:3
    for j=1:nfreq
        f=f+dfreq*fs;
        for i=1:n-1
            S=S+(n-i)*cos(2*pi*f*i*d*(sin(phi))/c)*(sin(2*pi*f*i*d/c))/(2*pi*f*i*d/c);
        end
        %Ganho do Array
        GA=10*log10(n/(1+2*S/n));

        %Armazenando todos os valores a serem plotados no vetor graphics.
        graphics1(j,1) = f/fs;    %guarda relação de frequências
        if (phi==0*pi/180)
            graphics1(j,2) = GA;  %guarda Ganho do Array para phi = 0°
        elseif (phi==45*pi/180)
```

```

graphicsl(j,3) = GA; %guarda Ganho do Array para phi = 45°
elseif (phi==90*pi/180)
graphicsl(j,4) = GA; %guarda Ganho do Array para phi = 90°
end
S=0;
end
f=0;
phi=phi+45*pi/180;
end

%Distância entre os hidrofones
fprintf('Distância entre os hidrofones:%1.3f\n',d);

%Coletando o máximo ganho do array e em qual relação de frequências ocorre
%Para phi= 0 graus
[maxganho1, rfreq1]=max(graphicsl(:,2));
fprintf('Máximo Ganho para phi = 0°:%2.3f\n',maxganho1);
fprintf('Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi =
0°:%2.3f\n', rfreq1*dfreq);

%Para phi= 45 graus
[maxganho2, rfreq2]=max(graphicsl(:,3));
fprintf('Máximo Ganho para phi = 45°:%2.3f\n',maxganho2);
fprintf('Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi =
45°:%2.3f\n', rfreq2*dfreq);

%Para phi= 90 graus
[maxganho3, rfreq3]=max(graphicsl(:,4));
fprintf('Máximo Ganho para phi = 90°:%2.3f\n',maxganho3);
fprintf('Relação de Frequências onde ocorre o máximo ganho para phi =
90°:%2.3f\n', rfreq3*dfreq);

%Impressão dos gráficos
figure(1)
plot(graphicsl(:,1),graphicsl(:,2), '-r',graphicsl(:,1),graphicsl(:,3), '-b',graphicsl(:,1),graphicsl(:,4), '-g' );
%plota theta e Ganho do Array
title('frequência e Ganho do Array');
legend('phi = 0°', 'phi = 45°', 'phi = 90°');
xlabel('f/fs');
ylabel('Ganho do Array (dB)');
xlim([0 nfreq*dfreq]);
grid on

```

Função Diretividade do Array

%Programa para estudar a Função de Diretividade do Array considerando %a função de abertura como janelamento retangular (função sinc) e %fazendo a análise para diferentes espaçamentos entre hidrofones a %partir de uma frequência de sintonia desejada. Permite entrada de dados.

```

clc %limpa a Command Window
clear %limpa as variáveis em uso
close %fecha todas as figures em aberto

%Entradas do sistema:
fs = input('Digite a Frequência de Sintonia (Hz) : ');
f = input('Digite a Frequência (Hz) : ');
theta0 = input('Digite o ângulo de direcionamento de feixe: ');
n1 = input('Digite o primeiro número de hidrofones para comparação : ');
n2 = input('Digite o segundo número de hidrofones para comparação : ');
n3 = input('Digite o terceiro número de hidrofones para comparação : ');

%Velocidade do som no mar (m/s)
c=1500;

%Espaçamento entre os hidrofones, considerando a frequência de sintonia (m)
d=c/(2*fs);

%Comprimento de onda do sinal acústico(m);
lambda=c/f;

%Theta Final
thetaf=180*pi/180;

%Theta Inicial
thetai=-180*pi/180;

%Ângulo de Direcionamento de Feixe
theta0=theta0*pi/180;

%Variável Theta a ser incrementada no "for"
theta=thetai;

%Passo adotado para o Projeto (graus)
dtheta=0.01*pi/180;

%Número de passos realizados
ntheta=(thetaf-thetai)/dtheta;

%Número de hidrofones
n=n1;

%Vetor Graphics vai armazenar todos os valores correspondentes de acordo
%com o número de passos, e ao final do método numérico vai plotar todos %os
%gráficos necessários.
graphics = zeros(ntheta,4);

for j=1:3

    for i=1:ntheta

```

```

%Variável u
u=sin(theta)/lambda;
u0=sin(theta0)/lambda;
%Função de Diretividade do Array para abertura retangular
G=((sin(n*pi*d*(u-u0)))/(n*sin(pi*d*(u-u0))));
%Armazenando todos os valores a serem plotados no vetor graphics.
graphics(i,1) = theta*180/pi; %guarda theta
graphics(i,2) = theta; %guarda theta para o Diagrama Polar
if (j==1)
graphics(i,3) = abs(G); %guarda Função Diretividade do Array para
j=1
elseif (j==2)
graphics(i,4) = abs(G); %guarda Função Diretividade do Array para
j=2
elseif (j==3)
graphics(i,5) = abs(G); %guarda Função Diretividade do Array para
j=3

    %Para colocar na legenda dos gráficos:
    str1=sprintf('n=%d',n1);
    str2=sprintf('n=%d',n2);
    str3=sprintf('n=%d',n3);
    end
    theta=theta+dtheta;
end
if (j==1)
n=n2;
elseif (j==2)
n=n3;
end
theta=thetai;
end

%Impressão dos gráficos
figure(1)
plot(graphics(:,1),graphics(:,3),'-r',graphics(:,1),graphics(:,4),'-
b',graphics(:,1),graphics(:,5),'-g'); %plota theta e Função Diretividade do
Array
title('theta e Função Diretividade do Array');
legend(str1,str2,str3);
xlabel('theta');
ylabel('Função Diretividade do Array');
grid on

%Impressão dos gráficos na forma polar
figure(2)
polarplot(graphics(:,2),graphics(:,3),'-
r',graphics(:,2),graphics(:,4),'-b',graphics(:,2),graphics(:,5),'-g');
%plota theta e Função Diretividade do Array
legend(str1,str2,str3);
title('theta e Função Diretividade do Array');

%Imprimindo informações relevantes
fprintf('Comprimento de onda: %.3f\n',lambda);
fprintf('Distância entre os hidrofones: %.3f\n',d);

```

APÊNDICE B – DESENHO DE CONJUNTO

