



MARINHA DO BRASIL
INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ACÚSTICA SUBMARINA

PROTÓTIPO DE LIBERADOR ACÚSTICO UTILIZANDO ALGORITMO DE
DECISÃO POR FILTRAGEM CASADA

André Luis Lima Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Acústica Submarina, PPGAS, do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Acústica Submarina.

Orientador: Renato Peres Vio

Arraial do Cabo
Abril de 2023

PROTÓTIPO DE LIBERADOR ACÚSTICO UTILIZANDO ALGORITMO DE
DECISÃO POR FILTRAGEM CASADA

André Luis Lima Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ACÚSTICA SUBMARINA DO INSTITUTO DE
ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ACÚSTICA SUBMARINA.

Orientador: Prof. Renato Peres Vio, Ph.D.

Aprovada por: Prof. Linilson Rodrigues Padovese, Ph.D.

Prof. Vicente Barroso Júnior, D.Sc.

Prof. Marcus Vinícius da Silva Simões, D.Sc.

Prof. Rogério de Moraes Calazan, Ph.D.

ARRAIAL DO CABO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2023

Lima Silva, André Luis

Protótipo de liberador acústico utilizando algoritmo de decisão por filtragem casada/André Luis Lima Silva. – Arraial do Cabo: IEAPM, 2023.

XVIII, 93 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Renato Peres Vio

Dissertação (mestrado) – IEAPM/Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 75 – 79.

1. Acústica submarina. 2. Liberador acústico. 3. Atuadores submersos. 4. Filtro casado. I. Peres Vio, Renato. II. Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina. III. Título.

Agradecimentos

Chegar ao fim desta jornada, que por vezes pareceu inalcançável, só foi possível graças a ajuda daqueles que me cercam. E, por isso, agradecer a todos que por incentivo ou colaboração me impulsionaram nesse caminho é parte fundamental deste trabalho.

À minha esposa, Luana, agradeço pela compreensão e apoio que transbordam em nosso convívio. Obrigado por acreditar em mim mesmo quando eu mesmo duvidava, por contribuir com as ilustrações e revisões ortográficas e, principalmente, por me acompanhar sem hesitação nas apostas que fiz ao longo da vida. Sem você, nunca seria pleno, faltaria metade de mim.

Ao meu orientador, coordenador do curso, professor, encarregado de divisão, mergulhador, soldador e tantas outras funções, o Ph.D. Renato Peres Vio, que faz parecer que o dia tem 72 horas, agradeço pelo exemplo de determinação, pelos ensinamentos em acústica submarina, pelo auxílio nas múltiplas tarefas exigidas ao longo do processo e pelo incentivo (por vezes pedagogicamente questionável, mas sempre pertinente).

Aos instrutores do PPGAS, com destaque ao D.Sc. Vicente Barroso Júnior, ao Ph.D. Rogério de Moraes Calazan, ao Ph.D. Renato Peres Vio e ao D.Sc Fábio Conreira Xavier, meus sinceros agradecimentos pelo zelo em garantir-nos uma formação adequada ao ingressarmos na imensidão que é a acústica submarina. Sei que sempre haverá muito a aprender, mas, graças aos senhores, hoje podemos nos arriscar a discutir o tema.

Aos amigos da primeira turma do PPGAS-2021, os futuros mestres, Rodrigo Soares de Freitas, Pedro Mendes Diniz e Vinícius Reveilleau, agradeço pela ajuda mútua e espírito de corpo fundamentais para traspor as dificuldades que se apresentaram. Torço para que os esforços de cada um tragam os frutos que merecem e que nossas ocupações não nos impeçam de mantermos contato e, eventualmente, relembrar com alegria esses dois anos que vivemos. "Essa é a história!".

Não poderia esquecer dos integrantes do departamento de acústica do IEAPM, os oficiais CC(EN) Backer, CT(RM2-EN) Brito, CT(EN) Loreto, 1ºTen(EN) Tavares, ao SO-ET Braun e ao SG-ET Pereira, que dedicaram parte de seu valioso tempo a me ajudar na construção do protótipo que foi o objetivo maior deste trabalho e a

tripulação da embarcação Anchova, que nos atenderam com presteza e bom ânimo todas as vezes que foi solicitada. Muito obrigado.

Finalmente, a minha família e amigos na cidade de São Salvador, agradeço por torcerem sinceramente pelo meu sucesso e compreenderem minhas faltas quando foi necessário priorizar o trabalho. Na acústica submarina aprendi que para alcançar maiores distâncias na comunicação é recomendado reduzir a frequência. E, apesar de distorcer a definição de frequência neste caso, gosto de pensar que sempre haverá um canal de comunicação entre nós, não importa quão longe estivermos. Amo vocês.

"Deus me livre de não ser baiano!"

Vanderson Nascimento

Tecnologia própria é independência.

Lema do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo

Resumo da Dissertação apresentada ao IEAPM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROTÓTIPO DE LIBERADOR ACÚSTICO UTILIZANDO ALGORITMO DE DECISÃO POR FILTRAGEM CASADA

André Luis Lima Silva

Abril/2023

Orientador: Renato Peres Vio

Programa: Acústica Submarina

Liberadores acústicos, empregados em pesquisas oceanográficas, são comumente utilizados para recuperar instrumentos ou equipamentos submersos, como sensores e boias de marcação, instalados no oceano ao longo da coluna d'água visando coletar dados e estudar a vida marinha. Eles também são usados na indústria *offshore* de petróleo e gás para recuperar equipamentos em atividades de exploração e produção. Seu funcionamento se resume em acionar um mecanismo de liberação projetado para separar a parte desejada do conjunto submerso ao receber um sinal acústico específico. Sua utilização carrega como grande vantagem reduzir o emprego de mergulhadores ou alcançar regiões onde o mergulho não seria possível. O sinal acústico transmitido pela água pode percorrer longas distâncias, tornando-se uma maneira eficaz de acionamento remoto. Embora sejam úteis no âmbito da pesquisa e da indústria, no Brasil, estes equipamentos são comercializados a elevado custo e, geralmente, envolve importação. Esse fator desencoraja sua utilização. Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um protótipo de liberador acústico de baixo custo reunindo as principais características necessárias ao funcionamento confiável deste equipamento no ambiente de águas rasas. Apresenta-se uma opção construtiva para o invólucro estanque e para o mecanismo de liberação, detalhada juntamente com todo o desenvolvimento relativo à escolha e testes do sinal de acionamento. Empregando a técnica de filtragem casada, com a devida avaliação dos parâmetros de transmissão entre projetor e receptor, avaliação do efeito do canal marinho na propagação do sinal e o devido pré-processamento, um algoritmo de decisão suficientemente acurado é apresentado para compor a plataforma do dispositivo autônomo. Os resultados comprovam a viabilidade do protótipo e a possibilidade de ampliar o emprego deste equipamento no território nacional.

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

ACOUSTIC RELEASER PROTOTYPE USING MATCHED FILTERING
DECISION ALGORITHM

André Luis Lima Silva

April/2023

Advisor: Renato Peres Vio

Department: Underwater Acoustics

Acoustic releasers are employed in oceanographic research and are commonly used to recover submerged equipment, such as sensors and markers installed in the ocean along the water column to collect data and study marine life. They are also used in offshore oil and gas industry to recover equipment in activities of exploration and production. Its operation consists in activating a mechanism of release designed to separate the desired part from the submerged assembly when receiving a specific acoustic signal. Its has the main advantage of reducing diving activities or reaching regions where diving would not be possible. The acoustic signal transmitted through water can travel long distances, making it an effective way of remote trigger. Although they are useful within the research and industry, in Brazil, this equipment is sold at a high cost and usually involves importation. This factor discourages its use. This research aimed to develop a low-cost acoustic releaser prototype bringing together the main characteristics necessary for the reliable operation of this equipment in shallow water environment. A constructive option is presented for the watertight enclosure and for the release mechanism, detailed along with all the development related to the choice and testing of the triggering signal. Employing the matched filtering technique, with proper evaluation of the transmission parameters between projector and receiver, evaluation of the effect of the marine channel on the propagation of the signal and due pre-processing, a sufficiently accurate decision algorithm is presented to compose the standalone device platform. The results proves to viability of the prototype and the possibility of expanding the role of this equipment in brazilian territory.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Símbolos	xv
Lista de Abreviaturas	xviii
1 Introdução	1
1.1 Conceito e aplicações de liberadores acústicos	2
1.2 Motivação para o trabalho	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Organização da dissertação	6
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Resistência a pressão e vedações	7
2.2 Tipos de acionamento para atuadores	11
2.3 Características dos projetores acústicos	14
2.4 Características da propagação no oceano	20
2.5 Hidrofone receptor	28
2.6 Processamento de sinais	29
3 Método Proposto	35
3.1 Invólucro	35
3.2 Conjunto eletromecânico	38
3.3 Seleção do Sinal-chave para acionamento	41
3.4 Pré-processamento e implementação	45
4 Testes e Discussões	56
4.1 Estanqueidade	56
4.2 Acionamento do dispositivo	59
4.3 Simulação de desempenho do algoritmo de decisão	61
4.3.1 Simulação com ruído sintético gaussiano branco	61

4.3.2	Teste de desempenho no ambiente real	63
4.4	Prova de mar do liberador acústico	69
5	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	72
	Referências Bibliográficas	75
A	Curvas de Wenz	80
B	Códigos implementados	81
B.1	Cálculo da ordem do filtro Butterworth otimizada para a aplicação .	81
B.2	Réplica do sinal armazenada no dispositivo	83
B.3	Sinal a transmitir do projetor acústico	84
B.4	Acionamento do motor utilizando o sinal da Raspberry via GPIO . .	86
B.5	Captura de áudio e detecção do Sinal-chave	87
C	Folha de dados do projetor acústico ITC-1001	89
D	Folha de dados do modelo comercial de liberador acústico Sonardyne LTR	91

Lista de Figuras

1.1	Aplicação de um liberador acústico na recuperação de equipamentos submersos.	3
2.1	Retentor de lábio e selo mecânico.	10
2.2	Liberador acústico utilizado em águas rasas e cargas leves. Fabricado pela <i>Desert Star Systems</i> ; Modelo: ARC-1.	12
2.3	Liberador acústico utilizado em águas profundas. Fabricado pela <i>Ix-Blue</i> ; Modelo: OCEANO 5000S.	13
2.4	Liberador acústico utilizado em águas rasas e cargas leves. Fabricado pela <i>Sonardyne</i> ; Modelo: RT 6-1000.	13
2.5	Modelo de rede de duas portas e quatro terminais utilizado na representação de cerâmicas piezoelétricas.	16
2.6	Diagrama esquemático para apresentar os principais componentes mecânicos de um transdutor de vibração longitudinal modelo <i>Tonpitz</i>	16
2.7	Diagrama simplificado mostrando funcionamento de um projetor flex-tensional.	17
2.8	Curva de Impedância vs. Frequência do projetor acústico EDO-610E.	18
2.9	Curva de Impedância vs. Frequência do projetor acústico ITC-1001.	19
2.10	Medição do tempo de resposta do projetor acústico ITC-1001.	19
2.11	Modelos de espalhamento geométrico e sua relação com a intensidade acústica.	21
2.12	Comparação entre os coeficientes de absorção na água salgada e na água doce.	23
2.13	<i>Transmission Loss</i> estimada para um canal submarino em função do alcance de propagação considerando os efeitos de perda devido ao espalhamento geométrico e devido a absorção.	24
2.14	Padrão de interferência devido ao efeito <i>Lloyd's Mirror</i>	26
2.15	Campo de pressão acústico e <i>Transmission Loss</i> à profundidade de 23 m calculados através do modelo de propagação de raios TRACEO.	27
2.16	Hidrofone desenvolvido no IEAPM com material de baixo custo.	28

2.17	Valores médios de sensibilidade resultante da calibração dos hidrofo- nes modelo IEAPM.	29
2.18	Exemplo de utilização da filtragem casada para detecção de um sinal conhecido.	32
2.19	Matriz de decisão binária.	33
3.1	Algumas dimensões padronizadas para tubos em PVC.	36
3.2	Componentes da selagem do eixo principal.	37
3.3	Conceito desenvolvido para o invólucro.	38
3.4	Esquema básico de circuito de acionamento do motor.	39
3.5	Módulo de baterias e circuito simplificado das associações entre as células.	39
3.6	Vista em corte do conjunto planetário e esquema demonstrativo da transmissão de movimento.	40
3.7	Desenho de fabricação e eixo fabricado em aço	41
3.8	Relação tempo-frequência dos sinais CW, LFM e HFM.	42
3.9	Comparação entre os sinais Tom e LFM.	44
3.10	Comparação entre as respostas em frequência de filtros <i>Butterworth</i> para diferentes ordens de filtragem.	47
3.11	Resposta em frequência do filtro <i>Butterworth</i> de ordem $n = 23$	48
3.12	Filtro aplicado a um sinal sintético de ruído gaussiano branco.	48
3.13	Picos de correlação do Sinal-chave com a duração igual a janela de processamento em diferentes instantes de chegada.	50
3.14	Picos de correlação do Sinal-chave com a duração igual a metade da janela de processamento em diferentes instantes de chegada mantendo $T_A < T_W/2$	52
3.15	Picos de correlação do Sinal-chave com a duração igual a metade da janela de processamento em diferentes instantes de chegada mantendo $T_A > T_W/2$	52
3.16	Esquema simplificado ilustrando um <i>buffer</i> deslizante.	53
3.17	Formato característico da janela de Hann.	54
3.18	Forma de onda do sinal que será transmitido do projetor acústico e correlação deste como o Sinal-chave.	55
4.1	Regiões susceptíveis a vazamento alvo do teste de estanqueidade.	57
4.2	Pressurização do invólucro e posicionamento no tanque de prova para teste de estanqueidade.	58
4.3	Teste de acionamento do motor utilizando comando enviado pelos pinos GPIO da Raspberry Pi.	59
4.4	Raspberry Pi utilizada no protótipo e conjunto eletromecânico interno. 60	60

4.5	Curva característica de operação do receptor.	63
4.6	Local de realização do experimento destacando a distância aproximada entre o projetor e o receptor. O valor considerado para cálculos foi de 500 <i>m</i>	64
4.7	Resultado do processamento da gravação através do algoritmo de detecção nos trechos cujos níveis da fonte foram de 182 <i>dB</i> e 188 <i>dB</i> , respectivamente.	67
4.8	Perda na transmissão estimada pelo modelo TRACEO no o ambiente onde foi realizado o ensaio.	68
4.9	Versão final do protótipo montado para a prova de mar.	69
4.10	Infográfico ilustrando a escala TRL	71
A.1	Níveis espectrais do ruído no ambiente marinho. Retirado de [45]. . .	80

Lista de Tabelas

4.1	Relação entre o volume do amplificador, a tensão de saída e o nível de fonte alcançado com o projetor ITC-1001.	65
4.2	Registro de emissão do Sinal-chave durante o ensaio com projetor e receptor submarinos.	66
4.3	Relação entre a tensão aplicada e o alcance estimado em que o sinal poderá ser distinguido pelo liberador acústico.	69
4.4	Resumo das principais características do protótipo de liberador desenvolvido neste trabalho.	70
D.1	Resumo das principais características do liberador Sonardyne LTR.	91

Lista de Símbolos

A_R	Área resistente à pressão aplicada no vaso, p. 9
D_0	Decisão referente a hipótese H_0 no sistema de detecção, p. 33
D_1	Decisão referente a hipótese H_1 no sistema de detecção, p. 33
E	Operador esperança, p. 31
F	Força associada ao movimento da cerâmica, p. 15
F_P	Força resultante da pressão aplicada no interior do vaso, p. 9
H	Profundidade, p. 22
H_0	Hipótese nula da matriz de decisão binária, p. 33
H_1	Hipótese alternativa da matriz de decisão binária, p. 33
I	Corrente elétrica nos terminais da cerâmica, p. 15
I_0	Intensidade acústica em um ponto de referência (definido a 1 m de distância da fonte), p. 20
L	Comprimento do vaso de pressão cilíndrico, p. 9
M_O	Sensibilidade do hidrofone [dB], p. 29
P_D	Probabilidade de detecção, p. 33
P_{FA}	Probabilidade de falso alarme, p. 33
R	Distância de propagação em relação à fonte emissora, p. 23
$R_{XY}(\tau)$	Correlação cruzada entre dois PEESA, p. 31
S	Salinidade, p. 22
SPL	Nível de pressão sonora [dB], p. 29
T	Tempo total de duração do sinal, p. 42

TL	<i>Transmission Loss</i> relativa à todos os efeitos considerados [dB], p. 23
TL_{ABS}	<i>Transmission Loss</i> relativa à perda por absorção no meio submarino [dB], p. 23
TL_{CIL}	<i>Transmission Loss</i> relativa à propagação cilíndrica [dB], p. 21
TL_{ESF}	<i>Transmission Loss</i> relativa à propagação cilíndrica [dB], p. 21
TL_{GEO}	<i>Transmission Loss</i> relativa à perda por espalhamento geométrico [dB], p. 23
T_I	Intervalo entre sinais transmitidos, p. 51
T_c	Temperatura do oceano em graus Celsius, p. 22
T_A	Instante de chegada do Sinal-chave dentro da janela, p. 49
T_{EM}	Coefficiente de transdução elétrico-mecânico, p. 15
T_{ME}	Coefficiente de transdução mecânico-elétrico, p. 15
T_{ST}	Tempo de duração do sinal emitido, p. 51
T_W	Tempo de duração da janela de processamento, p. 49
V	Tensão elétrica nos terminais da cerâmica, p. 15
VL	Nível de Tensão elétrica [dB], p. 29
Z_E	Impedância elétrica da cerâmica, p. 15
Z_M	Impedância mecânica da cerâmica, p. 15
α	Coefficiente de absorção em água salgada, p. 22
\propto	Proporcionalidade entre grandezas, p. 21
σ_L	Tensão na parede lateral do vaso, p. 9
σ_T	Tensão na parede superior (tampo) do vaso, p. 9
$a[n]$	Vetor discreto com n amostras de uma variável, p. 31
$b[-n]$	Vetor discreto invertido com n amostras de uma variável, p. 31
$b[n]$	Vetor discreto com n amostras de uma variável, p. 31

$c[n]$	Vetor discreto resultante da convolução com n amostras, p. 31
e_p	Espessura da parede do vaso de pressão, p. 9
f	Frequência, p. 22
f_0	Frequência inicial da banda de um sinal de frequência modulada, p. 42
f_1	Frequência final da banda de um sinal de frequência modulada, p. 42
f_C	Frequência central do Sinal-chave, p. 46
f_N	Frequência de Nyquist. Máxima frequência que se deseja observar., p. 45
f_S	Frequência de amostragem, p. 45
f_c	Frequência constante característica do tom, p. 42
$f_i(t)$	Frequência instantânea do sinal em função do tempo, p. 42
n_R	Número de amostras do Sinal-chave disponíveis para a filtragem casada na janela de processamento em que o sinal é captado, p. 50
n_P	Números de divisões da janela de processamento, p. 51
p	Pressão aplicada no interior do vaso, p. 9
pH	Escala de acidez e basicidade pH, p. 22
r_e	Raio externo do vaso de pressão, p. 9
r_i	Raio interno do vaso de pressão, p. 9
$r[n]$	Vetor discreto resultante da correlação com n amostras, p. 31
u	Velocidade associada a vibração da cerâmica, p. 15
$w(n)$	Valor do ganho calculado com a função de Hann na amostra n , p. 54
$x(t)$	Réplica do Sinal-chave, p. 31
$y^*(t + \tau)$	Complexo conjugado do trecho de sinal medido, p. 31

Lista de Abreviaturas

<i>SPL</i>	<i>Sound Pressure Level</i> , p. 29
<i>VL</i>	<i>Voltage Level</i> , p. 29
<i>CW</i>	<i>Continuous Wave</i> , (tom), p. 42
<i>GPIO</i>	<i>General-Purpose Input/Output</i> , p. 30
<i>HFM</i>	<i>Hyperbolic Frequency Modulated</i> , (chirp hiperbólico), p. 42
<i>IEAPM</i>	Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, p. 4
<i>LFM</i>	<i>Linear Frequency Modulated</i> , (chirp linear), p. 42
<i>NL</i>	<i>Noise Level</i> , p. 66
<i>PEESA</i>	Processo Estocástico Estacionário no Sentido Amplo, p. 31
<i>PVC</i>	Policloreto de Vinila, p. 35
<i>PZT</i>	Titanato Zirconato de Chumbo, p. 14
<i>SI</i>	Sistema Internacional de Unidades, p. 7
<i>SL</i>	<i>Source Level</i> , p. 18
<i>SNR</i>	<i>Signal to Noise Rate</i> , p. 32
<i>TL</i>	<i>Transmission Loss</i> , p. 20
<i>TVR</i>	<i>Transmitting Voltage Response</i> , p. 17

Capítulo 1

Introdução

Desde o início da história, o oceano é fonte de interesse econômico e estratégico para todo país que possui área litorânea. Estima-se que cerca de 90% das mercadorias comercializadas ao redor do globo são transportadas através de vias marítimas fazendo deste modal o principal tipo de transporte para o comércio internacional. O Brasil nunca foi exceção a essa regra e atualmente a economia marítima representa cerca de 20% do Produto Interno Bruto (PIB) do país [1].

Dada a sua importância, o espaço marítimo foi alvo de disputas territoriais ao longo da história e hoje, após estabelecidos os tratados que definem os direitos de cada Estado sobre sua exploração e uso [2], atrai investimentos nas mais diversas áreas de tecnologia e requer apropriação e patrulhamento visando garantir a soberania nacional [3].

Além disso, o oceano desempenha papel de destaque como um grande influenciador do clima global através das circulações, de larga e meso escala, e dos biomas que abriga [4–8]. Estima-se que existam cerca de 1 milhão de espécies vivas no planeta Terra e destas 250 mil habitam os oceanos [9].

O oceano promove o equilíbrio térmico do planeta absorvendo o calor durante o período de incidência solar e liberando-o à noite. O calor específico¹ da água é cerca de mil vezes maior que o do ar e se destaca entre as substâncias naturais existentes. Aliando esse fator a grande quantidade de água que cobre a superfície do planeta fica clara a importância do oceano nesse equilíbrio térmico que é fundamental para a existência da vida como conhecemos.

Dada sua relevância e reconhecendo que ainda há muito a se descobrir, o estudo do mar vem crescendo e ganhando notoriedade por todo o planeta à medida que o desenvolvimento tecnológico permite entender, cada vez mais, sua riqueza [10].

¹Calor específico é uma grandeza física intensiva que define a variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor. Também é chamado de capacidade térmica mássica. A unidade no SI é J/(kg.K) (Joule por quilograma e por Kelvin). Uma unidade usual bastante utilizada para calores específicos é cal/(g °C) (caloria por grama e por grau Celsius).

Em todas as áreas da pesquisa, executar medições *in situ* é fundamental para entender fenômenos naturais ou validar modelos numéricos [11, 12]. E no oceano, instalar e manter instrumentos de medição ao longo da coluna d'água não é uma tarefa simples. Os liberadores acústicos, tema central desta dissertação, são equipamentos desenvolvidos para auxiliar nessa tarefa pois permitem localizar e recuperar equipamentos utilizados para efetuar tais medições.

Porém o ambiente marinho impõe desafios. É preciso lidar com a degradação causada pelas características químicas, visto que o ambiente provoca corrosão acelerada devido a presença de sais dissolvidos, características físicas, devido a variação de temperatura, pressão e ação das correntes marinhas e características biológicas, devido a presença de animais e microrganismos que provocam bioincrustação acelerada no ambiente de águas rasas.

1.1 Conceito e aplicações de liberadores acústicos

Liberadores acústicos são atuadores largamente utilizados para recuperar equipamentos submersos ou para expor a localização de um equipamento que se deseja inspecionar em um fundeio oceanográfico ou em uma estação submersa através de um comando remoto que utiliza um sinal acústico [13].

A grande vantagem do uso de um liberador é dispensar ou reduzir a necessidade de executar mergulhos, o que é particularmente de interesse quando se trata de profundidades acima da capacidade humana.

A expressão fundeio oceanográfico se refere a um conjunto de equipamentos postos no oceano para obtenção de séries temporais, ou seja, medições de variáveis (temperatura, pressão, ruído) ao longo do tempo [14]. Um fundeio oceanográfico é lançado com objetivo de que permaneça em uma localização fixa. Para tal, são utilizadas poitas² em uma das extremidades da linha de fundeio e boias de superfície na outra extremidade. Os sensores e instrumentos de medição são postos na profundidade desejada, em relação à coluna d'água, ao longo do cabo que liga a boia à poita.

O liberador é projetado como uma câmara estanque de forma a garantir a integridade do equipamento eletrônico localizado na sua parte interna. Por ser um dispositivo autônomo, um dos desafios de seu projeto é dimensionar e otimizar seu consumo de energia para que possa permanecer submerso pelo tempo necessário a aquisição dos dados. A função do liberador, ao receber um sinal acústico específico, é separar (“liberar”) parte do conjunto fundeado para a superfície. A Figura 1.1 esquematiza a aplicação de um liberador acústico que, comandado pela comunicação

²Poita é a denominação dada a um peso de ferro, chumbo ou pedra utilizado para afundar ou manter um objeto em contato com o fundo.

entre um projetor acústico na embarcação e um hidrofone que o compõe, separa parte da linha de fundeio para à superfície.

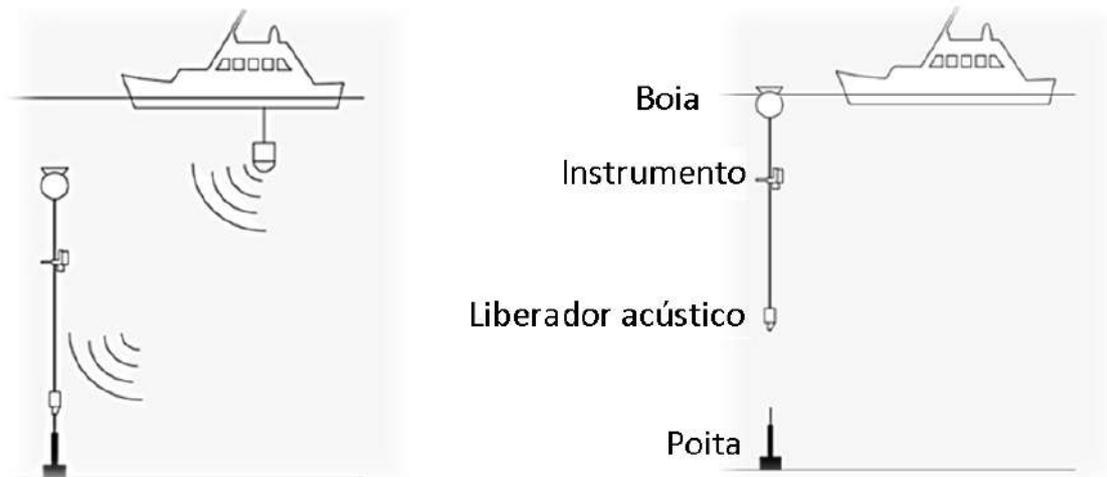


Figura 1.1: Aplicação de um liberador acústico na recuperação de equipamentos submersos.

Diversas áreas da oceanografia e da indústria marítima se beneficiam destes equipamentos utilizando-os para monitoramento ambiental e sísmico, acionamento em instalações off-shore, monitoramento militar de tráfego submarino, entre outras [15].

É possível prever que a funcionalidade do equipamento dependerá de uma comunicação bem-sucedida entre os dois pontos. Por isso, o desenvolvimento de algoritmos de comunicação para controlar atuadores submersos acionados por pulsos sonoros é uma das áreas de estudo da acústica submarina.

Controlar equipamentos remotamente é uma prática comum quando se utilizam pulsos eletromagnéticos (rádio, micro-ondas, infravermelho) e o ar é o meio de propagação da onda. No meio submarino, a propagação de ondas eletromagnéticas exige frequências de transmissão extremamente baixas [16], caso contrário, a propagação será fortemente atenuada e limitará o alcance do sinal emitido. Além disso, os equipamentos necessários para essa comunicação a tornam quase inviável visto que as antenas de transmissão e recepção teriam tamanho da ordem de meio comprimento de onda da frequência encolhida para o sinal [16].

Sistemas de comunicação submarina utilizando ondas eletromagnéticas continuam sendo desenvolvidos buscando aproveitar as características positivas no que diz respeito a livre passagem entre diferentes meios e a suposta ausência de impacto ambiental durante a transmissão [17–19]. Porém, quando o sinal emitido não tem o objetivo de atravessar fronteiras entre dois meios diferentes e o objetivo é a propagação na água, a energia acústica atinge maior alcance e tem melhor relação entre

desempenho e estrutura necessária para transmissão.

Dessa forma, ondas mecânicas (sonoras) se apresentam como solução, mas ainda assim, o meio submarino carrega peculiaridades quanto ao perfil de velocidade de propagação do som (estratificado e dinâmico), interação com as fronteiras na superfície e leito marinho e quanto a presença de ruído ambiente em faixas de frequência relativamente próximas às que são desejáveis para a comunicação [20].

Em um fundeio oceanográfico ou em equipamentos autônomos, onde não há conexão física com a plataforma de controle, para que a comunicação seja bem-sucedida o equipamento submerso precisa ser capaz de interpretar um sinal recebido em meio ao ruído presente e compará-lo com um sinal predefinido através de um algoritmo de decisão embarcado, para então executar um comando específico [21]. No caso do liberador acústico a tarefa é separar parte do conjunto fundeado. Felizmente, neste caso, é possível escolher um sinal conveniente e mantê-lo armazenado no equipamento para efetuar a comparação.

1.2 Motivação para o trabalho

A motivação deste trabalho é desenvolver um protótipo com aplicação real. Tendo, atualmente, pouca disponibilidade para aquisição no mercado nacional, liberadores acústicos são equipamentos muito úteis às pesquisas oceanográficas. Por isso, adquirir a capacidade de construí-los será de grande valia para futuras pesquisas dentro do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM).

Além disso, o fato de abranger várias áreas da engenharia e a capacidade de integrar sistemas desenvolvidos para atender requisitos específicos incentiva a versatilidade e dinâmica da pesquisa, tornando-a desafiadora.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um protótipo de liberador acústico de baixo custo apresentando soluções viáveis no que diz respeito a comunicação acústica, invólucro estanque e acionamento eletromecânico.

Os objetivos específicos a serem atingidos são:

- Projetar o invólucro e mecanismo de liberação testando-os no tanque de prova e no mar para validação;
- Propor e testar soluções de baixo custo para a construção dos componentes eletromecânicos e de controle necessários ao seu funcionamento;
- Avaliar a aplicação de transdutores piezoelétricos e interface eletrônica/computacional disponíveis;
- Pesquisar e aplicar técnicas de comunicação acústica e processamento de sinais identificando as características mais apropriadas para os principais parâmetros do sinal acionador do dispositivo, tais como a forma de onda do sinal e sua faixa de frequência além das etapas de pré-processamento necessárias.

1.4 Organização da dissertação

Essa dissertação, dividida em cinco capítulos, foi organizada conforme descrito a seguir.

Neste Capítulo 1, visou-se contextualizar o tema deste trabalho, expor, de maneira sucinta, algumas das aplicações dos liberadores acústicos em pesquisas oceanográficas e na indústria naval. Além disso, foram apresentados a motivação que justificou a pesquisa e, por fim, os objetivos que esperávamos alcançar.

O projeto de um equipamento e construção de seu protótipo são desafios que certamente reúnem diversas áreas de conhecimento. No Capítulo 2 serão abordados os conceitos necessários para concepção do projeto. Incluindo as referências ligadas ao aspecto construtivo e os tipos de acionamento de alguns modelos de liberadores acústicos existentes. Em seguida, reconhecendo que o ponto principal deste trabalho é, necessariamente, o estudo da comunicação acústica entre a plataforma de comando e o dispositivo autônomo, são apresentadas as características dos projetores, do meio de propagação, do hidrofone (elemento sensor na captação do sinal acústico) e apresenta-se a teoria de detecção utilizada para viabilizar o acionamento do liberador.

No Capítulo 3, com base na teoria apresentada, descreve-se o conceito aplicado ao desenvolvimento do invólucro estanque. Em seguida apresenta-se o mecanismo e componentes eletromecânicos escolhidos como possível solução para o protótipo de baixo custo. São expostos os critérios e testes executados para escolher o Sinal-chave do liberador e, por fim, são apresentadas as etapas de processamento e controle do conjunto eletromecânico através da plataforma embarcada no dispositivo.

A complexidade do projeto exige como boa prática que os sistemas sejam testados separadamente, porém cada etapa e componente deve ser dimensionado visando sua utilização no dispositivo completo.

No Capítulo 4 serão apresentados e descritos os testes executados para validação do protótipo durante seu desenvolvimento no que diz respeito à estanqueidade, controle e acionamento do dispositivo através do processador embarcado e a robustez do algoritmo de decisão utilizado.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros que podem explorar os resultados desta pesquisa.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos necessários para concepção do liberador acústico. A fundamentação teórica que envolve todo o desenvolvimento é bastante vasta, portanto, neste trabalho, foram evidenciados apenas os pontos fundamentais ao entendimento desta dissertação.

2.1 Resistência a pressão e vedações

Os primeiros parâmetros analisados para viabilizar o uso de um equipamento submerso no oceano são a resistência a pressão gerada pela coluna d'água, a estanqueidade do seu invólucro (garantindo que os componentes eletrônicos não entrem em contato com a água) e a resistência a corrosão dos materiais utilizados, especialmente aqueles que estarão em contato direto com o meio marinho.

Assim como a biodegradação, a corrosão pode ser atenuada através da seleção de materiais poliméricos inertes e metais inoxidáveis. A bioincrustação em um equipamento submerso é inevitável e, portanto, os componentes móveis devem ser protegidos ao máximo do contato direto como o meio submarino.

A resistência a pressão terá um dimensionamento mais preciso. No sistema internacional de unidades (SI) a pressão é medida em Pascal (Pa). A pressão de $1 Pa$ equivale à aplicação de uma força de $1 N$ sobre uma área de $1 m^2$, $1 Pa = 1 N/m^2$ ou, utilizando as grandezas fundamentais, $1 Pa$ equivale a $1 kg/m.s^2$. Diversas unidades podem ser utilizadas para medição de pressão dependendo da área de estudo ou fonte utilizada. Por esse motivo, a equivalência entre as unidades mais comuns será evidenciada na Equação 2.1. Tomando como referência a pressão atmosférica padronizada ao nível do mar de uma atmosfera:

$$1 atm = 101325 Pa = 1,01 bar = 10,33 mca = 14,70 psi; \quad (2.1)$$

onde *mca* significa 'metros de coluna d'água' (água doce a temperatura de 4°C) e *psi* 'libra-força por polegada quadrada' (*pound-force per square inch*).

Ao referir-se à pressão exercida pela coluna d'água é conveniente memorizar a relação com a unidade *mca*. Isso porque haverá uma associação direta com a profundidade. O valor da pressão manométrica exercida pela coluna d'água em função da profundidade é calculado através da equação conhecida como lei de Stevin,

$$\begin{aligned} P_H &= \rho gh \\ h &= \frac{P_H}{\rho g}. \end{aligned} \tag{2.2}$$

Substituindo os valores da pressão atmosférica ($P_H = 101325 \text{ Pa}$), massa específica da água doce ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) e gravidade ($9,81 \text{ m/s}$) chega-se ao valor tabelado de aproximadamente $10,33 \text{ m}$. No entanto, a densidade da água do mar é ligeiramente maior devido a presença de sais dissolvidos. O valor médio considerado para a densidade da água salgada é $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$ e, dessa maneira, o valor equivalente de coluna d'água reduz-se à $10,03 \text{ m}$. Reescrevendo 2.1:

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 1,01 \text{ bar} = 10,03 \text{ mca}_{MAR} = 14,70 \text{ psi}; \tag{2.3}$$

A pressão na superfície do oceano é igual a 1 atm e considera-se a aproximação de que a pressão aumentará de mais 1 atm a cada 10 m de profundidade. Dessa maneira, numa profundidade de 10 metros a pressão será igual a 2 atm ou 2 bar , a 20 metros será igual a 3 atm ou 3 bar e assim sucessivamente. Vale ressaltar que os valores apresentados são valores de pressão absoluta. Valores de pressão manométrica serão menores por considerar a pressão de referência ao nível do mar igual a zero.

Um equipamento submerso, modelado como um vaso de pressão, pode ser projetado, quanto a pressão diferencial entre as superfícies interna e externa, para trabalhar sob três diferentes regimes: pressão equalizada, positiva ou negativa.

A opção que expõe o equipamento ao menor esforço solicitante é, naturalmente, a condição de pressão equalizada. Se a pressão no interior do vaso é exatamente igual a pressão no exterior, as paredes do vaso de pressão não sofrerão tensões devido à pressão. Infelizmente, o regime de pressão equalizada exigiria que a pressão externa fosse ajustada para uma profundidade específica e que as vedações fossem tensionadas na montagem o que só seria possível com o uso de fechamento roscado para o invólucro, dimensionado exclusivamente para a aplicação.

A proposta deste trabalho é projetar um equipamento utilizando materiais de baixo custo e de fácil acesso, disponíveis no mercado. Desse modo, um diferencial

de pressão entre as paredes do vaso será mantido propositalmente para forçar a compressão dos anéis de vedação e assim contribuir com a estanqueidade do equipamento. Dois regimes de pressão são possíveis nesse contexto, pressão positiva ou pressão negativa.

Um vaso cilíndrico submetido a pressão positiva sofrerá apenas esforço de tração e as tensões em suas paredes podem ser calculadas conforme mostrado a seguir. Definindo os raios interno e externo do vaso como r_i e r_e , respectivamente, a espessura da parede, e_p , e o comprimento do vaso cilíndrico, L .

$$r_i = r_e - e_p; \quad (2.4)$$

A tensão na parede lateral do vaso é:

$$\sigma_L = \frac{F_P}{A_R}; \quad (2.5)$$

Onde a força devido à pressão (aplicada no interior do vaso), p , é F_P e a área resistente, A_R ;

$$F_P = p \pi r_i L; \quad (2.6)$$

$$A_R = 2 e_p L; \quad (2.7)$$

Substituindo 2.4, 2.6 e 2.7 em 2.5, tem-se:

$$\sigma_L = \frac{p \pi (r_e - e_p)}{2 e_p} \quad (2.8)$$

Já a tensão na parede superior (tampo) do vaso é dada por:

$$\sigma_T = \frac{F_P}{A_R}; \quad (2.9)$$

$$F_P = p \pi r_i^2; \quad (2.10)$$

$$A_R = \pi (r_e^2 - r_i^2); \quad (2.11)$$

Substituindo 2.10 e 2.11 em 2.9:

$$\sigma_T = \frac{p (r_e - e_p)^2}{[2 r_e e_p - (e_p^2)]} \quad (2.12)$$

Por outro lado, um vaso cilíndrico submetido a pressão negativa sofrerá, além das tensões normais descritas anteriormente, esforços transversais que obrigam considerar a possibilidade de flambagem da parede. Com isso, o vaso projetado, potencialmente iria requerer uma espessura de parede maior. Além disso, como a pressão externa irá aumentar proporcionalmente com a profundidade, um vaso submetido

a pressão negativa sofrerá esforços maiores quanto maior a profundidade a que for submetida.

Neste trabalho, considerando a viabilidade de execução e os parâmetros descritos, o regime de pressão escolhido para o invólucro foi o de pressão positiva.

O segundo parâmetro pertinente ao projeto do liberador é a estanqueidade do dispositivo. Em outras palavras, a capacidade do invólucro permanecer isolado do ambiente, sem entrada de água que cause danos ao equipamento.

As vedações comumente utilizadas para fechamento de sistemas pressurizados que não serão submetidos a altas temperaturas ou produtos corrosivos são os anéis de elastômero (*o-rings*). Como foi citado anteriormente nas discussões sobre o regime de pressão no vaso, o funcionamento de um anel de vedação requer seu posicionamento entre duas superfícies de forma que ele seja comprimido e a existência de um diferencial de pressão entre a câmara interna do cilindro e o ambiente externo favorece a vedação. As vedações principais do invólucro do equipamento serão anéis de elastômero alojados de forma a serem comprimidos pela pressão no interior do vaso.

Além dessas vedações simples, a concepção desenvolvida neste projeto utilizará vedações dos tipos retentor e selo mecânico. Diferente das vedações utilizando anéis de elastômero, retentores e selos mecânicos são indicados para utilização em componentes pressurizados que terão movimento relativo entre partes do conjunto. Eles são comumente aplicados em eixos de bombas, compressores, cilindros hidráulicos ou pneumáticos e em eixos de navios. A Figura 2.1 apresenta os esquemas de vedação utilizando um retentor e um selo mecânico, respectivamente.

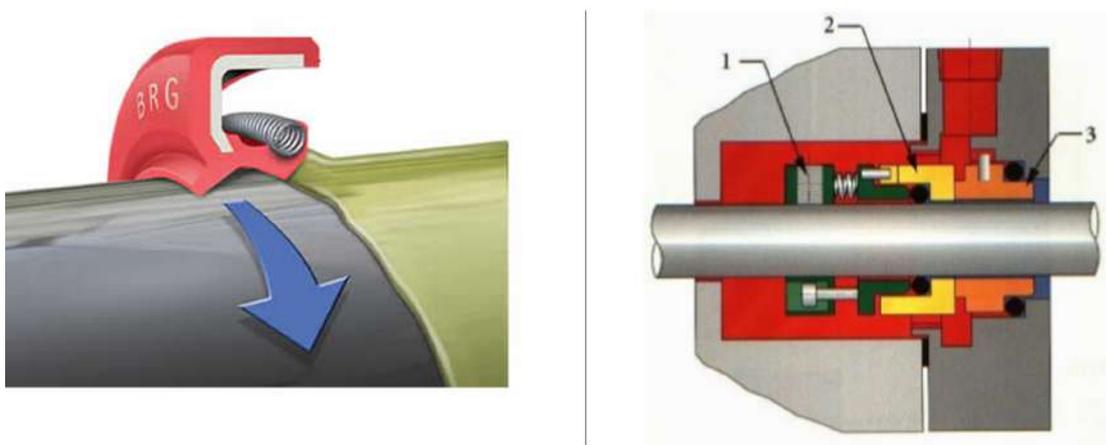


Figura 2.1: Retentor de lábio montado no eixo; Retirado de www.oliveirarolamentos.com.br/retentores_informacao. Selo mecânico indicando o suporte para a mola (1), face rotativa (2) e a face estacionária (3). Retirado de <http://orionvedacoes.com.br/portfolio/selos-mecanicos/> Acesso em 05/08/2022.

Os retentores de lábio são o tipo mais comum de vedação para eixos e consistem em um lábio flexível que veda contra o eixo. Eles são relativamente simples e baratos, mas podem não ser adequados para aplicações de alta pressão ou alta temperatura.

Os selos mecânicos usam uma face rotativa e outra estacionária para criar uma vedação estanque ao redor do eixo. Eles são o tipo mais eficaz de vedação para eixos, mas também os mais caros e requerem mais manutenção.

O objetivo desses dois tipos de vedação é o mesmo: Isolar duas câmaras ou compartimentos que são atravessados por um eixo ou haste. Em um navio, por exemplo, o eixo que conecta o motor ao hélice inevitavelmente atravessa o casco (invólucro). Claramente o embarque (entrada) de água é indesejável e, em geral, usa-se um sistema de selagem com um selo mecânico para manter a estanqueidade do compartimento de máquinas.

A concepção de projeto escolhida neste trabalho utiliza uma vedação composta por um conjunto retentor e selo mecânico para vedar o local por onde o eixo atravessa o invólucro.

A seleção das vedações depende da geometria e requisitos de operação do equipamento. Para um *o-ring*, dimensiona-se o tipo de borracha, diâmetro do cordão e comprimento total. Para os retentores, além do material de sua composição, é necessário o diâmetro do eixo, diâmetro do alojamento, diferencial de pressão e velocidade de rotação do eixo. Por fim, o dimensionamento do selo mecânico leva em conta todos os requisitos citados para o retentor e traz a necessidade do ajuste da fricção entre as faces rotativa e estacionária equilibrando a carga no eixo, desgaste da face rotativa e a estanqueidade da vedação.

2.2 Tipos de acionamento para atuadores

Vários modelos de liberadores acústicos podem ser encontrados no mercado e utilizam diferentes princípios físicos para o mecanismo de liberação. Para listar algumas das possibilidades de projeto, serão apresentadas algumas concepções desenvolvidas e aplicadas nos produtos disponíveis.

Para aplicações de pequeno porte, o conceito implementado pela *Desert Star Systems* no modelo ARC-1 (Figura 2.2), utiliza eletrodos para gerar corrente elétrica e romper um fio metálico que funciona como fusível, liberando parte do conjunto. Como não há nenhum componente atravessando o invólucro além dos eletrodos, que são elementos estáticos, este projeto é vantajoso no que diz respeito as vedações. A desvantagem desse conceito é que, para atingir a temperatura necessária para que o curto-circuito rompa o elemento fusível imerso em água (cuja temperatura varia com a posição geográfica e época do ano, podendo alcançar valores próximos ao mínimo de 4°C [22]), é necessária aplicação de uma corrente instantânea elevada

e a utilização de uma liga metálica específica que resista ao esforço de tração no cabo e tenha ponto de fusão adequado. Essas soluções exigem o desenvolvimento de tecnologia de materiais que não fazem parte do escopo desse trabalho. A Figura 2.2 mostra em detalhe os eletrodos e o elo fusível usados para liberação (a esquerda). Na mesma figura é apresentado o movimento executado pelo mecanismo, quadro a quadro, e o tempo estimado para abertura.



Figura 2.2: Liberador acústico utilizado em águas rasas e cargas leves. Fabricado pela *Desert Star Systems*; Modelo: ARC-1. Retirado de: <https://www.desertstar.com/page/arc-1xd>. Acesso em 31/08/2022.

Outro conceito bastante utilizado em liberadores, especialmente aqueles projetados para suportar cargas maiores, é o que utiliza fechaduras ou tranças eletromagnéticas. O modelo Oceano 5000S da *iXblue* é fabricado utilizando esse princípio (<https://www.ixblue.com/maritime/subsea-positioning/acoustic-releases/>). Seu funcionamento se assemelha a uma fechadura elétrica convencional utilizada em portões e automóveis. Ao receber o sinal correto, um eletroímã é energizado e provoca a abertura da tranca. Assim como o modelo citado anteriormente, este não possui componentes móveis atravessando a carcaça (invólucro) e, portanto, utiliza apenas vedações para componentes estáticos. Este tipo de acionamento permite a construção de um equipamento mais robusto, trazendo a vantagem de permitir sua utilização em linhas de fundeio cuja tração no cabo (carga) é maior. A desvantagem é a complexidade da fabricação dos componentes dessa tranca. A Figura 2.3, adaptada de [14], apresenta esse modelo de liberador e detalha alguns componentes:

1. o projetor acústico utilizado para envio do sinal ao equipamento submerso;
2. o liberador acústico propriamente dito;
3. o módulo de superfície utilizado para transmitir o sinal através do projetor acústico;
4. detalhamento da tranca fechada;
5. detalhamento da tranca aberta.



Figura 2.3: Liberador acústico utilizado em águas profundas. Fabricado pela *IxBlue*; Modelo: OCEANO 5000S. Retirado de [14].

Por fim, o terceiro conceito apresentado utiliza um motor elétrico cujo eixo atravessa a carcaça. Um exemplo de aplicação é o modelo RT 6-1000 fabricado pela *Sonardyne* apresentado na Figura 2.4. A extremidade do eixo possui uma rosca onde uma porca é conectada para efetuar a liberação de parte do conjunto. A porca tem seu movimento de rotação travado e, por isso, desloca-se axialmente quando o motor gira. Ao detectar o sinal correto, o dispositivo aciona o motor e solta a porca em sua extremidade.



Figura 2.4: Liberador acústico utilizado em águas rasas e cargas leves. Fabricado pela *Sonardyne*; Modelo: RT 6-1000. Retirado de https://www.sonardyne.com/wp-content/uploads/2021/11/Sonardyne_7986_lrt_2021.pdf. Acesso em 31/08/2022.

Esse conceito utiliza vedações especiais para o eixo que passa do interior para o exterior da carcaça e entrará em movimento quando acionado. Para isso são utilizados retentores ou selos mecânicos. Apesar dessa desvantagem, a concepção

permite uma construção compacta e relativamente robusta, possibilitando aplicação em uma linha de fundeio cuja tração no cabo seja suportada pelo conjunto eixo e porca.

2.3 Características dos projetores acústicos

Conforme mencionado anteriormente, para comandar o dispositivo submerso emitindo o sinal que o fará atuar, liberando assim parte do conjunto fundeado, é necessário utilizar um projetor acústico.

Equipamentos capazes de transformar uma forma de energia em outra são chamados de transdutores. Nosso interesse nesse trabalho está nos transdutores capazes de transformar energia elétrica em pressão acústica e vice-versa. Esse são denominados como transdutores eletroacústicos. Quando a energia elétrica é transformada em energia sonora o transdutor é chamado de projetor acústico, enquanto aquele que efetua o caminho inverso, convertendo a pressão acústica em sinal elétrico, é chamado de hidrofone [23].

Para dimensionar ou selecionar um transdutor eletroacústico é imprescindível considerar em que ambiente ele será aplicado [24]. As propriedades acústicas do meio, neste caso, o oceano, impõem um tratamento significativamente diferente quando comparado a um transdutor que opera no ar, por exemplo. Além disso, deve-se lidar com a pressão hidrostática, corrosividade, condutividade e intensa atividade biológica presente [25].

Atualmente, a maioria dos transdutores fabricados para aplicações de acústica submarina utilizam como principal componente uma cerâmica composta de materiais policristalinos. O mais comum é o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) que apresenta baixas perdas elétricas e altos coeficientes de acoplamento [26].

O PZT, propriamente dito, é uma solução sólida de $PbZrO_3$ e $PbTiO_3$ (Zirconato e Titanato de Chumbo, respectivamente), porém, as cerâmicas fabricadas com base nesse material oferecem variações nas suas propriedades que são alcançadas através de pequenas mudanças na composição. Para adquirir propriedades piezoelétricas, tais materiais são submetidos a polarização. Em termos gerais, o processo ocorre pela aplicação de um campo elétrico intenso a uma temperatura específica [27, 28]. Conforme a geometria desejada, a polarização da cerâmica é feita de maneira a maximizar a resposta na direção de interesse, isto é, na direção em que o projetor será excitado para transmitir o pulso sonoro desejado.

Uma classificação utilizada para distinção dessas variações quanto a aplicação e propriedades específicas foi regulamentada pela Marinha dos EUA a partir de 1970 na norma MIL-STD-1376 [29]. Por essa razão, algumas referências utilizam a nomenclatura *Navy Type* ao referir-se a cerâmica PZT. A equivalência entre as no-

menclaturas existe e pode ser encontrada na literatura. As principais categorias são a *Navy Type I* (PZT-4), *Navy Type II* (PZT-5) e *Navy Type III* (PZT-8). Curiosamente, embora a norma que originou a designação das cerâmicas piezoelétricas para a utilização militar em sistemas sonares (MIL-STD-1376) tenha sido descontinuada em 1999, a designação *Navy Type* ainda é utilizada como referência por grande parte dos fabricantes e pesquisadores.

Além do elemento piezoelétrico, que exerce papel principal na transdução, um projetor é constituído por uma série outros de elementos. De maneira simplificada, ele pode ser modelado como um oscilador harmônico amortecido restringindo-o a pequenas amplitudes de oscilação [30].

Para descrever e analisar conjuntamente a influência dos componentes mecânicos e elétricos, é comum utilizar a representação de circuito elétrico equivalente para os transdutores. Essa representação é útil para evitar o tratamento por equações diferenciais que emergiriam do problema. A analogia de impedâncias permite calcular o efeito das propriedade mecânicas na forma de impedâncias associadas ao circuito formado pelos componentes elétricos.

A Figura 2.5 mostra o modelo genérico de uma rede de duas portas e quatro terminais. Esse circuito é representativo para as cerâmicas piezoelétricas utilizadas nos transdutores e, conforme demonstrado por WILSON [25], obedecem às equações canônicas (2.13). Através dessas equações as grandezas elétricas de tensão, (V), e corrente, (I), podem ser relacionadas as gradezas mecânicas de força, (F), e velocidade, (u). Os coeficientes de transdução elétrico-mecânico (T_{EM}) e mecânico-elétrico (T_{ME}) são iguais para as cerâmicas piezoelétricas [25] e, portanto, os transdutores eletroacústicos que as utilizam podem ser considerados recíprocos.

$$\begin{aligned} V &= Z_E I + T_{EM} u; \\ F &= T_{ME} I + Z_M u; \end{aligned} \tag{2.13}$$

Um dos projetos mais comuns dentre os que utilizam cerâmicas piezoelétricas para construção de projetores aplicados a acústica submarina é o oscilador longitudinal chamado *Tonpilz*. O nome foi atribuído devido à sua geometria e pode ser traduzido do alemão como "cogumelo cantante". Os projetores modelo *Tonpilz* são do tipo pistão e possuem um eixo de irradiação preferencial em sua direção axial. A Figura 2.6 mostra os principais elementos mecânicos deste conceito, comumente utilizado em arranjos sonares de navios. O aumento proposital de dimensão na face do transdutor tem a intenção gerar ganho na intensidade acústica transmitida (maior volume de fluido deslocado) considerando uma dada expansão na cerâmica.

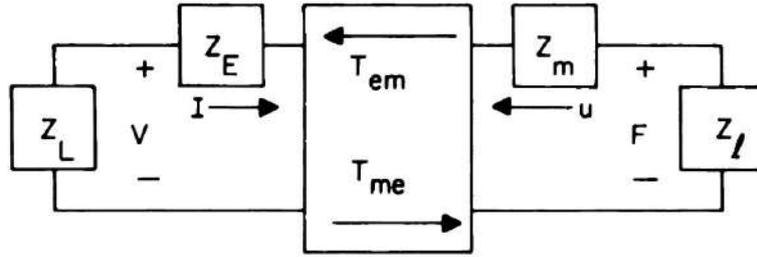


Figura 2.5: Modelo de rede de duas portas e quatro terminais utilizado na representação de cerâmicas piezoelétricas. Z indica as impedâncias do circuito e os subscritos E , m , L e l classificam-as como Elétrica, Mecânica, Carga elétrica e Carga mecânica. V e I representam as grandezas elétricas tensão e corrente, F e u , as grandezas mecânicas Força e Velocidade. Fonte: Adaptado de [25].

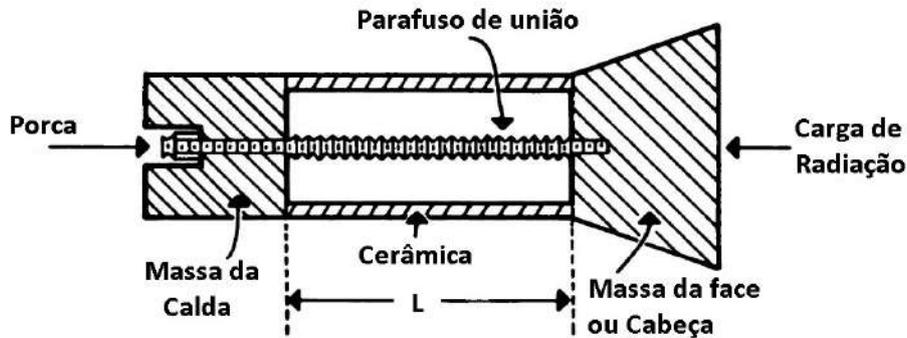


Figura 2.6: Diagrama esquemático para apresentar os principais componentes mecânicos de um transdutor de vibração longitudinal modelo *Tonpilz*. Fonte: Adaptado de [25].

Outro conceito que visa aumentar a razão entre a quantidade de fluido deslocado e a tensão na cerâmica é o projeto de transdutor conhecido como flextensional, também chamado de concha. As superfícies superior e inferior da "concha" se movem para dentro e para fora conforme o comprimento da barra central (material piezoelétrico) é alterado pela tensão elétrica aplicada. Assim, deslocamentos relativamente pequenos na cerâmica provocam deslocamento maiores em volume de fluido.

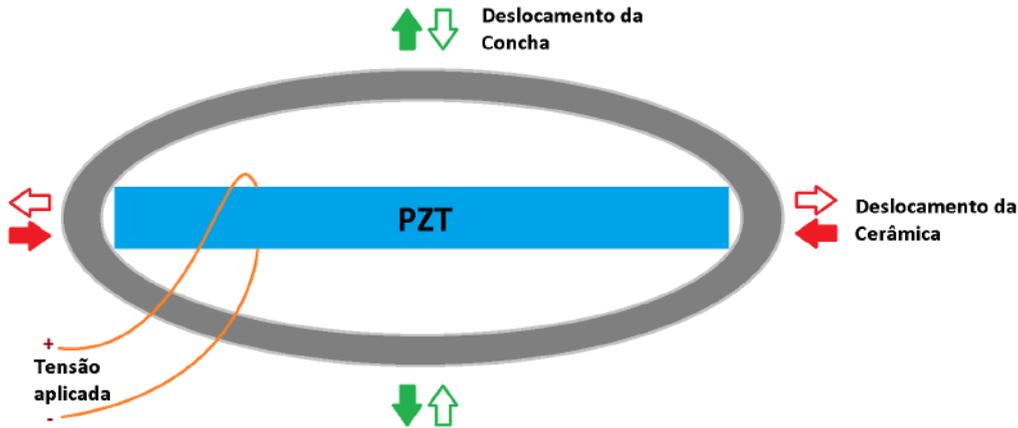


Figura 2.7: Diagrama simplificado mostrando funcionamento de um projetor flex-tensional.

Além dos dois conceitos apresentados, o modelo de projetor tipo esfera pulsante é mais uma concepção disponível para aplicações em acústica submarina. Esse conceito é o que melhor representa a aproximação de um projetor como uma fonte pontual e de padrão de irradiação isotrópico¹. Estes projetores utilizam cerâmicas no formato esférico, cuja variação do raio provoca o deslocamento do fluido ao seu redor.

O dimensionamento e a escolha de projetores acústicos depende de uma gama de fatores que relacionam-se entre si e tornam a solução complexa. Em outras palavras, não há como ganhar em todos os aspectos construtivos e, por isso, deve-se priorizar o que é preponderante à aplicação específica.

Na prática, quando o objetivo é selecionar um projetor para uma dada aplicação, utiliza-se as informações que constam na folha de dados ou manual do equipamento. Deve-se considerar os limites operacionais de tensão aplicada, potência e profundidade. Além de observar outras informações disponíveis como a resposta a excitação (TVR - *Transmitting Voltage Response*) para cálculo do alcance provável do sinal emitido. Uma análise fundamental pertinente a um projetor acústico é a observação de sua curva de impedância. Em geral, é disponibilizada a faixa de frequência na qual o transdutor opera, mas é necessário considerar a variação da impedância dentro dessa faixa. O ideal é aproximar-se da frequência de ressonância série, na qual o projetor teria melhor resposta.

As Figuras 2.8 e 2.9 mostram as curvas de impedância medidas, em função da frequência, para dois projetores distintos. O primeiro, EDO-610E, é do tipo *Tonpilz* e tem faixa de operação, indicada pelo fabricante, entre 3 *kHz* e 11 *kHz*. É um projetor extremamente robusto e capaz de operar em condições operacionais

¹Os projetores em geral são ajustados para se aproximar dessa característica. Porém, àqueles que possuem formato esférico alcançam esse parâmetro com maior naturalidade.

bastante severas, não à toa é utilizado em sistemas sonares de navios de guerra. O segundo, ITC-1001², é do tipo esfera pulsante e opera numa faixa de frequências mais ampla, de 100 *Hz* à 25 *kHz*. Esse transdutor possui a grande vantagem de apresentar uma resposta próxima a linear nas frequências acima de 10 *kHz*.

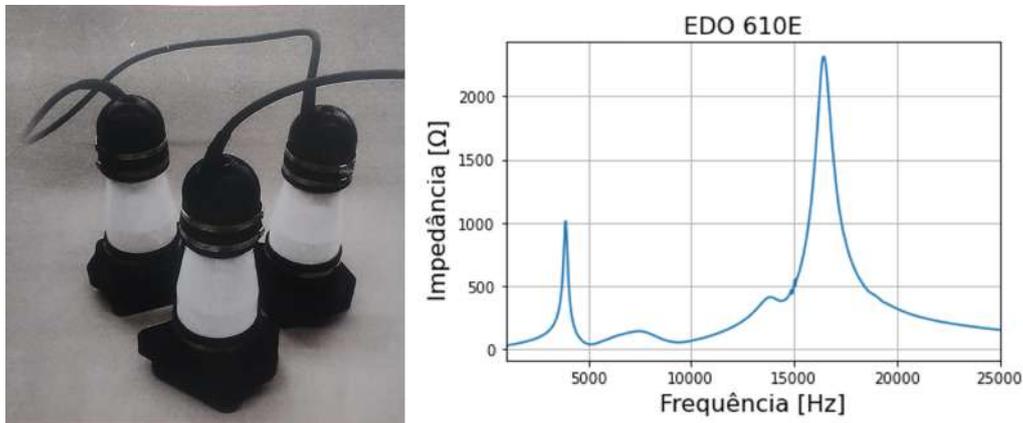


Figura 2.8: Curva de Impedância vs. Frequência do projetor acústico EDO-610E.

Um exemplo do uso das características de um projetor acústico é o cálculo do nível da fonte (*Source Level*), *SL*, um dos termos da Equação Sonar que, posteriormente, será aplicada para estimação do alcance de comunicação com o atuador submerso.

O nível da fonte, como mostrado na Equação 2.14, é calculado em decibel, *dB*, relativamente a pressão acústica de referência de 1 μPa , à distância de 1 *m* de uma fonte (considerada pontual) e de onde se propaga uma onda plana.

$$SL = TVR + 20 \log V \quad (2.14)$$

O valor de *TVR* para o projetor ITC-1001, informado pelo fabricante, é de 149 *dB* re 1 μPa @1 *m*, para a frequência de 16,5 *kHz*. Utilizando a Equação 2.14 e supondo a aplicação de 400 *V* de tensão, através de um amplificador, o nível da fonte resultante seria de 201 *dB* re 1 μPa @1 *m*.

Por fim, uma característica relevante dos projetores acústicos quando aplicados na prática é que necessariamente haverá um intervalo de tempo, no início e no final, no qual o equipamento não terá eficiência máxima. Isso pode ser visualizado em analogia a um sistema massa-mola-amortecedor (oscilador harmônico amortecido), modelo utilizado para descrever o transdutor, que, devido a inércia da massa, levará um tempo para acelerar, a partir da aplicação de uma força, e, da mesma forma, para desacelerar quando esta força cessar.

²A ficha técnica completa consta no Apêndice C.

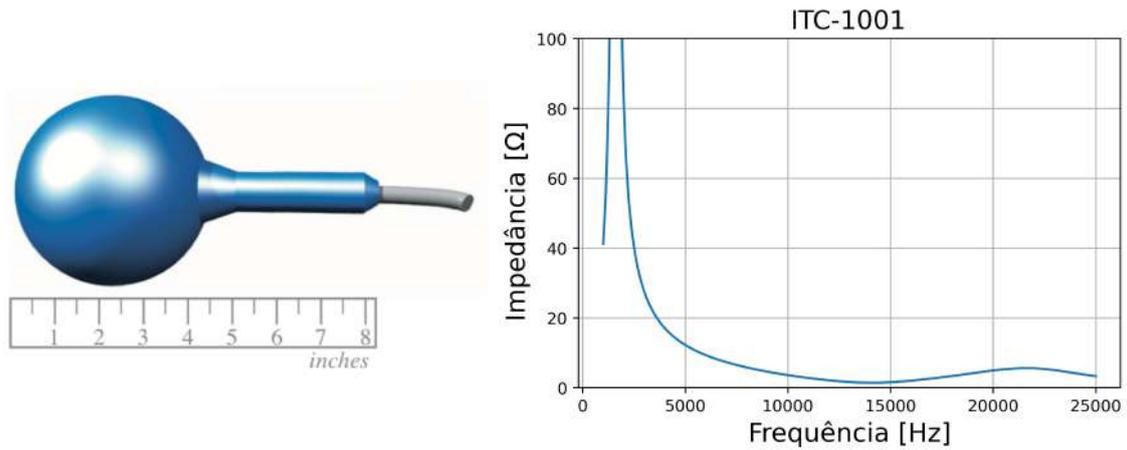


Figura 2.9: Curva de Impedância vs. Frequência do projetor acústico ITC-1001.

A Figura 2.10 apresenta a medição desse tempo de resposta para o projetor ITC-1001. Embora o sinal enviado através do projetor tivesse amplitude contínua (um Tom 16 kHz), ele é transmitido com uma rampa de amplitude no início e no final da duração do sinal. Embora o tempo de resposta para esse projetor seja muito pequeno (da ordem de milissegundos) esse efeito físico pode degradar a resposta do liberador acústico ao acionamento.

Para evitar que esse efeito prejudique o desempenho do algoritmo de detecção deve-se utilizar uma janela adequada para transmissão do sinal com comportamento próximo ao comportamento real do transdutor. Esse processo será apresentado oportunamente na Seção 3.4 e é uma prática recomendada para aumentar a vida útil do projetor acústico.

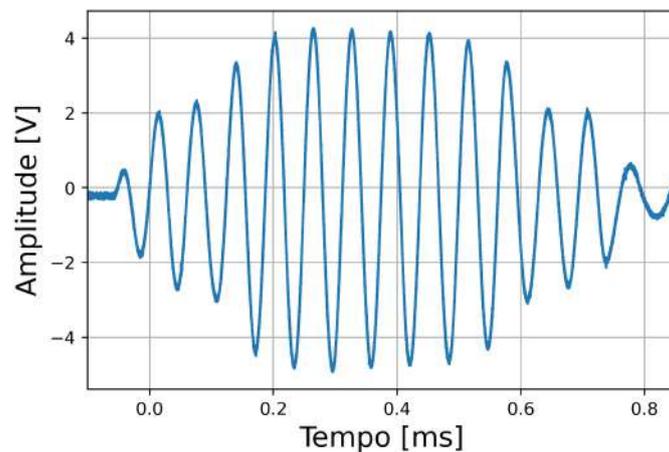


Figura 2.10: Medição do tempo de resposta do projetor acústico ITC-1001.

2.4 Características da propagação no oceano

A influência do oceano na propagação do sinal acústico precisa ser modelada com maior detalhamento possível para que a previsão se aproxime do resultado da transmissão real.

O oceano e suas fronteiras (superfície e fundo) formam um guia de onda bastante complexo para propagação acústica. O perfil de velocidade do som no oceano é influenciado por grandezas que variam no tempo e no espaço. E essas características provocam perdas ao longo do caminho percorrido e devido as interações com as fronteiras resultando em variações significativas no campo de pressão [18, 23, 31].

A temperatura da água, por exemplo, é fator preponderante no cálculo da velocidade do som e varia com a profundidade, incidência solar, correntes marinhas, entre outros fatores. Fenômenos meteorológicos como chuvas e ventos podem mudar drasticamente a propagação do som no oceano que, em geral, modela a superfície como uma fronteira plana e perfeitamente reflexiva [31]. E o leito marinho, embora tenda a ser estável ao longo do tempo, varia com a localização geográfica e sua caracterização não costuma ser facilmente adquirida, especialmente em regiões profundas.

Ao propagar-se no oceano, um pulso sonoro poderá ser atenuado, distorcido e atrasado [23]. Para que a comunicação acústica aconteça de forma eficaz, ou em outras palavras, para que seja possível recuperar um sinal transmitido de forma satisfatória no receptor, é necessário conhecer os fenômenos característicos desse guia de ondas.

No contexto da propagação acústica, o principal objetivo na compreensão do ambiente oceânico é ser capaz de prever, com algum grau de precisão, a perda de energia que ocorrerá à medida que o som se propaga nesse ambiente complexo. A literatura se refere a essa perda como *Transmission Loss*, ou simplesmente *TL*, e representa a medida de quanto um sinal é atenuado ao se propagar entre dois pontos (de uma fonte para um receptor) em um canal. Em acústica submarina, a perda de transmissão é um parâmetro importante que determina a quantidade de energia perdida devido à absorção, espalhamento e outros efeitos físicos.

A *TL* é definida matematicamente como mostrado na Equação 2.15, retirada de [31]. É a relação entre a Intensidade I_0 em um ponto de referência (definido a 1 m de distância da fonte) e a Intensidade em um ponto ao longo do trajeto de propagação I_1 . A relação logarítmica resulta em uma perda calculada em decibel (*dB*).

$$TL = -10 \log \frac{I_1}{I_0} \quad (2.15)$$

A Equação 2.15 assume que a impedância acústica do meio em qualquer ponto

do campo sonoro onde será calculada a *Transmission Loss* é igual a impedância no ponto de referência a $1m$ da fonte [31]. De maneira simplificada, a *TL* pode ser considerada como a soma das perdas devido ao espalhamento geométrico e das perdas devido a atenuação [23].

Como a intensidade, por definição, é a medida do fluxo de potência por unidade de área, as perdas por espalhamento geométrico serão proporcionais à área da superfície formada pela frente de onda, ao se propagar, em relação à fonte.

As duas formas mais comuns de modelar o espalhamento geométrico na propagação oceânica são considerá-la esférica ou cilíndrica. Conforme apresenta a Figura 2.11.

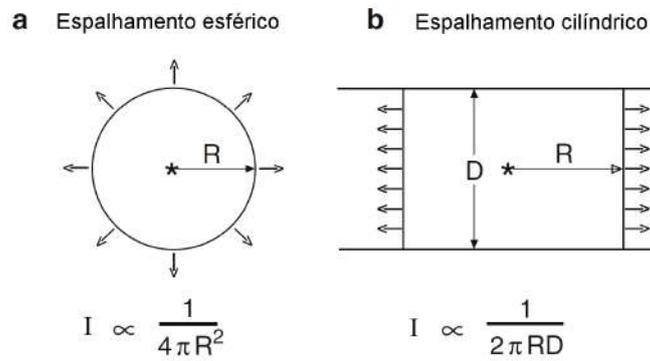


Figura 2.11: Modelos de espalhamento geométrico e sua relação com a intensidade acústica. Espalhamento esférico (a). Espalhamento cilíndrico (b). Fonte: Adaptado de [31].

Quando a propagação ocorre sem que haja interação com as fronteiras (como em águas profundas ou no campo próximo) considera-se as perdas por espalhamento esférico, TL_{ESF} em 2.16. Quando a interação com as fronteiras ocorre (caso de propagação em águas rasas ou longas distância) considera-se as perdas por espalhamento cilíndrico, TL_{CIL} em 2.16 [31].

$$\begin{aligned} TL_{ESF} &= 20 \log R \\ TL_{CIL} &= 10 \log R \end{aligned} \tag{2.16}$$

Se a *TL* devido ao espalhamento geométrico pode ser explicada como uma distribuição da energia numa área crescente de influência da frente de onda a medida que se afasta da fonte, a *TL* devido a absorção pode ser compreendida como a dissipação da energia sonora ao longo do percurso.

Apesar de saber que, em última instância, toda energia acústica será transformada, de alguma forma, em energia térmica, a descrição desse processo e quantifica-

ção das parcelas atribuídas aos diferentes fenômenos presentes na propagação é uma tarefa complexa e um campo de estudo classificado como incipiente [32]. A descrição mais precisa desse fenômenos envolve uma análise a nível molecular considerando a estrutura e interação das diversas substâncias presentes no oceano, dissolvidas ou em suspensão, e como reagem a propagação da energia sonora [33, 34].

Uma forma de estimar a *Transmission Loss* é calcular o coeficiente de absorção utilizando a equação empírica 2.17 apresentada por KINSLER *et al.* [32].

Nesse caso, são desprezadas as perdas por atenuação devido a interação com as fronteiras, mas, na coluna d'água, a equação 2.17 considera os dois principais causadores da divergência entre os valores de atenuação medidos na água salgada quando comparada a água doce: A relaxação química causada pela presença de ácido bórico (H_3BO_3) e sulfato de magnésio ($MgSO_4$) [32]. As variáveis independentes são a temperatura (T_c), em graus Celsius, a salinidade (S), a profundidade (H), em metros, e o pH da água.

$$\alpha = \left(\frac{A}{f_1^2 + f^2} + \frac{B}{f_2^2 + f^2} + C \right) f^2 \quad [dB/km]$$

$$\begin{aligned} f_1 &= 780 \exp(T_c/29) \\ f_2 &= 42000 \exp(T_c/18) \\ A &= 0,083(S/35) \exp[T_c/31 - H/91 + 1,8(pH - 8)] \\ B &= 22(S/35) \exp(T_c/14 - H/6) \\ C &= 4,9E^{-10} \exp(-T_c/26 - H/25) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Uma relação importante mostrada pela Equação 2.17 é que a atenuação no meio submarino é diretamente proporcional ao quadrado da frequência. E isso deve ser levado em consideração na escolha do sinal transmitido.

A Figura 2.12 mostra a comparação entre o coeficiente de absorção calculado para a água salgada e água doce ($S = 0$). Os parâmetros utilizados para o cálculo da curva que representa o oceano (água salgada) foram temperatura, $T_c = 15 \text{ }^\circ C$, salinidade, $S = 35$, profundidade, $H = 23 \text{ m}$ e $pH = 8$.

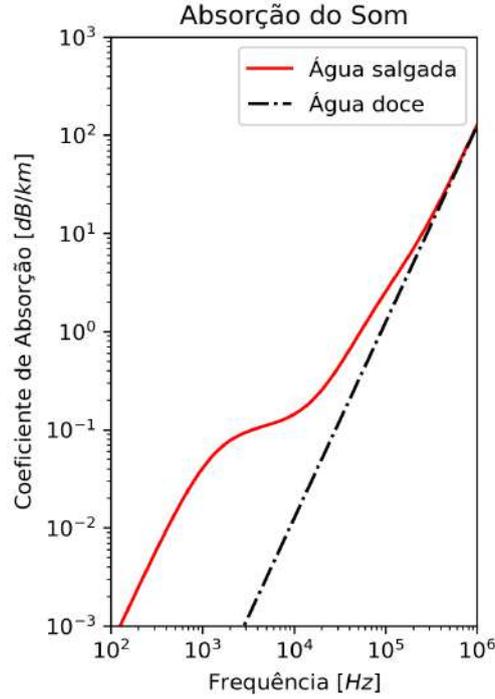


Figura 2.12: Comparação entre os coeficientes de absorção na água salgada e na água doce. O oceano (água salgada) foi representado com os parâmetros $T_c = 15\text{ }^\circ\text{C}$, $S = 35$, $H = 23\text{ m}$ e $pH = 8$.

Em resumo, uma estimativa de TL pode ser feita somando as parcelas referentes às perdas geométricas e às perdas por absorção no meio, Equação 2.18. Considerando a propagação em águas rasas, onde o alcance é muito maior que a profundidade, a modelagem mais apropriada para às perdas geométricas é considerar a propagação cilíndrica [31] como apresentado em 2.16, TL_{CIL} . Para o cálculo da parcela de perdas por absorção, foi considerado o valor de coeficiente de $0,2\text{ dB/km}$ que equivale aproximadamente a frequência de 20 kHz . Esse valor foi escolhido como caso mais extremo e por tanto, válido tendo em vista um critério conservativo.

$$\begin{aligned}
 TL &= TL_{GEO} + TL_{ABS} \\
 TL &= TL_{CIL} + aR \\
 \alpha &= 0,2\text{ [dB/km]} = 2 \cdot 10^{-4}\text{ [dB/m]} \\
 TL &= 10 \log R + 2 \cdot 10^{-4}R
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

A Figura 2.13 mostra a evolução da *Transmission Loss*, calculada conforme desenvolvimento apresentado em 2.4, ao longo dos primeiros 10 km de propagação. Como referência, também é apresentada a evolução da perda puramente por espa-

lhamento geométrico cilíndrico.

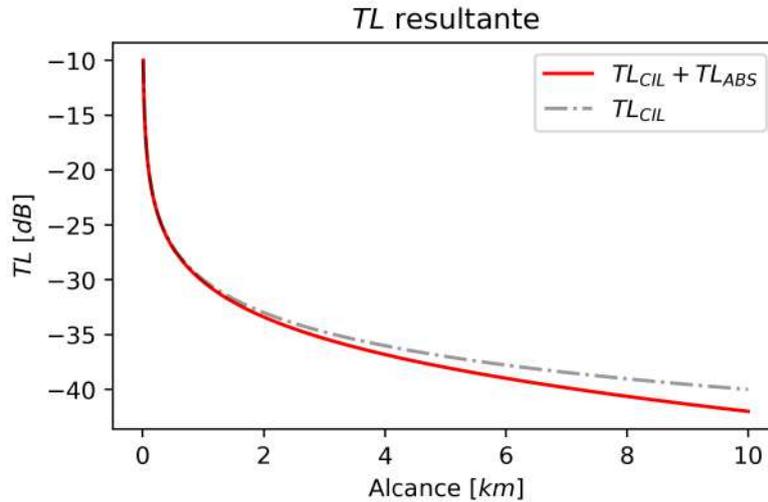


Figura 2.13: *Transmission Loss* estimada para um canal submarino em função do alcance de propagação. Foram considerados os efeitos de perda devido ao espalhamento geométrico e devido a absorção (calculada através da Equação 2.17 para a frequência de 20 *kHz*.), conforme desenvolvimento apresentado em 2.4.

Outra abordagem possível é a utilização de um modelo de propagação como o de traçado de raios (*Ray tracing*). Muito comum em acústica submarina, o modelo de raios, como é chamado, é usado para modelar a propagação de ondas sonoras no oceano. O método envolve o cálculo do trajeto de raios sonoros individuais à medida que se propagam pela água, permitindo o cálculo de campos acústicos, incluindo pressão e intensidade sonora, em vários locais.

No geral, o modelo de raios é uma ferramenta poderosa para entender e prever o comportamento das ondas sonoras no oceano e tem aplicações em várias áreas, incluindo comunicação submarina, tecnologia sonar e oceanografia [31, 35].

Neste modelo, as ondas sonoras são representadas como uma série de raios que viajam pela água e interagem com as variáveis do ambiente, como fundo do mar (batimetria), a superfície (altimetria) e a própria coluna d'água (que causa atenuação). O comportamento de cada raio é determinado pelas leis da física, incluindo a lei de Snell, que descreve a curvatura de um raio na interface entre dois meios de diferentes propriedades acústicas [31, 35, 36].

Portanto, para usar o modelo, é necessário especificar as propriedades acústicas da água, como o perfil de velocidade do som, densidade e atenuação, bem como a geometria do ambiente, incluindo a topografia do fundo do mar (batimetria) e a localização de fontes e receptores. Essas variáveis de entrada são usadas para calcular os caminhos dos raios sonoros individuais à medida que viajam pela água,

refletindo e refratando nos limites entre diferentes materiais.

Em cada ponto ao longo do caminho de um raio, o modelo calcula o campo acústico. Ao combinar as contribuições de todos os raios em um determinado local, o modelo pode prever o campo sonoro total em qualquer ponto da água. Esta informação pode ser usada para estudar uma variedade de fenômenos, incluindo as perdas na transmissão, TL .

Como o modelo consegue considerar a interação entre os raios lançados a partir da fonte e que percorrem diferentes trajetórias, a perda calculada terá um aspecto diferente da curva de TL geométrica apresentada na Figura 2.13. Picos ou flutuações nos valores calculados podem ocorrer devido a efeitos de interferência causados pela interação de vários raios sonoros à medida que se propagam pelo oceano.

A interferência ocorre quando duas ou mais ondas sonoras se encontram e suas amplitudes se somam, seja de forma construtiva (resultando em um sinal mais forte) ou destrutiva (resultando em um sinal mais fraco). A Figura 2.14-A, retirada de [35], ilustra a interação entre dois raios, um de incidência direta (1) e outro após reflexão na superfície (considerada perfeitamente reflexiva, $p(0) = 0$). Neste exemplo, a fonte foi posicionada nas coordenadas $(0, z_s)$ e o receptor em (r_h, z_h) . Por percorrer diferentes trajetórias e por vezes interagir com a superfície, os raios se cruzaram com diferença de fase resultando no padrão de interferência característico da propagação por multi caminhos (2.14-B).

O modelo de raios baseia-se numa aproximação de alta frequência e por via de regra é indicado quando o comprimento de onda é substancialmente menor que as escalas de distância e profundidade envolvidas no problema [31]. Um pulso sonoro na frequência de ressonância do projetor ITC-1001 ($16,5 \text{ kHz}$) terá comprimento de onda de cerca de 10 cm , o que é algumas ordens de grandeza menor que a profundidade e o alcance que estão sendo modelados para o problema descrito nesse trabalho.

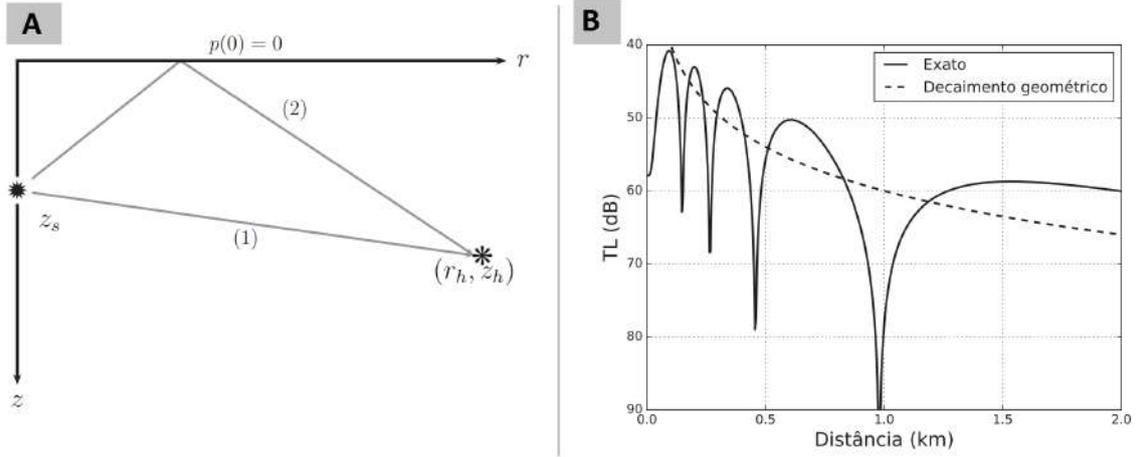


Figura 2.14: Padrão de interferência devido ao efeito *Lloyds Mirror*. Em A está a representação da interação entre dois raios, (1) e (2), com diferentes fases devido ao trajeto percorrido. Considerou-se uma fonte posicionada nas coordenadas $(0, z_s)$ e um receptor em (r_h, z_h) . Em B está a comparação entre a TL geométrica e a TL considerando o efeito de interferência entre os raios. Fonte: Retirado de [35].

No contexto dos modelos de traçado de raios, a interferência pode fazer com que a perda de transmissão varie significativamente de um ponto a outro, pois o campo resultante dependerá de como os raios chegaram em cada ponto, incluindo o trajeto percorrido e o número de interações com as fronteiras.

Para contabilizar esses picos na perda de transmissão, o modelo geralmente usa métodos estatísticos para calcular a média dos resultados em um grande número de raios ou para suavizar as variações usando interpolação ou outras técnicas. Esses métodos podem ajudar a fornecer uma estimativa mais precisa e confiável da perda de transmissão, mesmo na presença de efeitos de interferência [37].

A estimativa feita através de um modelo de propagação é, em geral, mais precisa porque possibilita considerar um número maior de variáveis para o problema. Entretanto, o modelo deve ser alimentado com informações confiáveis para que a resposta também o seja.

A figura 2.15 apresenta o resultado do campo de pressão sonora e da perda na transmissão calculados à partir do modelo de traçado de raios TRACEO [37]. Os parâmetros de entrada foram o perfil de velocidade do som típico da região, as características do leito marinho (modelado como areia e com batimetria plana) e as características da superfície (modelada como perfeitamente reflexiva). No modelo é possível determinar a posição da fonte (posta nas coordenadas $(0, 2)$ neste caso) e calcular a TL para uma profundidade desejada. Por isso, a Figura 2.15 apresenta a *Transmission Loss* na profundidade de interesse do experimento, 23 m. Nota-se

que o valor da TL diverge bastante da primeira estimativa que considerava apenas o espalhamento cilíndrico. Essa diferença se deve, principalmente, à dois efeitos: O primeiro, a frequência relativamente alta do sinal transmitido que foi ajustado nesta faixa para se afastar de outros sinais presentes no local do experimento em bandas de frequência de até 10 kHz . O segundo, a interação entre os raios que percorrem diferentes caminhos e que podem produzir interferência destrutiva no sinal propagante.

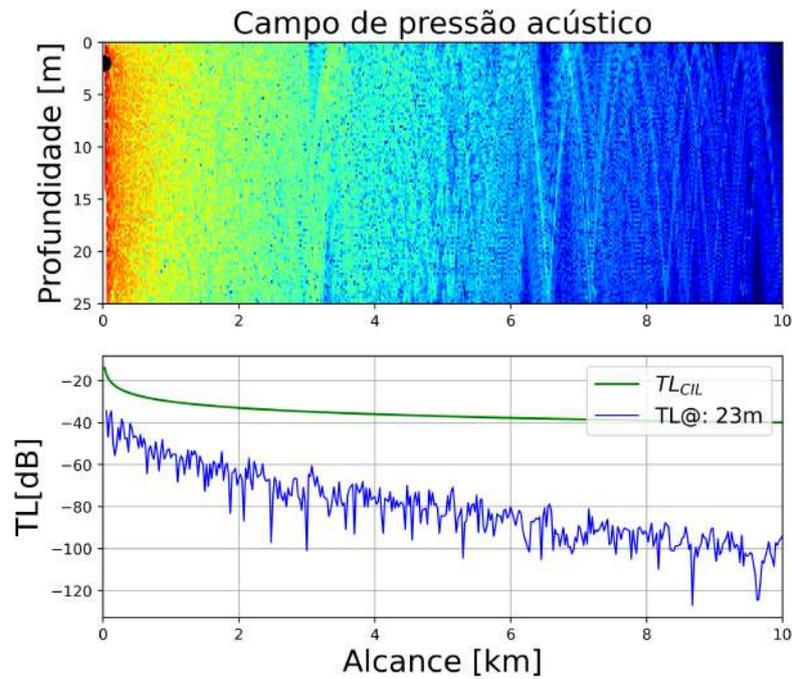


Figura 2.15: Campo de pressão acústico e *Transmission Loss* à profundidade de 23 m calculados através do modelo de propagação de raios TRACEO. As variáveis de entrada foram a frequência do sinal, $f = 16,5\text{ kHz}$, profundidade (considerada batimetria plana) de 25 m , superfície perfeitamente reflexiva, fundo elástico com propriedades equivalentes ao sedimento areia.

Para a aplicação descrita nesta dissertação e considerando todas as incertezas que farão parte da estimativa da TL , torna-se suficientemente acurado o cálculo da TL conforme esse modelo.

2.5 Hidrofone receptor

Para que um atuador submerso seja capaz de captar um sinal acústico é preciso que ele esteja equipado com um hidrofone. Esse sensor apropria-se do efeito piezoelétrico característico do material cerâmico que o compõe para converter variações do campo de pressão acústica, a que está imerso, em um sinal elétrico correspondente.

Apesar de tratar-se do mesmo fenômeno, transdutores piezoelétricos possuem critérios de projeto distintos quando a aplicação muda de um projetor para um hidrofone. Quando o objetivo é converter um sinal sonoro em elétrico, maximizar a relação entre a energia do sinal e a energia do ruído³ será o principal critério [25]. Como a pressão acústica que se deseja captar gera um sinal elétrico da ordem de *microvolts*, o circuito utilizado em um hidrofone precisa de uma boa razão de pré-amplificação, o mais próximo possível da cerâmica, antes de enviar o sinal para leitura.

O hidrofone utilizado nesse projeto e apresentado na Figura 2.16 foi construído no IEAPM utilizando material de baixo custo e reaproveitando as cerâmicas de sistemas sonar tipo *AQS – 18V*, já descomissionados pela Marinha do Brasil. Ele foi calibrado pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) para a faixa de frequência entre 800 Hz e 25 kHz . A sensibilidade média do hidrofone é mostrada na Figura 2.17.



Figura 2.16: Hidrofone desenvolvido no IEAPM com material de baixo custo.

³Nesse caso, o termo é utilizado no sentido mais abrangente, não somente referindo-se ao som ambiente como também a interferência eletrônica ou de quaisquer natureza.

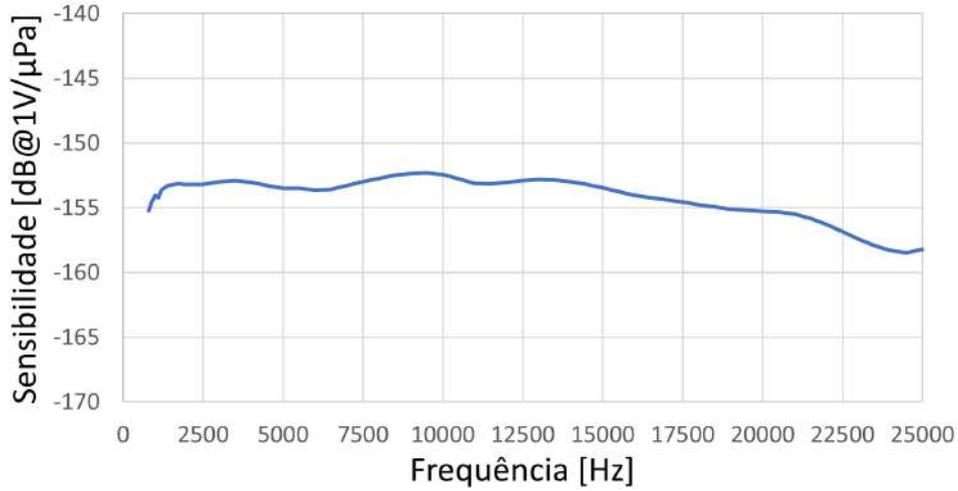


Figura 2.17: Valores médios de sensibilidade resultante da calibração dos hidrofones modelo IEAPM.

Na faixa de frequência entre 5 kHz e 20 kHz a sensibilidade do hidrofone varia entre -152 e $-155\text{ dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$.

No exemplo desenvolvido na Seção 2.3 a intensidade calculada da fonte foi de 201 dB . A TL , estimada através do modelo de propagação de raios TRACEO, 2.15, para um alcance de 3 km equivale a cerca de -80 dB . O nível de pressão sonora (SPL) em um hidrofone posicionado a 3 km dessa fonte emissora seria de $121\text{ dB re } 1\mu\text{Pa}$, ou $1,12\text{ Pa}$.

Adotando o valor da sensibilidade, M_O , igual a -155 dB , a tensão de saída do hidrofone pode ser calculada, desprezando o ruído, através da Equação 2.19 e o valor para o exemplo hipotético descrito anteriormente seria de aproximadamente 20 mV .

$$\begin{aligned}
 M_O &= VL - SPL && [\text{dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}] \\
 VL &= 20 \log V && [\text{dB re } 1\text{V}] \\
 V &= 10^{VL/20} && [\text{V}]
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

2.6 Processamento de sinais

Equipar o liberador com um hidrofone o torna capaz de captar o campo acústico ao seu redor, mas a partir daí é necessário que haja o processamento do sinal captado com o objetivo de determinar quando o atuador deve ser acionado. Em geral, o processamento é feito por um computador e utiliza um algoritmo para armazenar ou transformar a informação contida nesse sinal.

Em dispositivos autônomos, uma das plataformas mais utilizadas para esse processamento é a Raspberry Pi. Trata-se de um minicomputador de placa única que

foi desenvolvido para compor sistemas nas mais diversas áreas e, por isso, é extremamente versátil quanto a comunicação e conexão com outros componentes [38–41]. A Raspberry Pi é otimizada para utilizar linguagem de programação Python⁴ e, através dela, comandar entradas e saídas multipropósitos através do conjunto de pinos conhecido como *General-Purpose Input/Output* (GPIO). No caso descrito nesta dissertação, o sinal captado pelo hidrofone será processado por uma Raspberry Pi que, no momento adequado, acionará o motor do conjunto eletromecânico.

Um algoritmo de processamento pode transformar o sinal capturado e apresentar uma visualização gráfica ao operador tomador de decisão ou pode possuir sua própria estratégia de decisão. O segundo caso caracteriza dispositivos autônomos, dentre os quais estão os liberadores acústicos. Daí surge o ponto chave do projeto de um liberador: o equipamento isolado de qualquer outra plataforma deve interpretar o sinal que está sendo captado pelo hidrofone e reconhecer, em meio ao ruído ambiente e outras interferências, o sinal específico que foi designado para acioná-lo.

Dentre as técnicas de processamento de sinais úteis a esta aplicação, a filtragem casada (*matched filtering*) é mais utilizada para a busca de um sinal familiar em meio a ruído através da correlação cruzada [42, 43]. Os termos *pulse compression* e *replica correlation* referem-se ao mesmo processo de detecção [44]. Por ser otimizado para essa aplicação, o algoritmo utilizado no protótipo descrito nesta dissertação aplica um filtro casado para detecção do sinal alvo imerso em ruído no meio submarino. Neste trabalho, o sinal alvo será chamado de Sinal-chave porque representa a forma de onda que, ao ser distinguida pelo algoritmo, aciona o mecanismo do atuador.

O Sinal-chave emitido por um projetor acústico, embora seja conhecido pelo receptor, será alterado pelo meio conforme discutido na Seção 2.4. De forma que o sinal recebido será uma versão distorcida e atenuada do sinal transmitido.

A correlação é uma operação matemática que produz um vetor⁵ a partir de outros dois, nesse caso as amostras do Sinal-chave e do sinal capturado pelo hidrofone ou trecho deste. O vetor gerado por essa operação é chamado de correlação cruzada dos dois vetores de entrada. Se um conjunto de amostras for correlacionado com ele mesmo, o resultado será chamado de autocorrelação [35].

A convolução de dois vetores discretos $a[n]$ e $b[n]$ resultando em um vetor $c[n]$ é representada como mostra a Equação 2.20. Analogamente, pode-se representar a correlação, $r[n]$, deste vetores como na Equação 2.21. É importante observar que, para efetuar a correlação dos vetores, as amostras de $b[n]$ precisam ser invertidas, por isso escreve-se $b[-n]$.

$$a[n] * b[n] = c[n] \tag{2.20}$$

⁴<https://www.python.org/downloads/>

⁵A designação "vetor", neste caso, se refere a um conjunto de dados, amostrados a uma certa taxa, que representam uma série temporal de maneira discreta. É o chamado vetor de dados.

$$a[n] * b[-n] = r[n] \quad (2.21)$$

A semelhança entre as duas operações é uma conveniência matemática que traz uma consequência importante já que, de acordo com o teorema da convolução, a convolução de dois sinais no domínio do tempo equivale a um produto no domínio da frequência.

No entanto, convolução e correlação representam procedimentos muito diferentes no processamento de sinais [42]. A convolução calcula como um sistema altera um sinal que passa por ele. Por exemplo, a convolução de um sinal com a resposta impulsiva do canal submarino representa como o sinal será alterado ao se propagar nesse canal. A correlação, por outro lado, é uma medida de quanto os sinais de entrada se assemelham e, por isso, é útil para distinguir a presença de uma forma de onda específica em meio ao ruído. Em outras palavras, o valor da amplitude de cada amostra no vetor resultante da correlação será maior quanto mais próximas (correlatas) forem essas amostras.

Neste trabalho, a correlação se refere a semelhança entre o sinal medido (capturado pelo hidrofone e processado pelo microcomputador embarcado) e o Sinal-chave (armazenado na memória do dispositivo).

O objetivo é efetuar o processamento a cada intervalo de 0,1 segundo⁶. É esperado que a amplitude da correlação seja significativamente maior caso o Sinal-chave estiver presente no trecho do sinal medido que está sendo analisado. Esse pico de amplitude que provocará o acionamento do atuador submerso e conseqüentemente a liberação de parte do conjunto fundeado.

Considerando que o ruído ambiente é uma variável aleatória, o processamento dependerá de uma análise baseada em propriedades estatísticas [45]. Conforme mostra PERES VIO [46], para dois processos estocásticos conjuntamente estacionários no sentido amplo, a correlação cruzada é calculada como uma média conjunta através da Equação 2.22. Transportando para o exemplo do uso da filtragem casada no acionamento de um atuador submerso, o sinal $x(t)$ seria o equivalente ao Sinal-chave e o sinal $y^*(t + \tau)$ o complexo conjugado do trecho de sinal medido.

$$R_{XY}(\tau) = E[x(t).y^*(t + \tau)]; \quad (2.22)$$

A presença de ruído e possibilidade de existências de outros sinais interferidores obriga a observância de um limiar de decisão (*decision threshold*) para avaliar se o Sinal-chave foi ou não enviado ao dispositivo. Esse limiar de decisão será uma função das probabilidades de ocorrência que serão descritas posteriormente.

A Figura 2.18 ilustra a utilização da filtragem casada na detecção de um sinal conhecido. O primeiro gráfico, apresenta na cor preta a forma de onda utilizada como

⁶A limitação da janela temporal de processamento em 0,1 s será discutida na Seção 3.4

chave nesse exemplo destacado sobre a representação do sinal medido (soma do Sinal-chave com o ruído gaussiano branco) em azul. Em seguida, o gráfico apresentado na cor verde mostra o resultado da correlação. Quando o Sinal-chave está presente, a magnitude da correlação é significativamente maior que nos trechos onde existe apenas ruído. Nota-se que a detecção é possível mesmo numa condição desfavorável onde a amplitude do ruído é maior que a amplitude do sinal de interesse.

Nesse exemplo específico, apresentado na Figura 2.18, o Sinal-chave tem amplitude unitária enquanto o ruído gaussiano branco, somado posteriormente ao sinal, foi gerado com média zero e desvio padrão igual a três (a variância do ruído, portanto, é igual a nove). A relação sinal-ruído (*Signal to Noise Rate* - SNR) calculada é igual a aproximadamente $-19dB$.

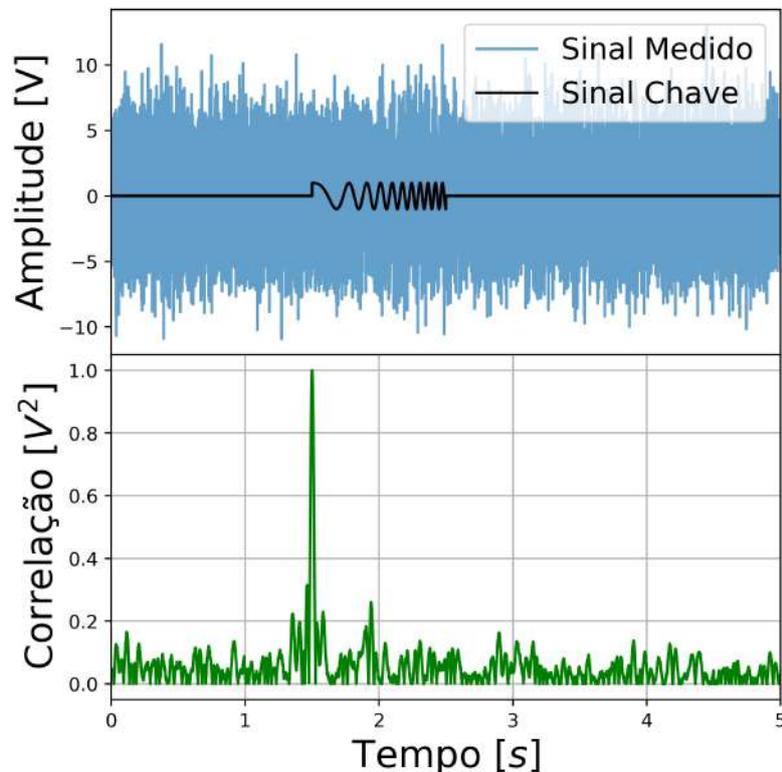


Figura 2.18: Exemplo de utilização da filtragem casada para detecção de um sinal conhecido (frequência modulada com duração de 1 s e banda de 1 a 20 Hz). A curva em preto é o envelope do sinal a ser detectado em meio ao ruído (gráfico em azul). Em verde, o resultado da correlação. Nessa simulação, a relação sinal-ruído utilizada foi de aproximadamente $-19dB$.

Na literatura, a presença de um sinal em um sistema de detecção é comumente descrita utilizando uma matriz de decisão binária. Essa designação para o modelo surge do fato de que apenas duas hipóteses são possíveis e o processamento deverá indicar, sem ambiguidade, uma das duas possibilidades.

A hipótese nula, H_0 , se refere à ausência do sinal alvo (ruído puro) e hipótese alternativa, H_1 , se refere à detecção deste sinal na amostra analisada. Quando a amplitude da correlação atingir ou superar um limiar de decisão especificado, considera-se que o Sinal-chave está presente no sinal medido, hipótese H_1 . Do contrário, quando a amplitude da correlação for menor que o limiar de decisão, a interpretação é de que se trata apenas de ruído, hipótese H_0 (Sinal-chave ausente). Dessa maneira, surgem quatro situações possíveis para o problema enunciado: O limiar de decisão pode ser atingido com a presença do Sinal-chave nas amostras observadas. Este é o efeito desejado, a detecção correta; a segunda possibilidade é o limiar de decisão ser atingido sem a presença do Sinal-chave. É um alarme falso, por vezes referido como erro tipo I; também é possível que a amplitude da correlação não alcance o limiar de decisão porque o Sinal-chave está ausente na observação. É uma decisão nula (este também é um efeito desejado e mantém o atuador em espera); e, a última possibilidade, é a amplitude da correlação não atingir o limiar de decisão, embora o Sinal-chave esteja contido na medição. Essa possibilidade é chamada de sinal perdido ou erro tipo II.

O quadro apresentado na Figura 2.19, adaptado de URICK [23], é a matriz de decisão binária que sintetiza essa teoria em termos de probabilidade.

	Interpretado presente	Interpretado ausente
Sinal presente	Detecção correta P_D	Sinal perdido $1 - P_D$
Sinal ausente	Alarme falso P_{FA}	Decisão nula $1 - P_{FA}$

Figura 2.19: Matriz de decisão binária.

A terminologia típica da estatística denomina como Probabilidade de Detecção (P_D) a chance de o Sinal-chave ser encontrado estando presente no sinal medido e de Probabilidade de Falso Alarme (P_{FA}) a chance de o limiar de decisão ser atingido na ausência do Sinal [47]. Essas são as principais variáveis para quantificar o desempenho de um sistema de detecção.

Como mencionado, não pode haver interseção entre os espaços amostrais das decisões D_1 , quando o sistema interpreta a hipótese H_1 , e D_0 , quando o sistema interpreta a hipótese H_0 , pois a detecção seria ambígua. Por isso as probabilidades mostradas na Figura 2.19 são complementares aos pares. Em outras palavras, se o Sinal-chave está presente no trecho observado, a probabilidade de detecção e a probabilidade de perder o sinal representarão a probabilidade total, como apresenta

a Equação 2.23. O mesmo vale para a probabilidade de falso alarme e a probabilidade de decisão nula quando o trecho observado é composto apenas por ruído.

$$\begin{aligned} P_D &= P(D_1|H_1) = 1 - P(D_0|H_1) \\ P_{FA} &= P(D_1|H_0) = 1 - P(D_0|H_0) \end{aligned} \tag{2.23}$$

A decisão nula pode ser vista como a não ocorrência de falsos alarmes no intervalo de tempo em que existe apenas ruído na observação e é uma interpretação correta do algoritmo de decisão. Já a alternativa de sinal perdido pode estar relacionada com a seleção inadequada do limiar de decisão ou uma relação sinal-ruído desfavorável.

Em geral, o limiar de decisão é escolhido de forma a minimizar a probabilidade de falso alarme, mesmo com o custo de diminuir a probabilidade de detecção. Esse é o princípio fundamental do teorema de Neyman-Pearson e, assim como em um sistema sonar, é indicado para os atuadores submersos onde um falso alarme pode ser mais prejudicial que um sinal perdido [48]. A parametrização é feita buscando maximizar a probabilidade de detecção enquanto a probabilidade de falso alarme é mantida em um limite de projeto pré-estabelecido. Na Seção 4.3 será apresentado o ensaio de robustez que resulta na definição do limiar de detecção no qual a Probabilidade de Falso Alarme foi atribuída no valor de 10^{-3} , isto é, 0,1%.

Capítulo 3

Método Proposto

Neste capítulo são apresentadas as soluções propostas para cada desafio dentro do desenvolvimento do protótipo de liberador acústico descrito nesta pesquisa.

3.1 Invólucro

Seguindo o objetivo de construir um liberador acústico de baixo custo e com materiais de fácil obtenção, o invólucro do protótipo foi idealizado utilizando tubos em PVC (Policloreto de Vinila). Dentro da grande variedade de dimensões existentes, o tubo com diâmetro de 100 *mm* e cuja espessura de parede é de 2 *mm* foi o escolhido. É possível que uma versão mais compacta seja viável, porém exigiria a fabricação de peças dimensionadas especificamente para essa aplicação, o que foge ao escopo desse trabalho.

A Figura 3.1 mostra as principais dimensões utilizadas para o dimensionamento. Para o cálculo de tensões são utilizados os valores de diâmetro externo e interno, assim como a espessura de parede do tubo. À direita, a figura apresenta o tampão utilizado para fechamento da extremidade com anel de vedação.

Além do baixo custo e disponibilidade no mercado, tubos de PVC apresentam como vantagem a possibilidade de adequar o comprimento a necessidade do projeto. Em outras palavras, é possível variar o comprimento do invólucro caso seja necessário adicionar ou retirar algum componente. As extremidades do tubo principal serão fechadas utilizando tampões. Esses acessórios também são comumente encontrados para aquisição e possuem alojamento próprio para o uso de vedações de elastômero do tipo *o-ring*.

Na seção 2.1, foram apresentados os cálculos de tensão para um vaso de pressão cilíndrico. De acordo com a norma ABNT NBR 5647-1, tubos PVC com diâmetro nominal de até 100 *mm* devem resistir a pressão interna de até 6 *bar* para a tensão limite de escoamento. A norma ainda apresenta o fator de correção para variações de temperatura e variações bruscas no regime de esforços solicitantes.

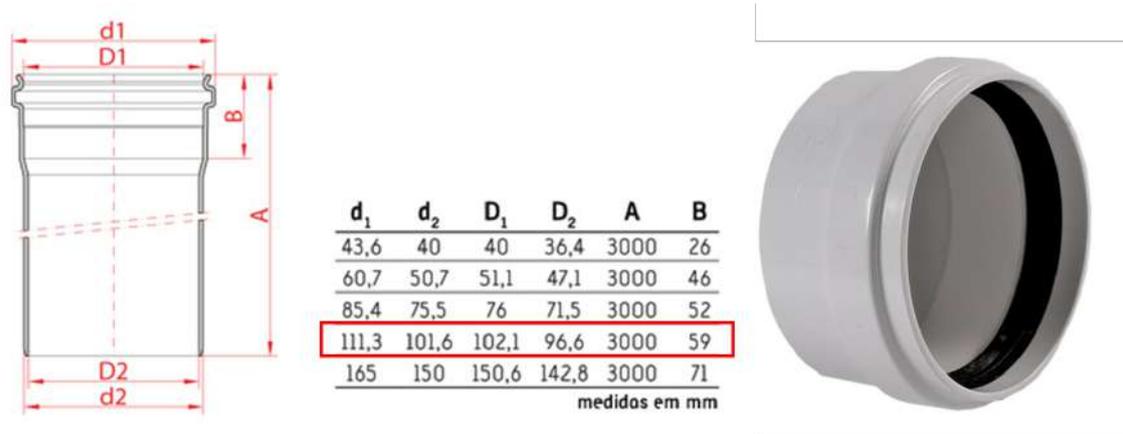


Figura 3.1: Algumas dimensões padronizadas para tubos em PVC. À esquerda, desenho do tubo e respectivas cotas. À direita, tampão utilizado para fechamento da extremidade com anel de vedação.

A influência da temperatura só se torna relevante para valores acima de $30^{\circ}C$, o que é incomum para o ambiente submarino. E para acomodar o transiente de pressão ao qual o invólucro será submetido foi utilizado um coeficiente de segurança de 1,5, o que limita a pressão aplicada ao valor máximo de 4 *bar*.

Adicionalmente, para permitir a passagem do eixo de dentro para fora do invólucro sem a entrada de água, um alojamento para o conjunto de vedação foi desenvolvido utilizando uma luva de PVC de 32 *mm*. O alojamento foi fixado no tampão inferior do invólucro e a montagem da vedação no interior do alojamento foi dimensionada sob medida.

O comprimento total da luva é de 48 *mm* e o conjunto montado foi dimensionado com 55 *mm* possibilitando a compressão da mola do selo mecânico (requisito para vedação). Além deste selo, o conjunto de vedação conta com dois retentores. Cada um deles representa um obstáculo entre o interior e a água salgada. Por fim, o alojamento será preenchido com óleo para que ele atue como fluido barreira.

Na Figura 3.2 é possível visualizar os componentes da vedação do eixo que foram mencionados. Ao lado esquerdo, a luva de PVC que servirá como alojamento para os retentores e o selo mecânico. Ao lado direito a medida aferida com o paquímetro digital mostrando que a mola será comprimida em 7 *mm* para manter a vedação entre a face rotativa e a face estacionária.



Figura 3.2: Componentes da selagem do eixo principal.

O alojamento das vedações do eixo foi fixado no tampo inferior do invólucro utilizando resina de poliuretano devido a sua boa aderência no material base de PVC. Após a cura, a resina garante estabilidade dimensional e estanqueidade.

Os retentores utilizados são fabricados pela ARCA[®] Retentores para aplicação em bombas hidráulicas e, por tanto, atendem os requisitos de pressão ao qual serão submetidos. Suas dimensões são 32 *mm* de diâmetro externo (para montagem no alojamento), 16 *mm* de diâmetro interno (por onde passará o eixo) e 7 *mm* de altura.

Já o selo mecânico é do modelo T01 da Inpacom[©]. Assim como o retentor, tem face estacionária com dimensão de 32 *mm* para montagem no alojamento e sua vedação interna para eixo de 5/8 de polegada (16 *mm*), atende a pressão de até 12 *bar* e velocidade de 12 *m/s*.

A Figura 3.3-A apresenta o conceito final do invólucro montado. Foram utilizados dois discos de polipropileno e três barras roscadas para travar a abertura dos tampões quando pressurizado. Além disso, é possível notar na Figura 3.3-B a passagem do eixo através do invólucro e a porca que será liberada por ocasião do acionamento do dispositivo.

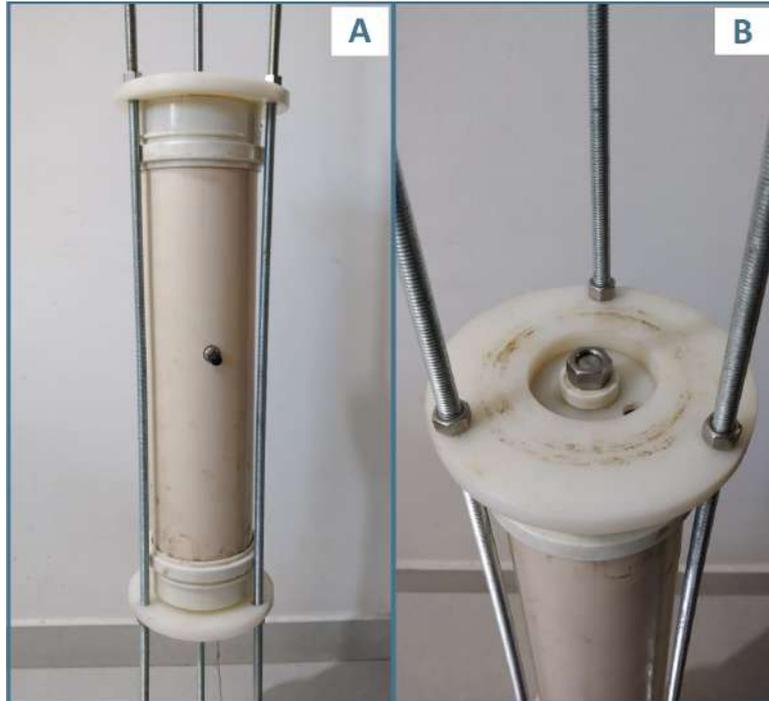


Figura 3.3: Conceito desenvolvido para o invólucro.

3.2 Conjunto eletromecânico

O conceito escolhido para o protótipo utiliza como mecanismo de liberação a separação entre um eixo e uma porca. O eixo é movido por um motor elétrico de corrente contínua e tensão de alimentação de 12 V. Por tratar-se de uma carga indutiva e como o banco de baterias poderá ser compartilhado com os componentes eletrônicos de processamento é necessário utilizar um circuito separando o comando e a carga do motor. Esse circuito, conhecido como *driver*, utiliza transistores como chaveamento para acionar o motor a partir do sinal enviado pelo processador.

Um esquema simplificado do circuito elétrico para acionamento do motor através de um comando oriundo da *Raspberry Pi* pode ser visto na Figura 3.4, assim como a placa controladora utilizada nesse protótipo e que utiliza este circuito como base¹.

O sinal elétrico de comando emitido através dos pinos GPIO da *Raspberry Pi* está limitado a 50 mA de corrente e 5 V de tensão e seria incapaz de acionar o motor de maneira direta. Utilizando transistor como chave, o comando é ligado ao terminal base, o motor ao terminal coletor e o terminal emissor fecha o circuito no polo negativo da bateria (simbolizado como terra, GND). Ao receber o comando,

¹Vendido por USINAINFO. Disponível em https://www.usinainfo.com.br/driver-para-motor/controlador-pwm-d4184-modulo-de-potencia-mosfet-30a-400w-36v-5506.html?search_query=Controlador+PWM+D4184+%2F+Modulo+De+Potencia+Mosfet+30A+400W+36V&results=3. Acesso em 23/03/2022.

o transistor permite a passagem de corrente para o motor em um circuito isolado do microcomputador. Um diodo é utilizado em paralelo com o motor para drenar corrente reversa, após o desligamento, resultante do carregamento do indutor que compõe o motor elétrico. Exercendo essa função o componente é conhecido como diodo de roda livre.

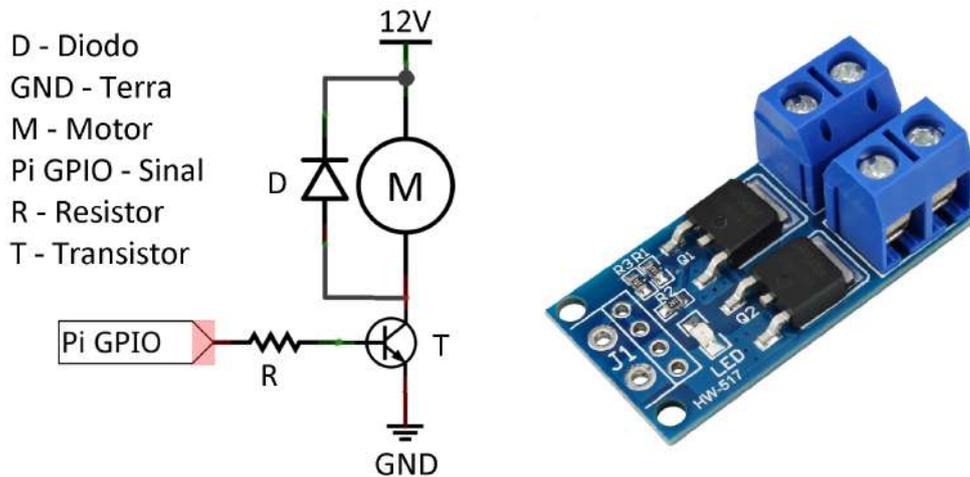


Figura 3.4: Esquema básico de circuito de acionamento do motor. À direita um controlador disponível no mercado e que atende aos requisitos do protótipo.

O banco de baterias foi idealizado em módulos compostos por doze células de 4 V associadas, conforme apresentado na Figura 3.5, em série 3 a 3 e em paralelo entre os quatro conjuntos resultantes das associações em série.

Assim como todos os componentes do projeto, o banco de baterias teve suas dimensões ajustadas para utilização no interior do invólucro de 100 mm de diâmetro. Para isso, as células foram fixadas em um disco de polipropileno.

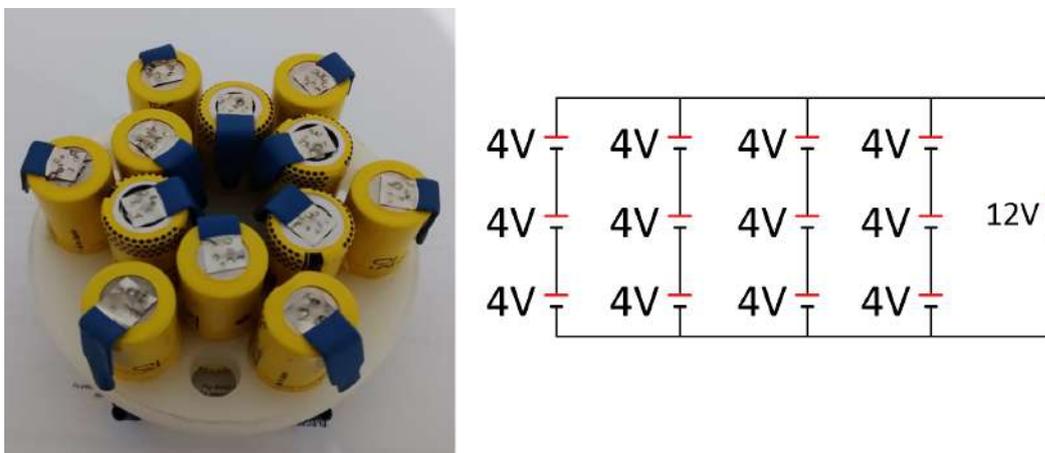


Figura 3.5: Módulo de baterias, à esquerda, e circuito simplificado das associações entre as células, à direita.

Módulos de baterias iguais ao apresentado na Figura 3.5 podem ser associados para adequar-se à carga demandada pelo acionamento do motor e à autonomia esperada para o liberador acústico.

O banco de baterias foi projetado com o parâmetro de tensão de 12 V para atender à tensão nominal do hidrofone e do motor. Porém, o microcomputador (*Raspberry Pi*) utiliza tensão de alimentação igual a 5 V. Neste caso, um conversor de tensão 12/5 V é necessário para adequar a alimentação específica deste componente. Outra opção é utilizar um banco de baterias independente com tensão nominal igual a 5 V como os modelos vendidos para carga de aparelhos celulares. Essa última foi a opção adotada para o protótipo.

Entre o motor e o eixo principal, um conjunto de engrenagens planetárias será responsável pela redução de velocidade e aumento do torque disponível.

Esse sistema de redução é formado pelos componentes apresentados na Figura 3.6. A engrenagem posicionada ao centro é chamada de engrenagem Solar e será conectada ao eixo do motor elétrico. Para a aplicação descrita nesse trabalho, onde o conjunto será aplicado para redução de velocidade, a engrenagem externa, conhecida como engrenagem Anelar, será mantida estática. Por fim, as engrenagem que se movimentam em torno da engrenagem Solar são chamadas de Satélites e estão conectadas entre si através do eixo Portador. O Portador é o eixo de saída e será ligado ao eixo principal do liberador. Conforme visto na Figura 3.6, à direita, girar o eixo de entrada (representado na cor verde) provoca o giro no eixo de saída (representado na cor laranja) no mesmo sentido e com velocidade dada pela relação entre o número de dentes das engrenagem que compõe o conjunto.

Utilizar engrenagem planetárias no sistema de redução permite que o eixo principal e o motor permaneçam alinhados na montagem do equipamento e todo o conjunto mantenha dimensões reduzidas. Do contrário, em um sistema de redução convencional que utiliza um par de engrenagens lado a lado, seria necessário um aumento do diâmetro do invólucro para conseguir a mesma relação de redução.

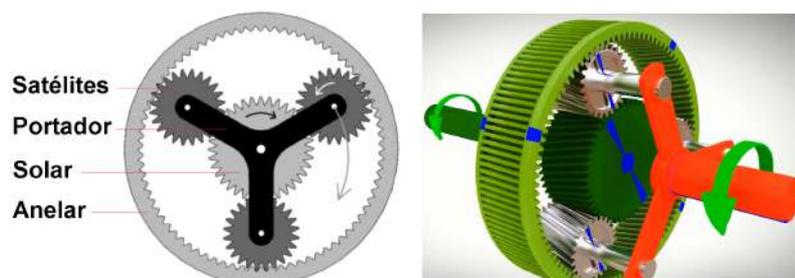


Figura 3.6: Vista em corte do conjunto planetário evidenciando o sentido de rotação de cada engrenagem, à esquerda. Esquema demonstrativo da transmissão de movimento, à direita.

O eixo principal foi desenhado especificamente para esse projeto a partir de uma barra cilíndrica de cinco oitavos de polegada ($5/8''$ equivalem à aproximadamente 16 mm). Ele prevê o acoplamento com a caixa de redução de engrenagens planetárias em sua extremidade superior e a rosca para a porca que será liberada na extremidade oposta.

Além dos componentes que serão conectados às extremidades do eixo, para garantir seu alinhamento e sustentação, criou-se um mancal de escora próximo a extremidade superior do eixo. Uma redução no diâmetro permite utilizar um rolamento de esferas que impede o deslocamento axial mantendo sua rotação livre.

O maior diâmetro especificado (16 mm) foi mantido na região onde serão posicionados os retentores e o selo para vedação.



Figura 3.7: Desenho de fabricação especificando as principais medidas do eixo, à esquerda. Eixo fabricado em aço inox indicando as posições dos componentes periféricos, à direita.

3.3 Seleção do Sinal-chave para acionamento

Como foi mencionado anteriormente, na Seção 2.6, o Sinal-chave para o liberador acústico é forma de onda que, ao ser distinguida pelo algoritmo, aciona o mecanismo do atuador.

Este sinal específico ficará armazenado no computador embarcado (*Raspberry Pi*) e será comparado com cada trecho do sinal captado pelo hidrofone. Mais especificamente, a comparação será feita a cada $0,1\text{ s}$ de sinal medido e, caso o limiar

de decisão pré-estabelecido seja atingido pela correlação, acionará o mecanismo de liberação.

As formas de onda mais utilizadas em aplicações de acústica submarina são os Tons (mono frequência), comumente referidos pela sigla em inglês *CW* (*Continuous Wave*), e os sinais de frequência modulada, conhecidos como *chirps*². Destacam-se a modulação linear de frequência (*Linear Frequency Modulated* – LFM) ou chirp linear e a modulação hiperbólica de frequência (*Hyperbolic Frequency Modulated* – HFM) ou chirp hiperbólico. A Figura 3.8 exemplifica a relação tempo-frequência dos três sinais citados. Todos foram gerados com a mesma duração (1 s). O tom (CW) possui frequência única de 6,5 kHz enquanto os chirps (LFM e HFM) varrem a faixa de 3 kHz à 10 kHz da menor para a maior (*up-sweep*). A forma como a frequência varia no tempo fica evidente no gráfico abaixo e remete a nomenclatura das formas de onda.

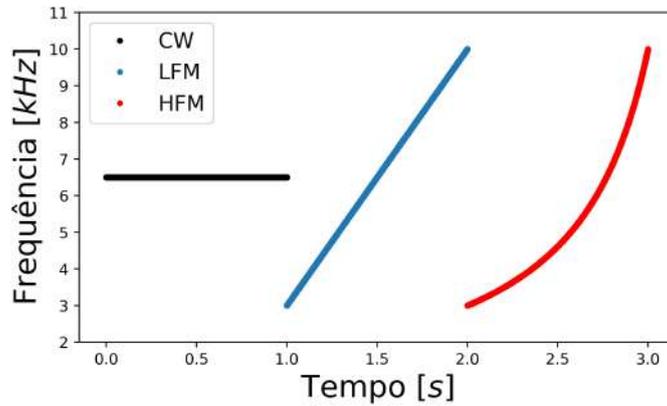


Figura 3.8: Relação tempo-frequência dos sinais CW, LFM e HFM.

Matematicamente, a frequência instantânea, f_i , de cada um dos sinais apresentados pode ser escrita, em função do vetor amostra de tempo, t , como mostra a Equação 3.1. Onde f_0 e f_1 representam a frequência inicial e final do chirp, respectivamente. T é o tempo total de duração do sinal e f_c é a frequência constante característica do tom [46].

$$\begin{aligned}
 f_i(t) &= f_c && (CW) \\
 f_i(t) &= f_0 + \frac{(f_1 - f_0) \cdot t}{T} && (LFM) \\
 f_i(t) &= \frac{f_0}{1 + \frac{f_0 - f_1}{T \cdot f_1} \cdot t} && (HFM)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

No exemplo discutido na Seção 2.6 e apresentado pela Figura 2.18 mostra-se

²Denominação também oriunda do inglês e utilizada devido a semelhança com o som de um gorjeio de pássaros.

a possibilidade de utilização da filtragem casada como técnica de processamento para detectar a presença de uma forma de onda previamente conhecida em meio ao ruído. Esse processamento gera uma resposta na qual a presença do sinal se destaca do ruído, descorrelacionado. Porém a escolha do sinal influencia diretamente na qualidade da resposta.

A amplitude da resposta à filtragem casada no domínio do tempo de um sinal é proporcional à sua duração. E, comparando dois sinais com a mesma duração, a resolução³ da resposta será melhor quanto maior a largura da banda de frequência do sinal.

Tendo como principal critério para seleção do Sinal-chave a expectativa de que ele seja exclusivo para o dispositivo e considerando a utilização do método de processamento de filtragem casada para distinção desse sinal em meio ao ruído, sinais de frequência modulada apresentam grande vantagem com relação a Tons [44].

A Figura 3.9 apresenta a simulação feita para comparar a resolução da resposta à filtragem casada de dois sinais e comprovar a teoria apresentada. No primeiro gráfico mostra-se as duas formas de onda, CW e LFM. Em seguida, são apresentados os espectros desses sinais. Nesse exemplo, o tom gerado tem frequência de 3 Hz e o chirp linear ocupa a banda de 1 Hz à 30 Hz . O último gráfico na Figura 3.9 mostra a resposta a filtragem casada para os dois. Comparando os resultados apresentados observamos que a resolução do sinal LFM é superior e apresenta um único pico pronunciado, enquanto o sinal CW apresenta um formato triangular que levaria a um processo decisório ambíguo.

Essa característica pode ser explicada através da natureza deslizante no cálculo da correlação. Um sinal mono-frequência, CW, ao ser deslocado em um período terá exatamente o mesmo formato e, por isso, terá valores significativos de correlação em torno do lóbulo principal. Os lóbulos secundários serão menores porque o número de amostras a correlacionar será menor a medida que a réplica do sinal desliza sobre o sinal testado. Por outro lado, um sinal de frequência modulada, como o LFM, só apresentará correlação significativa quando todas as amostras estiverem alinhadas. Por essa razão, sinais de frequência modulada são reconhecidos como tendo boa resolução para correlação no domínio do tempo [44].

³O termo resolução aqui se refere a capacidade de distinguir um sinal. A resolução de uma forma de onda representa um ponto de mudança onde dois sinais com separação maior que a resolução podem ser facilmente identificados [44]. As duas métricas primárias para cálculo da resolução são a distância entre os pontos de -3 dB em relação ao lóbulo principal e o critério de *Rayleigh* para resolução [49], que é a distância da resposta de pico ao primeiro zero.

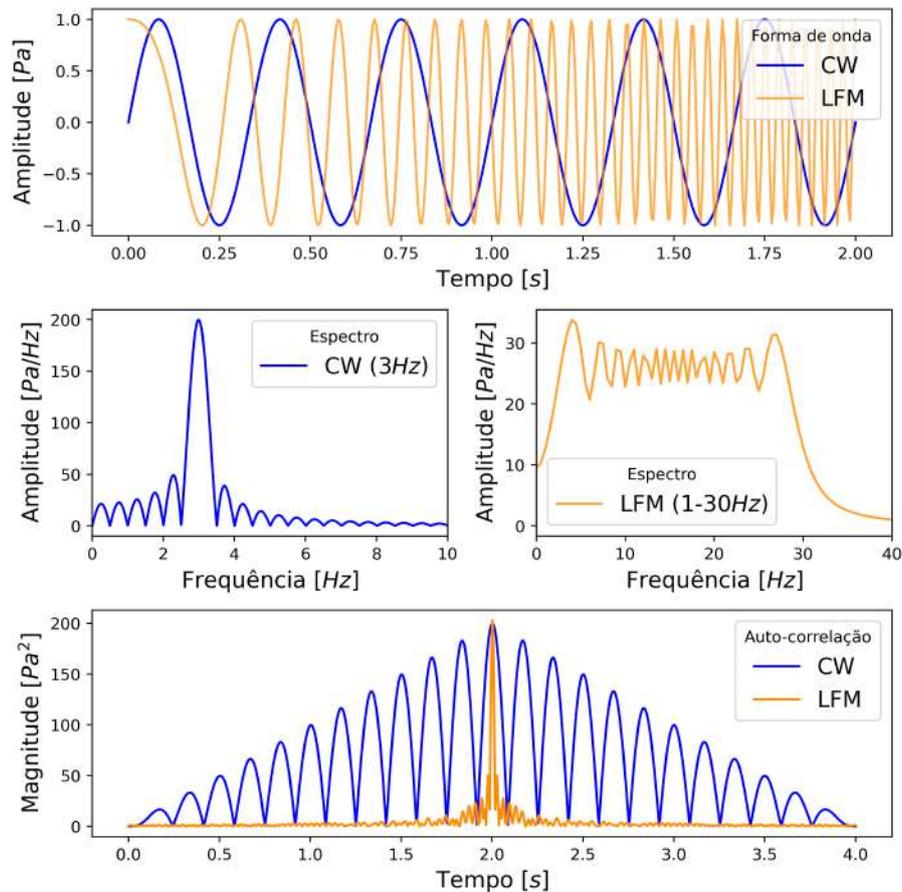


Figura 3.9: Comparação entre os sinais. No topo, as formas de onda. Ao centro, o espectro de cada uma delas. Por fim, a resposta a filtragem casada.

Outro ponto importante quando comparamos a resposta a filtragem casada de um sinal CW com a resposta de um sinal de frequência modulada é que, devido a mesma característica apresentada anteriormente, um sinal CW irá correlacionar com outro sinal CW, de mesma frequência, mesmo que a duração original desses sinais sejam distintas. Isso não ocorre com sinais de frequência modulada, pois, mesmo que atuem exatamente na mesma banda de frequência, a duração do sinal irá alterar a taxa de variação da frequência. Dessa forma, dois chirps que tenham as mesmas frequências inicial e final, mas tenham duração distinta, terão baixa correlação entre si.

A comparação entre as respostas de um sinal CW e um sinal de frequência modulada (neste caso um chirp linear) para detecção através de um algoritmo de processamento baseado na filtragem casada foi alvo do trabalho preliminar publicado nos anais do 12^o Congresso Ibero-Americano de Acústica [50].

Pelos motivos apresentados, o Sinal-chave para o acionamento do liberador acústico desenvolvido nesse trabalho foi feito utilizando um pulso de frequência modulada. E para determinar qual será o Sinal-chave, dentre os inúmeros sinais de

frequência modulada possíveis, serão consideradas a duração do sinal e a faixa de frequência do ruído ambiente e de sinais previstos para o local onde o equipamento será aplicado.

Na comunicação entre dois pontos estáticos (projektor e hidrofone em posições fixas) os sinais LFM e HFM tem desempenho semelhante (HFM é particularmente vantajoso em aplicações que necessitam considerar efeito Doppler devido ao movimento relativo entre emissor e receptor). No entanto, assim como a possibilidade de modulação da frequência varrendo da menor para maior (*up-sweep*) ou da maior para menor (*down-sweep*), são alternativas que aumentam a versatilidade para criação de um sinal exclusivo.

3.4 Pré-processamento e implementação

Ao longo deste trabalho foram apresentadas a técnica de processamento escolhida para o algoritmo de detecção e as características necessárias para que o Sinal-chave de acionamento do dispositivo submerso seja adequado.

Nesta seção será discutido como tais características foram implementadas no processador embarcado no dispositivo, fatores que influenciam na escolha da duração e banda de frequência do Sinal-chave.

Para um sistema de aquisição de dados ou de comunicação, onde um sinal é convertido em um conjunto de amostras (sinal discreto), a primeira variável que deve ser definida é a frequência de amostragem, f_s . Isso porque ela irá determinar qual a banda de frequência poderá ser utilizada em todo o processamento. Seguindo o critério previsto no teorema de amostragem de Nyquist a f_s utilizada na aquisição deve ser, no mínimo, o dobro da máxima frequência que se deseja observar, f_N (esse limite é conhecido como frequência de Nyquist).

$$f_s = 2f_N \tag{3.2}$$

Obedecer esse critério permite captar e representar os sinais dentro da banda limite (de 0 à f_N) sem nenhum risco quanto a subamostragem ou *aliasing* [51].

No processamento de sinais, o *aliasing* ocorre quando a taxa ou frequência de amostragem é muito baixa para capturar com precisão os componentes de frequência mais alta presentes no sinal. Para evitar o *aliasing*, é importante aplicar um filtro passa-baixa, eliminando a possibilidades de frequências acima do limite de Nyquist 3.2 serem representadas dentro do espectro que se deseja observar.

Os projetores disponíveis e apresentados na Seção 2.3 são capazes de transmitir sinais acústicos no meio submarino até o limite máximo de 25 kHz. Nesse caso a frequência de amostragem ideal seria de 50 kHz. É possível atingir esse valor de f_s

utilizando placas de áudio especiais projetadas para aquisição de alta qualidade⁴. Porém, os componentes mais comuns utilizados para aplicações de processamento de áudio costumam limitar seu desempenho a uma amostragem de 48 kHz [52]. Utilizando esse valor de f_S a frequência limite para o processamento será de 24 kHz .

Além de cobrir quase toda faixa de transmissão possível para os projetores disponíveis (96%), essa banda de frequência é suficientemente adequada para a aplicação desenvolvida nesse trabalho pois, conforme apresentado na Seção 2.4, a propagação em meio submarino é fortemente atenuada a medida que a frequência aumenta ($\alpha \propto f^2$). Por essa razão, pulsos sonoros emitidos no meio submarino buscam, sempre que possível, utilizar frequências mais baixas⁵ para maximizar o alcance.

Analisando a banda de frequência relativa a f_S de 48 kHz (0 a 24 kHz) retomaremos a discussão sobre a escolha do Sinal-chave no que diz respeito a frequência de transmissão e recepção. As Figuras 2.8 e 2.9 mostram a impedância dos projetores em função da frequência de transmissão. Ambos, apresentam degradação do desempenho no primeiro quinto da faixa (0 a 5 kHz), incluindo a presença de ressonâncias em paralelo. Além disso, conforme mostram as amplamente conhecidas curvas de Wenz (Apêndice A), frequências mais baixas concentram maior intensidade de ruído no meio submarino [53]. Por essa razão essa faixa de frequência foi descartada.

A banda de frequência de 5 à 10 kHz , na localidade onde o protótipo será testado e utilizado, está reservada à um experimento anterior e cujos sinais serão modelados como interferidores nessa dissertação. Alguns destes sinais interferidores utilizam pulsos de frequência modulada com variação linear (LFM) varrendo a banda da menor para maior frequência e, para que estes possam ser distinguidos do sinal de interesse mais facilmente, o Sinal-chave será modelado utilizando variação hiperbólica (HFM).

Enfim, a banda de frequência restante para o desenvolvimento do protótipo descrito nesse trabalho é de 10 à 24 kHz . E esse foi o fator decisivo na escolha do projetor ITC-1001 cuja frequência de ressonância em série (ponto ótimo para transmissão) informada pelo fabricante é de $16,5\text{ kHz}$.

Adotou-se como frequência central da banda de transmissão e recepção o valor de $f_C = 16,5\text{ kHz}$. E a largura de banda do sinal será de 5 kHz . Dessa forma, o Sinal-chave será gerado com frequência modulada entre 14 kHz e 19 kHz .

Partindo da definição da banda de frequência do sinal, é fundamental durante o pré-processamento executar a filtragem do sinal medido. Para isso foi utilizado um

⁴A placa Octo Audio Injector é um exemplo de acessório compatível com a Raspberry Pi capaz de capturar sinais em até oito canais simultâneos com taxa de amostragem de até 96 kHz .

⁵Quando a propagação ocorre em águas rasas ou o perfil de velocidade do som favorece a formação de um canal sonoro de superfície deve-se observar o limite para o comprimento de onda comportado pelo canal. Nesse caso, o limite inferior deverá ser a frequência de corte calculada para uma dada espessura do canal de superfície ou, no caso de águas rasas, será função da profundidade e da relação entre as velocidade na coluna d'água e no leito marinho [31].

filtro passa banda *Butterworth*. A largura de banda atribuída ao filtro foi de 10 kHz para afastar seus limites do sinal de interesse. Dessa forma, o limite inferior da banda passante adotada foi $f_{low} = 12\text{ kHz}$, visando eliminar as frequências onde atuam os sinais interferidores e onde o ruído tem maior intensidade, e o limite superior foi $f_{high} = 22\text{ kHz}$, garantindo que não haja interferência de sinais com frequência acima da banda de interesse.

Butterworth é um filtro do tipo *Infinite Impulse Response (IIR)* e se destaca por possibilitar uma resposta em frequência tão plana quanto possível na banda passante, sendo conhecido como “filtro de maximização de magnitude plana”. Apesar de requerer uma banda de transição maior (quando comparado a outros filtros IIR como *Chebyshev*, por exemplo) tem a vantagem de não apresentar ondulação (*ripple*) na banda passante.

Além da banda passante mencionada ($12\text{ a }22\text{ kHz}$), a implementação tem como parâmetro a ordem do filtro. Esse parâmetro determina a taxa de variação do ganho do filtro na banda de transição (*rate of roll-off*). Dessa forma, quanto maior a ordem do filtro mais sua resposta em frequência se aproxima da resposta ideal, conforme mostra a Figura 3.10.

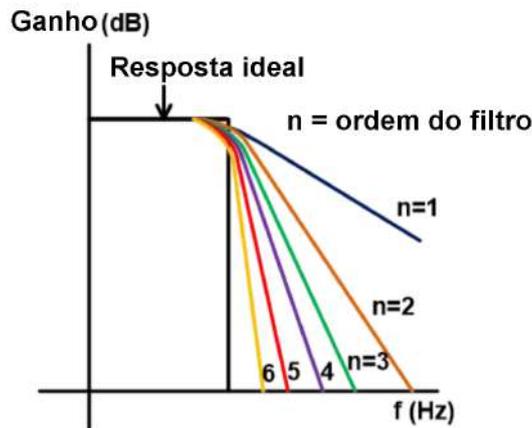


Figura 3.10: Comparação entre as respostas em frequência de filtros *Butterworth* para diferentes ordens de filtragem.

Entretanto, o aumento da ordem do filtro causa aumento proporcional no atraso das amostras do sinal e, além disso, no número de operações efetuadas durante o processo de filtragem. Isso representa maior tempo de processamento e, portanto, a escolha da ordem do filtro deve utilizar como critério de otimização encontrar o menor valor que garanta a relação de ganho necessária entre a banda passante e a banda rejeitada.

A Figura 3.11 apresenta a resposta em frequência do filtro otimizado para os

parâmetros específicos deste trabalho. Ele foi modelado para garantir uma perda menor que 1 dB na banda de $14\text{ a }19\text{ kHz}$ e atenuação de 100 dB na banda rejeitada. Nos valores de frequência de corte $f_{low} = 12\text{ kHz}$ e $f_{high} = 22\text{ kHz}$ a atenuação é de aproximadamente 3 dB . O filtro resultante do processo de otimização é um filtro *Butterworth* de ordem $n = 23$. O código utilizado para o cálculo da ordem do filtro como foi discutido é o Apêndice B.1 deste trabalho⁶.

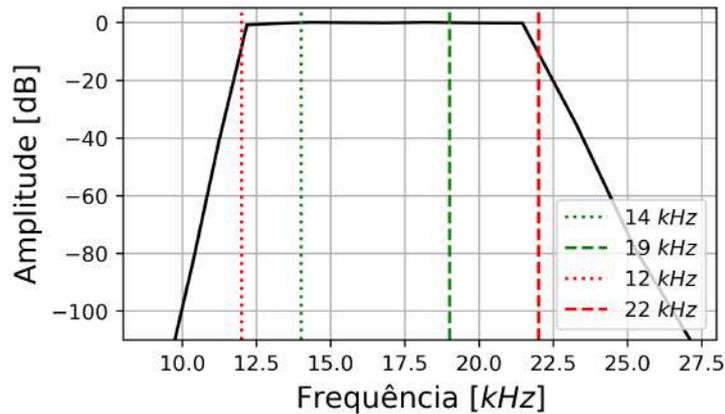


Figura 3.11: Resposta em frequência do filtro *Butterworth* de ordem $n = 23$.

A Figura 3.12 mostra a aplicação do filtro *Butterworth* em um sinal sintético gerado na banda de frequência de $0\text{ a }24\text{ kHz}$. É possível notar que o filtro mantém a amplitude do sinal na banda passante enquanto atenua as frequências da banda rejeitada a valores próximos de zero.

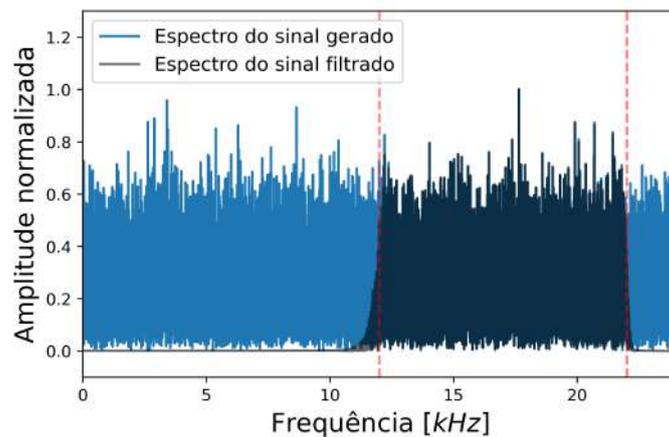


Figura 3.12: Filtro aplicado a um sinal sintético de ruído gaussiano branco. As linhas vermelhas mostram a banda de filtragem de $12\text{ a }22\text{ kHz}$.

⁶A função utilizada para executar a otimização é parte da biblioteca Scipy do Python e sua documentação está disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.butterord.html>. Acesso em 07/12/2022.

O próximo parâmetro avaliado para a aplicação se refere à duração do sinal emitido e sua relação com a janela temporal de processamento no computador embarcado.

Na seção anterior discutiu-se a relação entre a duração de um sinal e a amplitude instantânea da sua autocorrelação. ABRAHAM e SIDERIUS [44] mostram que elas são diretamente proporcionais. Em outras palavras, quanto maior a duração do sinal, maior será a quantidade de amostras correlacionadas. Isso leva ao raciocínio de que sinais de maior duração são superiores para a aplicação sugerida. Entretanto, sempre existirá uma limitação na duração do sinal em qualquer sistema de transmissão e detecção que possa ser construído.

No caso descrito nesta dissertação a recepção e processamento do sinal em tempo real foram limitados a 0,1 s. Janelas temporais maiores não são suportadas pelo microcomputador sem que haja perda de pacotes de dados durante o processamento. Nos testes executados, a Raspberry Pi (modelo 3B) mostrou-se capaz de executar a comparação entre o sinal medido e o Sinal-chave dentro desse intervalo temporal enquanto mantinha simultaneamente a captação da próxima janela.

Assumindo essa limitação de processamento, existem ao menos duas formas de construir e transmitir o Sinal-chave para garantir uma correlação previsível na plataforma embarcada. A primeira delas é reduzir o tamanho do Sinal-chave em relação à janela de processamento e transmiti-lo múltiplas vezes para garantir que todas as amostras façam parte do cálculo da correlação. Chamaremos esta solução de "múltiplos envios". A segunda forma é implementar o chamado "*buffer* deslizante" no qual o cálculo da correlação é feita com mais de uma das janelas capturadas através do armazenamento das amostras dessas janelas. Neste último, a limitação de processamento se aplicará ao tamanho do *buffer*.

No caso dos múltiplos envios, as características do processamento em tempo real mostram que utilizar uma duração de sinal menor que o valor limite da janela de processamento pode gerar uma resposta mais previsível. Isso porque, numa comunicação unidirecional entre o projetor e o dispositivo submerso, não é possível determinar em qual ponto da janela o sinal será recebido pelo hidrofone.

Se o Sinal-chave possuir a mesma duração da janela de processamento, a correlação só atingirá o valor máximo previsto (para um dado SNR) caso o Sinal-chave chegue ao receptor no momento exato em que uma janela de processamento se inicia. Do contrário, o número de amostras correlacionadas, n_R , será sempre menor que a duração da janela. Mais especificamente, o número de amostras correlacionadas será igual à diferença entre o tempo de duração da janela, T_W , e o instante de chegada do Sinal-chave dentro da janela, T_A , multiplicados pela taxa de amostragem, f_S , como mostra a Equação 3.3.

$$n_R = (T_W - T_A)f_S \quad (3.3)$$

Na Figura 3.13 observa-se o efeito descrito anteriormente para cinco valores arbitrários de instantes de chegada (T_A) com relação a uma janela de processamento de 100 *ms* e um Sinal-chave emitido com a mesma duração. A medida que T_A se aproxima do final da janela, a correlação diminui sensivelmente. A simulação apresentada foi modelada na ausência de ruído para evidenciar a relação linear entre a amplitude da resposta à filtragem casada e o número de amostras disponíveis para o cálculo na janela de processamento em que o sinal é captado.

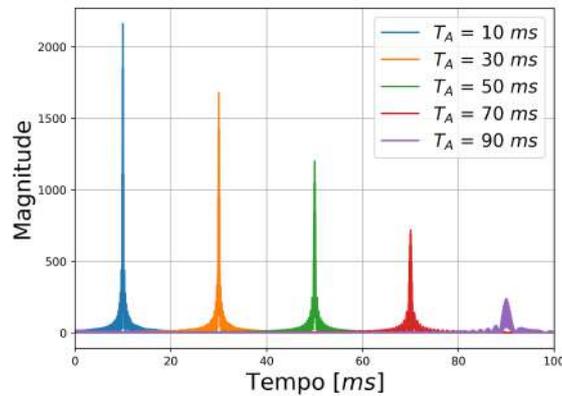


Figura 3.13: Picos de correlação do Sinal-chave com a duração igual a janela de processamento em diferentes instantes de chegada. Valores simulados para o sinal na ausência de ruído.

As amostras restantes ($T_A.f_S$) serão testadas na janela seguinte, porém, mesmo que representem uma parcela maior das amostras do Sinal-chave (o que ocorre para $T_A > T_W/2$), terão um pico de amplitude da resposta a filtragem casada menor que a primeira parcela apresentada na Equação 3.3. Isso ocorre porque sempre que uma nova janela se inicia a correlação com a réplica armazenada do Sinal-chave é calculada a partir da frequência inicial da banda do Sinal-chave. Como efeito, a correlação com o segundo trecho do sinal sempre será fraca e não alcançará um limiar de detecção relevante.

A influência do instante de chegada do sinal na resposta do sistema é um fator que pode ser contornado emitindo uma série de sinais estrategicamente espaçados para garantir que pelo menos um deles seja recebido em um intervalo especificado da janela de processamento. Por exemplo, se forem emitidos 2 sinais de 100 *ms* espaçados entre si em 150 *ms*, podemos garantir que pelo menos um deles será captado na primeira metade de uma janela de processamento. Da mesma forma, emitindo 3 sinais de 100 *ms* espaçados entre si em 133 *ms*, pelo menos um deles será

captado no primeiro terço de uma janela de processamento. Esse padrão pode ser equacionado e o intervalo entre os sinais emitidos calculado conforme apresentado na Equação 3.4.

Dividindo a janela de processamento em n_P partes iguais, se forem emitidos n_P sinais espaçados de intervalos iguais a T_I garante-se que ao menos um dos sinais emitidos será recebido na primeira fração da janela de processamento (0 a T_W/n_P) onde a amplitude da resposta a filtragem casada é maior.

$$T_I = \left(\frac{n_P + 1}{n_P} \right) T_W \quad (3.4)$$

A contrapartida dessa solução é que o sinal a ser transmitido terá duração T_{ST} sempre maior que T_W para possibilitar um valor previsível de amplitude na resposta. O valor de T_{ST} pode ser calculado pela Equação 3.5 e deve observar o limite indicado para transmissão ininterrupta do projetor acústico.

$$T_{ST} = \left(\frac{2(n_P)^2 - 1}{n_P} \right) T_W \quad (3.5)$$

Outra abordagem possível e que permite linearizar a amplitude da resposta a filtragem casada em relação ao instante de chegada do sinal na janela de processamento é utilizar um Sinal-chave com duração igual a metade de T_W (duração da janela). Nesse caso, se o sinal emitido for composto por dois pulsos deste Sinal-chave sem intervalo, totalizando 100 ms , a resposta a correlação será constante independente do instante de tempo em que o sinal emitido for captado pelo hidrofone dentro da janela de processamento.

É possível comprovar esse efeito através da Equação 3.3 pois $n_R > (T_W/2) \cdot f_s \forall T_A < T_W/2$ e portanto, neste intervalo, todas as amostras serão processadas na mesma janela, sem corte. Quando $T_A > T_W/2$ o segundo sinal emitido em conjunto será processado pela janela seguinte com a mesma quantidade de amostras disponíveis para correlação, $n_R = (T_W/2) \cdot f_s$, tamanho total do Sinal-chave.

A Figura 3.14 mostra a resposta de um Sinal-chave com duração igual a $T_W/2$ (emitido em dois pulsos consecutivos como sugerido anteriormente) para três diferentes instante de chegada na janela de processamento na condição $T_A < T_W/2$. É possível visualizar que o primeiro pulso do sinal emitido terá magnitude constante para correlação até o limite de $T_A = T_W/2$ enquanto o segundo pulso se degrada linearmente a medida que T_A aumenta.

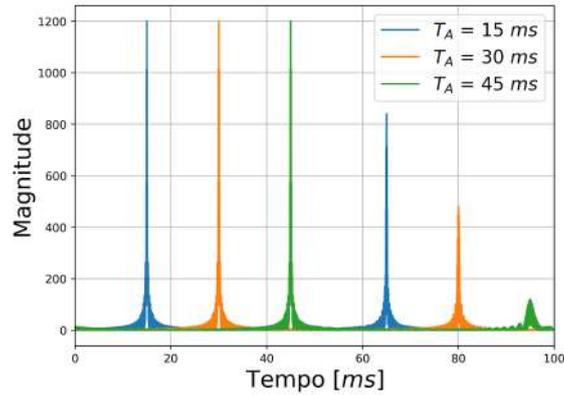


Figura 3.14: Picos de correlação do Sinal-chave com a duração igual a metade da janela de processamento em diferentes instantes de chegada mantendo $T_A < T_W/2$. Valores simulados para o sinal na ausência de ruído.

De maneira complementar, a Figura 3.15 apresenta a simulação do mesmo Sinal-chave para três diferentes instantes de chegada onde $T_A > T_W/2$. Nesse caso, vê-se que o primeiro pulso tem picos de correlação degradados pela quantidade de amostras disponíveis para o cálculo dentro da janela de processamento em que o Sinal-chave atinge o hidrofone receptor. Porém, o segundo pulso do Sinal será processado com a totalidade das amostras $((T_W/2)f_s)$ na janela de processamento seguinte.

Utilizando essa abordagem, o tempo de duração do sinal emitido, T_{ST} , será igual ao tempo de duração da janela de processamento, T_W .

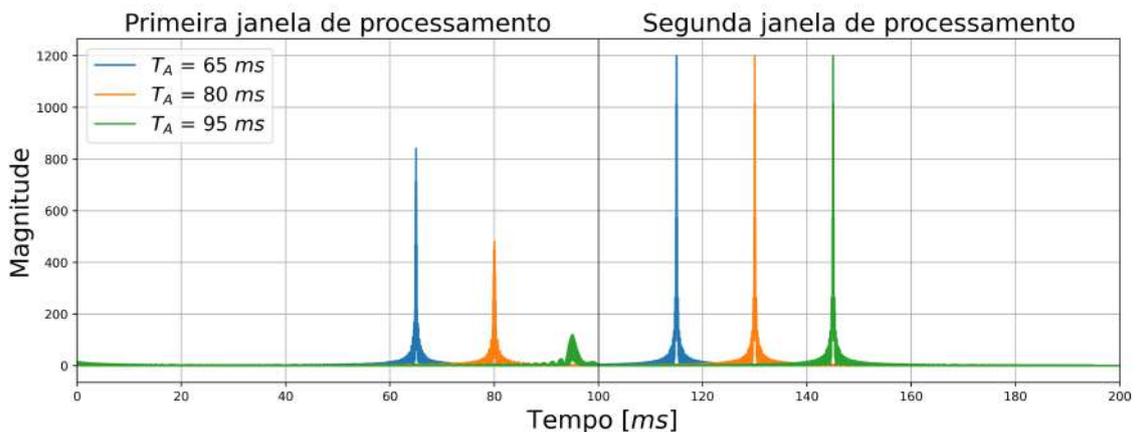


Figura 3.15: Picos de correlação do Sinal-chave com a duração igual a metade da janela de processamento em diferentes instantes de chegada mantendo $T_A > T_W/2$. Valores simulados para o sinal na ausência de ruído.

A segunda forma de lidar com a limitação de processamento imposta pelo *hardware* disponível é a implementação de um acumulador conhecido como *buffer* des-

lizante. Como mencionado anteriormente, neste caso a limitação será imposta ao tamanho do total do *buffer*, que deverá ser de 100 *ms*.

O acumulador funciona armazenando o sinal medido em múltiplas janelas até atingir o limite de memória pré-estabelecido. Daí, o algoritmo deverá descartar o bloco de dados mais antigo para receber o próximo, em *loop*.

A Figura 3.16 mostra um esquema simplificado de *buffer* deslizante que ajuda a compreender esse fluxo de dados. No primeiro momento, o acumulador recebe os blocos de dados 1 e 2 em espaços vazios. Como o tamanho máximo de alocação é de dois blocos, para receber o bloco 3 é necessário descartar o bloco 1, para receber o bloco 4 seria necessário descartar o bloco 2 e assim sucessivamente.

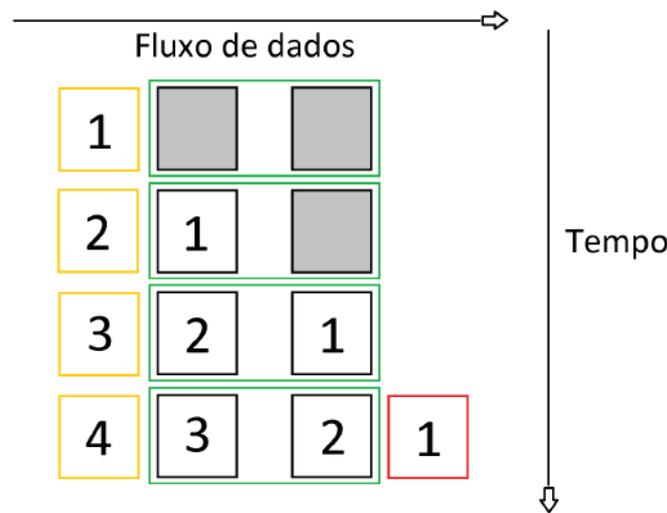


Figura 3.16: Esquema simplificado ilustrando um *buffer* deslizante.

Não por acaso a Figura 3.16 apresenta um *buffer* composto por duas janelas. Assim como visto anteriormente quando a abordagem de múltiplos envios foi apresentada, a configuração ótima para um *buffer* limitado à 100 *ms* será processar janelas de 50 *ms* duas a duas. Dessa forma, em qualquer instante em que o Sinal-chave for capturado dentro de uma janela a correlação será feita com todas as amostras.

O cálculo da correlação será feito comparando o Sinal-chave a 100 *ms* de sinal medido agrupando as janelas 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4, e assim sucessivamente.

De posse de todos os elementos necessários para a escolha do melhor sinal possível para a aplicação, a chave para o liberador foi criada: Um chirp hiperbólico, varrendo a banda de frequência de 12 *kHz* a 19 *kHz* (*up-sweep*) e depois de 19 *kHz* a 12 *kHz* (*down-sweep*), com duração de 50 *ms* e frequência de amostragem $f_s = 48 \text{ kHz}$. Como é previsto que o sinal captado seja filtrado antes do processamento, o mesmo filtro será aplicado à réplica armazenada no dispositivo, introduzindo na réplica a mesma mudança de fase que será causada pelo filtro no sinal medido. O algoritmo

utilizado para gerar o Sinal-chave é apresentado no Apêndice B.2.

Na seção 2.3 foi apresentado o comportamento de aceleração e desaceleração característico de um projetor acústico quando este é posto em funcionamento. E, para adequar o sinal transmitido a essa realidade, a solução mais comum é aplicar uma janela. Chamamos de janela o conjunto de coeficientes que serão multiplicados pelo sinal atribuindo diferentes ganhos a cada trecho.

O objetivo do janelamento, nesta aplicação, é suavizar o sinal transmitido o aproximando da resposta do projetor. Com isso, aumenta-se a vida útil do equipamento. Uma opção consagrada, dentre as várias disponíveis, é a janela de Hann. A função de Hann, nomeado em homenagem ao meteorologista Austríaco Julius von Hann, é uma função de janelamento discreto que obedece a função apresentada na Equação 3.6.

$$w(n) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right) \quad (3.6)$$

Onde n é o índice de uma dada amostra e N o número total de amostras.

A Figura 3.17 mostra o formato da janela de Hann. Os coeficientes variam de 0 a 1. A largura da janela pode ser ajustada de acordo com o tamanho do vetor de amostras que se deseja conformar.

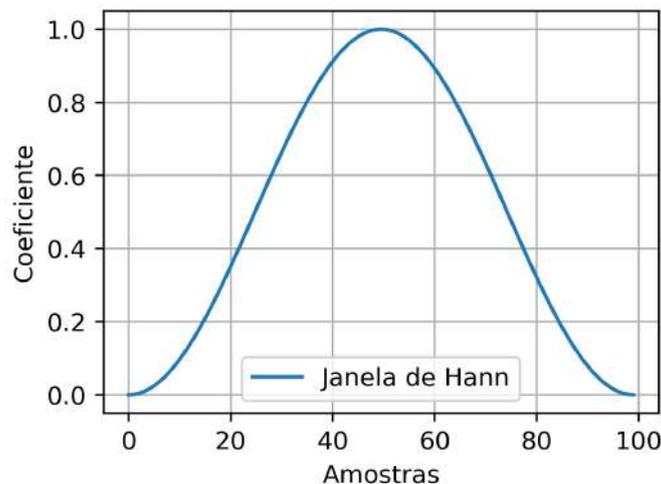


Figura 3.17: Formato característico da janela de Hann.

O janelamento previne o desgaste imposto ao projetor por uma variação brusca de movimento. Porém não é interessante para a aplicação descrita neste trabalho que seja atribuído ganho zero a nenhum trecho do Sinal-chave. Por isso, o sinal a transmitir terá um trecho posto especificamente para satisfazer a condição de aceleração e desaceleração do transdutor, afastando o Sinal-chave dessas regiões.

Esse sinal criado para transmissão é apresentado na Figura 3.18. O primeiro gráfico se refere à forma de onda e seu envelope assemelha-se propositalmente, nas

extremidades, com a forma medida quando o tempo de resposta do projetor foi avaliado, Figura 2.10. O segundo gráfico apresenta a correlação do sinal transmitido com o Sinal-chave.

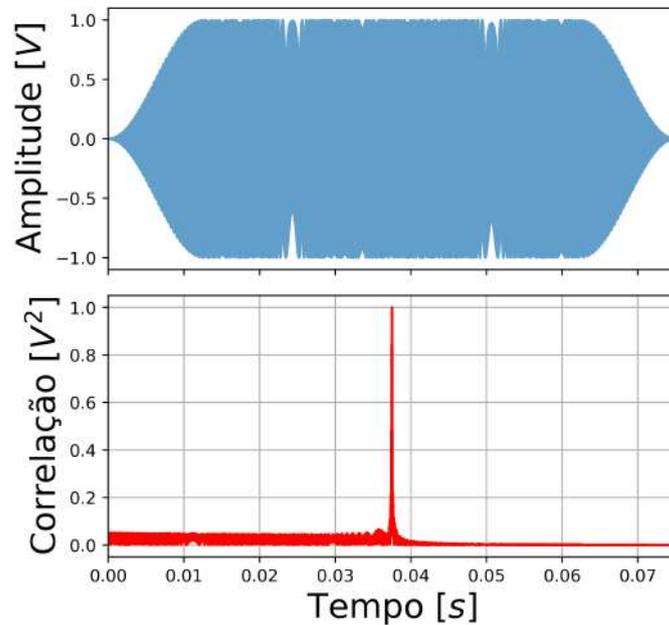


Figura 3.18: Forma de onda do sinal que será transmitido do projetor acústico e correlação deste como o Sinal-chave.

O código transcrito no Apêndice B.3 mostra a implementação desse sinal. Nos trechos das extremidades foi acrescentado um Tom de 13200 Hz para tornar o sinal mais audível e permitir confirmação da transmissão. Esse tom foi utilizado apenas para adequar a forma de onda à resposta do projetor acústico que será utilizado, portanto, não impacta no projeto do Sinal-chave.

Capítulo 4

Testes e Discussões

Todos os sistemas desenvolvidos e construídos ao longo desta pesquisa foram postos a prova separadamente e em conjunto para provar a viabilidade do protótipo sugerido e estes testes são apresentados neste capítulo.

4.1 Estanqueidade

Na Seção 2.1 foram apresentados os parâmetros necessários para o dimensionamento do invólucro como um vaso de pressão e os tipos de vedação utilizados para garantir a estanqueidade em um regime de pressão positiva. Em seguida, na Seção 3.1, listamos o material selecionado para o protótipo e os limites previstos para uma operação segura e confiável.

Neste primeiro experimento o invólucro foi montado sem a maioria dos componentes internos, apenas o eixo principal foi posicionado para possibilitar o teste de estanqueidade. O objetivo foi avaliar vazamento do ar comprimido posto no interior do invólucro que, posteriormente resultaria em entrada de água, através das vedações nos tampões (superior e inferior) ou através das vedações por onde o eixo atravessa o invólucro.

Os tampões utilizam como vedação anéis de elastômero (*o-rings*), já a vedação do eixo é feita por dois retentores e um selo mecânico conforme exposto na Figura 3.2. As regiões susceptíveis a vazamento são as interfaces entre o tubo e os tampões e entre o eixo e o alojamento de suas vedações conforme destacado na Figura 4.1.

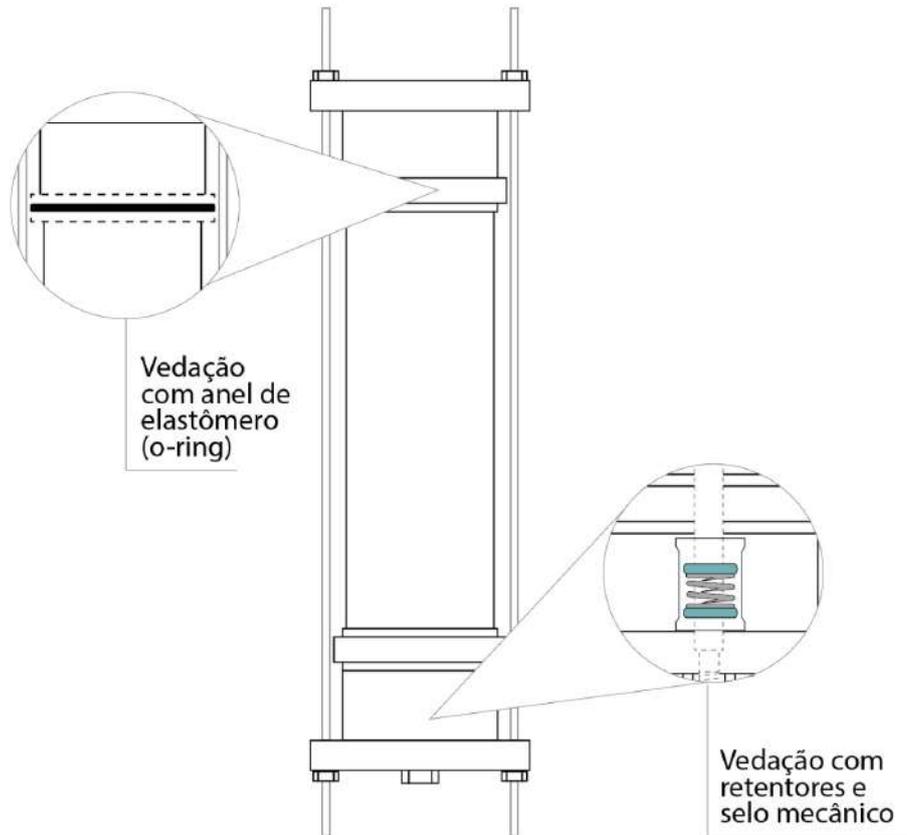


Figura 4.1: Regiões susceptíveis a vazamento alvo do teste de estanqueidade.

A região destacada a esquerda, na parte superior da Figura 4.1, se refere ao local onde são posicionados os anéis de elastômero nos dois tampões. Os anéis tem seção circular e diâmetro ligeiramente maior que a profundidade do alojamento para propiciar uma montagem com interferência entre os tampões e o tubo, isso mantém a borracha comprimida e é essencial à vedação. O detalhamento apresenta apenas a vedação superior para não sobrecarregar a ilustração, contudo, as vedações dos dois tampões são exatamente iguais.

A região destacada à direita, na parte inferior da figura, se refere ao local onde foi fixado o alojamento do selo. Dentro desse alojamento encontram-se os dois retentores (representados na cor azul) e o selo mecânico (representado pela mola na cor cinza) que, conforme citado, garantem a vedação com o eixo que atravessa o invólucro e se conecta com a porca que será efetivamente separada quando o dispositivo for acionado.

Prevendo a utilização do protótipo a uma profundidade de cerca de 25 m, o que implica numa pressão devido a coluna d'água de aproximadamente 2,5 bar, a pressão escolhida para o teste foi de 3 bar. Esse valor está dentro do limite estabelecido para o material e todas as vedações utilizadas e nos mantêm afastados dos limites de falha do material de PVC. Para efetuar testes com pressões maiores seria necessário criar

uma área segura com acionamento a distância.

O invólucro foi pressurizado com ar-comprimido utilizando um compressor e uma válvula Schrader¹ instalada no centro do tubo. A Figura 4.2-A mostra a pressurização do invólucro até o valor determinado para o teste (3 bar). Após a pressurização, o protótipo foi posicionado no tanque de prova como mostrado na Figura 4.2-B.

O teste consistiu em manter o protótipo no tanque por 72 horas simulando sua permanência submerso em um fundeio. Após esse período, a pressão no interior do invólucro foi novamente aferida e o valor de 3 bar foi rigorosamente mantido. Isso mostrou que as vedações utilizadas são adequadas para a aplicação.

Como o teste foi executado no tanque de prova, a uma profundidade desprezível, o diferencial de pressão entre o interior do invólucro e o ambiente externo foi o maior possível. Aplicando o dispositivo no local previsto, a medida que a profundidade aumentar o diferencial de pressão será menor até o limite de cerca de 0,5 bar. Essa condição é menos severa para os componentes, também foi testada e obteve o mesmo resultado.



Figura 4.2: Pressurização do invólucro e posicionamento no tanque de prova para teste de estanqueidade.

¹A válvula Schrader é utilizada em pneus de automóveis e bicicletas, ou ainda como válvula de serviço em sistemas de ar-condicionado. Ela atua como retenção permitindo a passagem de ar apenas quando o pino é pressionado e a força da mola que a compõe é vencida. Em geral a pressão no interior da câmara é maior que a exterior o que favorece o fechamento da válvula.

4.2 Acionamento do dispositivo

Uma etapa fundamental para validação do protótipo do liberador acústico é testar sua capacidade de acionar o mecanismo atuador quando o Sinal-chave for corretamente identificado. Mais especificamente, é preciso atestar que o motor elétrico é capaz de acionar o eixo e liberar a porca ao receber um sinal da Raspberry Pi.

Além disso, a carga elétrica necessária para executar o acionamento precisa estar disponível no momento em que o Sinal-chave for recebido. Esses desafios se tornam ainda maiores pelo fato de que os componentes, em sua maioria, foram adaptados e não fabricados sob medida para essa aplicação.

Na Seção 3.2 foi apresentado o circuito controlador necessário para separar a carga do motor do circuito eletrônico do microprocessador que, de outra forma, não suportaria a demanda de corrente necessária ao acionamento. Esse circuito foi testado em bancada utilizando o algoritmo apresentado no Apêndice B.4. A Figura 4.3 mostra um dos testes feitos com a placa controladora que cumpre esse papel. É possível notar que a alimentação do motor passa por conectores mais robustos e são separados dos contatos de comando oriundos da Raspberry Pi.

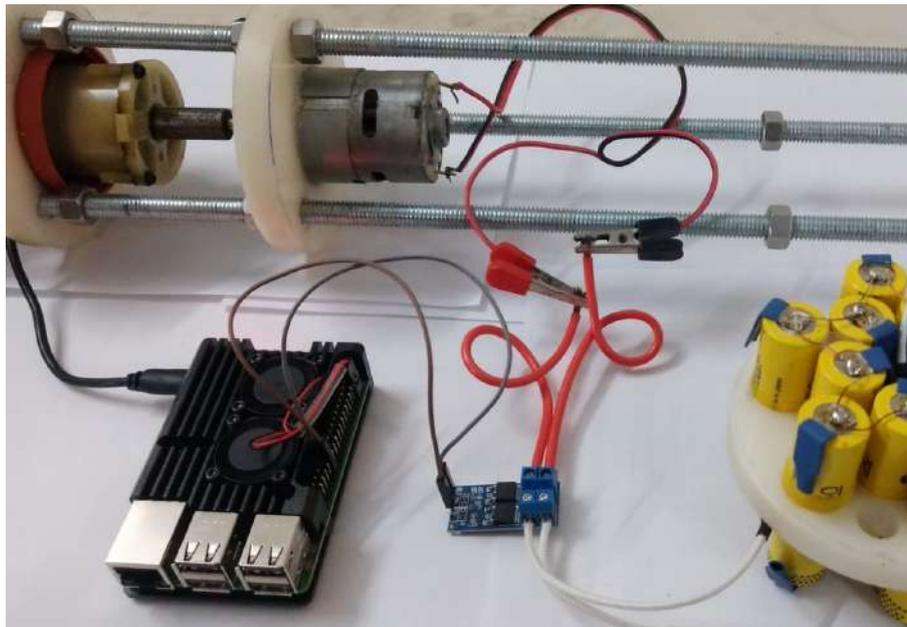


Figura 4.3: Teste de acionamento do motor utilizando comando enviado pelos pinos GPIO da Raspberry Pi. O elemento central é a placa apresentada na Figura 3.4.

É necessário que o motor permaneça ligado por cerca de 1 segundos para que a porca se solte completamente do eixo no dispositivo. O comando será mantido pelo dobro do tempo para garantir que não haja falhas devido a algum atraso ou dificuldade de movimento entre as peças provocada pelo período inerte.

Este protótipo foi desenvolvido visando construir um equipamento portátil e de fácil manuseio. Por isso suas dimensões foram reduzidas ao diâmetro de 100 milímetros do tubo PVC escolhido para o invólucro. Dessa forma, os componentes do conjunto eletromecânico foram montados em linha conforme mostra a Figura 4.4. Cada plataforma onde são posicionados os componentes precisa ser ajustada e travada na distância correta em relação aos componentes adjacentes, do contrário, o motor elétrico requisitaria mais energia para mover o eixo, reduzindo a eficiência da aplicação.

Assim como no travamento externo do invólucro, três barras roscadas foram utilizadas como guias para o posicionamento das plataformas feitas com discos de polipropileno com espessura de 10 milímetros e diâmetro de 96 milímetros (medida ajustada para o interior do invólucro).

Nesse ponto, todos os componentes foram postos para atuar conjuntamente e funcionaram como previsto: Ao enviar o comando através da GPIO da Raspberry Pi o conjunto eletromecânico é ligado e libera a porca da ponta do eixo principal.

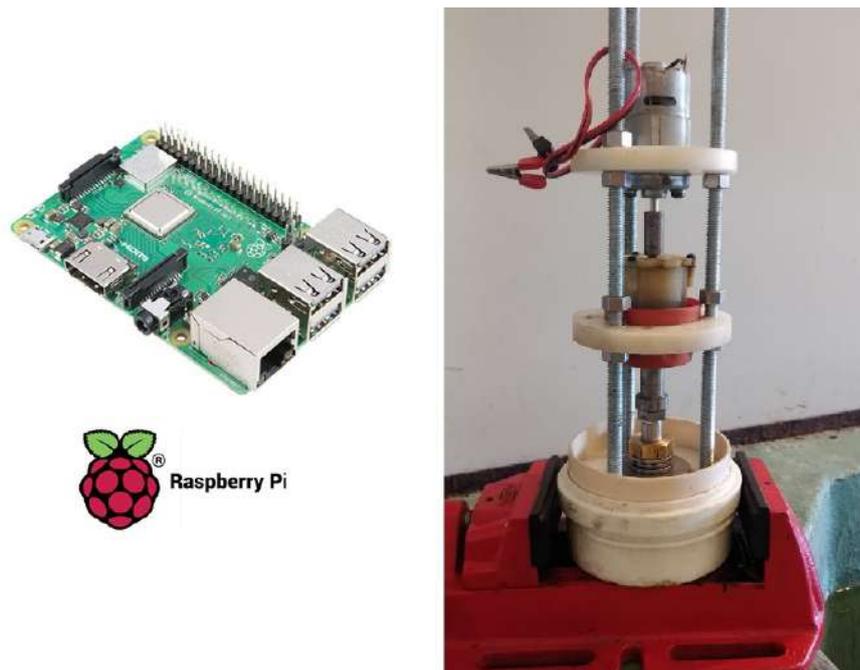


Figura 4.4: À esquerda, Raspberry Pi utilizada no protótipo. À direita, os três componentes que, junto ao banco de baterias, formam o conjunto eletromecânico interno.

4.3 Simulação de desempenho do algoritmo de decisão

O resultado de maior relevância para a acústica diz respeito à robustez do algoritmo de decisão, considerando os parâmetros específicos desta aplicação. O Sinal-chave foi escolhido, conforme discutido na Seção 3.3, baseado nas características do projetor acústico utilizado (2.3), do meio de propagação (2.4) e do método de processamento de sinais escolhido (2.6). A partir daí, vários testes puderam ser realizados para atestar a capacidade do algoritmo em atender com exclusividade o comando de acionamento.

4.3.1 Simulação com ruído sintético gaussiano branco

O primeiro teste executado teve como objetivo simular a detecção do Sinal-chave na presença de ruído. Nessa abordagem, o modelo sintético utilizou ruído gaussiano branco para avaliar os limites de detecção no que diz respeito à relação sinal-ruído e obter um valor inicial para o parâmetro de limiar de decisão para o protótipo. É importante enfatizar que esse ensaio foi realizado com dados puramente sintéticos.

O objetivo dessa simulação foi testar o algoritmo de detecção para cada combinação de SNR e limiar de decisão numa lista especificada previamente alterando apenas o ruído (gerado de forma aleatória) em um determinado número de iterações. Dessa forma, temos como resultados o número de vezes em que o Sinal-chave é detectado estando ele presente no sinal medido e o número de vezes em que o limiar é alcançado na correlação do Sinal-chave com o ruído puro. Conforme apresentado na Figura 2.19 a razão entre esses valores e o número total de eventos realizados gera estatísticas equivalentes a Probabilidade de Detecção e a Probabilidade de Falso Alarme.

Por exemplo, se são executadas 100 iterações (para um dado par SNR e limiar de decisão) e dentre elas o algoritmo atinge o limiar de decisão, na amostra correta onde o Sinal-chave foi enviado, em 70 casos; e, para os mesmo 100 vetores de ruído gerados aleatoriamente, o sinal é interpretado como presente 30 vezes em trechos onde sabidamente só havia ruído; podemos considerar que nesse espaço amostral a Probabilidade de Detecção é de 70% e a Probabilidade de Falso Alarme é de 30%.

Os valores de SNR e limiar que fizeram parte do ensaio foram escolhidos nas regiões limites onde havia variação relevante na resposta do algoritmo. E, para que este teste possa ser considerado estatisticamente válido o número de iterações foi atribuído com valor suficientemente grande de 10^5 .

Foram utilizados cinco valores de SNR entre -17 dB e -21 dB e vinte valores de limiar de decisão entre 30 e 100. O que significa que 100 combinações entre SNR e

limiar são possíveis e cada uma dela foi testada com 10^5 vetores aleatórios de ruído gaussiano branco.

A representação da eficiência de um sistema de detecção através desses dois parâmetros, P_D e P_{FA} , é conhecida na literatura como Curva Característica de Operação do Receptor ou *ROC curve*, da sigla equivalente em inglês. A Figura 4.5 mostra o resultado do ensaio descrito. Nota-se que, coerentemente, a Probabilidade de Detecção e a Probabilidade de Falso Alarme são diretamente proporcionais. Em outras palavras, se o limiar de decisão aumenta a P_D diminui assim como a P_{FA} . E se o limiar diminui as chances dele ser atingido aumentam tanto para o conjunto de amostras que contém o Sinal-chave quanto para o conjunto de amostras que é composto somente por ruído.

Na Figura 4.5-A a ROC é apresentada na forma clássica onde as probabilidades variam de 0 a 1. Em 4.5-B o eixo das abscissas é representado em escala logarítmica para evidenciar a região de interesse. Como posto na Seção 2.6, o limiar de decisão é escolhido de forma a minimizar a probabilidade de falso alarme (teorema de Neyman-Pearson) [48].

Atribuindo o valor esperado de 10^{-3} à Probabilidade de Falso alarme, o que equivale a uma chance em mil de o atuador ser acionado por ruído (modelado como gaussiano branco), os dados apontam consistentemente para um limiar de decisão em torno de 70 na magnitude da correlação calculada. A Probabilidade de Detecção resultante dessa escolha pode ser estimada avaliando a interseção de cada curva com o eixo das ordenadas na Figura 4.5-B. Os valores para a relação sinal-ruído igual a -17 dB e -18 dB foram de 91,95% e 78,12%, respectivamente. Para valores menores de SNR a P_D resultante está abaixo de 60% indicando que estaríamos além do limite de detecção aceitável para o dispositivo.

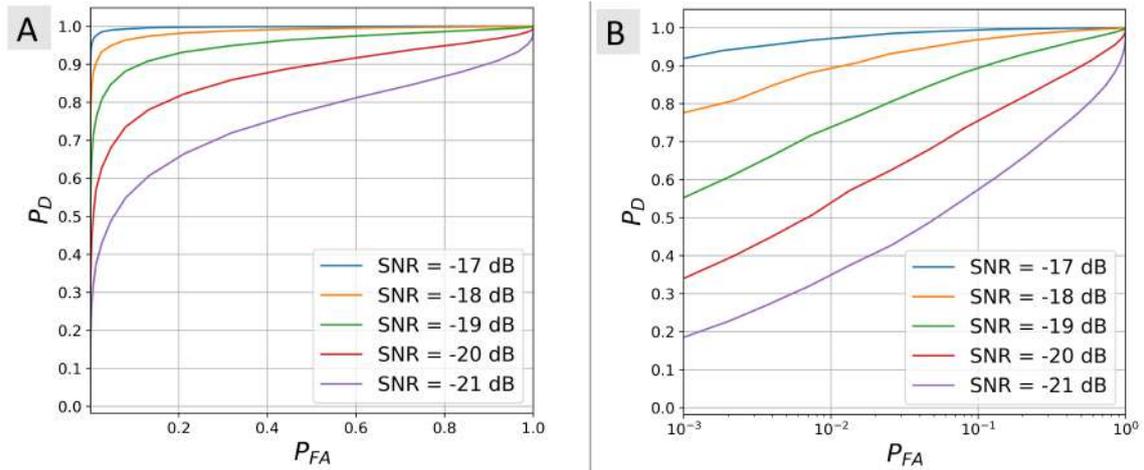


Figura 4.5: Curva característica de operação do receptor calculada nas proximidades do limite operacional para interferência por ruído gaussiano branco. O gráfico A é a apresentação clássica da curva. B apresenta o eixo das abscissas em escala logarítmica.

Embora se trate de uma avaliação baseada em ruído sintético e modelado como gaussiano branco, este resultado é um indicativo de estabilidade do algoritmo decisorio que compõe o dispositivo, pois foram simulados 10^5 possibilidades diferentes de ruído com amplitude sensivelmente maior que a amplitude do sinal de interesse. Desse ensaio foi possível caracterizar o receptor através de sua curva de resposta e atribuir um valor de limiar de decisão baseado na expectativa de P_{FA} .

4.3.2 Teste de desempenho no ambiente real

É previsto que, no cenário real, a performance do algoritmo seja degradada quando comparada à simulação com dados sintéticos. E, por isso, é imprescindível que sejam feitos ensaios *in situ* para determinar o alcance do equipamento.

O teste executado em seguida teve como objetivo aproximar a condição imposta ao algoritmo de decisão à condição real e, a partir desse ponto, a avaliação de performance foi feita utilizando dados gravados no ambiente real. Para isso, o sinal de interesse foi transmitido, utilizando um projetor submerso (modelo ITC-1001), e gravado em um hidrofone, similar ao apresentado na Seção 2.5, posicionado a cerca de 500 metros na Enseada dos Anjos (Arraial do Cabo/RJ). A Figura 4.6 mostra no mapa o local onde o experimento foi realizado e a distância aproximada entre os pontos de transmissão e recepção.



Figura 4.6: Local de realização do experimento destacando a distância aproximada entre o projetor e o receptor. O valor considerado para cálculos foi de 500 m.

Foram gravados três conjuntos de dados com duração de 20 minutos cada. Durante a gravação, o Sinal-chave foi emitido do projetor acústico em instantes de tempo específicos para avaliar a capacidade de detecção do algoritmo. A rotina de transmissão executada consistiu em enviar o Sinal-chave a cada 3 segundos.

A Tabela 4.1 apresenta a relação entre o volume ajustado no amplificador e a tensão de saída nos terminais do transformador casador de impedância. Esses valores de tensão foram medidos no laboratório e podem ser utilizado para calcular o nível da fonte, SL, através da Equação 2.14.

Tabela 4.1: Relação entre o volume do amplificador, a tensão de saída e o nível de fonte alcançado com o projetor ITC-1001.

Volume ajustado no amplificador	Tensão de saída em Volts nos terminais do casador de impedância	Nível da fonte (SL) em <i>dB</i> para o projetor ITC-1001
0,5	2	155,0
1,0	6	164,5
1,5	15	172,5
2,0	24	176,6
2,5	30	178,5
3,0	40	181,0
3,5	48	182,6
4,0	64	185,1
4,5	80	187,1
5,0	90	188,1
5,5	95	188,6
6,0	115	190,2
6,5	140	191,9
7,0	165	193,3
7,5	200	195,0
8,0	260	197,3
8,5	340	199,6
9,0	500	203,9
9,5	680	205,7
10,0	840	207,5

Durante a transmissão, o nível da fonte com que o sinal foi transmitido foi alterado sistematicamente para simular condições de menor SNR ou distanciamento do emissor. A cada dois minutos o volume do amplificador foi alterado e dessa forma cada bloco foi composto por 40 emissões do Sinal-chave com mesma intensidade. O registro dessa sistemática de transmissão é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Registro de emissão do Sinal-chave durante o ensaio com projetor e receptor submarinos.

Intervalo de envio [min]	SL em dB
00 a 02	188
02 a 04	187
04 a 06	185
06 a 08	182
08 a 10	181
10 a 12	178
12 a 14	176
14 a 16	172
16 a 18	164
18 a 20	155

Com apoio do sistema de aquisição de dados disponível no laboratório de acústica do IEAPM é possível avaliar a captação do hidrofone em tempo real através de áudio e da visualização do espectrograma. Isso permitiu executar o ensaio com a certeza de que o sinal estava sendo recebido mesmo antes de processar os dados com o algoritmo de detecção. Além disso, foi possível medir o valor médio de ruído (*Noise Level*, NL) durante o experimento em cerca 130 dB , valor típico do local de aplicação do experimento.

A Figura 4.7 apresenta o resultado do processamento de dois dos trechos da gravação na qual o Sinal-chave foi transmitido conforme a Tabela 4.2. O algoritmo de detecção foi aplicado e a correlação com o Sinal-chave mostrou-se claramente superior à correlação com o ruído presente no local do experimento. Considerando o limiar de decisão de 70 (inferido no experimento anterior para $P_{FA} = 10^{-3}$), o algoritmo cumpre inequivocamente o papel de prevenir falsos alarmes.

Na Figura 4.7-A observa-se que, para o SL igual a 182 dB , o sinal não seria detectado considerando o limiar especificado. A Figura 4.7-B apresenta o nível de fonte que traria o resultado esperado para o dispositivo, 188 dB . E, utilizando como referência esse trecho do sinal em que a detecção ocorreu como esperado, os dados foram processados para estimar a relação sinal-ruído necessária para o acionamento.

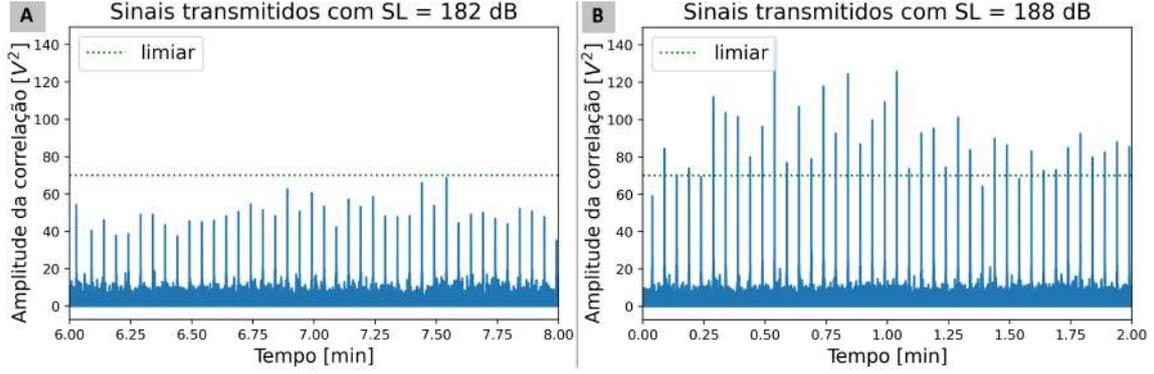


Figura 4.7: Resultado do processamento da gravação através do algoritmo de detecção nos trechos cujos níveis da fonte foram de 182 dB e 188 dB , respectivamente. Os picos representam os instantes onde o Sinal-chave está presente. O limiar representado pela linha verde (pontilhada) é o valor inferido no ensaio com ruído sintético para $P_{FA} = 10^{-3}$.

Para estimar a relação sinal-ruído a partir do trecho de sinal gravado foi necessário isolar cada segmento que continha as 40 emissões do Sinal-chave e utilizar um trecho em que sabidamente só havia ruído. A partir daí foi aplicado o método *Welch*[54], técnica comumente usada para estimar o SNR em um sinal gravado através da densidade espectral de potência (*Power Spectral Density*, PSD). Este método é útil quando o sinal é não-estacionário, ou seja, quando suas propriedades estatísticas mudam ao longo do tempo.

O SNR no trecho de 0 a 2 *min* calculado no processamento foi de $11,2 \text{ dB}$. Este valor será utilizado como referência para o cálculo do alcance do dispositivo como o valor mínimo necessário para o acionamento do liberador acústico.

Através da relação sinal-ruído e de posse da medição do ruído ambiente, estimamos o nível de pressão sonora que chega ao hidrofone ao receber o Sinal-chave.

$$SNR = SPL - NL \quad (4.1)$$

Para o ambiente do ensaio o nível de ruído medido foi $NL = 130 \text{ dB}$ e, portanto, o $SPL = 141,2 \text{ dB}$. E, sabendo que o nível da fonte transmitido foi de 188 dB , podemos calcular a perda na transmissão, $TL = 46,8 \text{ dB}$.

$$SL = SPL + TL \quad (4.2)$$

Adaptando o ambiente da modelagem apresentada pela Figura 2.15 para a profundidade de 10 m (onde está posicionado o hidrofone receptor utilizado no ensaio) e para a distância aproximada de 500 m em que a transmissão foi feita, obtivemos

o resultado de perda na transmissão calculada pelo modelo de propagação de raios, TRACEO, conforme apresentado na Figura 4.8.

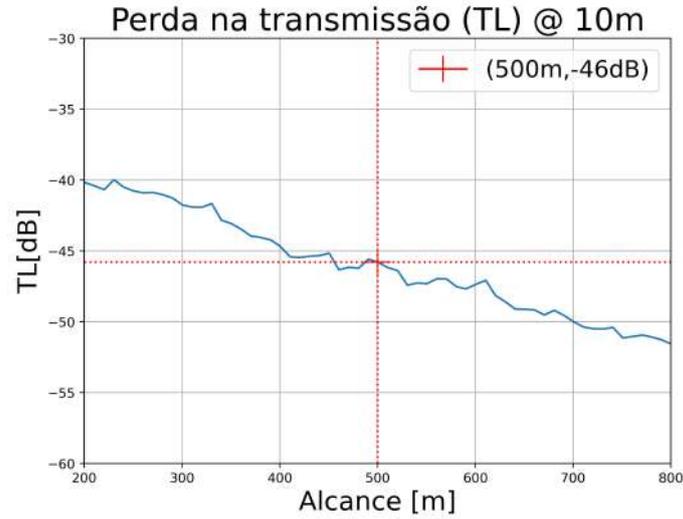


Figura 4.8: Perda na transmissão estimada pelo modelo TRACEO no o ambiente onde foi realizado o ensaio. Para a distância de 500 m o valor calculado foi de $-45,8$ dB.

O resultado de TL previsto pelo modelo atingiu valor próximo ao calculado através do sinal medido, a diferença entre os valores foi de 1 dB o que representa um erro de aproximadamente 2%. Embora este ensaio não valide o cálculo da TL através do modelo em todo o alcance, é justo afirmar que se trata de uma boa aproximação.

A partir deste ponto podemos estimar o alcance máximo ou limite de detecção deste protótipo de liberador acústico. O critério utilizado para essa estimativa foi comparar a *Transmission Loss* com o excesso de sinal, SE, fixando o valor de SPL em 141,2 dB conforme calculado em 4.1.

$$SE = SL - SPL_R \quad (4.3)$$

A Tabela 4.3 resume os principais valores para essa comparação que impõem o alcance do sinal emitido para esse protótipo. E, limitando a tensão aplicada ao projetor a 500 V, visando prevenir o desgaste prematuro do mesmo, chegamos ao alcance máximo de 1,5 km para o acionamento deste liberador acústico. Os valores de TL utilizados para o cálculo e apresentados na Tabela 4.3 foram retirados do modelo considerando a profundidade de 23 m conforme mostra a Figura 2.15.

Tabela 4.3: Relação entre a tensão aplicada e o alcance estimado em que o sinal poderá ser distinguido pelo liberador acústico.

Tensão de saída [V] / Volume ajustado no amplificador	Alcance do sinal em <i>km</i> considerando o ruído ambiente de 130 <i>dB</i>	<i>Transmission Loss</i> [<i>dB</i>] estimada pelo modelo de propagação (Figura 2.15)
90/5,0	0,5	52
340/8,5	1	58
500/9,0	1,5	60
680/9,5	2	63

4.4 Prova de mar do liberador acústico

Após executar com sucesso todos os testes necessários para comprovar a funcionalidade do equipamento, o último passo foi submeter o protótipo a uma prova de mar. Em outras palavras, testá-lo de forma completa em ambiente real de aplicação. Embora todos os componentes tenham sido testados separadamente foi um grande desafio integrar todos os sistemas. O teste foi realizado a uma profundidade de aproximadamente 8 metros com apoio de embarcação e mergulhadores disponibilizados pelo IEAPM. As gravações em vídeos da prova de mar estão disponíveis no endereço: https://drive.google.com/drive/folders/1InMVXMLd0fVdDsi7gpd4sggU1acAzuAF?usp=share_link.



Figura 4.9: Versão final do protótipo montado para a prova de mar.

A Figura 4.9 mostra a versão final do protótipo descrito neste trabalho. Dentro do invólucro estão o microprocessador, mecanismo de acionamento e as baterias que possibilitam o uso do liberador como dispositivo autônomo. Além do invólucro é possível visualizar o projetor acústico ITC-1001, utilizado para enviar o Sinal-chave e o hidrofone receptor, fabricado pelo próprio instituto.

A Tabela 4.4 traz as principais características do protótipo que nos permite comparar o resultado alcançado com o modelo comercial que utiliza o mesmo tipo de acionamento e cujas informações estão disponíveis na Tabela D.1 do Apêndice D. A característica que mais destoa quando compara-se o protótipo ao modelo comercial é a duração da bateria. Nota-se que converter um protótipo em um produto comercial exige algumas etapas de desenvolvimento que vão além do escopo deste trabalho, mas o liberador acústico apresentado aqui cumpriu o objetivo proposto inicialmente.

O custo aproximado para fabricação do protótipo foi de R\$ 800. E, embora não seja um parâmetro preciso para comparação com versões industrializadas, sugere que, de fato, trata-se de um protótipo de baixo custo.

Tabela 4.4: Resumo das principais características do protótipo de liberador desenvolvido neste trabalho.

Limite de profundidade	40 m
Frequência de Operação	(12–22 kHz)
Nível da Fonte (projetor) (dB re 1 μPa @ 1 m)	200 dB
Duração da bateria	3 dias
Carga suportada	Não aferida
Materiais construtivos	PVC, Polipropileno e Aço inoxidável
Dimensões (Comprimento x Diâmetro)	850 x 150 mm
Peso no Ar/Água	7,3/-0,8 kg
Custo aproximado de fabricação	R\$ 800

A marinha do Brasil, através da norma DGDNTM-2104 (de caráter ostensivo), estabelece as instruções para a avaliação e atribuição do Nível de Prontidão Tecnológica (*Technology Readiness Level* - TRL) aos projetos de ciência, tecnologia e inovação. A escala TRL foi desenvolvida pela NASA na década de 1970 para avaliar o estágio de desenvolvimento das tecnologias utilizadas em seus projetos espaciais. Desde então, essa metodologia foi adotada por diversos setores da indústria e da pesquisa científica como uma forma de avaliar o nível de maturidade de um projeto. Essa escala varia de 1 a 9 e leva em consideração diversos fatores, como o nível de maturidade da tecnologia, a existência de protótipos, os testes realizados e a validação da tecnologia em um ambiente relevante. Níveis mais baixos na escala

TRL, como 1 e 2, indicam estágios iniciais de pesquisa e desenvolvimento, enquanto níveis mais altos, como 8 e 9, indicam tecnologias já validadas em condições reais de uso. A escala TRL é amplamente utilizada em projetos de engenharia e ciência, permitindo uma avaliação objetiva do estágio de desenvolvimento de uma tecnologia e ajudando a guiar as decisões sobre investimentos e alocação de recursos em um projeto.

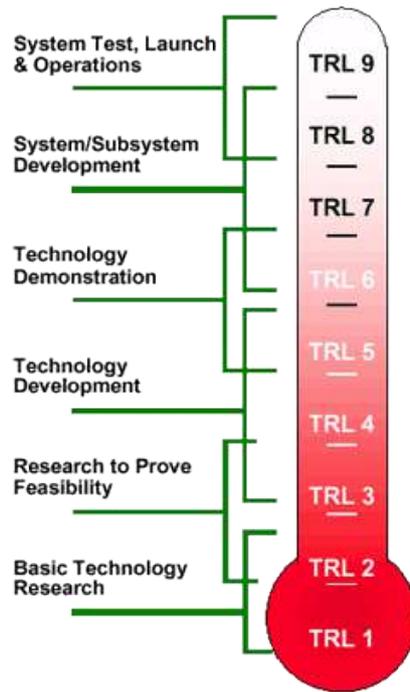


Figura 4.10: Infográfico ilustrando a escala dos Nível de Prontidão Tecnológica (*Technology Readiness Level* - TRL). Fonte: NASA/Sistemas de Espaço Aéreo (AS). Disponível em: <http://as.nasa.gov/aboutus/tr1-introduction.html>. Acesso em: 19/04/2023.

A Figura 4.10 apresenta de forma didática a referida escala. De acordo com os requisitos apontados pela norma DGDNTM-2104 o protótipo desenvolvido neste trabalho pode ser avaliado entre os níveis 5 e 6 da escala. Em resumo, esta classificação exige que os componentes tenham sido testados em um ambiente representativo para a condição de projeto e que um protótipo tenha sido construído e testado nesse ambiente utilizando requisitos de desempenho para comprovar sua viabilidade na aplicação.

Capítulo 5

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Ao longo desta dissertação foram apresentadas as etapas e características de projeto necessárias ao desenvolvimento de um protótipo de liberador acústico de baixo custo.

Os conceitos de invólucro e mecanismo de liberação foram escolhas baseadas no material disponível e, embora tenham provado-se viáveis e funcionais, devem ser otimizadas visando uma aplicação definitiva. Principalmente no que diz respeito à demanda de energia e consequente autonomia do liberador que devem ser calculadas para determinar a quantidade de módulos de baterias (tais quais os apresentados aqui) necessários em função do tempo submerso que se deseja manter o equipamento.

Já o tratamento de transmissão, recepção e processamento do sinal foi baseado no que a literatura indica como mais eficiente para comandar um atuador submerso, apesar de, em paralelo, também conciliar a disponibilidade de material. Os ensaios executados demonstram a viabilidade das técnicas descritas para a aplicação.

Sempre que houver necessidade de comunicação entre dois pontos deverá ser avaliada a faixa de frequência do sinal que será transmitido e utilizar projetores e hidrofones que operem com resposta linear e baixa impedância, tanto quanto possível, na referida banda de frequência. Além disso, é imprescindível que a atenuação provocada pelo meio submarino seja considerada para determinar o alcance máximo em que a comunicação é possível. A estimativa de perda na transmissão obtida através do modelo de propagação de raios mostrou-se suficientemente acurada para o problema proposto.

A técnica de filtragem casada também mostrou-se eficaz para a construção de um algoritmo de decisão que identifique um Sinal-chave pré estabelecido como exclusivo para o acionamento do dispositivo. Desde que o Sinal-chave em questão seja moldado de acordo com a capacidade de transmissão, recepção e alcance pretendido, assim como foi discutido neste trabalho.

Sinais de frequência modulada mostraram ser a melhor opção para construção

de uma chave exclusiva pois possibilitam uma grande variedade de combinações através da alteração dos parâmetros de duração, largura de banda e forma (relação tempo-frequência). Além disso, estas diferentes combinações de sinais com frequência modulada têm, em geral, baixa correlação entre si e, principalmente, com o ruído.

Para alcançar o maior desempenho, o sinal captado pelo hidrofone deve ser pré-processado utilizando um filtro projetado para a banda de frequência na qual o sinal de interesse será enviado. Isso previne a interferência de outros sinais e melhora a relação sinal-ruído, visto que este só será captado dentro de uma banda limitada. Neste trabalho foi utilizado um filtro de resposta infinita, *Butterworth*, que possibilita uma resposta em frequência tão plana quanto possível na banda passante.

Os ensaios realizados comprovaram a viabilidade do algoritmo de decisão desenvolvido para o protótipo. No primeiro, com dados sintéticos, a curva característica de operação do dispositivo foi levantada. Contudo, a modelagem considerou a transmissão do sinal como ideal, sem atenuação e com uma resposta perfeitamente linear ao longo da banda de frequência, o que não traduz a realidade. Como foi discutido neste trabalho, a propagação acústica no meio submarino provoca perdas proporcionais ao quadrado da frequência de transmissão e os projetores não possuem uma resposta exatamente linear, assim como não emitem de forma omnidirecional no espaço.

Embora o desempenho do algoritmo tenha sido superestimado nas curvas ROC devido às aproximações citadas, este ensaio foi imprescindível para comprovar a metodologia proposta para a estimativa do limiar de decisão. Fixado o valor de P_{FA} desejado (conforme recomenda o teorema de Neyman-Pearson), o limiar de decisão pôde ser estimado.

O segundo experimento relativo a testes para o algoritmo preencheu, em parte, a lacuna deixada pelo anterior. Utilizando o projetor acústico destinado à aplicação para transmitir o sinal, obtivemos uma resposta real do equipamento. Da mesma forma, a perda da transmissão fez parte do sinal medido e o ruído capturado foi o ruído real característico do local. Nesse teste, mais uma vez a detecção foi obtida com êxito. Porém o SNR mínimo necessário para viabilizar a aplicação destoou do sugerido pela modelagem com ruído sintético gaussiano branco indicando que essa simulação pode ser aperfeiçoada utilizando gravação de ruído real ou desenvolvendo um modelo de ruído mais próximo da condição ambiente.

A grande vantagem desse ensaio foi que os dados coletados contêm ruído e sinais interferidores reais, gravados no local onde pretende-se aplicar o dispositivo. A desvantagem, por outro lado, é a dificuldade de obter dados semelhantes em quantidade suficiente para uma avaliação estatística como foi o ensaio anteriormente descrito. Portanto, os dois testes se complementam para atestar a capacidade do algoritmo

de decisão desenvolvido para reconhecer o Sinal-chave como acionador exclusivo do dispositivo.

Partindo do que foi desenvolvido nesta pesquisa, trabalhos futuros são incentivados a analisar com profundidade a relação entre a potência acústica na transmissão e o alcance do sinal no cenário de águas rasas. Essa abordagem incluiria a utilização dos modelos de propagação disponíveis e aproximaria o protótipo de um produto comercializável. Da mesma forma, para atingir a classificação de produto, é fundamental que sejam feitos os cálculos relativos ao consumo energético (definindo a autonomia do equipamento).

Tanto o invólucro do dispositivo quanto os componentes do conjunto eletromecânico podem ser redimensionados para operar em profundidades superiores se os processos de fabricação adequados estiverem disponíveis. Aumentando-se a espessura do invólucro e utilizando roscas para comprimir o alojamento das vedações, seria possível adotar um regime de pressão neutra, por exemplo. Da mesma maneira, o conjunto de engrenagem planetárias pode ser calculado para entregar ao eixo principal rotação e torque muito mais eficientes, diminuindo a corrente de partida ao acionar o dispositivo.

O algoritmo de decisão, pré processamento e os recursos de controle testados e apresentados neste trabalho podem ser aplicados a diversas outras finalidades além do liberador acústico. E assim como os outros aspectos citados, podem ser aprimorados. Dentro desse contexto, a robustez do processo decisório pode ser ampliada adaptando o algoritmo de acionamento para responder às múltiplas chegadas, espaçadas por um intervalo bem definido, reduzindo ainda mais a probabilidade de falso alarme.

Para fins de pesquisa, relevando o aumento no custo final do equipamento pela necessidade de incluir um projetor acústico no conjunto, pode ser implementada uma comunicação em três vias que garanta a exclusividade do acionamento. A possibilidade de emitir sinal do liberador e não só recebê-lo também auxilia a localização do conjunto liberado na superfície em situações de mar agitado em que a embarcação e não consiga manter um posicionamento preciso.

A conclusão mais relevante e esperada para essa pesquisa é que liberadores acústicos, assim como outros equipamentos e instrumentos comumente adquiridos por importação, podem ser desenvolvidos com tecnologia e pesquisas nacionais provocando crescimento em diversas áreas e ampliando cada vez mais nosso horizonte.

Referências Bibliográficas

- [1] “Economia marítima rende R\$ 2 trilhões para o Brasil por ano.” Agência Brasil. Disponível em: <https://tinyurl.com/3zhs7pwj>, 2019. Acesso em: 05/10/2022.
- [2] “Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar.” Wikipedia. Disponível em: <https://tinyurl.com/yckc6fhc>, 2022. Acesso em: 07/01/2023.
- [3] “O que é a Amazônia Azul e por que o Brasil quer se tornar potência militar no Atlântico.” Marinha do Brasil. Disponível em: <https://tinyurl.com/2s3wrmdt>, 2019. Acesso em: 07/01/2023.
- [4] HARARI, J. *Circulação e massas d’água*. In: HARARI, Joseph (org.). *Noções de Oceanografia*. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 07: p. 147-166, 2021.
- [5] COLLING, A., OTHERS. *Ocean circulation*, v. 3. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [6] RAHMSTORF, S. “Ocean circulation and climate during the past 120,000 years”, *Nature*, v. 419, n. 6903, pp. 207–214, 2002.
- [7] PALUMBI, S. R., SANDIFER, P. A., ALLAN, J. D., et al. “Managing for ocean biodiversity to sustain marine ecosystem services”, *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 7, n. 4, pp. 204–211, 2009.
- [8] AKBARI, E., ALAVIPANAH, S. K., JEIHOUNI, M., et al. “A review of ocean/sea subsurface water temperature studies from remote sensing and non-remote sensing methods”, *Water*, v. 9, n. 12, pp. 936, 2017.
- [9] GOMES, VICENTE; SALDANHA-CORRÊA, F. A. *A vida no mar*. In: HARARI, Joseph (org.). *Noções de Oceanografia*. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 20: p. 427-446, 2021.

- [10] LEWISON, R., HOBDAY, A. J., MAXWELL, S., et al. “Dynamic ocean management: identifying the critical ingredients of dynamic approaches to ocean resource management”, *BioScience*, v. 65, n. 5, pp. 486–498, 2015.
- [11] SARGENT, R. G. “Verification and validation of simulation models”. In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, pp. 166–183, 2010. doi: 10.1109/WSC.2010.5679166.
- [12] KLEIJNEN, J. P. “Verification and validation of simulation models”, *European journal of operational research*, v. 82, n. 1, pp. 145–162, 1995.
- [13] DOSITS.ORG. “Discovery of Sound in the Sea. Acoustic Release.” Disponível em: <https://tinyurl.com/3vsmk4e6>, 2003. Acesso em: 05/10/2022.
- [14] VICENTINI NETO, F. L. “Fundeios Oceanográficos. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.” Disponível em: <https://tinyurl.com/4zpzant>. Acesso em: 05/10/2022.
- [15] AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D., MELODIA, T. “State-of-the-Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks”, 2006.
- [16] LAKE, C. “Extremely low frequency transmitter site clam lake, Wisconsin”, 2001.
- [17] YUSOF, M. A. B., KABIR, S. “An overview of sonar and electromagnetic waves for underwater communication”, *IETE Technical Review*, v. 29, n. 4, pp. 307–317, 2012.
- [18] RHODES, M., OTHERS. “Electromagnetic propagation in sea water and its value”. In: *in Military Systems.* SEAS DTC Technical Conference. Cite-seer, 2007.
- [19] CHE, X., WELLS, I., DICKERS, G., et al. “Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks”, *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 12, pp. 143–151, 2010.
- [20] ETTER, P. C. *Underwater acoustic modeling and simulation*. 5th ed. , CRC press, 2018.
- [21] NONNATO, L. V. *Instrumentação oceanográfica*. In: HARARI, Joseph (org.). *Noções de Oceanografia*. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 34: p. 763-788, 2021.
- [22] TALLEY, L. D. *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Academic press, 2011.

- [23] URICK, R. *Principles of Underwater Sound, third edition*. Peninsula Publishing, 2013. ISBN: 9780932146274.
- [24] KNOWLES, H. S. “Electroacoustics. The analysis of transduction, and its historical background. Frederick V. Hunt. Wiley, New York; Chapman & Hall, London, 1954. viii+ 260 pp. Illus. 6.” *Science*, v. 122, n. 3167, pp. 471–471, 1955.
- [25] WILSON, O. B. *An introduction to the theory and design of sonar transducers*. Naval Sea Systems Command, 1985.
- [26] LI, H., DENG, Z. D., CARLSON, T. J. “Piezoelectric Materials Used in Underwater Acoustic Transducers”, .
- [27] RYU, J., CHOI, J.-J., KIM, H.-E. “Effect of heating rate on the sintering behavior and the piezoelectric properties of lead zirconate titanate ceramics”, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 84, n. 4, pp. 902–904, 2001.
- [28] KIMURA, M., ANDO, A., MAURYA, D., et al. “Lead zirconate titanate-based piezoceramics”. In: *Advanced piezoelectric materials*, Elsevier, pp. 95–126, 2017.
- [29] USA - DEPARTMENT OF DEFENSE. “Military Standard. Piezoelectric Ceramic Material and Measurements Guidelines For Sonar Transducers. MIL-STD-1376B(SH)”. 1995.
- [30] BUTLER, J. L., SHERMAN, C. H. *Transducers and arrays for underwater sound*. Springer, 2016.
- [31] JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B., et al. *Computational Ocean Acoustics*. 2th ed. New York, Springer Science & Business Media, 2011.
- [32] KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., et al. *Fundamentals of acoustics*. John wiley & sons, 2000.
- [33] MELLEN, R. *Global model for sound absorption in sea water*. N. 7923. Naval Underwater Systems Center, 1987.
- [34] FISHER, F., SIMMONS, V. “Sound absorption in sea water”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 62, n. 3, pp. 558–564, 1977.
- [35] RODRÍGUEZ, O. *Fundamentos de acústica submarina*. Universidade do Algarve Editora, 2021.

- [36] PORTER, M. B. *BELLHOP3D User Guide*. Relatório técnico, Heat, Light, and Sound Research, Inc., 2016.
- [37] RODRIGUEZ, O. C. “The TRACEO ray tracing program”, *Universidade do Algarve-Signal Processing Laboratory*, 2010.
- [38] RICHARDSON, M., WALLACE, S. *Getting started with raspberry PI*. "O'Reilly Media, Inc.", 2012.
- [39] MONK, S. *Movimento, luz e som com Arduino e Raspberry Pi*. Novatec Editora, 2019.
- [40] CICOLANI, J. “Raspberry Pi GPIO”. In: *Beginning Robotics with Raspberry Pi and Arduino*, Springer, pp. 103–128, 2018.
- [41] JOLLES, J. W. “Broad-scale applications of the Raspberry Pi: A review and guide for biologists”, *Methods in Ecology and Evolution*, v. 12, n. 9, pp. 1562–1579, 2021.
- [42] SMITH, S. W. *Digital Signal Processing Second Edition*. 1999. Disponível em: <www.DSPguide.com>.
- [43] AL-ABOOSI, Y. Y., SHA'AMERI, A. B., KHAMIS, N. H. H. “Comparison of methodologies for signal detection in underwater acoustic noise in shallow tropical waters”, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 11, n. 5, pp. 3086–3094, 2016.
- [44] ABRAHAM, D., SIDERIUS, M. *Modern Acoustics and Signal Processing Underwater Acoustic Signal Processing Modeling, Detection, and Estimation Foreword by*. 2019. Disponível em: <<http://www.springer.com/series/3754>>.
- [45] ALBUQUERQUE, J. P. D. A., FORTES, J. M. P., FINAMORE, W. A. “Probabilidade, variáveis aleatórias e processos estocásticos”, *Editora PUC-Rio e Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil*, 2008.
- [46] PERES VIO, R. *Improved UUV positioning using acoustic communications and a potential for real-time networking and collaboration*. Tese de Doutorado, Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2017.
- [47] KAY, S. M. *Fundamentals of statistical signal processing: Practical algorithm development*, v. 3. Pearson Education, 2013.
- [48] MCDONOUGH, R. N., WHALEN, A. D. *Detection of signals in noise*. Academic Press, 1995.

- [49] WALKER, J., RESNICK, R., HALLIDAY, D. *Halliday and resnick fundamentals of physics*. Wiley, 2014.
- [50] LIMA SILVA, A. L., VIO, R. P., XAVIER, F. C., et al. “Comparação das respostas dos sinais Tom (CW) e Chirp Linear (LFM) no meio submarino”. In: *Anais do 12^o Congresso Iberoamericano de Acústica*, Florianópolis, Brasil, 2022.
- [51] OPPENHEIM, A. V., WILLSKY, A. S. “Sinais e Sistemas”, 2014.
- [52] MOHD, S. A., GAN, K. B., ABDULLAH, S., et al. “The Use of Raspberry Pi and High Resolution Sound Card for Very Low Frequency Signal Detection”. In: *2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*, pp. 261–266, 2019. doi: 10.1109/IconSpace.2019.8905943.
- [53] COUNCIL, N. R. *Ocean Noise and Marine Mammals*. The National Academies Press, 2003. ISBN: 978-0-309-08536-6. doi: 10.17226/10564. Disponível em: <<https://nap.nationalacademies.org/catalog/10564/ocean-noise-and-marine-mammals>>.
- [54] WELCH, P. “The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms”, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, v. 15, n. 2, pp. 70–73, 1967. doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.

Apêndice A

Curvas de Wenz

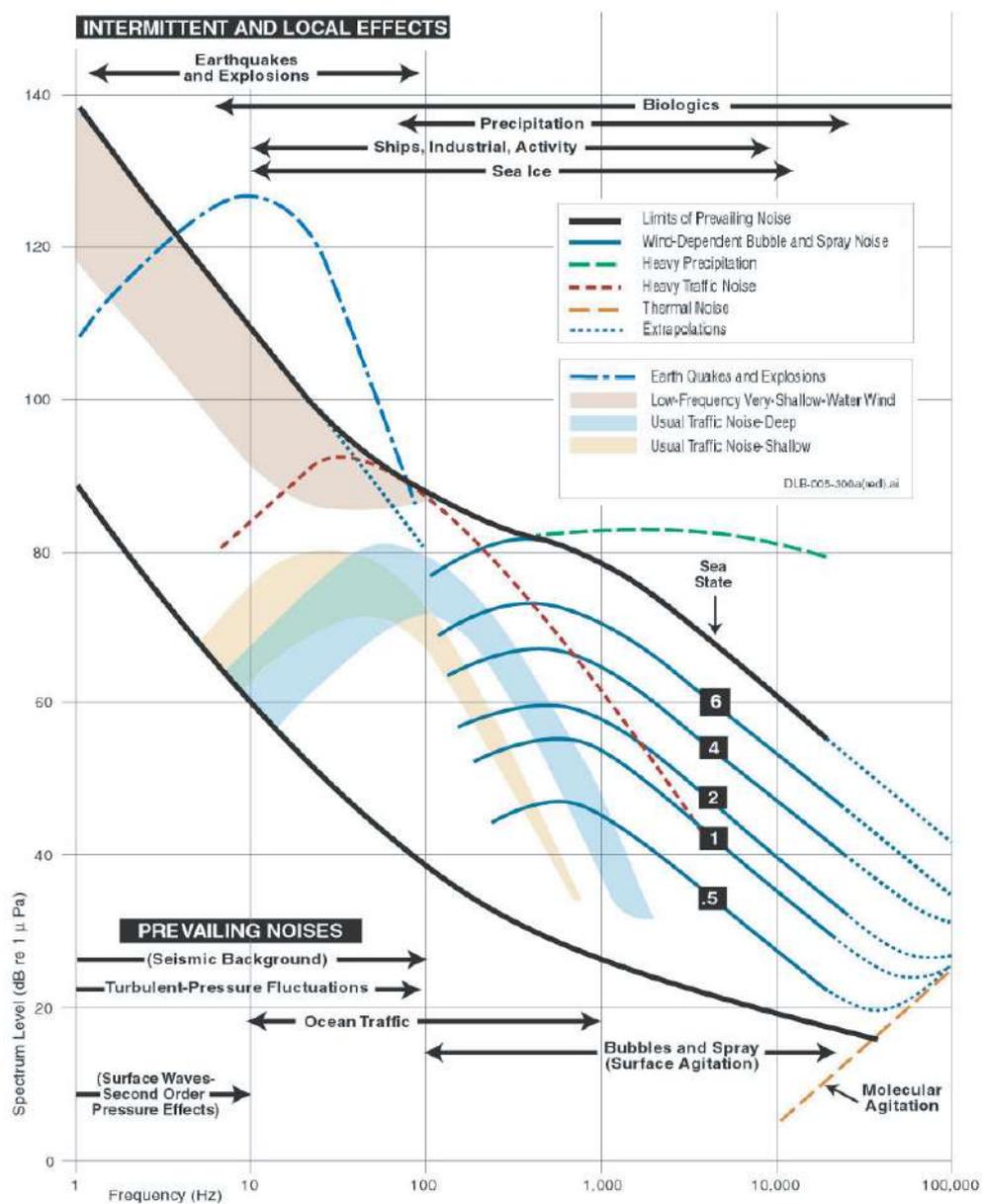


Figura A.1: Níveis espectrais do ruído no ambiente marinho. Retirado de [45].

Apêndice B

Códigos implementados

B.1 Cálculo da ordem do filtro Butterworth otimizada para a aplicação

```
"""  
@author: André Luis Lima Silva (IEAPM)  
"""  
  
import numpy as np  
from scipy import signal  
import matplotlib.pyplot as plt  
  
Fs = 48000 # frequência de amostragem  
  
f_ress = 16.5e3; banda = 5e3  
f1 = f_ress+banda//2; f2 = f_ress-banda//2  
# parâmetros de frequência do sinal  
f_low = f2-2e3; f_high = f1+3e3  
# parâmetros de frequência do filtro  
  
N, Wn = signal.buttord([f2, f1], [f_low, f_high], \  
                       gpass = 1, gstop = 100, fs=Fs)  
# Cálculo da ordem 'N' do filtro que melhor se adequa  
# 'Wn' são frequências onde o 'gpass' é garantido  
  
# rotina de plotagem gráfica  
b, a = signal.butter(N, [f_low, f_high], 'band', True)
```

```

fg=plt.figure(figsize=(5,3))
w, h = signal.freqs(b, a)
plt.plot(w/1e3, 20 * np.log10(abs(h)), 'k')
plt.title('Resposta em frequência do filtro\n Butterworth \
          de ordem ={}'.format(N),fontsize = 14)
plt.xlabel('Frequência [kHz]',fontsize = 14);plt.xlim(8,28)
plt.ylabel('Amplitude [dB]',fontsize = 14)
plt.ylim(-110,max(20 * np.log10(abs(h)))+5)
plt.grid(which='both', axis='both')
plt.axvline(x=f2/1e3, linestyle='dotted', color='g', \
            label = '{} kHz'.format(round(f2/1e3)))
plt.axvline(x=f1/1e3,linestyle='dashed', color='g', \
            label = '{} kHz'.format(round(f1/1e3)))
plt.axvline(x=f_low/1e3, linestyle='dotted', color='r', \
            label = '{} kHz'.format(round(f_low/1e3)))
plt.axvline(x=f_high/1e3,linestyle='dashed', color='r', \
            label = '{} kHz'.format(round(f_high/1e3)))
plt.legend(loc='lower right',fontsize = 10)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

B.2 Réplica do sinal armazenada no dispositivo

```
"""
@author: André Luis Lima Silva (IEAPM)
"""

import numpy as np
import scipy.signal as sg

Ts = 0.025      # tempo de duração do Sinal-chave
Fs = 48e3       # frequência de amostragem do sinal
ts = np.linspace(0,Ts,int(Ts*Fs))    # vetor tempo discreto

f_low = 12e3    # frequência limite inferior do filtro
f_high = 22e3  # frequência limite superior do filtro
sos = sg.butter(23, [f_low,f_high], 'bandpass', fs=Fs, output='sos')
# 'sos' é o filtro butterworth de ordem 23 para a
# banda de f_low aa f_high e frequência de amostragem Fs

f1 = 19e3      # frequência inicial do chirp
f2 = 14e3      # frequência final do chirp
up = sg.chirp(ts, f2, Ts, f1, method='hyperbolic')
down = sg.chirp(ts, f1, Ts, f2, method='hyperbolic')
sinal_chave = np.hstack((up,down))
sinal_chave = sg.sosfilt(sos, sinal_chave)
# sinal_chave é a réplica que será armazenada no dispositivo.
# Chirp hiperbolico down-sweep com duracao Ts, banda de
# frequência de f1 à f2. A Fs esta implícita no vetor ts
```

B.3 Sinal a transmitir do projetor acústico

```
"""
@author: André Luis Lima Silva (IEAPM)
"""

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.signal as sg

# parâmetros de frequência
Fs = 48000
f_ress = 16.5e3; banda = 5e3
f1 = f_ress+banda//2
f2 = f_ress-banda//2

# vetores de tempo que serão utilizados
T = 0.075; t = np.linspace(0,T,int(T*Fs)) # tempo total
Ts = 0.025; ts = np.linspace(0,Ts,int(Ts*Fs)) # tempo do Sinal-chave

# adaptando a janela à posição desejada
win = np.hsplit(sg.hann(ts.size),2);
jan = np.hstack((win[0],np.ones(2*ts.size),win[1]))
x = (np.sin(2*np.pi*13200*t))*jan

# posicionamento das duas réplicas do Sinal-chave
loc_s = 0.0125; loc_s2 = 0.0375
chave = sg.chirp(ts,f1,Ts,f2,method='hyperbolic')
x[int(loc_s*Fs):int((loc_s +Ts)*Fs)] = chave
x[int(loc_s2*Fs):int((loc_s2 +Ts)*Fs)] = chave

r = np.correlate(x,chave,'same') # cálculo da correlação
r = np.roll(r,-chave.size//2)
# ajuste da marcação para o instante de início

# rotina de plotagem gráfica
a = 5.7; fig = plt.figure(figsize=(a,a))
gs = fig.add_gridspec(2, hspace=0.1)
ax = gs.subplots(sharex=True)
ax[0].plot(t,x, label = 'sinal medido', alpha = 0.7)
```

```

ax[0].set_ylabel('Amplitude  $[V]$ ',fontsize = 20)
ax[0].set_xlim(0,T)
ax[1].plot(t,abs(r)/max(abs(r)), 'r', label = 'Correlação');
# ax[1].grid()
ax[1].set_xlim(0,T)
ax[1].set_xlabel('Tempo  $[s]$ ',fontsize = 20)
ax[1].set_ylabel('Correlação  $[V^2]$ ',fontsize = 20)
# ax[1].legend(fontsize = 16, loc = 'upper right')
plt.tight_layout()
plt.show()

### cria o arquivo WAV do sinal a transmitir

from scipy.io import wavfile
wavfile.write('sinal_chave(48k).wav', Fs, x.astype(np.float32))

```

B.4 Acionamento do motor utilizando o sinal da Raspberry via GPIO

```
"""
@author: André Luis Lima Silva (IEAPM)
"""
import RPi.GPIO as gp
import time as tm

gp.setmode(gp.BCM) # define qual padrão de numeração será
                   # utilizada para os pinos da placa
gp.setup(5, gp.OUT) # informa qual pino será usado e qual a função

gp.output(5, gp.HIGH) # comanda ligar
tm.sleep(6)          # tempo de permanência em segundos
gp.output(5, gp.LOW) # comanda desligar
gp.cleanup()         # restabelece as configurações iniciais da GPIO
```

B.5 Captura de áudio e detecção do Sinal-chave

```
"""
@author: André Luis Lima Silva (IEAPM)
"""

import numpy as np
import pyaudio
import RPi.GPIO as gp
import time as tm
import scipy.signal as sg

# parâmetros de comando da GPIO (script B.4)
gp.setmode(gp.BCM)
gp.setup(5, gp.OUT)
run_times = 2 # número de vezes que o motor será acionado

# função para detecção do sinal
def detect(y,chave,threshold = 1000):
    found = False
    r = np.correlate(y,chave,'same')
    for i in range(len(r)):
        if abs(r[i]) >= threshold :
            found = True
    return found

%% Iniciando gravação
FORMAT = pyaudio.paFloat32
CHANNELS = 1
RATE = 48000
CHUNK = RATE//20 # 50 ms

audio = pyaudio.PyAudio()
stream = audio.open(format=FORMAT, channels=CHANNELS, rate=RATE, \
                    input=True, frames_per_buffer=CHUNK, \
                    input_device_index=0)
```

```

# cria um buffer com 100 ms
BUFFER_LEN = 2*CHUNK
buffer = np.zeros(BUFFER_LEN)

print('Gravando...')
detectado = False
while detectado == False:
    data = stream.read(CHUNK)
    if byteorder == 'big':
        data.byteswap()
    decoded = np.frombuffer(data, dtype=np.float32)
    signal = decoded / abs(decoded).max()
    signal_filt = sg.sosfilt(sos, signal)
    buffer = np.concatenate((buffer, signal_filt))
    sliding_buffer = buffer[CHUNK:]
    detectado = detect(sliding_buffer, sinal_chave)
    # sinal_chave foi criado no script B.2
    # threshold deve ser avaliado conforme ambiente e equipamento

# Parar a gravação
stream.stop_stream()
stream.close()
audio.terminate()
print('DETECTADO')

# Liberar o dispositivo
for i in range(run_times):
    gp.output(5, gp.HIGH)
    tm.sleep(1.5)
    gp.output(5, gp.LOW)
    tm.sleep(1)

gp.cleanup()

```

Apêndice C

Folha de dados do projetor acústico

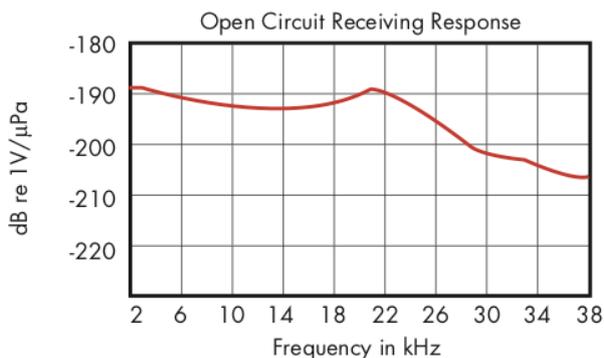
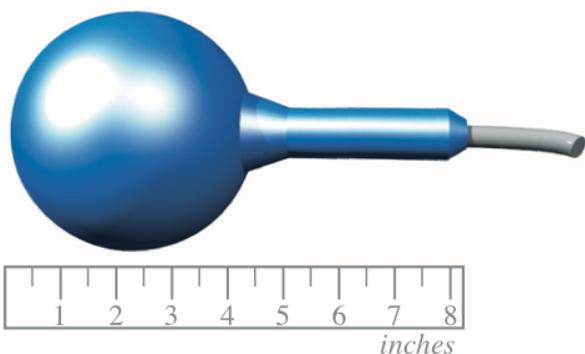
ITC-1001

Model ITC-1001

Spherical Omnidirectional Transducer

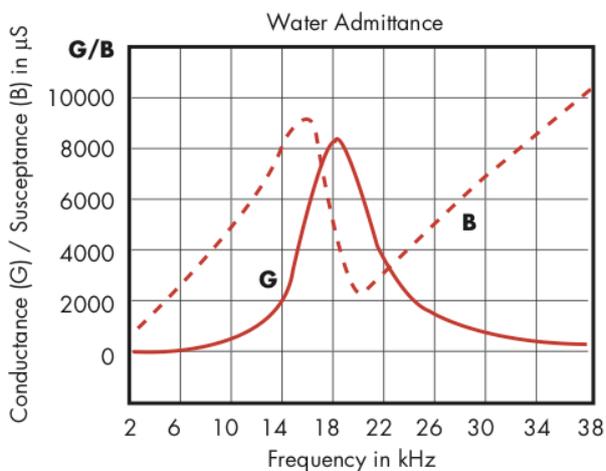
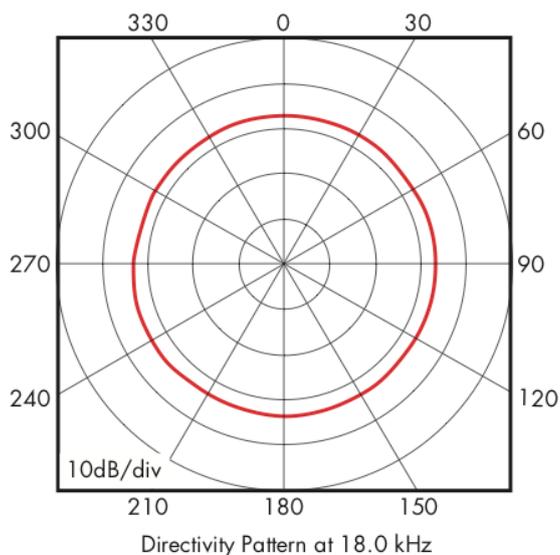
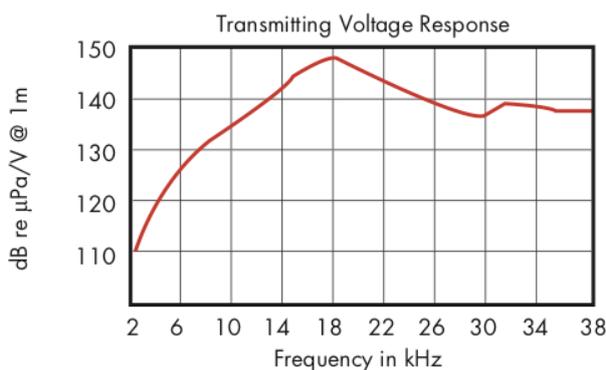
Model ITC-1001

The **Model ITC-1001** spherical transducer offers a broad band omnidirectional transmitting and receiving response with efficiencies greater than 50% over the entire band. This transducer is fabricated of high precision Channelite-5400 lead zirconate titanate ceramic hemispheres. The Model ITC-1001 is particularly well suited for high power noise sources and applications where a truly omnidirectional response is required.



Specifications (Nominal)

Type	Projector/Hydrophone
Resonance Frequency f_r	16.5 kHz
Depth	1250 meters
Envelope Dimensions (in.)	4.25D
TVR at f_r	149 dB//μPa/V@1m
Midband OCV	-191 dB//1V/μPa
Suggested Band	.01 – 25 kHz
Beam Type	Spherical
Input Power	2,000 watts



GAVIAL ITC

Brent.Febo@Gavial.com
805-357-2522
www.GavialITC.com

Gavial ITC
869 Ward Drive
Santa Barbara, CA 93111

Apêndice D

Folha de dados do modelo comercial de liberador acústico Sonardyne LTR

Tabela D.1: Resumo das principais características do liberador Sonardyne LTR.

Limite de profundidade	500 m
Frequência de Operação	(35–50 kHz)
Nível da Fonte (projeto) (dB re 1 μPa @ 1 m)	185 dB
Duração da bateria (Long-Life Lithium)	51 meses
Carga suportada	125 kg
Materiais construtivos	Liga de Alumínio Anodizado, Plástico e Aço inoxidável
Dimensões (Comprimento x Diâmetro)	490 x 63 mm (19,3 x 2,48")
Peso no Ar/Água	1,77/0,42 kg

Datasheet

Lightweight Release Transponder (LRT)



Part of Sonardyne's Coastal Acoustics product range, the Type 7986 Lightweight Release Transponder (LRT) has been developed from transponders capable of accurately positioning hundreds of seismic receiver nodes. It has both receive and transmit functions, unlike similar low-cost release transponders, enabling accurate slant ranges to be measured, release actuation to be confirmed and its position to be accurately determined.

The LRT is depth rated to 500 m making it the ideal choice for use in continental shelf waters. Field replaceable alkaline or long-life lithium battery packs give a listening life of 18 months and 51 months respectively. A 'screw-off' release mechanism ensures a positive release action that overcomes any biological growth and all external parts are made of high strength plastics that provide excellent environmental corrosion resistance.

LRTs are controlled using the Type 7967 Surface Command Unit (SCU) comprising a low-cost deck unit and remote transducer on 10 m of cable. The SCU is initially used to program the acoustic identity of the LRT, test the transponder and load the release nut prior to deployment. Once deployed, the deck unit can measure ranges to the transponder and prior to sending a secure release command, relocate the transponder. The SCU can be controlled via RS232 enabling raw range data to be logged to a PC.



An optional attachment for the LRT is a rope canister that allows items left on the seabed, for example tools, cables and salvage, to be quickly and easily hauled up.

It works by mooring one end of the rope to the item on the seabed and the other end to the LRT via the attached canister of rope. As the transponder ascends to the surface, high strength rope is deployed from the canister. This line can then be used to pull up the item directly or retrieve heavier tag lines.

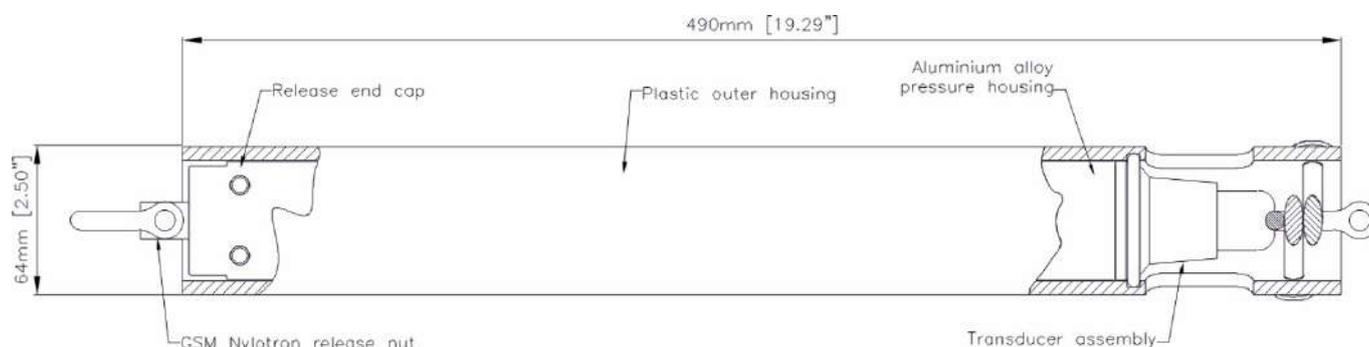
LRTs can be supplied with $\pm 15^\circ$ or $\pm 30^\circ$ tilt sensors. This allows the user to acoustically check that the LRT and its mooring have been correctly deployed on the seabed.

Key Features

- Safe Working Load¹ of 125 kg
- Depth rated to 500 m
- Up to 51 months deployment with long-life lithium battery pack
- Hundreds of secure identities; field programmable with deck unit
- Reliable, 'screw-off' release
- Rugged, compact design
- Compatible with Scout USBL, ROV-Homer, Homer-Pro and Prospector positioning/relocation systems

Specifications

Lightweight Release Transponder (LRT)



Feature	Type 7986	
Depth Rating	500 m	
Operating Frequency	HF (35–50 kHz)	
Transmit Source Level (dB re 1 μ Pa @ 1 m)	185 dB	
Receive Sensitivity (dB re 1 μ Pa)	<110 dB	
Number of Unique Addresses	400 (field programmable)	
Operating Mode	Always On (no on/off switch)	
Battery Life	Alkaline	18 months
	Long-Life Lithium	51 months
Safe Working Load ¹ (at 4:1 ratio)	125 kg	
Release Load ²	125 kg	
Breaking Load ³	500 kg	
Proof Load ⁴ (a Proof Test Certificate is available upon request)	250 kg	
Mechanical Construction	Anodised Aluminium Alloy, plastic and stainless steel	
Dimensions (Length x Diameter)	490 x 63 mm (19.3 x 2.48")	
Weight in Air/Water	1.77/0.42 kg	
Options/Spares	Rope Canister (Longer lengths available on request)	75 m (100 kg SWL) 120 m (250 kg SWL) 160 m (125 kg SWL)
	Tilt Sensor	$\pm 30^\circ$ or $\pm 15^\circ$ (order Type 7986-000-06 only)
	Release Nut	Re-order Part No. 830-1641 (5 nuts supplied with each new LRT)
Surface Command Unit	Type 7967-000-02 (includes transducer and 10 m of cable)	

¹ The maximum recommended working load. This is set as a quarter (1/4) of the Breaking Load³ and allows for factors such as corrosion, fatigue, shock loads, harmonic loads, manufacturing defects and material defects.

² The maximum in-line load that the whole assembly can release whilst guaranteeing safe and reliable operation. Note that as the load is released in water, this is determined by the maximum upthrust from the buoyancy.

³ The load that induces structural failure in one or more parts of the instrument causing the load to part from the release mechanism.

⁴ The load to which the actual unit has been tested in the factory. This load should be periodically applied to demonstrate that the unit is still in a safe condition. This is usually twice (x 2) the SWL. A Proof Load Certificate can be provided upon request