



MARINHA DO BRASIL

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

**ATENUAÇÃO DO SOM, NO MEIO SUBMARINO, USANDO A TÉCNICA DE
CORTINA DE BOLHAS**

BARBARA CHRISTINA SOARES DE ABREU

**Arraial do Cabo
2026**

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

ATENUAÇÃO DO SOM, NO MEIO SUBMARINO, USANDO A TÉCNICA DE
CORTINA DE BOLHAS

Barbara Christina Soares de Abreu

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, Ph.D.

Arraial do Cabo
2026

Biblioteca do IEAPM

A162a Abreu, Barbara Christina Soares de
Atenuação do som, no meio submarino, usando a técnica de
cortina de bolhas / [por] Barbara Christina Soares de Abreu.
-- 2026.

92 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Renato Peres Vio.

Dissertação (Mestrado) - Instituto de Estudos do Mar Almirante
Paulo Moreira, Programa de Pós-graduação em Acústica Submarina,
Arraial do Cabo, 2026.

Inclui bibliografia.

1. Atenuação 2. Cortina de bolhas 3. Absorção 4. Reflexão
5. Ruído 6. Paisagem acústica I. Vio, Renato Peres II. Instituto
de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. Programa de
Pós-graduação em Acústica Submarina III. Título.

CDD: 620.26

BARBARA CHRISTINA SOARES DE ABREU

**ATENUAÇÃO DO SOM, NO MEIO SUBMARINO, USANDO A TÉCNICA DE
CORTINA DE BOLHAS**

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 título de Mestre em Acústica Submarina.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Renato Peres Vio, Ph.D

**Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
Professor Orientador – Presidente da Banca Examinadora**

Prof. Vicente Barroso Junior, D.Sc

Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira

Prof. Marcus Vinícius da Silva Simões, D.Sc

Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira

Prof. Paulo Apicelo de Souza Pereira, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense

Arraial do Cabo, 31 de março de 2026.

**ATENUAÇÃO DO SOM, NO MEIO SUBMARINO, USANDO A TÉCNICA DE
CORTINA DE BOLHAS**

Barbara Christina Soares de Abreu

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 OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ACÚSTICA
SUBMARINA.

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

Aprovada por: Prof. Marcus Vinícius da Silva Simões, D.Sc.

Prof. Vicente Barroso Junior, D.Sc.

Prof. Paulo Apicelo de Souza Pereira, D.Sc.

**Arraial do Cabo, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2026**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida, pela sabedoria e por permitir que eu mantivesse minha saúde mental e física ao longo desta jornada, possibilitando a conclusão desta pesquisa.

À minha família, especialmente à minha mãe, minha irmã e minha afilhada Ana Luiza, estendo minha eterna gratidão pelo apoio incondicional, pela paciência e por sempre acreditarem em mim. Sem o incentivo e a compreensão de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Sou profundamente grata ao meu professor e orientador, CF(EN) Renato, que sempre se mostrou um incentivador, paciente e amigo, acreditando e oferecendo todo suporte necessário para o meu desenvolvimento no curso e nesta pesquisa.

Aos meus colegas de turma, em especial Yasmin, Wendel e o Richard, agradeço pela amizade e pelo apoio ao longo deste percurso. Também manifesto minha gratidão aos militares e civis do Prédio da Pós do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), que sempre se mostraram solícitos e dispostos em ajudar. Um agradecimento especial à 1T(RM2-T) Lory, Secretária da Pós-Graduação em Acústica Submarina, que, com carinho e dedicação, nunca mediu esforços para auxiliar em todo o processo.

Expresso também minha gratidão ao CC Lima, sempre solícito e presente, compartilhando conhecimentos sobre acústica e apoiando-me em minha trajetória. Da mesma forma, agradeço ao grupo de militares do Laboratório de Acústica Submarina: CF(EN) Backer, 1Sg (ET) Alexandrino e MN(RM-2) Soares, por suas contribuições e apoio inestimáveis.

Finalmente, deixo meus sinceros agradecimentos aos meus queridos professores: CC(EN) Amílcar, CMG (RM1) Barroso, Eduardo, Fábio, CF(EN) Guarino, CF(T) Márcia Helena, CF(RM1-T) Moraes, CT(EN) Tavares, CC(RM3-T) Tonelli e CMG(RM1-T) Simões, que foram fundamentais para o meu crescimento durante o curso. Também agradeço aos membros da comunidade acadêmica e aos colegas da Biotecnologia, que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação e para o aprimoramento deste trabalho.

A todos, meu mais sincero e profundo agradecimento.

“Se vi mais longe, foi por que estava sobre os ombros de gigantes.”

Sr. Isaac Newton

RESUMO

Os primeiros esforços no controle de ruído tinham como objetivo minimizar os sons do tráfego aéreo e da atividade industrial, devido aos impactos prejudiciais sobre os trabalhadores e as comunidades vizinhas. Com a crescente exploração dos oceanos pelo homem, surge a necessidade de mitigar o ruído excessivo no meio marinho. Diversos estudos destacam os efeitos negativos do ruído contínuo e excessivo gerado por fontes individuais, como embarcações, atividades de construção e operações de perfuração offshore. Esse ruído interfere na comunicação, migração, busca por alimentos, reprodução e outras atividades vitais para a vida marinha, impactando sua sobrevivência e a harmonia do meio submarino. Uma das práticas mitigadoras cada vez mais estudadas e implementadas em outros países é o uso de cortina de bolhas, que consiste na criação de uma barreira de ar na água. Essa técnica funciona como um eficiente mecanismo de reflexão e absorção sonora devido à diferença de impedância acústica e à frequência de ressonância natural das bolhas, contribuindo para a atenuação da energia acústica e, conseqüentemente, para a redução dos efeitos prejudiciais à vida marinha. Desse modo, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo teórico sobre a atenuação do som por meio da técnica da cortina de bolhas, além da realização de experimentos em um ambiente controlado, o tanque de teste do Laboratório de Engenharia Acústica do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), utilizando projetores acústicos na faixa de frequência entre 400 Hz a 10kHz. Tal análise se concentrará no comportamento dos sinais transmitidos sob a forma de pulso e de onda contínua ao interagir com a cortina de bolhas, contribuindo para compreensão de seus efeitos e resultados na propagação acústica submarina.

Palavras chaves: atenuação; absorção; cortina de bolhas; reflexão; ruído; paisagem acústica; propagação acústica submarina.

ABSTRAT

The earliest efforts in noise control were primarily aimed at minimizing sound emissions from air traffic and industrial activities, due to their harmful effects on workers and nearby communities. With the increasing human exploitation of the oceans, the need to mitigate excessive noise in the marine environment has become evident. Several studies have highlighted the adverse effects of continuous and high-intensity noise generated by individual sources such as vessels, construction activities, and offshore drilling operations. This type of noise interferes with communication, migration, foraging, reproduction, and other vital behaviors of marine organisms, ultimately affecting their survival and the overall balance of the underwater environment.

One of the most widely studied and implemented mitigation techniques in other countries is the use of bubble curtains, which consist of creating an air barrier within the water column. This technique acts as an efficient acoustic reflection and absorption mechanism due to the difference in acoustic impedance and the natural resonance frequency of the bubbles, contributing to the attenuation of acoustic energy and consequently reducing the detrimental effects on marine life.

Therefore, the present work aims to conduct a theoretical study on sound attenuation using the bubble curtain technique, as well as experiments in a controlled environment, specifically the acoustic tank of the Acoustical Engineering Laboratory at the Admiral Paulo Moreira Institute for Sea Studies (IEAPM), the experiments employ acoustic projectors operating in the frequency range from 400 Hz to 10 kHz. Such analysis will focus on the behavior of transmitted signals in both pulse and continuous-wave forms when interacting with the bubble curtain, contributing to the understanding of its effects and outcomes in underwater acoustic propagation.

Keywords: absorption; acoustic landscape; attenuation; bubble curtain; noise; reflection; underwater acoustic propagation.

Sumário

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Símbolos.....	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Problema.....	3
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo Geral.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Organização do Texto.....	5
2 Referencial Teórico.....	6
2.1 Estado da Arte.....	6
2.2 Propagação do Som no meio Submarino: Fatores e Características	11
2.3 A Física por Trás da Bolha	16
2.3.1 Coeficiente de Amortecimento.....	20
2.3.1.1 Amortecimento de Radiação.....	22
2.3.1.2 Amortecimento Viscoso.....	22
2.3.1.3 Amortecimento Térmico.....	23
2.3.2 Seção Transversal de Espalhamento.....	26
2.3.3 Poder de Reflexão do Alvo	30
2.3.4 Seção Transversal de Extinção.....	31
2.4 Atenuação.....	32
2.4.1 Bolhas de um Único Tamanho.....	33

2.4.2	Bolhas de Vários Tamanhos.....	34
3	Metodologia.....	36
3.1	Procedimento Experimental.....	37
3.1.1	Pulso.....	44
3.1.2	Onda Contínua.....	45
4	Resultado e Discussões.....	49
4.1	Sinal Acústico com Forma de Pulso.....	52
4.2	Sinal Acústico com de Onda Contínua.....	58
5	Conclusões.....	66
	Referências Bibliográficas.....	71
	Anexo A: Experimento no Tanque Acústico.....	76

Lista de Figuras

01.	Complexo Eólico Offshore: Processos de Licenciamento Ambiental abertos no Ibama.....	8
02.	Tipos de Torres Eólicas Offshore e Profundidades de Aplicação.....	10
03.	Composição de espectros de ruídos ambiente por Wenz.....	13
04.	Faixa da frequência de vocalização, audição das espécies marinhas e antropogênica. As cores indicam a banda de energia de cada fonte.....	14
05.	Visão do Processo em Determinar a Atenuação do Som com Cortina de Bolhas.....	15
06.	Oscilador Harmônico Simples (OHS).....	17
07.	Razão entre a seção transversal acústica e a seção transversal geométrica de uma bolha de ar em água, em função da frequência normalizada	29
08.	Esquema Experimental.....	37
09.	Tanque de teste do Laboratório de Engenharia Acústica do IEAPM.....	38
10.	Projeto Acústico - Modelo Lubell 964 e especificações.....	38
11.	Curva de TVR por frequência do modelo: Lubell 964.....	39
12.	Projeto Acústico - Modelo Lubell 1424 e especificações do fabricante...	40
13.	Curva de TVR por frequência do modelo: Lubell 1424.....	40
14.	Projeto Acústico - modelo EDO 610E e especificações do fabricante	41
15.	Curva de TVR por frequência do modelo - EDO 610 E.....	41
16.	Hidrofone do IEAPM e Gráfico de Sensibilidade.....	42
17.	Instrumento Multifuncional (Horiba – U 5000)	42
18.	Variação do Oxigênio ao longo do tempo sem e com cortina de bolhas....	43
19.	A - Recorte do Sinal no Domínio do tempo no intervalo de 1s e B – Pulso Isolado.....	44
20.	Recorte de um Sinal de Onda Contínua em fase aleatória sem bolhas.....	45
21.	Trecho do Sinal CW no domínio do tempo sem e com bolhas	46

22.	Trecho de Sobreposição do Sinal CW intervalo de 0.5 s.....	47
23.	Imagens das bolhas na coluna d'água representando os diâmetros dos furos de (A) 0.5 mm, (B) 1.0 mm, (C) 1.5 mm e (D) 2.0 mm.....	49
24.	Imagem da largura formada pela cortina de bolhas na coluna d'água cujo diâmetro do furo de 1.0 mm e 1.5mm.....	50
25.	Atenuação Teórica para diferentes diâmetros de bolhas.....	52
26.	Desvio Padrão e valor médio da atenuação em dB/m das bolhas formadas pelos furos: A) $d_f = 0.5$ mm e B) $d_f = 1.0$ mm	53
27.	Desvio Padrão e valor médio da atenuação em dB/m das bolhas formadas pelos furos: A) $d = 1.5$ mm e B) $d = 2.0$ mm.....	54
28.	Sobreposição do sinal de áudio no domínio do tempo, com $f = 3.0$ kHz.....	56
29.	Espectrograma do Sinal de áudio com a frequência de 2kHz e $d_f = 1.0$ mm.....	57
30.	Recorte do Sinal de Áudio composto de várias senoides.....	59
31.	Recorte da Sobreposição do Sinal sem e com a cortina de bolhas.....	59
32.	Transformada de Fourier do Trecho do Sinal sem e com a cortina de bolhas.....	60
33.	Pico acentuado na frequência de 5.540 Hz na faixa de frequência entre 5.0 kHz a 10.0kHz.....	61
34.	Densidade Espectral de Potência na faixa de frequência de 400 Hz a 10kHz.....	61
35.	Recorte da Densidade Espectral de Potência (PSD) do sinal recebido com e sem bolhas.....	62
36.	Atenuação Experimental do Sinal em Forma de Pulso e em CW	63
37.	Comparação da Atenuação Teórica com Atenuação Experimental.....	64

Lista de Tabelas

01.	Resumo dos limiares acústicos do grupo de espécies marinhas.....	10
02.	Dados teóricos das frequências de ressonância da bolha (f_b) com os respectivos diâmetros médio das bolhas (d_b) e comprimento da largura da cortina (L_c) e suas incertezas.....	50
03.	Dados teóricos dos parâmetros físicos dos respectivos diâmetros das bolhas e a frequência.....	51
04.	<i>Target Strength</i> (TS) e Atenuação teórica ($\alpha_{teó}$)	51
05.	Diâmetro médio da bolha (d_b) e a atenuação experimental($\alpha_{Exp.}$)	56

Lista de Símbolos

b	componente real da razão complexa dos calores específicos, γ , adimensional
c	velocidade do som
d	componente imaginária da razão complexa dos calores específicos, γ , adimensional
D_b	taxa de absorção, s^{-1}
f	frequência de ressonância natural
f_b	frequência de ressonância da bolha
f_R	frequência de ressonância ajustada
\vec{F}	força
g	aceleração da gravidade
k	número de onda
K_g	condutividade térmica do ar
m	massa de radiação
$n(a) da$	número de bolhas de raio a , em um incremento da , por unidade de volume, m^{-3}
P	pressão
Q	fator de qualidade
r	raio da bolha
R_m	constante de amortecimento
S	área da superfície
s	constante elástica
S_{bs}	<i>differential cross section</i>
TS	<i>target strength</i>
\vec{u}	velocidade de partícula
V	volume

z	profundidade
Z	impedância acústica
Z_R	impedância de radiação
α_b	atenuação da bolha
β	coeficiente de absorção
γ	taxa dos calores específicos c_p e c_v
δ	coeficiente de amortecimento
δ_r	coeficiente de amortecimento de radiação
δ_t	coeficiente de amortecimento térmico
δ_v	coeficiente de amortecimento viscoso
λ	comprimento de onda
μ	viscosidade de cisalhamento
ρ_0	densidade da água do mar
σ_e	<i>extinction cross section</i>
σ_s	<i>scattering cross section</i>
τ	tensão superficial
ω_0	frequência angular
ω_d	frequência angular amortecida

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Ao longo dos séculos, o homem tem utilizado o mar como fonte de recurso, porém suas atividades têm resultado em impactos significativos no ambiente marinho. Segundo Popper (2011) a pesca excessiva, o descarte inadequado de resíduos, o aquecimento global, a exploração de petróleo, o turismo náutico, a construção de infraestruturas costeiras e, mais recentemente, a implantação de parques eólicos offshore para suprir a demanda energética têm contribuído para esses impactos.

Uma das implicações dessas atividades é a modificação da paisagem acústica¹ do ambiente marinho. Conforme apontado por Etter (2018), o ruído é todo e qualquer sinal indesejado ou involuntário, que possa afetar a qualidade de uma medição, comunicação ou sistema, e têm afetado o comportamento e a vida da biodiversidade marinha, visto que a vida marinha é sensível ao ruído e depende do som para comunicação, orientação, busca de alimento e reprodução (Popper, 2011).

As alterações na paisagem acústica do ambiente marinho perturbam esses processos vitais, interferindo no comportamento, nas migrações e até mesmo na sobrevivência das espécies (Popper, 2011). Portanto, é fundamental pesquisar e avaliar medidas que minimizem o impacto dos sons antropogênicos² na vida marinha, para a conservação e proteção desse meio.

O Brasil possui 7,4 mil quilômetros de costa, e sob jurisdição 4,5 milhões de km² de espaço marítimo conhecida como Amazônia Azul³. Segundo Gasalha (2016) estudos indicam que há a presença de cerca de 10.804 diferentes espécies nas águas brasileiras, incluindo aquelas que utilizam essas áreas como rota migratória para reprodução e alimentação anual.

¹ Paisagem acústica se refere ao ambiente sonoro ou ao conjunto de sons presentes em um determinado local.

² som antropogênico é o som gerado por atividades do homem.

³ Amazônia Azul nome escolhido pelo Comandante da Marinha, Roberto de Guimarães Carvalho, que fez um paralelo entre as riquezas existentes no nosso mar com os presentes na Amazônia e bem como suas dimensões.

A riqueza da biodiversidade marinha coexiste em um ambiente no qual o som desempenha um papel fundamental. Segundo Urick (1983), fontes em movimento ou resultantes de atividades humanas no ambiente submarino podem introduzir energia no oceano, gerando flutuações de pressão acústica que se propagam sob a forma de ondas acústicas.

A propagação dessas flutuações depende de diversos fatores, incluindo frequência, intensidade da fonte e propriedades do meio. Em geral, ondas de baixa frequência sofrem menor atenuação e podem alcançar maiores distâncias antes de serem absorvidas, enquanto ondas de alta frequência apresentam maior atenuação, limitando seu alcance efetivo (Kinsler *et al.*, 2000).

A onda do som (mecânica) se propaga causando compressões e rarefações no fluido, desta forma cria um complexo cenário acústico. De acordo com Nussenzveig (2014), essas ondas mecânicas transmitem energia de um ponto a outro com uma velocidade definida, propagando-se em todas as direções, irradiando a partir de sua origem.

O nível da pressão acústica gerada (Sound Pressure Level – SPL) por equipamentos e embarcações pode impactar negativamente a vida e o ambiente marinho. Uma das práticas mitigadoras cada vez mais estudadas e implementadas no exterior é a utilização da cortina de bolhas, que consiste na criação de uma barreira de bolhas de ar na água, tendo como propósito reduzir ruídos submarinos propagados pelas diversas atividades offshore (Rustemeier; Griebmann; Rolfes, 2012).

A cortina de bolhas atua como um eficiente mecanismo de reflexão e absorção sonora, pela diferença de impedância e da ressonância natural das bolhas, contribuindo para atenuar a onda mecânica que propaga e, conseqüentemente, os efeitos prejudiciais sobre a vida marinha (Urick, 1983).

Este estudo abrange interesses civis e militares. No âmbito civil a utilização da cortina de bolhas pode ser aplicada em projetos de construção e exploração offshore em reduzir o impacto ambiental devido aos ruídos gerados e proteger a vida marinha.

No contexto militar, a cortina de bolhas pode ser aplicada em treinamentos com munição e explosivos (Finneran e Jenkins, 2012). Além disso, submarinos utilizam cortinas de bolhas como despistador de sonares inimigos (Meng *et al.*, 2016).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo realizar o estudo teórico da atenuação devido à cortina de bolhas, além de conduzir a uma série de experimentos em um espaço controlado, visando enriquecer a compreensão.

Para os experimentos, será utilizado o tanque acústico do Laboratório de Engenharia Acústica do IEAPM⁴, onde projetores acústicos, operando na faixa de 400 Hz a 10 kHz, serão empregados para gerar os sinais de teste sob a forma de pulso e de onda contínua. A análise incluirá a comparação dos resultados experimentais com os cálculos teóricos, visando validar os resultados obtidos.

1.1 PROBLEMA

O aumento do ruído submarino resultante da expansão das atividades humanas no oceano, como navegação, construção offshore, exploração de recursos marinhos e a implantação de fazendas eólicas, vem causando preocupações crescentes devido aos impactos adversos nos ecossistemas marinhos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A relevância em abordar este problema se baseia na vitalidade dos ecossistemas marinhos para o equilíbrio ambiental e a subsistência da humanidade. As alterações na paisagem acústica submarina podem afetar o comportamento, migrações e a própria sobrevivência das espécies marinhas.

Portanto, é necessário a realização de pesquisas e avaliações para identificar medidas eficazes na redução do impacto dos ruídos humanos na vida marinha, visando à conservação e à proteção desse ecossistema, já que tais ruídos prejudicam a comunicação e orientação, causando estresse e perturbação comportamental.

Nesse contexto, este trabalho busca investigar a viabilidade da técnica de cortina de bolhas, já empregada como solução potencial, com o objetivo de compreender os mecanismos de atenuação sonora e avaliar sua eficácia em condições controladas, contribuindo para futuras aplicações.

⁴ Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a eficácia da técnica de cortina de bolhas na atenuação da propagação sonora em ambientes submarinos, visando compreender seus mecanismos de atuação e seu potencial de aplicação em cenários operacionais offshore.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo teórico sobre a atenuação de ondas mecânicas longitudinais na presença de bolhas gasosas, com o propósito de analisar os mecanismos físicos envolvidos nessa interação. Serão abordados aspectos como a influência do tamanho das bolhas, a frequência natural de ressonância e a impedância acústica do meio, elementos fundamentais para a redução da energia acústica em ambientes submarinos.

Com base nos fundamentos teóricos estabelecidos, pretende-se realizar experimentos em ambiente controlado, utilizando um tanque acústico. Nesses experimentos, serão empregados dois tipos de sinais acústicos: sinais do tipo pulso, que possibilitam a análise da resposta transitória da cortina de bolhas, e sinais de onda contínua, que permitem avaliar o comportamento estacionário e a atenuação do sinal ao longo do tempo. A utilização desses dois tipos de sinais visa avaliar a eficiência da cortina de bolhas gasosas como barreira acústica, bem como seu comportamento em um espaço limitado.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta pesquisa está estruturada em cinco Capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução com os aspectos significativos do tema, incluindo os objetivos e a justificativa para a realização deste trabalho. A introdução busca levantar questionamentos que orientem o desenvolvimento do estudo e a busca por soluções, materializadas por seus objetivos.

O segundo capítulo apresenta um levantamento bibliográfico sobre os principais conceitos teóricos relacionados ao tema, organizado em: *Estado da Arte, Propagação do Som no Meio Submarino, Física Associada às Bolhas, Poder de Reflexão do Alvo e Atenuação*. Esses tópicos são abordados para fornecer uma compreensão detalhada do uso e da eficácia da técnica de cortina de bolhas na atenuação dos ruídos submarinos.

No terceiro capítulo, detalha-se a metodologia experimental, incluindo equipamentos laboratoriais. O esquema experimental, apresentado na Figura 8, ilustra o arranjo que facilita a compreensão do procedimento realizado no tanque acústico.

O quarto capítulo apresenta os resultados e as discussões, interpretando os dados por meio de tabelas e gráficos, comparando os conceitos teóricos abordados no levantamento bibliográfico com os dados experimentais.

Finalmente, o quinto e último capítulo expõe as conclusões sobre a técnica adotada, analisando a hipótese levantada por esta pesquisa. A comparação entre os dados experimentais e a teoria é discutida, considerando a influência das condições experimentais realizadas em um espaço confinado.

Capítulo 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Para uma melhor compreensão das possibilidades do uso da técnica de cortina de bolhas, visando reduzir os impactos da energia sonora no meio submarino, temos como área de interesse o estudo da atenuação da energia sonora proveniente das construções submarinas, embarcações e plataformas offshore.

O impacto dessas fontes de ruído no ambiente marinho tem se tornado uma crescente preocupação, especialmente no contexto de uma mudança global no planejamento energético, que pode afetar a vida marinha de diversas maneiras.

Nesse sentido, a cortina de bolhas emerge como uma solução para reduzir a propagação da energia sonora no meio submarino e, conseqüentemente, minimizar os impactos adversos. Trata-se de uma técnica que vem sendo implementada com sucesso em diversos países, demonstrando seu potencial como uma medida de barreira acústica, como, por exemplo, no Mar do Norte (Bellmann, 2014).

Este referencial teórico baseia-se em pesquisas em Kinsler (2000), Medwin (1977), Medwin e Clay (1998), Lurton (2002), Leighton (2012), Rustemeier, Griebmann e Rolfes (2012), Urick (1983) e Wild (1946), que abordam o assunto, e que servem como base científica para o desenvolvimento deste trabalho. Ao longo deste capítulo, explora-se a evolução dos fenômenos físicos e dos parâmetros necessários para determinar a atenuação teórica ao utilizar essa técnica.

2.1 ESTADO DA ARTE

A primeira pesquisa documentada sobre o estudo de bolhas, foi publicada pelo Centro de Pesquisa de Defesa Nacional dos Estados Unidos em 1946, intitulada “*Acoustic Theory of Bubbles*” (Wild, 1946), sendo o marco inicial das investigações sobre as propriedades acústicas das bolhas em meio submarino.

Desde então, esse campo de pesquisa tem crescido substancialmente, proporcionando perspectivas valiosas sobre como bolhas gasosas podem ser geradas e como podem influenciar na propagação do som em diferentes ambientes.

Embora o foco deste trabalho esteja nas bolhas geradas artificialmente, por meio da ventilação de gases produzida por compressores ou equipamentos de mergulho em atividades submarinas (Rustemeier; Griebmann; Rolfes, 2012), é importante mencionar que, além do mar, as cortinas de bolhas também podem se formar na coluna d'água de rios, lagos, lagoas e outros ambientes submarinos.

Essas bolhas podem ser geradas naturalmente, como na liberação de gases do fundo do oceano através de fontes submarinas de águas termais (hidrotermais) ou vulcânicas (NOAA, 2017). As fontes hidrotermais fornecem águas aquecidas pela proximidade do magma, enquanto as fontes vulcânicas submarinas liberam material vulcânico, incluindo gases que formam bolhas à medida que sobem.

Uma referência importante são os estudos de Rustemeier, Griebmann e Rolfes (2012), onde foram realizados experimentos em dois meios distintos, laboratório e em um lago, testando diferentes tamanhos bolhas e densidade de bolhas por volume de líquido, sendo apresentados e discutidos resultados dos testes acústicos, além de propor um modelo computacional para simular o efeito de atenuação gerado pela cortina de bolhas, analisando suas limitações frente às condições experimentais observadas nos dois meios.

Complementando os estudos experimentais, modelos teóricos têm sido desenvolvidos para descrever a interação entre as ondas sonoras e as bolhas. Tsouvalas (2020) conduziu um estudo sobre duas abordagens para reduzir o ruído causado pela instalação de torres eólicas. A primeira abordagem seria modificar o método de instalação, enquanto a segunda envolve a aplicação de técnicas como a cortina de bolhas para atenuar o ruído gerado pelo homem. Dada a complexidade do ambiente submarino e a necessidade de preservar a segurança das espécies marinhas, ainda há uma demanda por mais pesquisas nesta área.

A aplicação da técnica de cortina de bolhas surge como uma resposta à necessidade em ampliar a capacidade da geração de energia por meio de Energia Eólica Offshore e das demandas de técnicas eficazes para a mitigação do ruído submarino geradas por construções offshores.

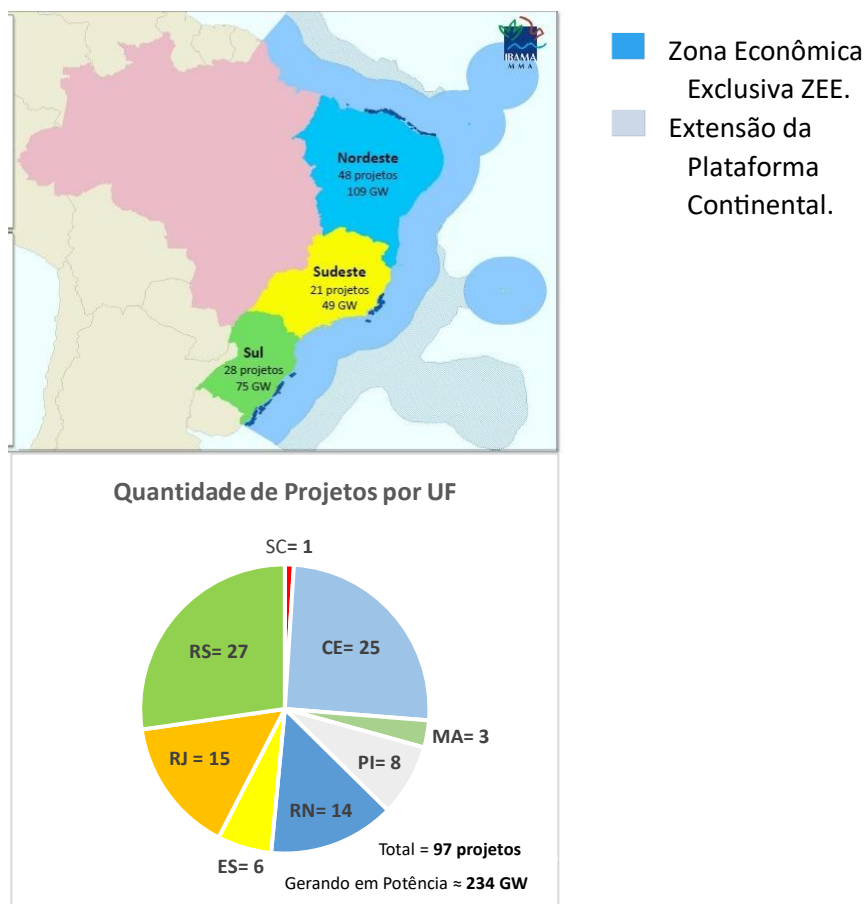
No Brasil, essa realidade está a cada dia mais próxima. Segundo Machado (2023) até 14 de julho, o IBAMA⁵ havia registrado cerca de 78 pedidos de licenciamento para

⁵ Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis é um órgão do Governo Federal do Brasil responsável pela gestão ambiental e pela aplicação das políticas e diretrizes ambientais no País.

projetos de energia eólica offshore, resultando em uma capacidade combinada de 189 GW. Com a previsão de instalação de aproximadamente 13 mil turbinas ao longo da costa brasileira, essa capacidade se aproxima da potência total de energia atualmente instalada no País, que é de 199 GW (ANEEL⁶, 2023).

Conforme apontado por Junior e Napoli (2023) o Brasil é visto com grande potencial na expansão da energia eólica offshore, dada a sua extensa costa e condições favoráveis de vento. Esse potencial também é impulsionado pelas tendências globais de redução das emissões de carbono e na adoção de fontes renováveis, sendo crucial à realização de estudos que venham considerar os impactos ambientais dessa transição.

Figura 1: Complexo Eólico Offshore - Processos de Licenciamento Ambiental abertos no Ibama atualizado em 10/12/2024.



Em 2024, o IBAMA divulga o mapa atualizado do complexo eólico em processo de licenciamento ambiental como pode ser verificado na Figura 1, com 97 projetos e com

⁶ Agência Nacional de Energia Elétrica.

a proposta em gerar aproximadamente 234 GW, ultrapassando a capacidade aproximada da potência total de energia atualmente instalada no País.

Nesse contexto de expansão do setor, em 2025, sancionou-se a Lei nº 15.097/2025, que estabelece o marco regulatório para a geração de energia elétrica em águas sob domínio da União, consolidando o ambiente normativo para o desenvolvimento da energia eólica offshore no Brasil. Ao disciplinar a cessão de áreas marítimas, os critérios de outorga e os procedimentos de licenciamento ambiental, a referida legislação contribui para a atração de investimentos no setor (Brasil, 2025).

Como desdobramento desse avanço, o IBAMA emitiu, em junho de 2025, a primeira licença prévia para um projeto eólico offshore, a ser implantado no litoral do município de Areia Branca (Rio Grande do Norte), com capacidade instalada de até 24,5 MW. Essa licença resulta de um processo iniciado em 2017 e contempla um Plano de Gestão Ambiental composto por 13 programas, os quais abrangem, entre outros aspectos, o monitoramento da fauna e a avaliação de ruídos submarinos, com o objetivo de assegurar a sustentabilidade do empreendimento (IBAMA, 2025).

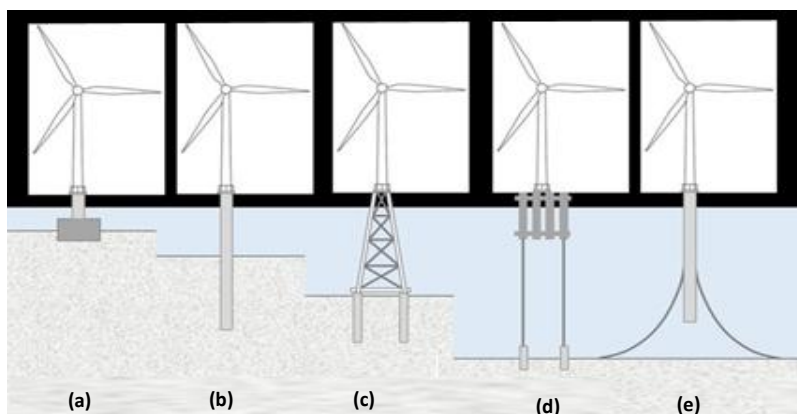
Já em 2026, observa-se que esse novo marco se reflete em um conjunto significativo de empreendimentos, com cerca de 103 projetos de energia eólica offshore em fase de análise pelo IBAMA, o que evidencia o papel da regulação como elemento indutor do desenvolvimento do planejamento energético offshore no Brasil (IBAMA, 2026).

Segundo Junior e Napoli (2023) as turbinas eólicas offshore representam uma importante fonte de energia limpa. Apesar desse avanço, o IBAMA alerta sobre o método (bate-estacas e balde de sucção) utilizado em sua instalação no fundo do mar, devido a possibilidade de gerar consequências significativas para o meio e suas espécies marinhas.

Esses impactos podem afetar significativamente o comportamento das espécies marinhas, alterando suas atividades diárias como alimentação, reprodução, migração e descanso. Além disso, o ruído excessivo pode causar estresse, afetar a comunicação e, em casos extremos, provocar danos físicos. É fundamental realizar avaliações detalhadas dos impactos ambientais e implementar medidas para minimizar esses efeitos negativos e garantir a conservação da vida marinha.

De acordo com Sánchez et al (2019), existem vários tipos de fundações para as turbinas eólicas offshores, dependendo da profundidade da coluna d'água, tipo de fundo e das condições oceanográficas. Estas podem ser: monopilar, tripé, flutuante, gravitacional e jaqueta. O método utilizado para essas instalações, devido aos níveis sonoros do ruído gerado na cravação das estacas, é que vem trazendo tais preocupações.

Figura 2: Tipos de Torres eólicas offshore e profundidades de aplicação. (a) Gravidade (0 - 10 m), (b) Monopilar (0 – 30 m), (c) Jaqueta/ Tripés (25 – 50 m), (d) Flutuantes – TLP/Semi-sub (> 50m) e (e) Flutuantes – SPAR (>120m).



Fonte: Aguilera (2020).

Um bom exemplo é a cravação das estacas dos geradores eólicos Monopilar (Figura 2-b) em North Hoyle, no Reino Unido. Conforme Nedwell, Langworthy e Howell (2003), em seu relatório “*Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife*” são apresentados um conjunto significativo de medições de ruídos submarinos em locais em estágio de implantação das torres eólicas. Essa atividade gerou um nível da fonte de 260 dB re 1 μ Pa @ 1 metro para estacas cravadas em profundidade local de 5 metros, e 262 dB re 1 μ Pa @ 1 m para 10 metros. Sendo importante ressaltar que esses valores não levam em consideração o tipo de fundo marinho, o que significa que podem variar para outras localizações.

Tabela 1: Resumo dos limiares acústicos do grupo de espécies marinhas.

Grupo Auditivo	Alcance Auditivo	Sinal Impulsivo
Cetáceos de Baixa frequência (LF) - Baleias de barbatanas.	7 Hz – 35 kHz	$L_p, 0\text{-pkt}$: 219 dB $LE, p, LF, 24h$: 183 dB
Cetáceos de Alta Frequência (HF) – golfinhos, baleias dentadas, baleia de nariz de garrafa.	150 Hz – 160kHz	$L_p, 0\text{-pk}$: 230 dB $LE, p, HF, 24h$: 185 dB
Cetáceos de Frequência muito alta (VHF) – botos, baleias cachalote, golfinhos, cefalorinquídeo.	275 Hz – 160 kHz	$L_p, 0\text{-pk}$: 202 dB $LE, p, VHF, 24h$: 155 dB
Pinípedes Fócidos (PW) – focas	50Hz - 86kHz	$L_p, 0\text{-pk}$: 218 dB $LE, p, PW, 24h$: 185 dB
Pinípedes Otarídeos (OW) – leões-marinhos e focas de pelos	60Hz – 39kHz	$L_p, 0\text{-pk}$: 232 dB $LE, p, OW, 24h$: 203 dB

Nível de pressão sonora de pico ($L_p, 0\text{-pk}$) e nível de exposição sonora cumulativa ponderada (LE, p).

Fonte: Modificado NMFS (2025).

Conforme com a Tabela 1, os valores de North Hoyle estão acima dos níveis tolerados para os mamíferos marinhos, de acordo com as diretrizes técnicas da NOAA⁷. Neste contexto, torna-se fundamental a exploração de métodos e tecnologias inovadoras para mitigar os impactos ambientais.

Além das cortinas de bolhas, outras técnicas vêm sendo empregadas para reduzir o ruído gerado durante a cravação de estacas, como as estruturas de contenção (ensecadeiras) e revestimentos de estacas (mangas ou *pile sleeves*). Segundo Bellmann (2014), as estruturas de contenção atuam pelo princípio do desacoplamento, criando uma barreira entre a estaca e o fluido, minimizando a transmissão sonora para a água. Já as mangas de estacas operam pelo princípio da reflexão, utilizando revestimentos que alteram a impedância acústica e redirecionam parte da energia sonora, reduzindo sua propagação.

2.2 PROPAGAÇÃO DO SOM NO MEIO SUBMARINO: FATORES E CARACTERÍSTICAS

De acordo com Nussenzveig (2014), o som é uma vibração mecânica que se propaga em um meio elástico e pode ser percebido pelo ouvido humano na faixa de frequência entre 20 Hz e 20 kHz. Vibrações com frequências abaixo de 20 Hz são denominados infrassons, enquanto aquelas acima de 20 kHz são chamadas de ultrassons. O ouvido humano não consegue detectar diretamente essas faixas extremas, mas elas podem ser registradas por instrumentos, como microfones (no ar) e hidrofones (na água), bem como percebidas por alguns animais. As baleias mysticetas, por exemplo, percebem infrassons para comunicação a longas distâncias, enquanto cetáceos odontocetos, como os golfinhos, utilizam ultrassons para ecolocalização.

A partir da fonte, o som se propaga em todas as direções, embora possa haver maior concentração de energia dependendo do seu direcionamento ou de onde encontra-se a fonte. O som como é uma onda mecânica precisa de um meio qualquer para se propagar, podendo ser no estado sólido, líquido ou gasoso (Nussenzveig, 2014).

Um som sempre carrega uma informação, transmitindo uma mensagem caracterizando-se como sinal. Segundo Urick (1983) também há o som que interfere na

⁷ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

qualidade do sinal, sendo classificado como ruído ou sinal indesejado, dependendo do contexto de interesse.

A propagação do sinal submarino depende de diversos fatores, tais como a intensidade das fontes sonoras e o caminho até o receptor. Essa propagação é influenciada também por fatores locais como a profundidade, salinidade, temperatura e as propriedades acústicas do fundo do mar e da dinâmica oceânica (Jensen *et al.*, 2011).

Outro aspecto essencial é a dependência da atenuação com a frequência. No meio submarino, sinais de baixa frequência sofrem menor atenuação e, portanto, percorrem distâncias maiores, o que é fundamental tanto para a comunicação da vida marinha quanto para a operação de sonares. Essa dependência, associada às propriedades do meio, pode ser expressa de forma aproximada por $[\alpha_c \propto \omega^2 / (\rho_0 \cdot c^3)]$, onde ω é a frequência angular, ρ_0 a densidade do meio e c a velocidade do som (Urlick, 1983).

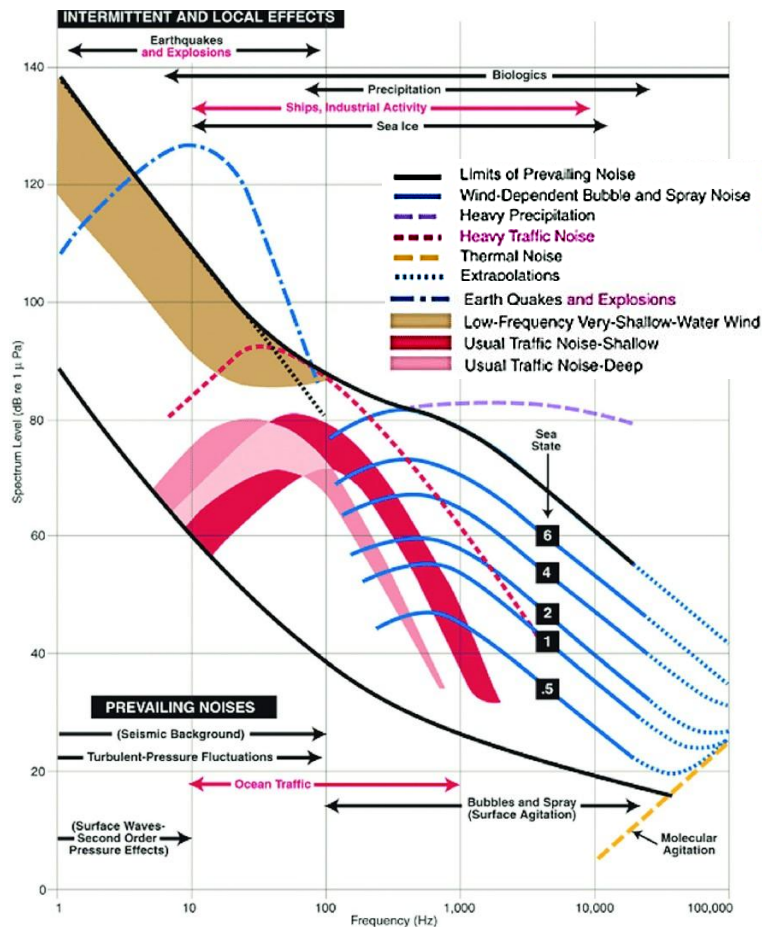
Observa-se que os mares são ambientes dinâmicos, e estão diariamente sujeitos à influência dos sons biológicos, geofônico (ondas, ventos e precipitações) e antropogênico (homem). Essa diversidade de fontes sonoras resulta em uma distribuição em frequência e energia que define o ruído no ambiente oceânico (Jensen *et al.*, 2011).

Esse ambiente em constante mudança é caracterizado por uma complexa interação de fatores acústicos. O nível de ruído ao longo das faixas de frequência nesta paisagem acústica permite distinguir as contribuições típicas das diferentes fontes sonoras no meio submarino. Essas contribuições podem ser representadas por meio de curvas, que oferecem uma visão quantitativa da paisagem acústica submarina e identificam padrões espectrais associados ao ruído antropogênico, biológico e geofônico.

Neste cenário, as curvas de Wenz⁸ (Figura 3) desempenham um papel crucial ao fornecer uma representação detalhada dessas contribuições, permitindo uma compreensão mais profunda da paisagem acústica submarina nas diferentes faixas de frequência.

⁸ As curvas de Wenz, descoberta por George Wenz em 1962, são gráficos que mostram a relação entre o nível de ruído de fundo e a frequência do som no oceano.

Figura 3: Composição de espectros de ruídos ambiente por Wenz.



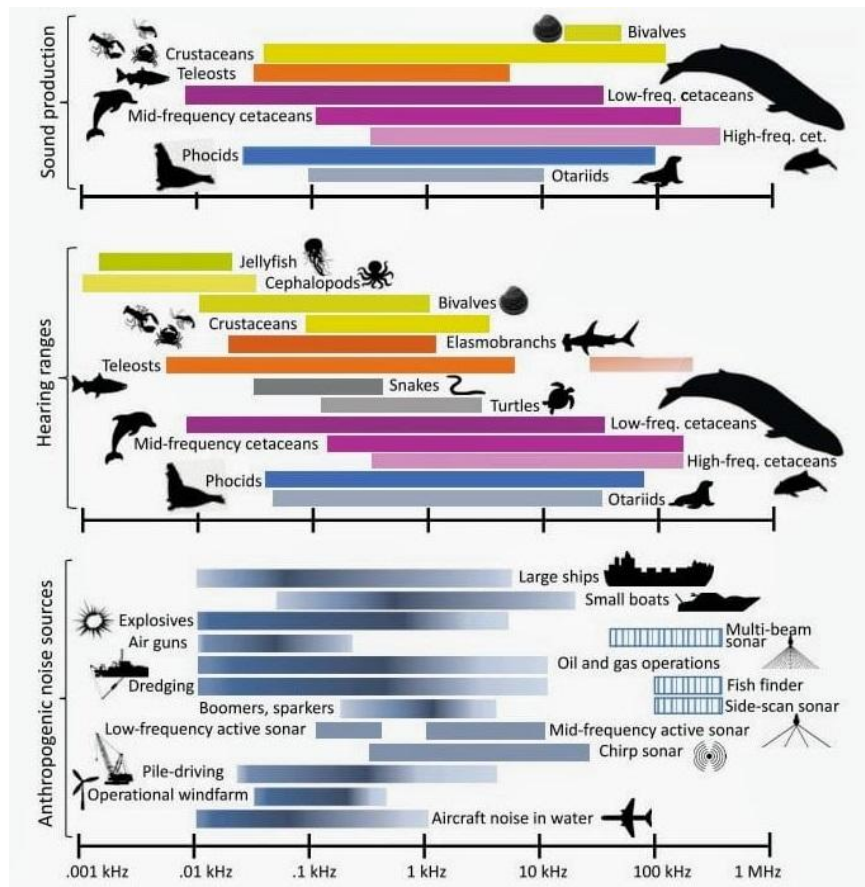
Fonte: Jensen *et al.* (2011).

Como mostrado na Figura 3, os níveis de ruído variam significativamente entre as diferentes faixas de frequência. As contribuições biológicas predominam em certas frequências mais baixas, enquanto os ruídos antropogênicos são mais evidentes em faixas médias a altas. Esses padrões destacam a importância de considerar tanto as características naturais do meio quanto as fontes sonoras externas ao estudar a propagação submarina.

Com a expansão das atividades humanas em áreas marinhas, incluindo navegação comercial e turismo, exploração de recursos naturais (como petróleo), construções portuárias e instalação de parques eólicos, o ruído antropogênico tem se tornado uma presença constante e crescente nos oceanos e mares.

A intensificação dessas atividades é evidenciada na Figura 4, que mostra como as faixas de frequências usadas por algumas espécies marinhas para vocalização e audição, estão sendo sobrepostas pelos sons gerados pelo homem, prejudicando a sua comunicação, orientação e a detecção de presas ou de predadores (Duarte *et al.*, 2021).

Figura 4: Faixa da frequência de vocalização, audição das espécies marinhas e antropogênica. As cores indicam a banda de energia de cada fonte.



Fonte: Duarte *et al.* (2021).

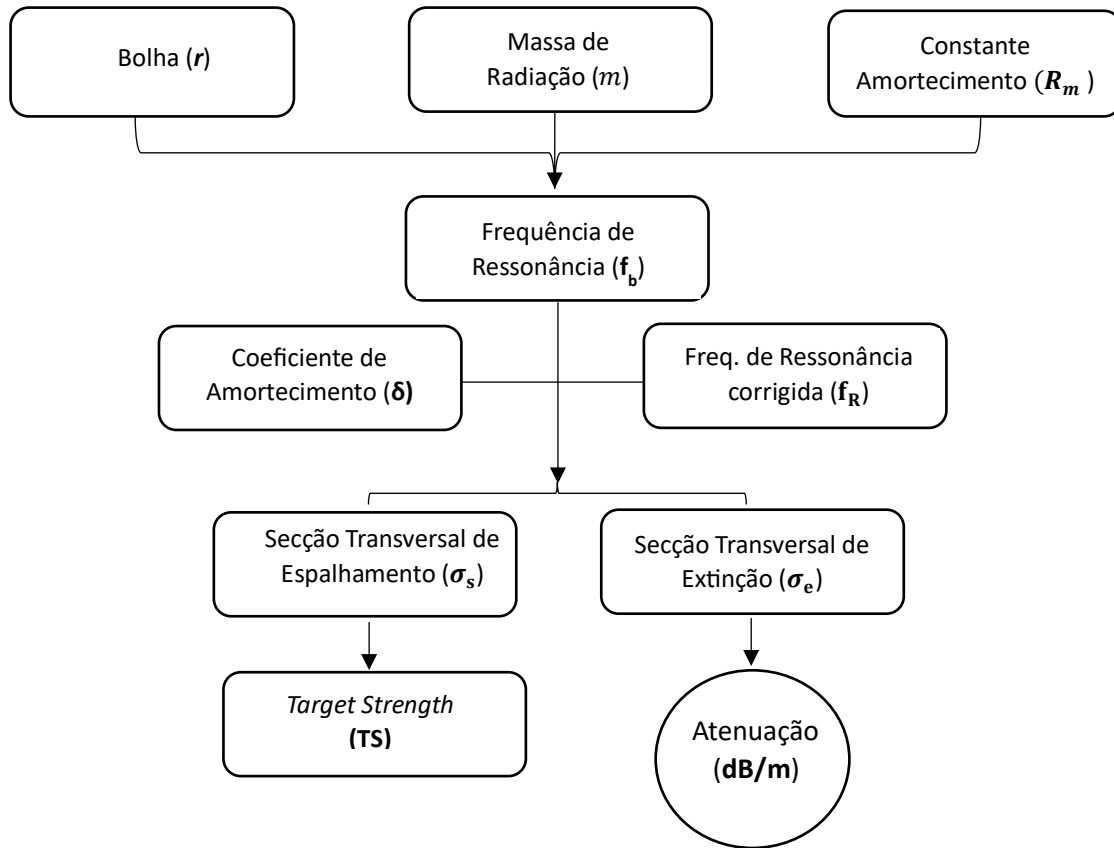
A Figura 4 apresenta a faixa de frequência de vocalização e audição das espécies marinhas em comparação com as fontes antropogênicas de ruído submarino. As cores indicam a banda de energia associada a cada fonte sonora. Diversas espécies, como cetáceos, elasmobrânquios, teleósteos e invertebrados, possuem faixas de vocalização e audição que frequentemente coincidem ou se sobrepõem às frequências dos ruídos gerados por grandes navios, operações de petróleo e gás, sonares e atividades industriais.

Ao abordar esses problemas é importante considerar estratégias de gestão, planejamento e regulamentações dos órgãos responsáveis que limitem o ruído antropogênico, em manter pesquisas contínuas para entender melhor os efeitos do ruído nas diferentes espécies, e desenvolver soluções que minimizem os impactos gerados para assim manter o equilíbrio e harmonia do meio.

Diante desses desafios, é essencial compreender os princípios físicos que regem o comportamento e a dinâmica das bolhas gasosas no meio submarino, conforme proposto por esta técnica. Para tornar essa compreensão mais acessível e estruturada, elaborou-se

um fluxograma, apresentado na Figura 5, que sintetiza o desenvolvimento teórico adotado para estimar a atenuação acústica em dB/m.

Figura 5: Visão do processo em determinar a atenuação do som com a cortina de bolhas.



A Figura 5 apresenta uma visão geral do processo que será utilizado para determinar a atenuação do som na presença de uma cortina de bolhas. O procedimento inicia-se com os parâmetros básicos da bolha, como o raio (r), a massa de radiação (m) e a constante de amortecimento (R_m). A partir deles, determina-se a frequência de ressonância (f_b) da bolha.

Em seguida, calcula-se a frequência de ressonância corrigida (f_R), que considera os efeitos adicionais associados aos mecanismos de amortecimento presentes no sistema. Paralelamente, são determinados os coeficientes de amortecimento (δ), que representam as perdas de energia associadas a diferentes processos físicos, como dissipação viscosa, perdas térmicas e radiação acústica.

Com base nesses parâmetros, é possível obter as seções transversais associadas à interação da onda acústica com a bolha. Inicialmente, calcula-se a seção transversal de espalhamento (σ_s), que representa a parcela da energia incidente que é redirecionada pela

bolha em diferentes direções. Esse parâmetro possibilita caracterizar a intensidade do espalhamento acústico produzido pela bolha por meio do *Target Strength* (TS).

Em seguida, determina-se a seção transversal de extinção (σ_e), que quantifica a remoção total de energia da onda incidente, resultante da combinação dos processos de espalhamento e absorção.

Por fim, o procedimento culmina na estimativa da atenuação acústica, expressa em dB/m, que representa a redução da intensidade do sinal à medida que a onda acústica atravessa a cortina de bolhas, decorrente dos processos de espalhamento e absorção associados à diferença de impedância acústica entre a água e o ar presente nas bolhas.

2.3 A FÍSICA ASSOCIADO À BOLHA

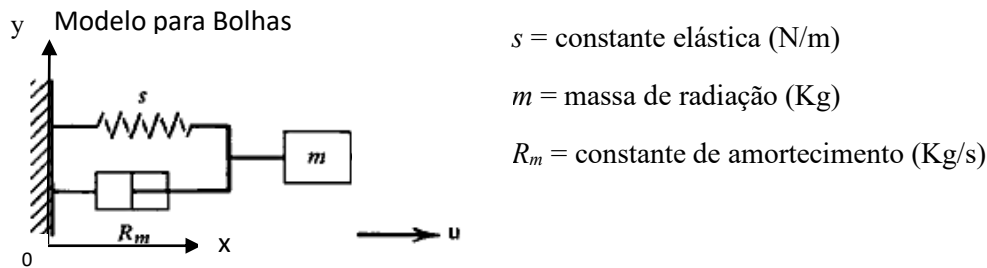
A cortina de bolhas é uma técnica que combina princípios da física com a engenharia para enfrentar desafios específicos, como o controle da propagação do som submarino. Nessa técnica, uma série de bolhas são geradas no fundo do mar ou em tanque com o auxílio de compressores. Quando esses geradores são ativados, eles liberam uma grande quantidade de bolhas de gás na água, com propriedades físicas com o poder de absorver e refletir o som.

Observa-se que a técnica da cortina de bolhas é uma solução que não agride o meio ambiente, uma vez que não envolve barreiras físicas rígidas que possam afetar negativamente a vida marinha. Portanto, a integração dos princípios da física por trás da cortina de bolhas representa uma promissora estratégia para mitigar os impactos do ruído antropogênico no meio submarino.

Seguindo a orientação da primeira seção do fluxograma da Figura 5, observa-se que a acústica submarina modela diversos sistemas como Oscilador Harmônico Simples (OHS), tais como transdutores e bolhas na coluna d'água.

O comportamento da bolha é semelhante ao de um oscilador harmônico, pois ao se deformar, retorna após um certo tempo ao estado original em virtude da ação de força restauradora. Essa força é proporcional à deformação da bolha, consequentemente, quanto maior a deformação, maior será a intensidade da força que a conduz de volta à posição de equilíbrio.

Figura 6: Oscilador Harmônico Simples Amortecido (OHS).



Fonte: Kinsler *et al.* (2000).

Segundo Kinsler *et al.* (2000, p.8), tem-se que:

$$m\ddot{x} + R_m\dot{x} + sx = 0 \quad (1)$$

Chega-se, assim, à seguinte solução, conforme apresentado por Kinsler *et al.* (2000):

$$x = A \cdot e^{-D_b t} \cdot \cos(\omega_d \cdot t + \varphi), \quad (2)$$

onde

$$D_b = \frac{R_m}{2 \cdot m}, \quad (3)$$

em que D_b representa a taxa de absorção.

A frequência angular amortecida (ω_d), dada por:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - D_b^2} \quad (4)$$

e a frequência angular de oscilação natural (ω_0) do sistema:

$$\omega_0 = \sqrt{s/m}, \text{ mas } \omega_0 = 2\pi \cdot f_0 \quad (5)$$

Dessa forma, obtém-se à frequência de ressonância (f_b) da bolha:

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{s}{m}} \quad (6)$$

Para determinar os valores equivalentes de "s" e "m" para uma bolha em oscilação, seguimos a abordagem proposta por Medwin e Clay (1998), que utiliza o conceito de impedância acústica (Z). Essa abordagem estabelece uma relação entre a pressão acústica

e a velocidade de partícula do meio, essenciais para compreender as propriedades vibratórias da bolha.

Uma onda sonora, ao se propagar de um meio para outro, encontra diferenças nas propriedades físicas, como a densidade e a velocidade do som. Essas variações resultam em impedâncias acústicas distintas, o que afeta a quantidade de energia refletida e transmitida na interface entre os meios (Kinsler *et al.*,2000).

Como apresentado em Kinsler *et al.* (2000, p.128), a impedância acústica para ondas esféricas, separadas em parte real e em imaginária, é dada por:

$$Z = \frac{\rho_0 \cdot c \cdot (k \cdot r)^2}{(k \cdot r)^2 + 1} + j \frac{\rho_0 \cdot c \cdot (kr)}{(k \cdot r)^2 + 1} \quad (7)$$

O primeiro termo representa a resistência acústica, e o segundo termo, a reatância acústica. Ambos tendem a zero para valores muito pequenos de kr , mas para valores muito grandes de kr , o termo resistivo aproxima-se de ρc e o termo reativo tende a zero (Kinsler *et al.*,2000).

Utilizando a notação complexa (Kinsler *et al.*, 2000), tem-se:

$$Z = |Z| \cdot e^{j\theta} \quad (8)$$

onde $|Z|$ é a magnitude da impedância complexa e θ é a fase entre a pressão acústica e a velocidade de partícula, dada por $\theta = \arctg\left(\frac{1}{kr}\right)$.

A magnitude da impedância é expressa por:

$$|Z| = \rho_0 \cdot c \cdot \frac{k \cdot r}{\sqrt{1 + (k \cdot r)^2}} \quad (9)$$

Adicionalmente, conforme em Kinsler *et al.* (2000), pode-se escrever:

$$Z = \rho_0 \cdot c \cdot \cos \theta \cdot e^{j\theta} \quad (10)$$

Ao modelar a bolha gasosa como uma esfera pulsante, a impedância de radiação passa a descrever a relação entre a pressão acústica na superfície da esfera e a velocidade normal de partícula do fluido sobre a esfera. Para uma esfera de raio r que oscila radialmente, a impedância de radiação depende tanto da frequência do som quanto das propriedades do meio, como densidade e velocidade do som.

Assim, a impedância de radiação da esfera pulsante, conforme descrita por Kinsler *et al.* (2000), é dada:

$$Z_R = \int \frac{df_S}{u}, \quad (11)$$

onde df_S representa um elemento de superfície e u a velocidade local da partícula.

Se todas as partes da esfera se movem com a mesma velocidade de partícula (u_0), a equação (11) pode ser reescrita como:

$$Z_R = \rho_0 \cdot c \cdot S \cdot [\cos^2(\theta) + j \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta)] \quad (12)$$

No limite de baixa frequência ($kr \ll 1$), o desenvolvimento da impedância de radiação descrito por Kinsler *et al.* (2000) resulta em:

$$Z_R \approx \rho_0 \cdot c \cdot S \cdot [(kr)^2 + j \cdot (kr)], \quad (13)$$

sendo $k = \omega/c$ o número de onda, $S = 4\pi r^2$ a área da superfície da esfera, e j a unidade imaginária. Como $(kr)^2 \ll kr$, a impedância é dominada pela componente reativa, equivalente a massa de radiação ($m = X_R/\omega$):

$$m = \rho_0 \cdot S \cdot r = 3 \cdot \rho_0 \cdot V \quad (14)$$

onde V^9 é o volume. No limite de baixa frequência, essa massa equivale a três vezes a massa do fluido deslocado pela esfera, evidenciando seu impacto na dinâmica do sistema acústico (Kinsler *et al.*, 2000). O efeito da massa de radiação torna-se especialmente significativo em fluidos mais densos, pois contribui diretamente para a redução da frequência de ressonância.

Com base nas relações de impedância e massa de radiação, o comportamento dinâmico da bolha pode ser associado a um sistema elástico, cuja força restauradora resulta da diferença entre a pressão interna do gás e a pressão exercida pelo fluido externo. A pressão interna ajusta-se por um processo adiabático¹⁰, enquanto a pressão externa combina a parcela hidrostática do fluido e a variação induzida pela onda acústica incidente, gerando ciclos de expansão e compressão isotrópicos (Leighton, 2012).

⁹ $V = \frac{4\pi r^3}{3}$, r é o raio.

¹⁰ $PV^\gamma = \text{constante}$, onde P é a pressão do gás (Pa), V é o volume do gás (m^3) e γ é o índice adiabático.

Nessas condições, considerando oscilações pequenas em torno do raio de equilíbrio da bolha, a aplicação da Lei de Hooke permite representar essa força restauradora com uma constante de rigidez efetiva, que quantifica a resposta elástica da bolha às variações de pressão, expressa por (Medwin e Clay, 1998, p. 293):

$$s = S^2 \cdot \gamma \cdot \frac{P_0}{V_0} = (4\pi r^2)^2 \cdot \gamma \cdot \frac{3 P_0}{4\pi r^3} = 12 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \cdot P_0 \quad (15)$$

Para pequenas bolhas ($kr \ll 1$), a frequência de ressonância, segundo a formulação proposta por Minnaert (1933) e adaptada por Medwin (1977), é dada por:

$$f_b = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{3P_0\gamma}{\rho_0}} \quad (16)$$

Considerando essas condições, obtém-se uma forma aproximada para a frequência de ressonância em termos da profundidade z (metros), ao considerar a pressão ambiente P_0 , a aceleração da gravidade $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, a pressão atmosférica no nível do mar como $p_{\text{atm}} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, a densidade da água do mar como $\rho_0 = 1026 \text{ kg/m}^3$ e o índice adiabático do ar $\gamma_{\text{ar}} = 1,4$ (razão do calor específico nas condições de pressão constante (c_p) e calor específico a volume constante (c_v)). Chegando, assim, à seguinte equação:

$$f_b = \frac{3,25}{r} \cdot \sqrt{(1 + 0,1 \cdot z)} \quad (17)$$

onde “ z ” a profundidade, em metros, para obter a frequência de ressonância em Hz. Em consonância com a segunda seção do fluxograma apresentado na Figura 5, a análise continua com o coeficiente de amortecimento.

2.3.1 COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO (DAMPING CONSTANT)

Como visto no tópico anterior, segundo Medwin (1977), quando o comprimento de onda for muito maior que o raio da bolha ($kr \ll 1$), a bolha pode ser representada como um oscilador harmônico. Nessa condição, sua resposta dinâmica é descrita por parâmetros efetivos associados ao sistema massa–mola–amortecedor, tais como a constante de amortecimento (R_m), a frequência de ressonância (f_b) e a massa de radiação (m).

O coeficiente de amortecimento (δ) está associado à oscilação da bolha e é definido como o inverso do número de ciclos necessários para que a amplitude do movimento decaia a $e^{-\pi}$ do seu valor original (Q) indicando a facilidade com que a energia se dissipa (Devin, 1959). De forma análoga, Kinsler *et al.* (2000) apresentam uma definição equivalente, expressando o coeficiente como o inverso de π vezes o número de ciclos necessários para que a amplitude decaia para $1/e$ do seu valor original.

Assim, a constante de amortecimento, segundo Medwin (1977), é escrita como o inverso do fator de qualidade (Q):

$$\delta = \frac{R_m}{\omega_0 \cdot m} = \frac{1}{Q} \quad (18)$$

De acordo com Devin (1959) o amortecimento total (δ) da bolha pode ser explicado pela perda de energia através de três processos:

- Amortecimento por radiação sonora (δ_r): Perda de energia em forma de ondas sonoras emitidas pela bolha.
- Amortecimento viscoso (δ_v): Devido às forças de viscosidade na interface entre o gás e o líquido.
- Amortecimento térmico (δ_{th}): Devido à condução de calor entre o gás dentro da bolha e o líquido circundante.

O coeficiente de amortecimento total é, portanto, a soma das contribuições desses três processos em virtude dos parâmetros físicos da bolha de ar, do líquido no qual está inserida e da interface entre eles (Devin, 1959).

Com isso, tem-se:

$$\delta = \delta_r + \delta_v + \delta_{th} \quad (19)$$

As equações (18) e (19) descrevem aspectos complementares do comportamento dinâmico da bolha: a primeira fornece a visão macroscópica do amortecimento, enquanto a segunda detalha a contribuição de cada processo individual (radiação, viscoso e térmico). Juntas, elas oferecem uma compreensão completa do amortecimento, sendo δ adimensional e fundamental para caracterizar tanto a dissipação de energia quanto o comportamento vibracional da bolha.

2.3.1.1 AMORTECIMENTO DE RADIAÇÃO (RADIATION DAMPING)

Segundo Devin (1959) em um líquido compressível, as bolhas ao serem excitadas por ondas sonoras, parte de sua energia é radiada para o meio como ondas sonoras esféricas, comportando-se como uma simples fonte sonora.

A constante de amortecimento de radiação, de acordo com Medwin (1977) é:

$$\delta_r = k \cdot r \quad (20)$$

Segundo Lurton (2002), a constante de amortecimento de radiação é inversamente proporcional à densidade e à velocidade de propagação da onda acústica¹¹. Essas propriedades, por sua vez, são determinadas pelas características do meio, como densidade e o módulo de elasticidade. Como ocorre no meio líquido, o módulo de elasticidade é representado pela quantidade inversa à compressibilidade.

Ou seja, a constante de amortecimento de radiação descreve a perda de energia de uma onda acústica à medida que ela se propaga em um meio, sendo influenciada pela densidade e pela velocidade. Em líquidos, a compressibilidade é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade, e o amortecimento de radiação tende a ser menor nos meios mais densos e com velocidades de som mais altas (Lurton, 2002).

2.3.1.2 AMORTECIMENTO VISCOSO (VISCOUS DAMPING)

De acordo com Devin (1959), embora a viscosidade não contribua diretamente para a geração de uma força total no líquido em equilíbrio, forças viscosas atuam na superfície da bolha. Essas forças exercem uma pressão adicional causada pelo estresse viscoso e pela distorção de elementos de líquido na camada esférica da superfície da bolha.

Para entender o efeito da viscosidade em uma bolha pulsante considera-se um pequeno elemento de uma camada esférica de líquido na superfície da bolha, este elemento tem dimensões radiais e laterais definidas no instante em que o raio da bolha está em sua posição média. Quando a bolha se expande, o pequeno elemento de líquido é distorcido e a espessura radial diminui enquanto a dimensão lateral aumenta.

¹¹ $c = \sqrt{E/\rho} = \sqrt{1/X\rho}$, onde E é o módulo de elasticidade, ρ é a densidade do meio e X é a compressibilidade.

Da mesma forma, quando a bolha se contrai, o elemento de líquido é novamente distorcido; desta vez, a espessura radial aumenta e a dimensão lateral diminui. Uma vez que o líquido é incompressível, a distorção não é causada por uma mudança no volume do elemento líquido, mas sim por tensões viscosas. Consequentemente, mais energia é necessária para comprimir a bolha do que é recuperada na próxima expansão. Devido ao movimento radial e à simetria esférica, as direções principais de tensão e taxa de deformação devem ser radiais. (Devin, 1959).

Com isso, o amortecimento viscoso (*viscous damping*) de acordo com Medwin (1977) é:

$$\delta_v = \frac{4 \cdot \mu}{\rho \omega r^2} \quad (21)$$

onde μ é a viscosidade de cisalhamento da água ($1 \cdot 10^{-5}$ kg/m.s), ρ é a densidade da água do mar ($\cong 1026$ kg/m³), ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi \cdot f$) e r é o raio da bolha em metros.

2.3.1.3 AMORTECIMENTO TÉRMICO (THERMAL DAMPING)

O trabalho realizado pela pressão ao comprimir o espaço gasoso é exatamente igual ao trabalho feito pelo gás ao se expandir, empurrando o líquido ao seu redor, em conformidade com a lei da conservação de energia.

De acordo com Devin (1959), para o caso de uma bolha, o gás em contato com o líquido segue, de forma aproximada, a equação de estado isotérmica, uma vez que o líquido apresenta elevado calor específico e condutividade térmica. Assim, a troca de calor entre o gás e o meio circundante ocorre de maneira eficiente durante as oscilações.

Conforme Medwin e Clay (1998) como o raio da bolha é muito pequeno a temperatura em todos os pontos do volume do gás permanece próxima à temperatura da água. Nessa condição, a oscilação assume caráter isotérmico, e a tensão superficial passa a exercer uma influência significativa sobre a dinâmica da bolha.

Essa contribuição requer uma correção na frequência de ressonância (f_b) apresentada na equação (17), que define a frequência f_R em função da pressão média interna, que depende da tensão superficial, através de β (coeficiente de absorção) e da

razão efetiva do calor específico que depende (através de b) da condutividade térmica, γb . Com isso:

$$f_R = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{3\gamma b \beta p_0}{\rho_0}} \quad (22)$$

$$f_R = f_b \cdot \sqrt{b\beta} \quad (23)$$

O parâmetro b nesse contexto, expressa o efeito da condução térmica dentro da bolha sobre o amortecimento térmico, influenciando diretamente sua resposta oscilatória e eficiência da bolha no espalhamento acústico.

No centro da bolha, longe de uma substância com alto calor específico¹², o gás se aproxima de uma equação de estado adiabática. Portanto, o processo térmico é politrópico¹³ para uma bolha, e existe uma diferença de fase entre o aumento da pressão por unidade de pressão original e a diminuição do volume por unidade do volume original. Esta diferença de fase causa um efeito de histerese¹⁴ (Devin, 1959).

De acordo com Devin (1959), o trabalho realizado pela pressão sobre o volume de gás durante a compressão supera o trabalho executado pelo espaço gasoso ao deslocar o líquido circundante durante a expansão. Essa diferença no trabalho realizado resulta em um fluxo de calor para o líquido, caracterizado pela constante de amortecimento térmico.

Conforme citado em Medwin (1977) o parâmetro que representa a interface entre a bolha de ar e o líquido na qual está inserido é a constante de amortecimento térmico, dado por:

$$\delta_{th} = \frac{d}{b} \cdot \left(\frac{f_R}{f}\right)^2 \quad (24)$$

Para isso, é necessário encontrar algumas variáveis na seguinte ordem: primeiro o argumento X , depois d/b , que representa a relação entre os parâmetros térmicos

¹² Calor específico (c): $c_{\text{água do mar}} = 4,22 \text{ J.kg.K}$ e $c_{\text{ar}} = 1,00 \text{ J.kg.K}$.

¹³ O processo politrópico é um processo termodinâmico que descreve a expansão e compressão de um gás que incluem transferência de calor, sendo relacionados com $PV^\gamma = \text{constante}$.

¹⁴ O efeito de histerese é um fenômeno no qual o estado de um sistema não retorna ao seu estado original quando um estímulo é removido. Em outras palavras, o sistema apresenta uma memória do estímulo.

adimensionais associados à transferência de calor na bolha, e β (coeficiente de absorção). Assim, é possível encontrar a constante de amortecimento térmico:

$$X = r \cdot \left(\frac{2\omega \cdot \rho_g \cdot C_{pg}}{K_g} \right)^{1/2} \quad (25)$$

$$\frac{d}{b} = 3 \cdot (\gamma - 1) \cdot \left[\frac{X \cdot (\sinh X + \sin X) - 2 \cdot (\cosh X - \cos X)}{X^2 \cdot (\cosh X - \cos X) + 3 \cdot (\gamma - 1) \cdot X \cdot (\sinh X - \sin X)} \right] \quad (26)$$

$$b^{-1} = \left[1 + \left(\frac{d}{b} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (\gamma - 1)}{X} \cdot \left(\frac{\sinh X - \sin X}{\cosh X - \cos X} \right) \right] \quad (27)$$

e

$$\beta = \frac{p_{int}}{P_A} = 1 + \frac{2\tau}{P_A \cdot r} \cdot \left(1 - \frac{1}{3 \cdot \gamma \cdot b} \right), \quad (28)$$

onde p_{int} é a pressão interna da bolha, P_A é a pressão ambiente estática, τ é a tensão superficial e r o raio da bolha.

Com a densidade do gás (ρ_g) sendo encontrada pela seguinte equação:

$$\rho_g = \rho_{g0} + [1 + 2\tau / (P_0 \cdot r)] \cdot (1 + 0,1z), \quad (29)$$

onde ρ_{g0} é densidade do ar no nível do mar e z é a profundidade.

Na qual a pressão ambiente estática (P_A) em função da profundidade sendo representada por:

$$P_A = 1,013 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0,1z) \text{ [Pa]} \quad (30)$$

As unidades usadas estão respeitando o Sistema Internacional de Medidas (SI), onde z em metros, $\rho_{g0} = 1,29 \text{ kg/m}^3$, $C_{pg} = 1,01 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (calor específico do ar), $\gamma_{ar} = 1,4$ (razão dos calores específicos c_p e c_v), $K_g = 2,34 \times 10^{-6} \text{ J.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (condutividade térmica do ar) e $\tau = 75,6 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ (tensão superficial da água do mar).

Agora possuindo o amortecimento de radiação, de viscosidade e térmico torna possível determinar o coeficiente de amortecimento da bolha de ar (δ) e assim compreender sua importância para seção transversal de espalhamento (*Scattering Cross Section*) na propagação sonora incidente.

Essa etapa constitui uma fase essencial no fluxograma apresentado na Figura 5, pois reúne os parâmetros básicos para descrever com precisão o comportamento acústico das bolhas. A consolidação desses resultados serve de base para as análises subsequentes, focadas à caracterização detalhada do espalhamento acústico e da atenuação.

2.3.2 SEÇÃO TRANSVERSAL DE ESPALHAMENTO (SCATTERING CROSS SECTION)

A *Scattering Cross Section* é o parâmetro que avalia como as bolhas reagem quando são expostas as ondas sonoras incidentes, fornecendo informações sobre sua capacidade em refletir o som ao interagir com as ondas acústicas.

De acordo com Clay e Medwin (1978), supõe-se que a bolha seja irradiada por um campo sonoro de baixa frequência ($kr \ll 1$), na qual em todos os pontos recebam uniformemente uma onda plana incidente. Com isso, é possível escrever que:

$$p_{inc} = P_{inc} \cdot e^{i\omega t}, \quad (31)$$

onde P_{inc} é a amplitude da onda incidente com seu valor em rms¹⁵.

A intensidade da onda plana incidente I_{inc} da bolha é:

$$I_{inc} = \frac{|P_{inc}|^2}{\rho_0 \cdot c}, \quad (32)$$

onde c é velocidade do som do meio e ρ_0 é densidade da água do mar.

Como trata-se de uma bolha pequena comparada com o comprimento de onda e móvel, a pressão espalhada é esfericamente simétrica sendo representada pela equação:

$$p_{scat} = P_{scat} \cdot \frac{R_0}{R} \cdot e^{i(\omega t - kR)}, \quad (33)$$

onde R_0 é a distância de referência da fonte (1m) e P_{scat} é a amplitude espalhada em $R = R_0$.

Para determinar a razão da pressão P_{scat}/P_{inc} , usa-se a condição da pressão na superfície da bolha com $R = R_0$. Logo a intensidade de espalhamento é:

¹⁵ Root mean square.

$$I_{scat} = \frac{(P_{scat})^2 \cdot (R_0/R)^2}{\rho_0 \cdot c} \quad (34)$$

A seção de espalhamento (*Scattering Cross Section*) é calculada por:

$$\sigma_s = \frac{\int I_{scat} dS}{I_{inc}} = \frac{I_{scat} \cdot S}{I_{inc}} \quad (35)$$

Sendo $S = 4 \cdot \pi R_0^2$ chega-se a:

$$\sigma_s = \frac{4 \cdot \pi R_0^2 I_{scat}}{I_{inc}} \quad (36)$$

Substituindo as equações (32) e (34) em (36), tem-se que:

$$\sigma_s = \frac{4 \cdot \pi R_0^2 \frac{(P_{scat})^2 \cdot (R_0/R)^2}{\rho_0 \cdot c}}{\frac{(P_{inc})^2}{\rho_0 \cdot c}} = 4 \cdot \pi \left(\frac{R_0^2}{R} \right)^2 \frac{(P_{scat})^2}{(P_{inc})^2} \quad (37)$$

Com base na relação descrita por Minnaert (1933), e utilizando a derivação aproximada da resposta em frequência da bolha, a relação $R = R_0 \cdot \left(\frac{f_R}{f} \right)^2$. Pode ser usada para expressar a seção transversal de espalhamento como:

$$\sigma_s = \frac{4\pi R_0^2}{\left(\frac{f_R}{f} \right)^2} \cdot \frac{(P_{scat})^2}{(P_{inc})^2} \quad (38)$$

Essa expressão evidencia que o espalhamento aumenta fortemente com a frequência, atingindo um máximo próximo à frequência de ressonância f_R . A dependência $R \propto \left(\frac{f_R}{f} \right)^2$ é derivada do modelo linear da bolha esférica de Minnaert, que considera pequenas oscilações e a resposta do gás dentro da bolha ao fluido circundante.

De acordo com Medwin e Clay (1998, p.299) a razão entre a amplitude da pressão espalhada e a amplitude da onda plana incidente pode ser escrita:

$$\frac{P_{scat}}{P_{inc}} = \frac{-r/R_0}{\left[\left(\frac{f_R}{f} \right)^2 - 1 \right] + i \left[kr + (d/b) \cdot \left(\frac{f_R}{f} \right)^2 + 4\mu / (\rho_0 \omega r) \right]} \quad (39)$$

O sinal negativo da equação (39) indica que a pressão espalhada está defasada de π radianos em relação à pressão incidente. Isso reflete a resposta da bolha, que se expande durante a rarefação (pressão incidente negativa) e se comprime durante a compressão (pressão incidente positiva), equilibrando a pressão total na interface fluido-bolha conforme sua dinâmica oscilatória.

Definimos o denominador complexo como $D(f) = A(f) + i B(f)$, com

$$A(f) = \left(\frac{f_R}{f}\right)^2 - 1 \quad (40)$$

$$B(f) = kr + \frac{d}{b} \left(\frac{f_R}{f}\right)^2 + \frac{4\mu}{\rho_0 \omega r}$$

A parte imaginária da equação (40), reúne os termos dissipativos (radiação acústica, térmico e viscoso) e, por isso, é identificada com a constante de amortecimento dependente da frequência, com isso a equação (38), pode ser escrita como:

$$\sigma_s(f) = \frac{4\pi r^2}{\left[\left(\frac{f_R}{f}\right)^2 - 1\right]^2 + \delta^2(f)}, kr \ll 1 \quad (41)$$

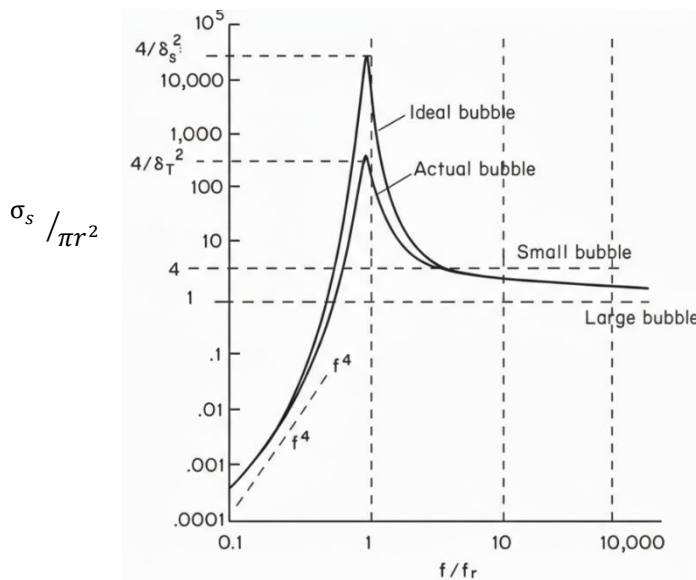
Segundo Wild (1946), a seção transversal de espalhamento (σ_s) atinge seu valor máximo quando a frequência da onda incidente (f) coincide com a frequência de ressonância da bolha (f_R). Nessa condição, o coeficiente de amortecimento (δ) desempenha um papel fundamental na determinação da seção transversal de espalhamento (σ_s), influenciando na dissipação da energia no meio. Assim pode-se reescrever a equação (41) da seguinte forma:

$$\sigma_s(f) = \frac{4\pi r^2}{\delta^2(f)} \quad (42)$$

Esse comportamento é reafirmado por Urick (1983) pela Figura 7, que apresenta, em escala logarítmica, a razão entre a seção transversal acústica e a seção transversal geométrica em função da frequência normalizada de f/f_R . O destaque principal está no pico agudo da curva para a bolha ideal, que indica o valor máximo correspondente à frequência de ressonância f_R da bolha. Nesse ponto, a seção transversal de espalhamento

(σ_s), ultrapassa a seção transversal geométrica (πr^2), que corresponde ao valor esperado para o espalhamento considerando apenas o tamanho ideal da bolha.

Figura 7: Razão entre a seção transversal acústica e a seção transversal geométrica de uma bolha de ar em água, em função da frequência normalizada (f/f_R)



Fonte: Modificada Urick (1983).

Observa-se, na Figura 7, que o comportamento da seção transversal (σ_s) para pequenas bolhas ($kr \ll 1$) depende diretamente dos mecanismos dissipativos presentes. Bolhas ideais perdem energia por espalhamento, enquanto bolhas reais apresentam perdas adicionais devido à condução de calor (amortecimento térmico) e ao arrasto viscoso do fluido ao redor (amortecimento viscoso), reduzindo o valor máximo do espalhamento em relação ao caso ideal.

Para frequências bem abaixo da ressonância, quase toda a energia retirada da onda sonora é reirradiada por espalhamento acústico (*scattering*). Próximo à ressonância, grande parte dessa energia é dissipada como calor, devido à condução térmica, à viscosidade da água e à tensão superficial na interface da bolha. Dessa forma, a bolha oscilante intercepta parte da onda sonora incidente, caracterizada pela sua seção de espalhamento, e a converte tanto em som espalhado quanto em calor, conforme os diferentes mecanismos físicos envolvidos.

Seguindo o fluxograma apresentado na Figura 5, após a identificação do comportamento da pressão incidente na seção transversal de espalhamento (σ_s), determina-se o *Target Strength* (TS), que representa a capacidade da bolha de espalhar a energia acústica incidente em todas as direções.

2.3.3 PODER DE REFLEXÃO DO ALVO (TARGET STRENGTH)

Conforme Urick (1983) em um sonar ativo, o parâmetro “*target strength*” refere-se ao retorno do eco do alvo submarino. Esses alvos podem incluir objetos de interesse militar, como submarinos ou minas, assim como objetos de interesse civil, como cardumes de peixes ou outras espécies marinhas.

Segundo Medwin e Clay (1998) o “*target strength*” é uma medida logarítmica de base 10, cuja seção transversal diferencial (*differential cross section*) depende da geometria do corpo, neste caso uma esfera. Sendo representado matematicamente por:

$$TS(\theta, \phi, t) = 10 \log_{10} \left[\frac{\Delta\sigma_s(\theta, \phi, t)}{1m^2} \right] [dB], \quad (43)$$

onde a área de referência é de $1m^2$.

Conforme mencionado por Urick (1983), o "poder de reflexão do alvo", é uma resposta ao pulso transmitido, caracterizada pela reflexão do som no alvo. Essa relação ocorre entre a intensidade da onda refletida e a onda sonora incidente, em uma distância específica. Logo:

$$TS(\theta, \phi, t) = 10 \log_{10} \left[\frac{\iint [I_{inc}(\theta, \phi) - I_{scat}(\theta, \phi)] \cdot d\theta \cdot d\phi}{1m^2} \right] [dB] \quad (44)$$

No caso da bolha de ar, a componente crucial para o cálculo da *Target Strength*, ocorre pela seção transversal de espalhamento (σ_s).

$$TS = 10 \cdot \log_{10} \frac{\sigma_s}{4\pi} [dB] \quad (45)$$

Usando a equação (41) em (45), chega-se a:

$$TS = 10 \cdot \log_{10} \frac{r^2}{\left[\left(\frac{f_R}{f} \right)^2 - 1 \right]^2 + \delta^2(f)} [dB] \quad (46)$$

A precisão no cálculo do *Target Strength* (TS) é essencial para a detecção eficiente de objetos submarinos, com aplicações em sistemas de sonar, ecolocalização e estudos de ecossistemas marinhos (Souza, 1997).

Para bolhas de ar em água, esse parâmetro depende diretamente da seção transversal de espalhamento (σ_s), que descreve a eficiência com que a bolha redireciona a energia

acústica incidente. Isso ocorre devido à diferença de impedância acústica entre o ar e a água, fazendo com que as bolhas atuem como espalhadores eficientes, permitindo quantificar a intensidade do espalhamento produzido e compreender sua interação com ondas acústicas.

Nesse contexto, a determinação do *Target Strength* torna-se um parâmetro fundamental para analisar o papel das bolhas na modificação da propagação acústica no meio e avaliar o efeito desse processo na atenuação associada às cortinas de bolhas em ambientes submarinos.

2.3.4 SEÇÃO TRANSVERSAL EXTINÇÃO (EXTINCTION CROSS SECTIONS)

Conforme Medwin e Clay (1998) a atenuação de uma onda depende tanto da seção transversal de espalhamento da bolha (σ_s), que dispersa parte da energia da onda incidente, quanto da seção transversal de extinção (σ_e), representando a energia total retirada da onda sonora devido à presença da bolha. A seção de extinção engloba os processos que resultam na redução da intensidade da onda, incluindo o espalhamento da energia e outras formas de perdas físicas.

A seção transversal de extinção é determinada através de:

$$\sigma_e = \frac{\Pi_e}{I_{inc}}, \quad (47)$$

em que

$$\Pi_e = \frac{4\pi a^2}{T} \int p_{inc} \left. \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right|_{R=r} dt \quad (48)$$

representa a taxa média de trabalho realizado pela pressão incidente sobre a superfície da bolha.

De acordo com Medwin e Clay (1998, p.303) a seção transversal de extinção (*extinction cross section*) é calculada diretamente a partir da taxa de trabalho realizado pela pressão incidente sobre a bolha, dividida pela intensidade da onda plana incidente:

$$\sigma_e = \frac{\frac{4\pi a^2}{T} \int p_{inc} \left. \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right|_{R=r} dt}{I_{inc}} \quad (49)$$

Resolvendo a integração da equação (49), chega-se ao seguinte resultado:

$$\sigma_e = \frac{4\pi r^2 \left(\delta / \delta_r \right)}{\left[\left(f_R / f \right)^2 - 1 \right]^2 + \delta^2(f)} \quad (50)$$

A seção transversal de extinção quantifica a perda total de energia da onda incidente, configurando-se como um parâmetro para a atenuação acústica. Dessa forma, relaciona as propriedades das bolhas, como raio, frequência de ressonância e mecanismos de amortecimento, à atenuação acústica do meio.

2.4 ATENUAÇÃO

Finalmente, alcança-se a etapa final do fluxograma apresentado na Figura 5, que sintetiza os mecanismos responsáveis pela atenuação da energia acústica na presença da cortina de bolhas na coluna d'água. Nesse contexto, a atenuação não decorre apenas da propagação geométrica e das condições de contorno, mas também da interação da onda mecânica longitudinal com as bolhas que compõem a cortina dispersa no fluido.

Nessa condição, a atenuação ocorre predominantemente por dois mecanismos físicos: espalhamento e absorção. Parte da energia incidente é reirradiada pelas bolhas (espalhamento), enquanto outra parcela é dissipada por processos térmicos, viscosos e por perdas associadas à radiação acústica (absorção).

Nas proximidades da frequência de ressonância, a amplitude de oscilação das bolhas é intensificada, promovendo aumento significativo da seção de espalhamento e do coeficiente de extinção do meio e, conseqüentemente, maior atenuação do campo acústico ao longo da coluna ocupada pelas bolhas.

Compreendidos os mecanismos físicos responsáveis pela atenuação na presença da cortina de bolhas, torna-se necessário quantificar esse efeito considerando dois cenários distintos: bolhas de um único tamanho e uma distribuição de tamanhos.

2.4.1 BOLHAS DE UM ÚNICO TAMANHO

Para uma melhor compreensão deve-se assumir que no meio submarino contenha (N) bolhas de raio r por unidade de volume. E essas bolhas estão suficientemente separadas para que não ocorram efeitos de interação.

De acordo com Urick (1983) a atenuação de uma onda plana se propagando no meio submarino contendo bolhas é expressa por um coeficiente de atenuação (α) definido por:

$$\alpha = 10 \cdot \log_{10} \frac{I(x)}{I_{inc}}, \quad (51)$$

onde $I(x)$ e I_{inc} representam, respectivamente, as intensidades da onda acústica após e antes da propagação através de uma unidade de distância na direção do feixe incidente.

Conforme Medwin e Clay (1998), se a intensidade da onda plana incidente for I_{inc} , a energia absorvida e espalhada para fora do feixe por cada bolha é dada por $I_{inc} \cdot \sigma_e$, onde a seção transversal de extinção (σ_e) é determinada pela equação (50). A taxa de variação espacial da intensidade é expressa como:

$$\frac{dI(x)}{dx} = -I_{inc} \cdot \sigma_e \cdot N \quad (52)$$

Separando as variáveis da equação (52):

$$\frac{dI(x)}{I(x)} = -\sigma_e \cdot N \cdot dx \quad (53)$$

Integrando ambos os lados,

$$\ln I(x) = -\sigma_e \cdot N \cdot x + Const. \quad (54)$$

$$I(x) = I_{inc} \cdot e^{-\sigma_e \cdot N \cdot x} \quad (55)$$

Passada uma distância x, ocorrerá uma mudança nesse nível da intensidade dada por:

$$\Delta IL = 10 \log_{10} \left(\frac{I(x)}{I_{inc}} \right) = -10 \cdot \sigma_e \cdot N \cdot x \cdot \log_{10} e \quad (56)$$

Chegando na taxa de atenuação da bolha (α_b), determinada por Clay e Medwin (1978, p.205), que representa uma quantidade de perda por metro, por definição:

$$\alpha_b = - \frac{\Delta IL}{x} = 4,34 \cdot \sigma_e \cdot N \text{ [dB/m]} \quad (57)$$

onde σ_e é a seção transversal de extinção em m^2 , N é número de bolhas por unidade de volume (m^3) cada uma com raio r e α_b é a atenuação em (dB/m).

2.4.2 BOLHAS DE VÁRIOS TAMANHOS

De acordo com Medwin e Clay (1998) quando um líquido contém bolhas de diferentes tamanhos, o número de bolhas por unidade de volume deve ser definido em termos do número correspondente a um incremento de raio (dr), dado por:

$$n(r) \cdot dr = \text{densidade de bolha por volume do líquido} \quad (58)$$

$$n(r) \cdot dr = \frac{\text{número de bolhas com raio entre } r \text{ e } r + dr}{\text{Volume do líquido}}, \quad (59)$$

onde o incremento é comumente utilizado como $dr = 1 \mu m$ (Medwin, 1977).

Conforme Medwin e Clay (1998, p.315) a seção transversal de extinção por unidade de volume, S_e , para ondas que atravessem uma mistura aleatória de bolhas, onde $kr < 1$, é calculada através da integração da equação (50):

$$S_e = \int_0^{\infty} \sigma_e n(r) dr = \int_0^{\infty} \frac{4\pi r^2 \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_r}\right) n(r) dr}{\left[\left(\frac{f_R}{f}\right)^2 - 1\right]^2 + \delta^2(f)} \quad (60)$$

Para simplificar a análise, Wild (1946, p.470) considera que a principal contribuição para a atenuação das bolhas ocorre quando a frequência de ressonância está próxima da frequência da onda incidente. Sob essa aproximação, a equação (60), ao assumir que a densidade de bolhas $n(r)$ e o coeficiente de amortecimento δ são praticamente constantes nesse intervalo restrito, fornece um valor aproximado para S_e :

$$S_e \approx \frac{2\pi^2 r_R^3 n(r_R)}{\delta_r} \quad (61)$$

onde r_R é o raio da bolha em ressonância e $n(r_R)$ é a densidade espectral¹⁶ de bolhas.

Em seguida, substituindo $\sigma_e \cdot N$ na equação (57), obtém-se a expressão para taxa de atenuação (α_b), devido à mistura de bolhas com $kr < 1$, conforme Medwin e Clay (1998, p.315):

$$\alpha_b = 4,34 \cdot S_e [dB/m] \quad (62)$$

¹⁶ Refere-se a distribuição de bolhas em função do raio, isto é, ao número de bolhas por unidade de volume com raios no intervalo entre r e $dr + r$.

Capítulo 3

METODOLOGIA

Este trabalho foi estruturado em duas etapas. A primeira consiste em um estudo bibliográfico, com o objetivo de compreender o comportamento das bolhas e sua dinâmica no que se refere à propagação de onda mecânica longitudinal. Esse estudo permitiu a compreensão dos mecanismos físicos envolvidos na atenuação acústica por cortinas de bolhas, conforme ilustrado na Figura 5.

A segunda etapa envolve a realização de experimentos em um tanque de teste, organizados em dois momentos distintos. No primeiro, foram conduzidos testes utilizando sinais acústicos na forma de pulsos, aplicados em faixas de frequência previamente definidas (400 Hz a 10 kHz). No segundo momento experimental, os ensaios foram realizados com sinais de onda contínua (CW), gerados por meio da composição de múltiplas senóides com fases aleatórias.

O sinal em forma de pulso acústico tem como característica principal a emissão em um curto intervalo de tempo, o que resulta em uma banda espectral larga. Os pulsos curtos proporcionam boa resolução temporal, favorecendo a distinção entre o sinal direto e suas reflexões dentro do tanque, o que facilita a análise de sua trajetória.

Por outro lado, o sinal de onda contínua (CW), composto por múltiplas senóides de fases aleatórias, permite a excitação simultânea de diversas frequências e reduz a ocorrência de interferências construtivas no interior do tanque. Esse tipo de sinal fornece um estímulo multiespectral, possibilitando a avaliação simultânea da resposta acústica do meio em diferentes bandas de frequência.

Com objetivo de melhorar a resposta acústica do tanque durante os ensaios com o sinal de onda contínua (CW), e considerando a presença das diversas reflexões nas paredes, no fundo e na superfície, foram adotadas medidas adicionais para minimizar tais efeitos. Para isso, adicionou-se um material absorvente à superfície do tanque, modificando a condição de contorno, com o propósito de absorver parte dessas reflexões e criar um ambiente acústico mais controlado.

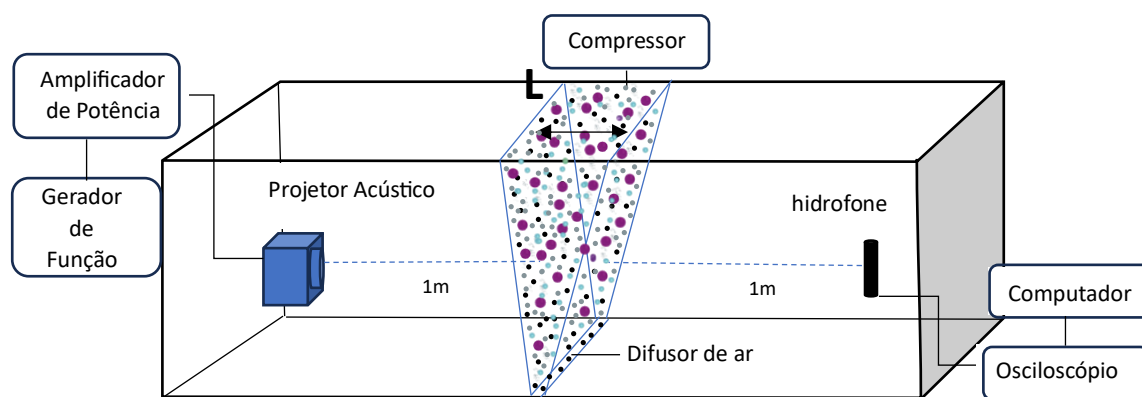
Do ponto de vista dos objetivos específicos, os experimentos realizados no tanque acústico (espaço controlado) permitem uma seleção de variáveis como tamanho de bolhas na coluna d'água, frequência de ressonância e outros. E essas variáveis são capazes de

influenciar no comportamento da cortina de bolhas e, conseqüentemente, na atenuação do ruído gerado pelos projetores acústicos usados.

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a geração da cortina de bolhas, foram utilizados tubos de PVC de 25 mm de diâmetro (difusor de ar), perfurados manualmente com diâmetros de: 0,5 mm; 1,0 mm; 1,5 mm e 2,0 mm. Cada difusor de ar contém furos de apenas um único tamanho e posicionado a 1 metro após o projetor acústico e a 1 metro antes do hidrofone, no tanque de teste, com alimentação fornecida por um compressor, modelo Pressure ATG2 – 10/100, como está representado no esquema experimental, Figura 8.

Figura 8: Esquema Experimental



Fonte: Autor (2026).

O gerador de funções Tektronix AFG3102C foi operado em modo rajada (burst) para gerar sinais com cinco ciclos, espaçados por intervalos de 100 ms. Este sinal foi aplicado ao amplificador de potência Crown XTI 2002, responsável por ajustar a amplitude do sinal de maneira a evitar a saturação do transdutor. No outro extremo, Figura 8, o receptor do sinal (hidrofone) está ligado ao osciloscópio digital (*Rohde & Schwarz*, RTB2004), instrumento responsável pela verificação da forma de onda e da amplitude da pressão acústica.

O tanque do Laboratório de Engenharia Acústica do IEAPM, Figura 9, tem como dimensões 2,10 m de largura, 4,50 m de comprimento e 1,50 m de profundidade.

Contendo água do mar para realização de teste de sistemas acústicos submarinos em um ambiente confinado e controlado, com frequência de corte¹⁷ de 238Hz.

Figura 9: Tanque Acústico do Laboratório de Engenharia Acústica do IEAPM.



Para a geração das ondas mecânicas neste trabalho, foram utilizados três projetores acústicos (Lubell 964, Lubell 1424 e o EDO 610E), visando cobrir a faixa de frequência planejada para os experimentos (400 Hz a 10 kHz). A Figura 10 apresenta um dos projetores utilizados.

Figura 10: Projetor Acústico - Modelo Lubell 964 e especificações.



Frequency response: 200 Hz - 20 kHz

SPL: 180 dB re 1 μ Pa @ 1m @ 1kHz

Fonte: <http://www.lubell.com>

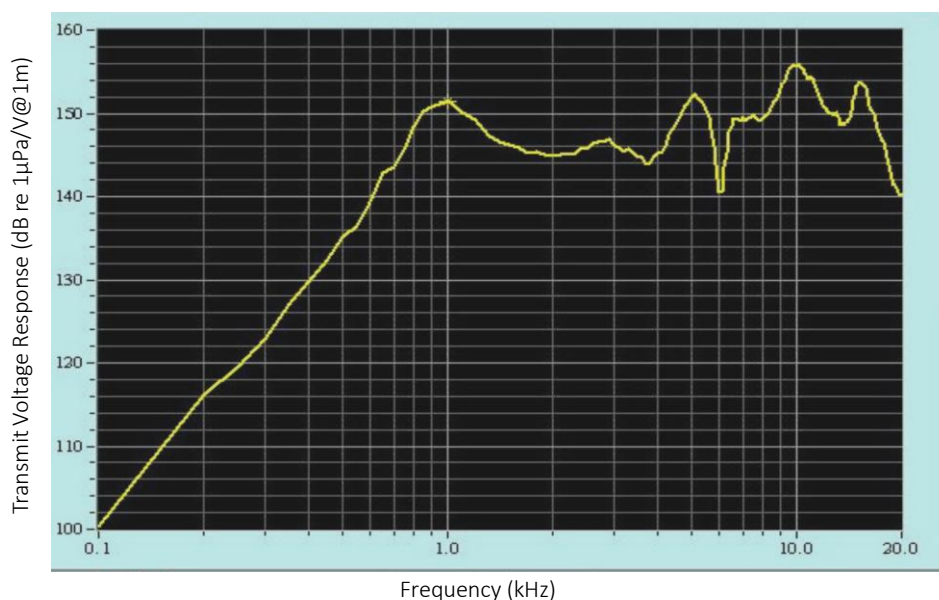
Um transdutor acústico tem como principal componente um material piezoelétrico, cujas propriedades físicas permitem a conversão de energia elétrica em energia mecânica,

¹⁷ Parâmetro que define o limite inferior do espectro de frequência que o sistema pode transmitir com eficiência.

atuando, assim, como projetor acústico. Quando submetido a um campo elétrico alternado, o material piezoelétrico se deforma mecanicamente, gerando ondas mecânicas compressionais que se propagam no meio circundante, como a água.

Uma das principais características de desempenho desse tipo de transdutor é a sua *Transmit Voltage Response* (TVR), que representa a pressão acústica gerada pelo transdutor para cada volt aplicado. Expresso em dB re 1 $\mu\text{Pa/V}$ @ 1 m o TVR varia com a frequência (Hz) sendo fundamental para a caracterização da resposta acústica do dispositivo. A análise dessa curva permite identificar as frequências de maior emissão, tornando-a essencial na seleção e caracterização de transdutores para aplicações de acústica submarina.

Figura 11: Curva de TVR por frequência do modelo: Lubell 964.



Fonte: <http://www.lubell.com>

A Figura 11 apresenta uma faixa mais linear em aproximadamente entre 1,5 kHz e 4,8 kHz, com valores de TVR entre 144 e 146 dB re 1 $\mu\text{Pa/V}$ @ 1 m. Nessa região, a curva permanece relativamente plana (linear), sem grandes picos ou vales, o que sugere uma resposta acústica estável e previsível do transdutor acústico.

Outro projetor acústico utilizado é do modelo Lubell 1424, é um transdutor acústico subaquático (UAT) de alta potência projetado para aplicações científicas e militares, Figura 12, dada sua construção robusta de acabamento em epóxi e com sistema de montagem em gaiola de aço inoxidável 316.

Figura 12: Projetor Acústico - Modelo Lubell 1424 e especificações do fabricante.

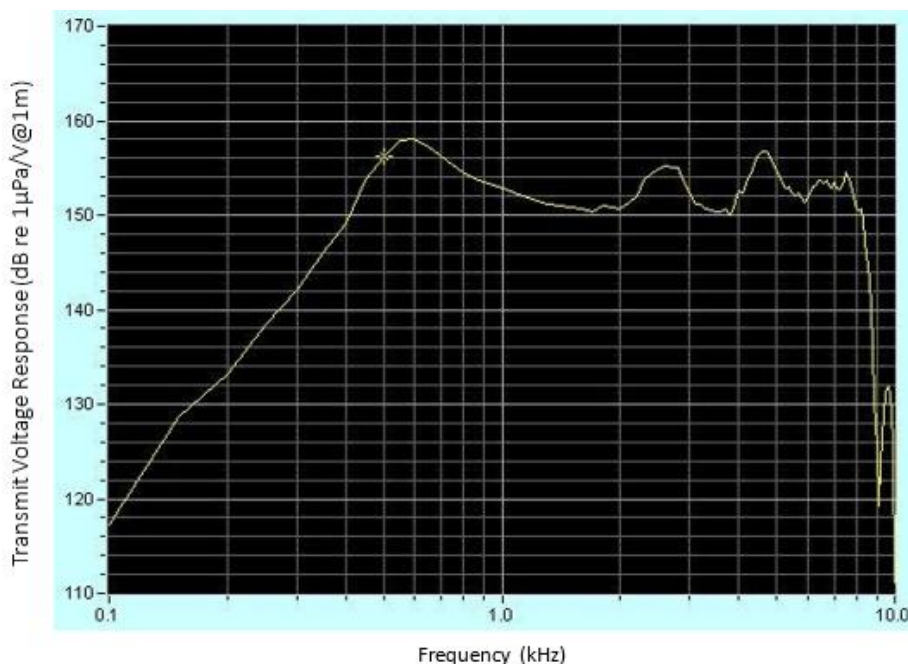


Frequency response: 200 Hz - 9 kHz
SPL: 197 dB re 1 μ Pa @ 1m @ 600Hz

Fonte: <http://www.lubell.com>

Neste modelo em sua curva de TVR, Figura 13, é possível observar uma faixa de resposta mais linear aproximadamente entre 900 Hz e 2 kHz, com valores de TVR variando entre 152 e 158 dB re 1 μ Pa/V @ 1 m, sugerindo uma faixa de frequência adequada para operação com maior previsibilidade de desempenho do projetor.

Figura 13: Curva de TVR por frequência do modelo: Lubell 1424.



Fonte: <http://www.lubell.com>

O terceiro projetor acústico, Figura 14, é o modelo EDO 610 E, tipo Tonpiliz, cujo elemento piezoelétrico¹⁸ é de uma cerâmica PZT-4 (Navy Type III¹⁹).

¹⁸ Materiais ferroelétricos que, após a polarização, se tornam piezoelétrica.

¹⁹ Modificada pela Marinha dos EUA.

Figura 14: Projetor Acústico - modelo EDO 610 E e especificações do fabricante.



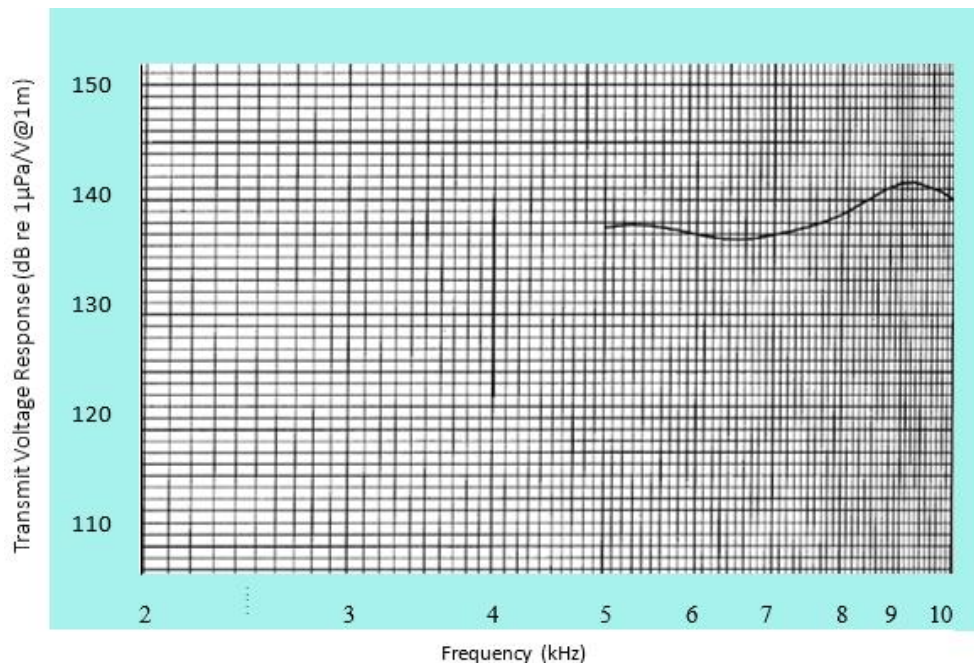
Frequency response: 3 – 11 kHz (faixa estendida)

SPL: 180 dB re 1 μ Pa @ 1m @ 650Hz

Fonte: www.exelisinc.com

De maneira análoga aos projetores anteriormente apresentados, a Figura 15 ilustra a curva de TVR disponibilizada pelo fabricante.

Figura 15: Curva de TVR por frequência do modelo: EDO 610 E.



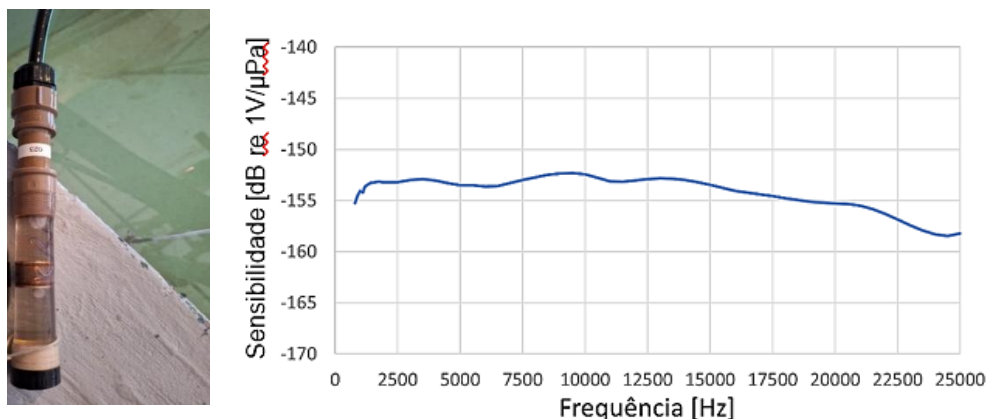
Fonte: EDO Corporation Electro – Ceramic Products (1998).

A Figura 15 apresenta a curva de TVR do modelo EDO 610, que exibe uma resposta relativamente linear entre aproximadamente 5 kHz e 7.5 kHz, com valores de TVR variando de 135 a 140 dB re 1 μ Pa/V @ 1 m. A estabilidade observada nessa faixa sugere uma resposta mais previsível do transdutor, contribuindo para a redução de possíveis distorções no sinal transmitido.

Alinhado ao projetor acústico e na distância de 2 m, o receptor do sinal, o hidrofone é usado para detectar as ondas sonoras submarinas. Segundo Denardo (2012), o hidrofone é um transdutor construído com uma cerâmica piezoelétrica, sendo escolhida por sua

capacidade em converter vibrações mecânicas em sinais elétricos e por sensibilidade à pressão (-155dB re 1V/ μ Pa), permitindo a detecção de pequenas variações da pressão acústica submarina, Figura 16.

Figura 16: Hidrofone do IEAPM e Gráfico de Sensibilidade.



O hidrofone, conectado ao osciloscópio (Rohde & Schwarz, RTB2004), capta o sinal acústico gerado pelo projetor. Com o volume do projetor acústico mantido constante e evitando a saturação do sinal, torna-se possível analisar a tensão do sinal recebido nas condições com e sem bolhas.

Além da análise da resposta acústica, é necessária a investigação da influência da cortina de bolhas sobre o oxigênio dissolvido no tanque. Para isso, utiliza-se um instrumento multifuncional (*Horiba*, modelo U-5000), conforme ilustrado na Figura 17, capaz de medir e indicar simultaneamente até 11 parâmetros em uma única unidade, sendo que, neste caso, foi medida apenas a variável de oxigênio dissolvido (mg/L), com medições realizadas tanto na ausência quanto na presença das bolhas.

Figura 17: Instrumento Multifuncional (Horiba)



Modelo: U-5000

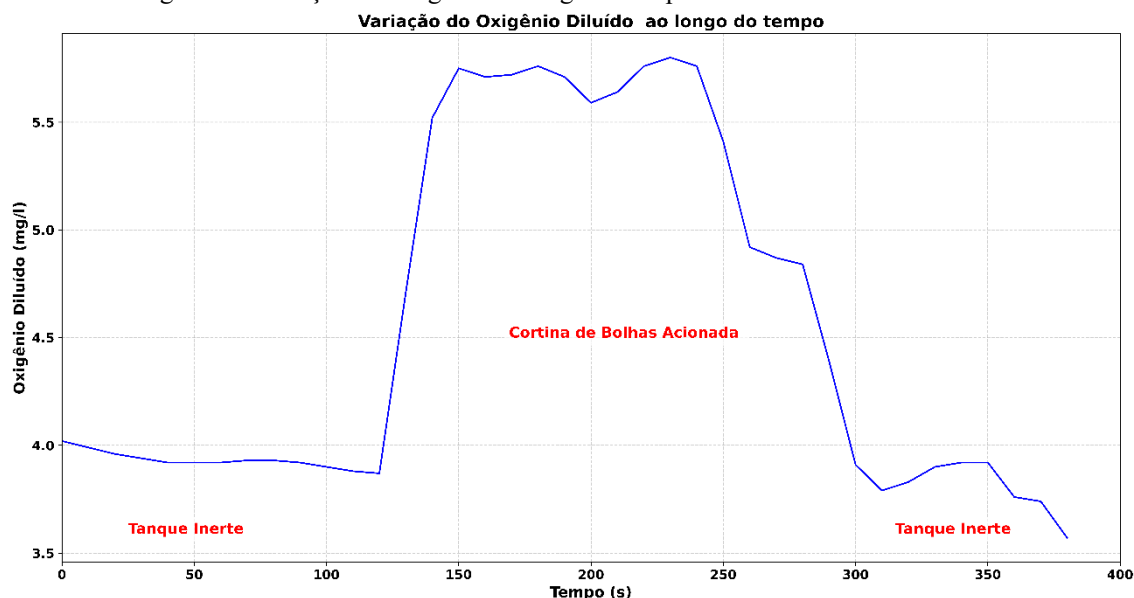
Power LR 14 1.5 v

Fonte: <https://cmscientifica.com.br> (2025).

As coletas de dados foram organizadas em três fases distintas: antes da ativação da cortina de bolhas, durante seu funcionamento e após sua desativação. Levando em consideração um intervalo de 5 minutos na amostra, antes de iniciar uma nova medida, isso garante a estabilização dos sensores e uma leitura mais precisa do oxigênio dissolvido.

Em cada etapa foram realizadas 12 medições consecutivas, sendo calculadas as médias para representar de forma confiável o comportamento do parâmetro ao longo do experimento. Essa metodologia sistemática permitiu avaliar a influência da cortina de bolhas sobre a concentração de oxigênio no tanque, assegurando maior rigor e controle nos resultados.

Figura 18: Variação do Oxigênio ao longo do tempo sem e com cortina de bolhas.



A Figura 18 apresenta a variação da concentração de oxigênio dissolvido no tanque ao longo do tempo. Na fase inicial (0 – 120 s), com o tanque em condição inerte, os níveis de oxigênio permanecem estáveis em torno de 4,0 mg/L. A partir do instante em que a cortina de bolhas é acionada (120 – 240 s), observa-se um aumento expressivo na concentração de oxigênio, que atinge valores próximos a 5,8 mg/L. Após a desativação do sistema (a partir de 240 s), os níveis de oxigênio diluído apresentam uma redução gradual, retornando a valores próximos aos observados no início do experimento.

Dessa forma, verifica-se que a água mantida em condição inerte no tanque assegura que a variação do oxigênio dissolvido não interfira na propagação da energia gerada pelo projetor acústico, devido ao controle da concentração de oxigênio no meio. Observa-se, ainda, que a atenuação do sinal está associada ao acionamento da cortina de bolhas. O

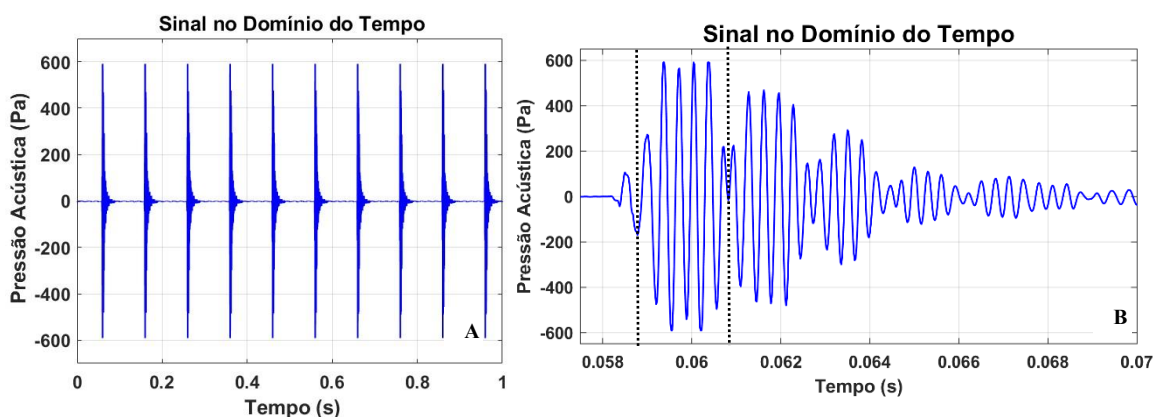
controle rigoroso desse parâmetro garante maior precisão nas medições relacionadas à propagação acústica em ambiente confinado.

3.1.1 PULSO

O sinal acústico foi configurado na forma de pulsos senoidais na faixa de frequência entre 400 Hz e 10kHz, respeitando os cinco ciclos por emissão. Essa configuração busca garantir que a duração do pulso seja suficientemente curta para permitir a separação do sinal direto das primeiras reflexões nas paredes, fundo e na superfície do tanque, possibilitando medições com mínima interferência e análise precisa da amplitude e forma de onda.

Os sinais recebidos no hidrofone foram gerados pelos projetores acústicos Lubell 964 (Figura 10), Lubell 1424 (Figura 12) e EDO 610E (Figura 14). Embora o sinal total registrado tenha duração de 60 segundos, a Figura 19 exibe um recorte do sinal recebido pelo hidrofone (A), no qual são facilmente observados os intervalos regulares entre pulsos, além do detalhamento temporal de um pulso isolado (B) extraído desse segmento.

Figura 19: (A) Recorte do sinal no domínio do tempo no intervalo de 1s e (B) Um pulso isolado.



A Figura 19(A) apresenta um recorte da transmissão acústica no domínio do tempo, no qual se observa um conjunto de pulsos periódicos. Cada pulso corresponde a uma onda acústica cuja amplitude varia ao longo do tempo, seguido por um intervalo de silêncio relativo. Os pulsos ocorrem em intervalos regulares, caracterizando uma frequência de repetição constante. A estrutura interna desses pulsos é composta por senoides de frequência de 2,0 kHz, cuja oscilação é visível somente na Figura 19(B).

Já a Figura 19(B) apresenta o detalhamento temporal de um pulso acústico isolado. O trecho entre as linhas pontilhadas representa o pulso principal, composto por cinco ciclos, seguido por múltiplas oscilações de menor amplitude, que correspondem às diferentes chegadas do sinal causadas pelas reflexões nas paredes, no fundo e na superfície do tanque. Ou seja, nesse intervalo, a forma de onda do sinal se mantém mais fiel à propagação original, sem as distorções causadas pela reverberação, permitindo uma análise mais precisa de suas características.

3.1.2 ONDA CONTÍNUA (CW)

Para aprimorar a interpretação dos experimentos relacionados aos múltiplos caminhos da propagação do sinal sob a forma de pulso, foram realizados novos ensaios agora empregando um sinal de onda contínua com fase aleatória. Essa abordagem propõe minimizar os efeitos de interferências e dos modos estacionários, identificados na primeira fase experimental decorrentes das limitações físicas do tanque.

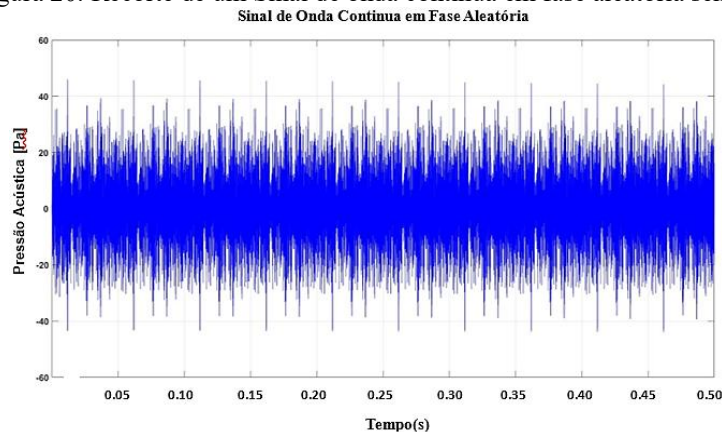
Para isso, o sinal gerado é formado pelo somatório de ondas contínuas com diferentes frequências e fase aleatória. Sendo representado por:

$$y(t) = \sum A_i \cdot \sin(2\pi f_i t + \varphi_i), \quad (63)$$

em que A_i é a amplitude, f_i é a frequência (Hz) de cada componente, t o tempo (s) e φ_i fase aleatória atribuída a cada senoide do somatório.

Essa proposta reduz os efeitos das interferências e modos estacionários, tornando o campo acústico mais homogêneo, como representado na Figura 20, o que facilita a identificação dos efeitos da reflexão das condições de contorno do tanque.

Figura 20: Recorte de um Sinal de onda contínua em fase aleatória sem bolhas.

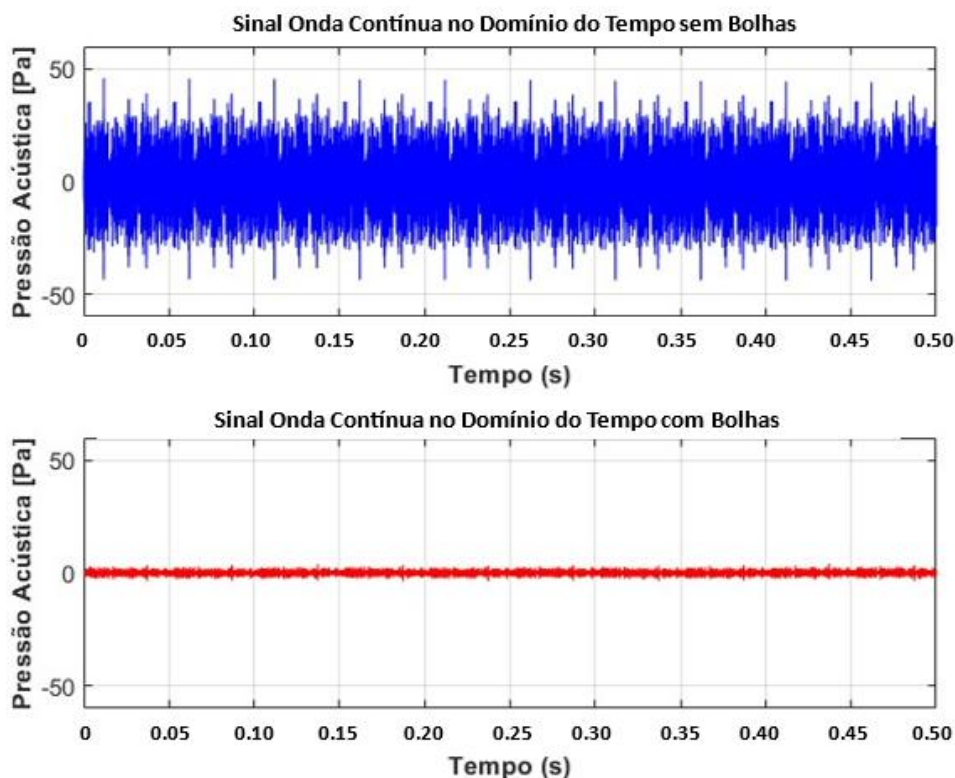


Na Figura 20, é possível observar a variação e dispersão da pressão acústica ao longo do tempo, sem a presença de padrões periódicos evidentes ou picos regulares. Essa característica decorre diretamente da soma de múltiplas senoides, cada uma iniciando em uma fase aleatória, o que impede a formação constante de interferências construtivas e destrutivas, promovendo uma dispersão mais uniforme da energia acústica no domínio do tempo.

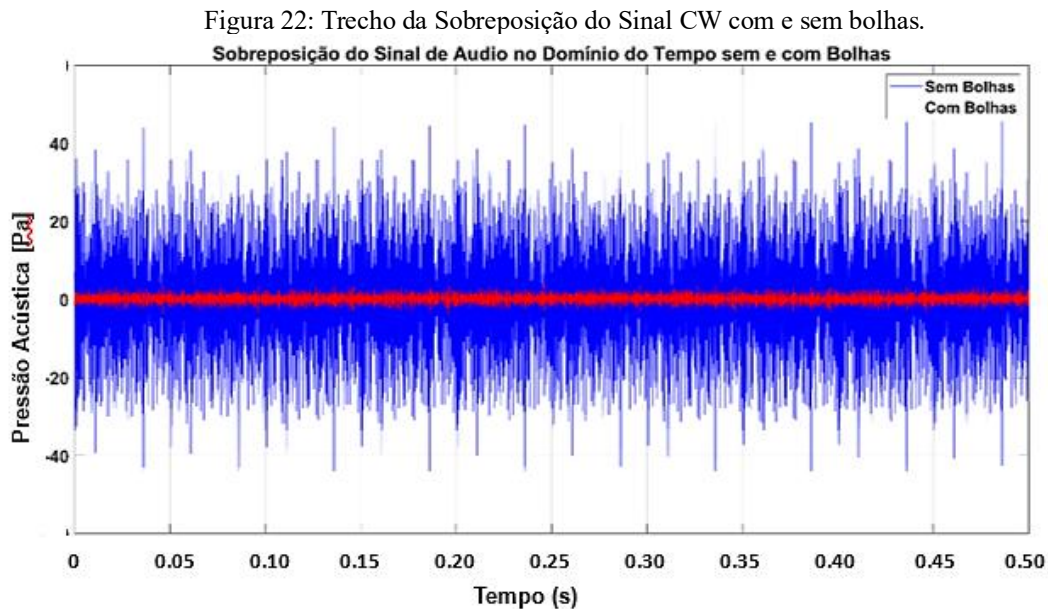
Para minimizar os efeitos das múltiplas reflexões, inerentes às dimensões limitadas do tanque, modifica-se as condições de contorno da superfície por meio da adição de uma cobertura de material com propriedades absorventes. Essa alteração visa reduzir o tempo de reverberação e atenuar os múltiplos caminhos da propagação, proporcionando sinais acústicos mais limpos e com menor interferência.

A transmissão do sinal pelo projetor acústico EDO 617 E, conforme ilustrado na Figura 17, permite analisar as alterações no comportamento da propagação sonora em função da nova condição de contorno. Essa configuração experimental, mediante repetições e comparações sucessivas, mostra-se relevante quando aplicada à cortina de bolhas gerada por orifícios com diâmetro de 0,5 mm, possibilitando uma avaliação mais precisa da atenuação acústica associada à técnica, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21: Trecho do sinal CW no domínio do tempo com e sem bolhas.



Na Figura 21, o primeiro gráfico mostra que, sem bolhas, o sinal CW apresenta grande amplitude e variações devido à propagação e reflexões no tanque. No segundo gráfico, com a cortina de bolhas ativada, observa-se uma redução significativa da amplitude e das variações da pressão acústica, evidenciando que as bolhas refletem, absorvem e dispersam a energia sonora transmitida, como pode ser visto na Figura 22.



De acordo com a Figura 22, a atenuação é determinada a partir da diferença entre as amplitudes da pressão acústica do mesmo sinal sem e com bolhas, obtida por meio da análise dos dados experimentais. Com o arranjo experimental devidamente estabelecido nas duas etapas (sem e com bolhas), todos os dados necessários para a análise são coletados e, então, determina-se o valor da atenuação experimental para cada frequência.

Esse procedimento está alinhado aos objetivos do estudo, que compreendem a comparação da atenuação acústica em sinais na forma de pulso e de onda contínua, com ênfase na identificação da condição que proporciona maior redução acústica.

A partir dos métodos e equipamentos descritos, busca-se garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo avaliar e comparar a eficácia da técnica de cortina de bolhas na atenuação de ondas mecânicas longitudinais. Essa avaliação considera diferentes tipos de sinais acústicos, como pulsos e ondas contínuas, possibilitando uma análise abrangente do desempenho da mitigação em distintas condições de propagação.

No próximo capítulo, apresentam-se os resultados obtidos, acompanhados de uma análise detalhada e de discussões que relacionam os dados experimentais com os conceitos teóricos abordados no estudo bibliográfico, visando não apenas validar os dados

coletados, mas também aprofundar a compreensão sobre os mecanismos físicos envolvidos na interação entre o sinal, o meio e a barreira acústica formada pela cortina de bolhas.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

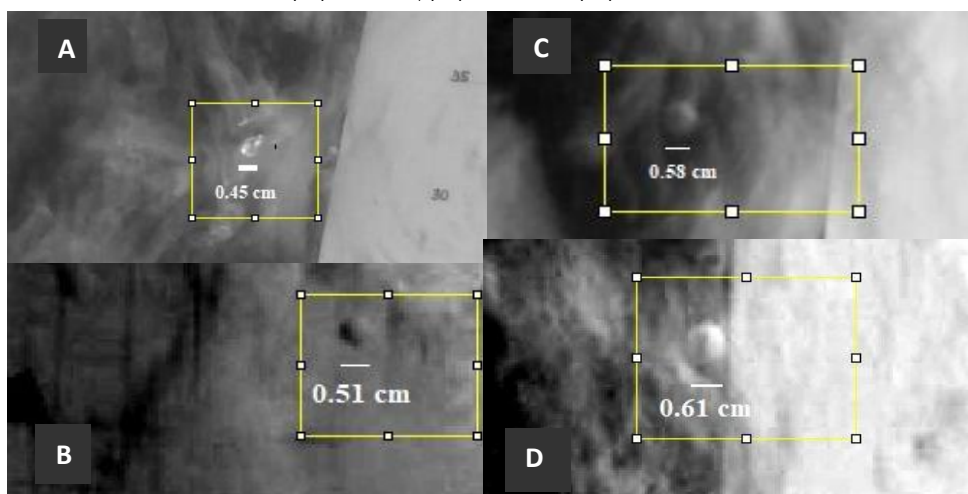
Os experimentos realizados no tanque de teste acústico utilizaram o mesmo método na abertura da válvula do compressor, mantendo a pressão entre 4 Bar ($4 \cdot 10^5$ Pa) a 6 Bar ($6 \cdot 10^5$ Pa). Essa padronização das condições experimentais foi crucial para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

A determinação dos diâmetros dos furos foi realizada com base no aprofundamento bibliográfico, já que os autores (Devin, 1959; Medwin, 1977; Leighton, 2012 e Medwin e Clay, 1998) sugerem bolhas com tamanho muito menor que o comprimento de onda, ou seja, $kr \ll 1$. Além disso, é importante mencionar que os furos, mesmo que pequenos, foram feitos manualmente e com brocas de diâmetro 0.5 a 2.0 mm, variando 0.5mm.

Apesar da preocupação em manter a pressão controlada com o método de regulação do compressor, durante todo o experimento, a distribuição das bolhas na cortina é aleatória, o que torna mais complexa a determinação precisa da quantidade de bolhas geradas por unidade de volume (N). Para tornar os cálculos mais fluidos, utilizou-se uma aproximação geométrica, considerando as bolhas distribuídas de forma uniforme dentro de um prisma trapezoidal, como representado na Figura 8 (esquema experimental).

A Figura 23 apresenta a medição das bolhas de ar formadas pelos furos com diâmetros de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm, realizada com o auxílio do software *ImageJ* (NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, s.d.).

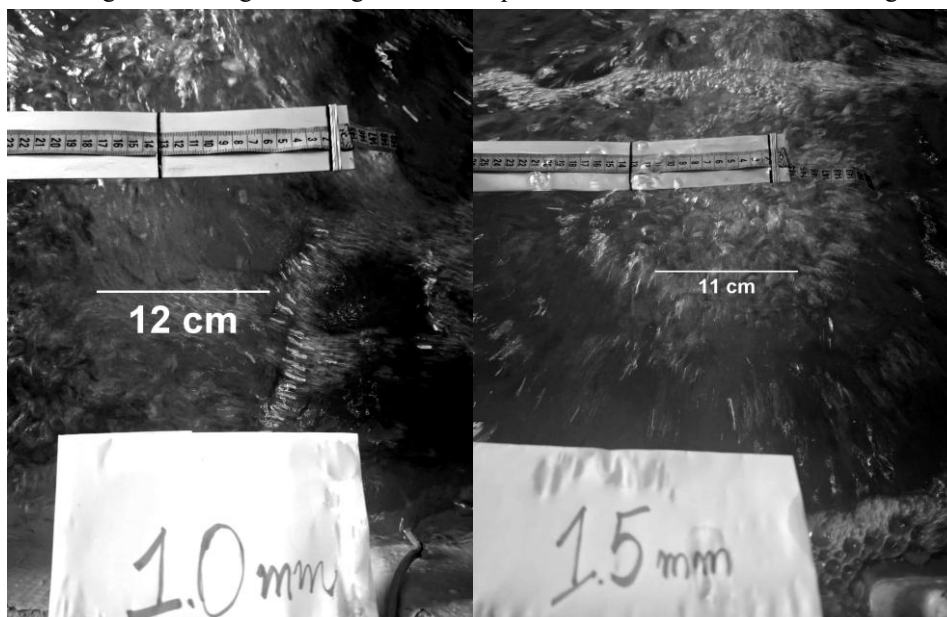
Figura 23: Imagens das bolhas na coluna d'água representando os diâmetros dos furos de (A) 0.5 mm, (B) 1.0 mm, (C) 1.5 mm e (D) 2.0 mm.



Esse procedimento, Figura 23, permite obter um conjunto de dados capaz de determinar a média do tamanho das diversas amostras de bolhas correspondentes a cada diâmetro de furo.

Utilizando o mesmo software, foi possível determinar a largura da cortina para cada diâmetro de furo, Figura 24, conforme os respectivos diâmetros dos furos na altura do hidrofone.

Figura 24: Imagem da largura formada pela cortina de bolhas na coluna d'água.



A análise visual e quantitativa dos experimentos, mostrada nas Figuras 23 e 24, permite relacionar o diâmetro dos furos utilizados na formação das cortinas de bolhas ao tamanho efetivo das bolhas obtidas. Esses resultados fornecem dados essenciais para os cálculos da concentração e da distribuição volumétrica no meio aquoso, possibilitando o preenchimento da Tabela 2. A frequência de ressonância é calculada utilizando a equação (4) para os diâmetros médios das bolhas, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Dados teóricos das frequências de ressonância da bolha (f_b) com os respectivos diâmetros médio das bolhas (D_b), diâmetro do furo (D_f) e comprimento da largura da cortina (L_c) e suas incertezas.

D_f (mm)	D_b (mm)	$L_{Cortina}$ (cm)	$f_{b_teórico}$ (kHz)
0.5 ± 0.1	4.6 ± 0.8	$12 \pm 0,5$ cm	1.441 ± 0.098
1.0 ± 0.1	5.2 ± 0.8	$12 \pm 0,5$ cm	$1,275 \pm 0.089$
1.5 ± 0.1	5.8 ± 0.8	$11 \pm 0,5$ cm	$1,143 \pm 0.083$
2.0 ± 0.1	6.1 ± 0.8	$15 \pm 0,5$ cm	$1,087 \pm 0.080$

O cálculo das constantes de espalhamento e da atenuação no tanque acústico requer a determinação de parâmetros essenciais para a obtenção da frequência de ressonância ajustada (f_R), conforme definido na equação (23), que leva em consideração a tensão superficial da bolha. Para isso, é necessário calcular o argumento X , utilizando a equação (25), seguido da determinação da razão d/b , que corresponde a parâmetros térmicos adimensionais, conforme a equação (26). Em seguida, calcula-se o coeficiente β , que representa a razão entre a pressão interna da bolha e a pressão ambiente, conforme a equação (28). Os valores desses parâmetros encontram-se organizados na Tabela 3.

Tabela 3: Dados teóricos dos parâmetros físicos dos respectivos diâmetros das bolhas e a frequência de ressonância ajustada.

D_b . (mm)	X	d/b . (10^{-3})	β	f_R (kHz)
$4,6 \pm 0,8$	$0,918 \pm 0,150$	$8,02 \pm 0,003$	1,00042	$1,218 \pm 0,083$
$5,2 \pm 0,8$	$0,976 \pm 0,149$	$9,06 \pm 0,003$	1,00037	$1,077 \pm 0,075$
$5,8 \pm 0,8$	$1,031 \pm 0,150$	$10,10 \pm 0,003$	1,00033	$0,996 \pm 0,070$
$6,1 \pm 0,8$	$1,057 \pm 0,151$	$10,62 \pm 0,003$	1,00031	$0,918 \pm 0,067$

A partir da média dos tamanhos das bolhas obtidas para cada diâmetro de furo, foi possível aproximar o sistema por um modelo em que a cortina é composta por N bolhas de mesmo diâmetro efetivo. Com essa representação, determina-se a taxa de atenuação individual de cada bolha por meio da equação (57). Dessa forma, estima-se a atenuação teórica para cada diâmetro de bolhas, cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Diâmetros das bolhas, *Target Strength* (TS) e a atenuação teórica ($\alpha_{teó}$).

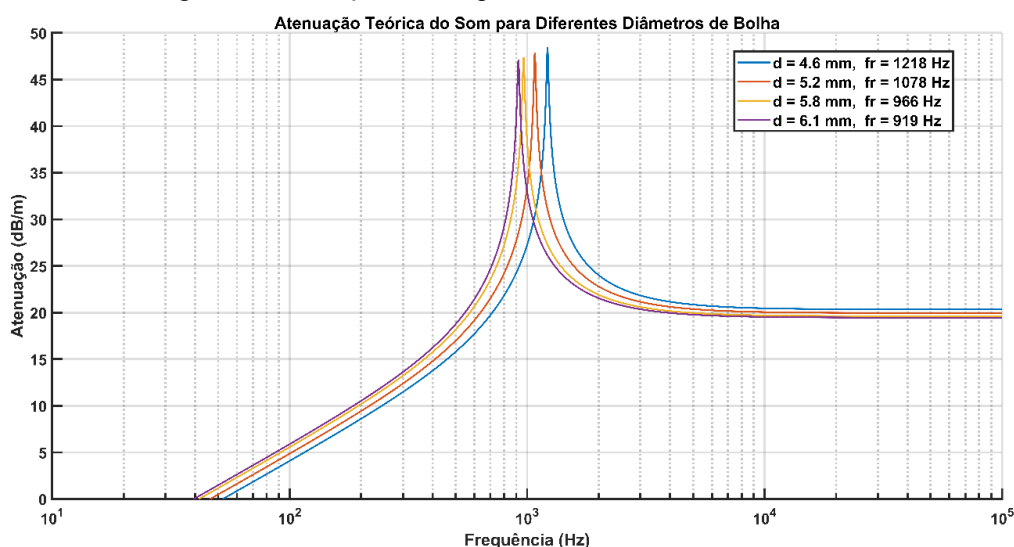
D_b . (mm)	TS (dB)	$\alpha_{teórico}$ (dB/m)
$4,6 \pm 0,8$	$-48,73 \pm 0,63$	$48,57 \pm 0,47$
$5,2 \pm 0,8$	$-49,91 \pm 0,63$	$48,05 \pm 0,47$
$5,8 \pm 0,8$	$-49,44 \pm 0,63$	$47,90 \pm 0,47$
$6,1 \pm 0,8$	$-50,16 \pm 0,63$	$47,42 \pm 0,47$

A relação entre o diâmetro da bolha e a atenuação não é linear, podendo variar em função da frequência do sinal e das propriedades do meio. A Tabela 4 apresenta os valores de *Target Strength* (TS) e da atenuação teórica para diferentes diâmetros de bolhas,

observando-se valores negativos de TS e uma leve tendência de diminuição com o aumento do diâmetro. Por ser uma cortina de bolhas, a elevada concentração desses elementos favorece o espalhamento múltiplo e a redistribuição da energia acústica em diferentes direções, influenciando o comportamento acústico da cortina, especialmente quando a frequência do sinal se aproxima da frequência de ressonância das bolhas.

Na Figura 25, com base na equação (57) e com os dados da Tabela 4, é apresentada a dependência da atenuação teórica da cortina de bolhas com a frequência para cada diâmetro de bolha analisado. Assim, o modelo adotado permite identificar faixas de máxima eficiência de atenuação, evidenciadas pelos picos das curvas, que variam conforme o diâmetro das bolhas e a frequência do som incidente.

Figura 25: Atenuação Teórica para diferentes diâmetros de bolhas.



Os picos observados na Figura 25 correspondem às frequências de ressonância de cada diâmetro, como indicado na Tabela 3, representando a atenuação máxima da energia acústica. Ressalta-se, porém, que esse comportamento é resultado da suposição de que todas as bolhas possuem o mesmo tamanho, condição idealizada que será discutida mais adiante.

4.1 SINAL ACÚSTICO EM FORMA DE PULSO

Após a realização de vários experimentos utilizando a cortinas de bolhas com diferentes diâmetros de furo, identificou-se um padrão de comportamento que pôde ser observado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26: Desvio Padrão e valor médio da atenuação em dB/m das bolhas formadas pelos furos: A) $d_f = 0.5 \text{ mm}$ e B) $d_f = 1.0 \text{ mm}$

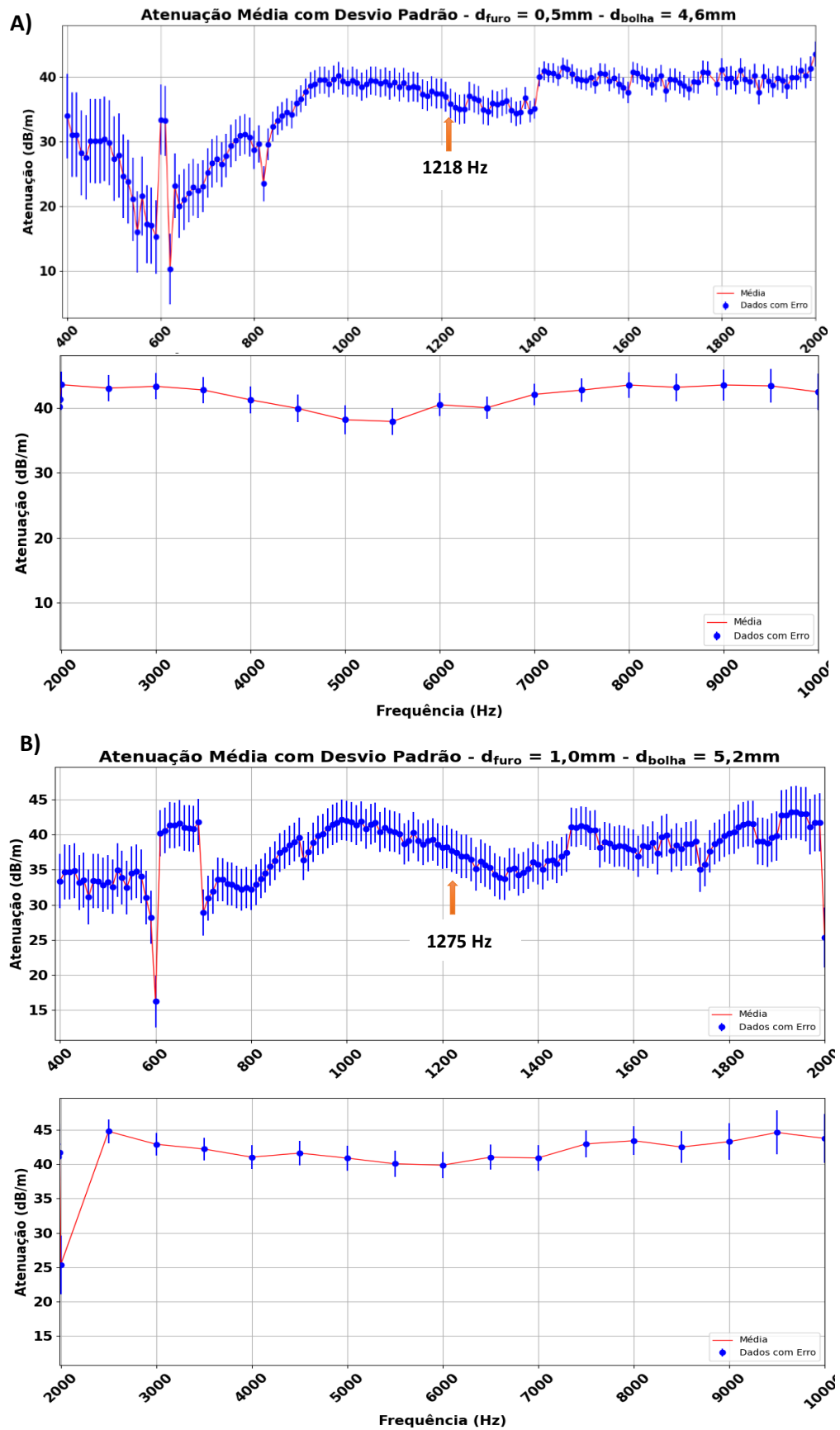
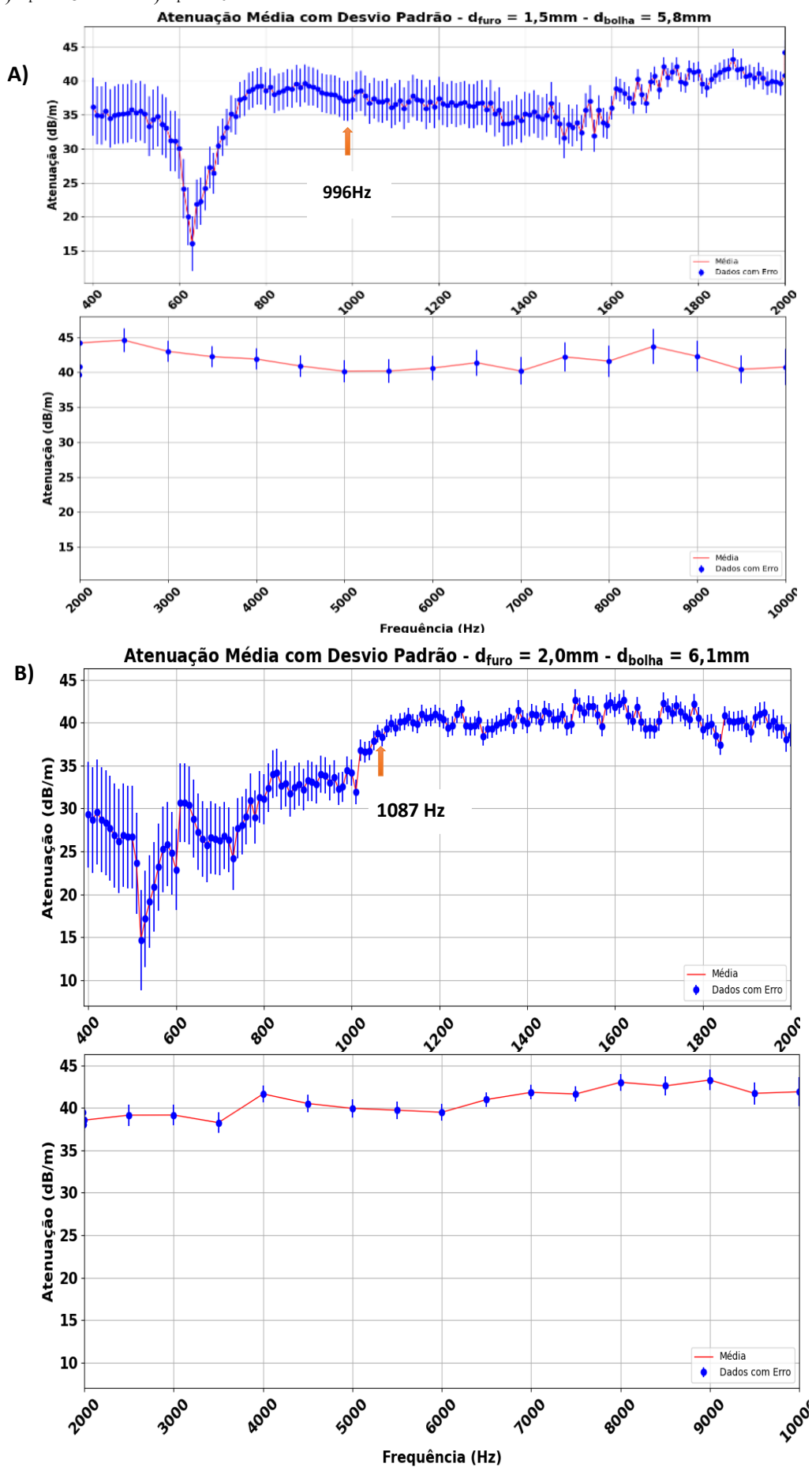


Figura 27: Desvio Padrão e valor médio da atenuação em dB/m das bolhas formadas pelos furos: A) $d_f = 1.5\text{mm}$. e B) $d_f = 2.0\text{mm}$.



Ao analisar os gráficos das Figuras 26 e 27 em conjunto com os dados das Tabelas 2, 3 e 4, observa-se que a atenuação máxima não ocorre na frequência de ressonância ajustada da bolha, conforme indicado pela atenuação teórica apresentada na Figura 25. A ausência de um máximo de atenuação nessa frequência pode ser relacionada a uma combinação de fatores, como a presença de diferentes tamanhos de bolhas em uma mesma cortina, aos efeitos hidrodinâmicos associados ao seu processo de formação e à dinâmica do escoamento do fluido.

Esse fenômeno decorre diretamente da dinâmica das bolhas. A formação e a expansão das bolhas ao longo da coluna d'água, desde a base até a superfície, são governadas pelas leis da hidrodinâmica e da física dos gases. À medida que a bolha sobe, a pressão hidrostática diminui, por ser proporcional à altura da coluna d'água e à densidade do fluido, resultando em um aumento contínuo do seu raio ao longo da trajetória.

Para que a bolha apresente uma ressonância bem definida em uma determinada frequência, é necessário que ela mantenha aproximadamente o mesmo raio por tempo suficiente em uma mesma posição. No entanto, devido à redução progressiva da pressão hidrostática, o raio da bolha varia continuamente enquanto sobe. Além disso, a inércia associada às oscilações radiais impede que o sistema responda instantaneamente a essas variações de tamanho, dificultando o ajuste imediato da frequência natural.

Assim, mesmo quando a bolha atinge momentaneamente o raio correspondente à frequência de ressonância, ela não permanece nessa condição por tempo suficiente para que a ressonância se estabeleça, o que inviabiliza a manifestação de um pico de atenuação bem definido.

Essa ausência da frequência de ressonância na cortina de bolhas é destacada por autores como Rustemeier, Griebmann e Rolfes (2012) e Leighton (2012). Além disso, é possível identificar, nas Figuras 26 e 27, a presença de picos e vales que estão associados às interferências construtivas e destrutivas causadas pelas dimensões do tanque. Tais discontinuidades são mais pronunciadas em frequências mais baixas (comprimentos de onda maiores), o que reforça que esse comportamento decorre das dimensões geométricas limitadas do ambiente experimental.

Dessa forma, a atenuação observada experimentalmente resulta da combinação entre a resposta dinâmica variável das bolhas e os efeitos do meio, o que permite determinar a atenuação máxima e sua frequência correspondente para cada diâmetro de bolha, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Diâmetro médio da bolha (D_b) e a atenuação experimental ($\alpha_{Exp.}$).

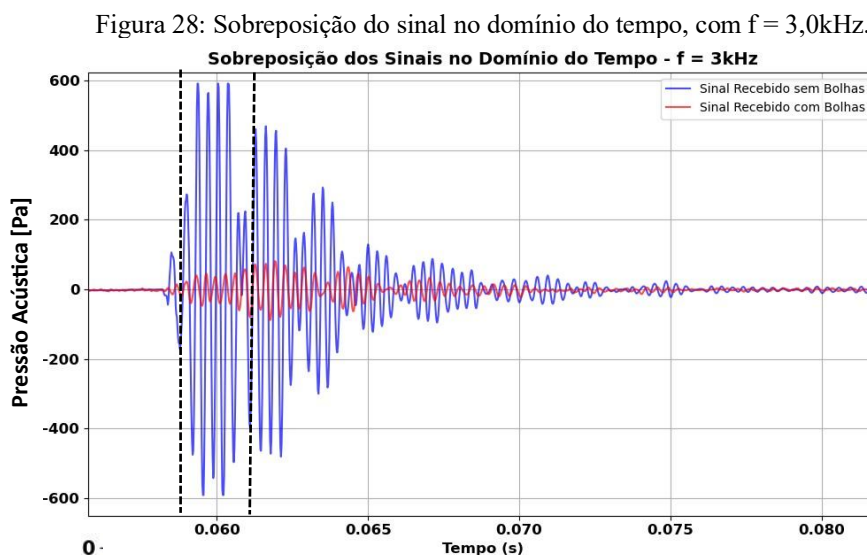
D_{bolha} (mm)	f (kHz)	$\alpha_{Exp.}$ (dB/m)
$4,6 \pm 0,8$	$2,00 \pm 0,05$	$45,52 \pm 0,32$
$5,2 \pm 0,8$	$2,51 \pm 0,05$	$44,86 \pm 0,39$
$5,8 \pm 0,8$	$2,50 \pm 0,05$	$44,45 \pm 0,57$
$6,1 \pm 0,8$	$1,50 \pm 0,05$	$43,32 \pm 0,82$

Os valores da atenuação teórica e experimental (em dB/m), para os respectivos diâmetros de bolha, apresentados nas Tabelas 4 e 5, indicam que a atenuação experimental é inferior à teórica.

Tal comportamento pode ser atribuído às hipóteses simplificadoras adotadas no modelo teórico, que normalmente consideram bolhas de um único tamanho, distribuição espacial homogênea e concentração volumétrica constante ao longo da coluna. Nessas condições idealizadas, a resposta ressonante tende a ser maximizada, resultando em maiores valores do coeficiente de extinção (σ_e) e, conseqüentemente, da atenuação.

Por outro lado, no experimento, a presença de uma distribuição de tamanhos e de possíveis variações na concentração de bolhas implica em uma resposta mais distribuída, o que reduz o efeito ressonante concentrado da cortina de bolhas e conduz a valores da atenuação inferiores aos estimados teoricamente.

Diante dessa limitação do comportamento ressonante das bolhas, ao analisar o sinal acústico transmitido diretamente, apresenta-se a Figura 28, que ilustra a influência da cortina de bolhas sobre um pulso na frequência de 3 kHz, para o diâmetro de furo de 2,0 mm, por meio de um recorte no intervalo de um tempo específico tanto na ausência quanto na presença da cortina de bolhas.

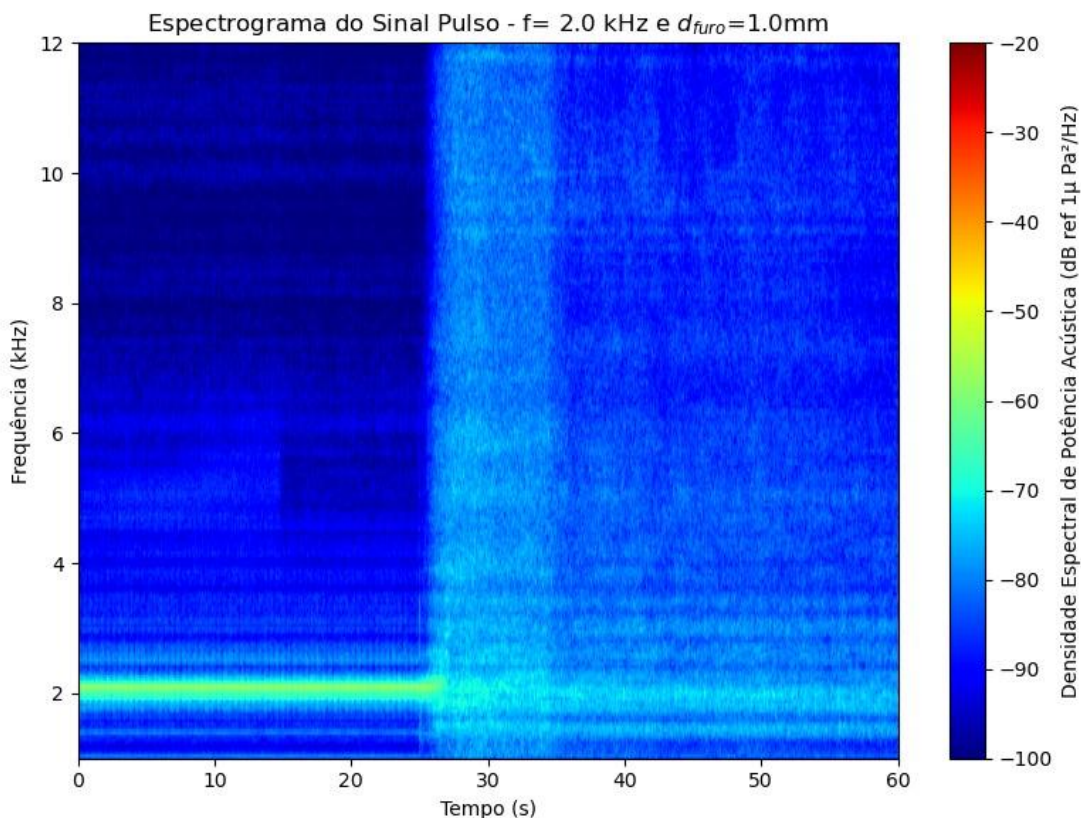


Ao observar a região delimitada pelas linhas pontilhadas na Figura 28, trecho em que o pulso sonoro não sofre interferência das reflexões das paredes, superfície e do fundo do tanque, é possível identificar, em termos quantitativos, uma variação no pico máximo de aproximadamente 596 Pa, no caso sem bolhas, para cerca de 84 Pa no mesmo ponto, quando considerada a presença da cortina de bolhas, o que corresponde a uma atenuação de aproximadamente 17 dB.

A quantificação da atenuação em decibéis é realizada a partir da comparação entre os níveis de pressão acústica dos sinais nas condições com e sem cortina de bolhas, utilizando a expressão $Atenuação = 20 \cdot \log_{10}(p_{com}/p_{sem})$ em que p_{com} e p_{sem} correspondem à pressão acústica do sinal com e sem bolhas.

Por uma outra perspectiva, agora utilizando um sinal de áudio completo, transmitido com frequência de 2 kHz pelo projetor acústico durante 60 segundos, nos primeiros 25 segundos, há a emissão da onda sonora que ocorre sem a presença da cortina de bolhas e a partir de 25 segundos, a cortina de bolhas é acionada e permanece ativa até o final da transmissão, totalizando 35 segundos sob a influência da barreira acústica, gerando um espectrograma, como apresentado pela Figura 29.

Figura 29: Espectrograma do Sinal de áudio com a frequência de 2kHz e diâmetro de 1.0 mm.



Entre 25 e 35 s, conforme mostrado na Figura 32, observa-se uma fase de transição associada à estabilização do sistema de geração de bolhas. Nesse intervalo, o aumento do fluxo de ar eleva a densidade de bolhas, favorecendo o surgimento de componentes espectrais adicionais associados à formação progressiva da cortina.

A partir de aproximadamente 35 s, o padrão temporal torna-se mais homogêneo, caracterizando o regime estável da cortina de bolhas. A cortina de bolhas, além de atuar como elemento atenuador do sinal transmitido, constitui uma fonte de ruído próprio associado à sua dinâmica de formação. A energia acústica do sinal, Figura 29, foi estimada nos intervalos de 10 a 12 s e 55 a 57 s, correspondentes, respectivamente, às fases pré-estabilização e de regime estável da cortina.

Nesses intervalos, observa-se uma redução da energia acústica de $6,531 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ para $2,795 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$, evidenciando que os processos de espalhamento e dissipação introduzidos pela cortina de bolhas passam a predominar no balanço energético do sistema.

4.2 ONDA CONTÍNUA (CW)

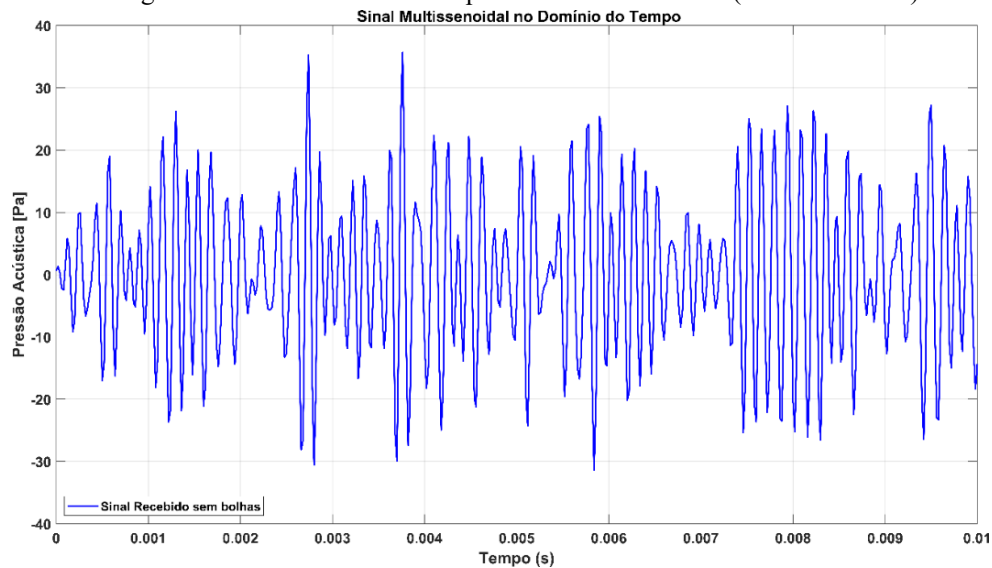
Nesta etapa, os experimentos foram conduzidos utilizando um sinal composto por múltiplas senoides na faixa de frequência de 400 Hz a 10 kHz, conforme descrito anteriormente. O uso de um sinal de onda contínua possibilita a formação de um padrão de onda estacionária, no qual os efeitos de interferência associados ao multicaminho podem ser controlados por meio da variação da posição relativa entre a fonte e o receptor.

Entretanto, de forma análoga ao observado para sinais pulsados, essa abordagem apresenta limitações quando a cortina de bolhas está ativa, uma vez que o padrão de interferência tende a ser modificado pela presença das bolhas.

Enquanto o pulso permite uma análise precisa dos tempos de chegada, o sinal de onda contínua facilita na avaliação em ambientes propícios à reverberação, onde se tentou reduzir o efeito das interferências.

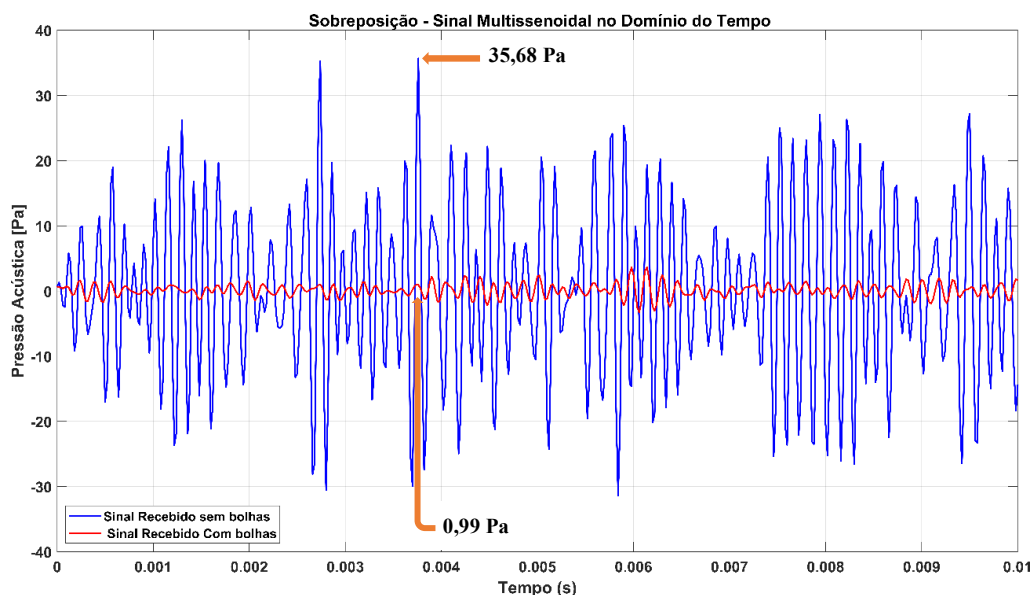
Na Figura 30, observar-se como exemplo, um recorte temporal de aproximadamente 0,010 s de um sinal formado pela composição de várias senoides (multissenoidais) com fases aleatórias em diferentes frequências, neste caso de 5.0 a 10k Hz, com passo em 20 Hz e com duração total de 30 s.

Figura 30: Recorte do Sinal composto de várias senoides (Multissenoidais).



Na sequência, a Figura 31 apresenta a sobreposição do sinal representando o comportamento do sinal recebido pelo hidrofone, sem e com a cortina de bolhas, com furos de diâmetro de 0,5 mm, com objetivo de identificar a atenuação do som ao alterar a condição de contorno da superfície, por meio da adição de uma superfície absorvente, buscando reduzir as distorções causadas pelas reflexões do tanque.

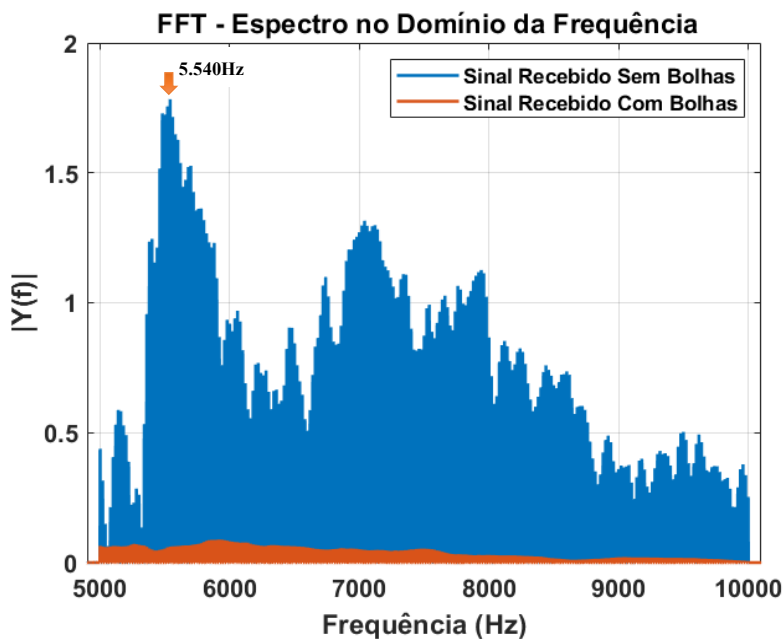
Figura 31: Recorte da Sobreposição do Sinal sem e com a cortina de bolhas.



No processamento dos sinais apresentados na Figura 31, observa-se que o sinal recebido com a cortina de bolhas acionada (vermelho) apresenta amplitudes significativamente menores em comparação ao caso sem bolhas (azul).

A metodologia para essa análise foi a aplicação da FFT (Transformada de Fourier no domínio da frequência) ao sinal, obtém-se o módulo do Espectro da Amplitude, que representa a magnitude das componentes de frequências presentes nesse sinal. Esse método permite visualizar como a energia acústica está distribuída ao longo do espectro de frequências, facilitando a identificação de padrões dos efeitos da cortina de bolhas na propagação da energia sonora, como ilustrado na Figura 32.

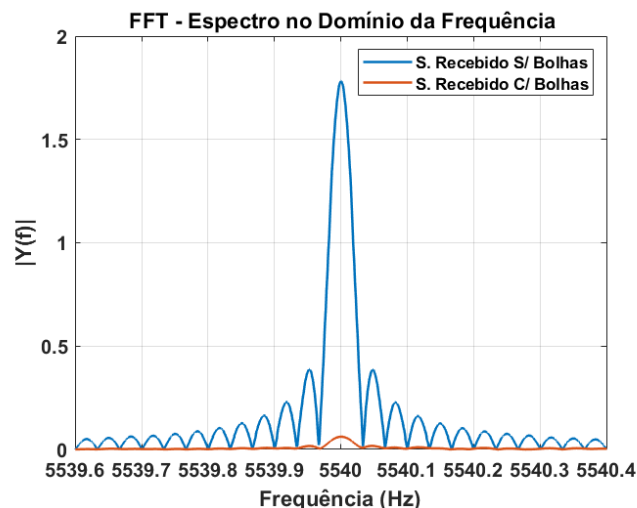
Figura 32: Transformada de Fourier do Sinal sem e com a cortina de bolhas.



Na figura 32, observa-se a diferença de intensidade entre os sinais em azul (ausência da cortina de bolhas) e vermelho (cortina de bolha acionada). Verifica-se que o sinal acústico após o acionamento da cortina de bolhas exibe redução na amplitude espectral, evidenciando o efeito atenuador da cortina. Esse comportamento é atribuído aos mecanismos de dispersão e absorção da energia acústica promovidos pelas bolhas, que resultam na dissipação parcial da energia do sinal.

Ao realizar um recorte da Figura 32, obtém-se o espectro apresentado na Figura 33, onde se observa uma atenuação significativa na frequência central de 5540 Hz quando a cortina de bolhas está acionada, em comparação ao caso sem bolhas. Essa redução evidencia o efeito de atenuação acústica promovido pela presença de bolhas justamente na frequência portadora do sinal transmitido.

Figura 33: Pico acentuado na frequência de 5540 Hz na faixa de frequência entre 5.0kHz a 10.0kHz

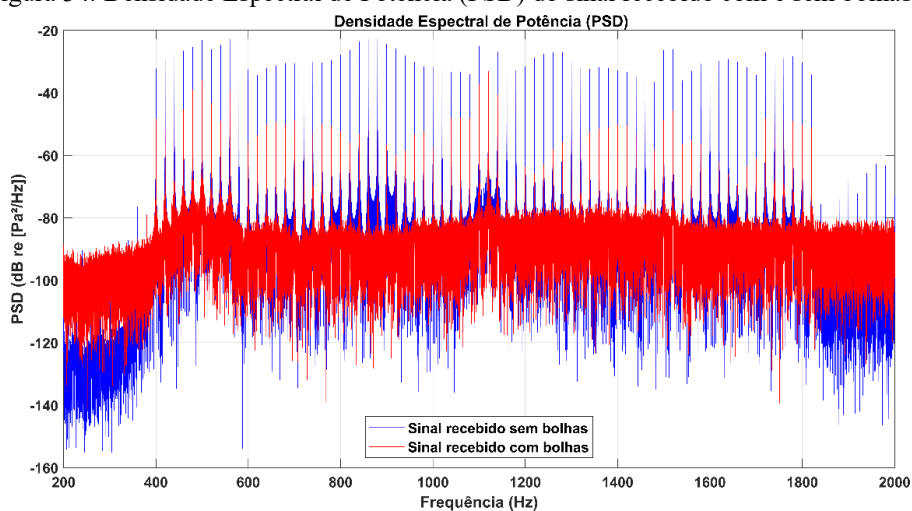


A partir do espectro mostrado na Figura 33, além do pico central atenuado, nota-se a presença de lóbulos laterais característicos da Transformada de Fourier de uma senoide de duração finita com janela retangular, o que confere ao espectro uma forma típica de uma função do tipo sinc.

Para aprofundar a análise do experimento, emprega-se a densidade espectral de potência (PSD), que permite avaliar a distribuição da energia acústica ao longo da frequência, identificando as bandas mais afetadas pela cortina de bolhas e a quantificação de seu efeito atenuador.

No ensaio com o sinal multissenoidal, foram geradas três faixas de frequência, entre: 400 a 1.840 Hz, 1.820 a 5.040 Hz e 5.020 a 10.000 Hz. A Figura 34 apresenta apenas a primeira faixa, por englobar a frequência de ressonância ajustada da cortina, em 1.218 Hz, teoricamente associada ao diâmetro dos furos (Tabela 3, p. 51). Assim, as variações além desse intervalo não são consideradas na análise.

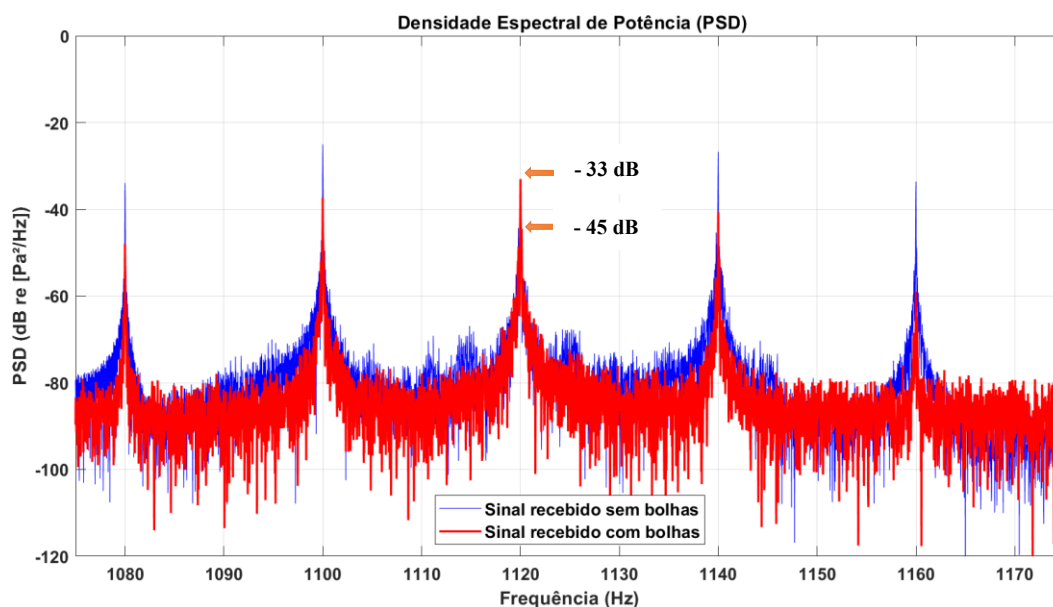
Figura 34: Densidade Espectral de Potência (PSD) do sinal recebido com e sem bolhas.



Observa-se, na Figura 34, que o sinal em azul (sem bolhas) não mantém amplitude constante na faixa de frequências, o que é compatível com a resposta não linear em frequência do transdutor. Tendência semelhante é verificada para o sinal em vermelho (com bolhas).

Para melhor observação das flutuações do sinal nesse intervalo, a Figura 35 apresenta um recorte da Figura 34. Nessa ampliação, os padrões decorrentes dos múltiplos caminhos de propagação no tanque, trajeto direto e reflexões no fundo e nas paredes, tornam-se mais evidentes pelos picos irregulares na densidade espectral de potência (PSD) do sinal sem bolhas, característica típica do padrão de interferência em frequência em ambientes experimentais confinados.

Figura 35: Recorte da Densidade Espectral de Potência (PSD) do sinal recebido com e sem bolhas.

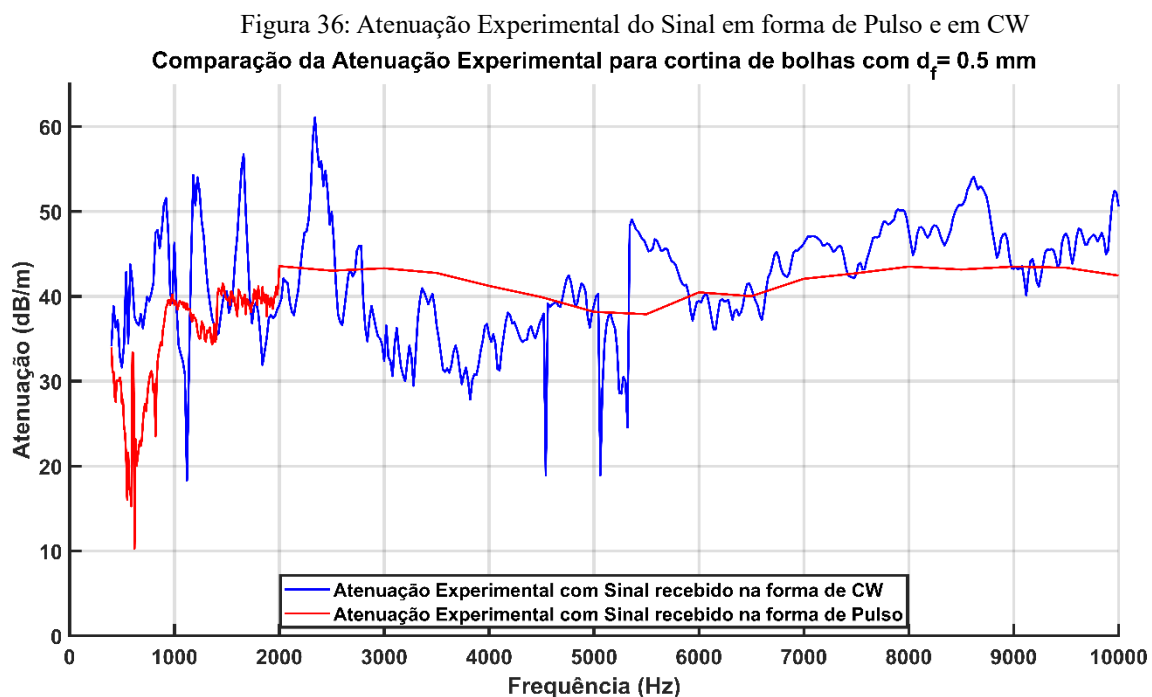


Ainda na Figura 35, com a presença da cortina de bolhas, esses picos permanecem identificáveis, porém com amplitude significativamente reduzida e de menor contraste em relação ao nível médio da densidade espectral de potência. Esse comportamento indica a dispersão e a absorção parcial da energia acústica promovidas pelas bolhas, resultando na atenuação (12 dB) das componentes espectrais.

Contudo, nota-se um comportamento pontual na frequência de 1.120 Hz, em que o espectro com bolhas apresenta amplitude superior ao espectro sem bolhas. Esse desvio pode estar associado a variações na distribuição do tamanho e na dinâmica das bolhas da cortina para essa frequência e, conseqüentemente, à modificação dos múltiplos caminhos de propagação no tanque, alterando as condições de interferência no ponto de recepção.

Apesar desse desvio local, a cortina promove atenuação geral significativa na faixa de ressonância. A fim de quantificar a atenuação experimental dos sinais multissenoidais com fase aleatória (CW) e sob a forma de pulso, foram coletados dados dos sinais recebidos com e sem a cortina de bolhas acionada, mantendo-se, em ambos os casos, o diâmetro dos furos da cortina fixado em 0,5 mm ao longo de toda a faixa de frequências, 400Hz a 10kHz, proposta neste estudo.

A atenuação é calculada em escala logarítmica, a partir da razão entre as densidades espectrais de potência dos sinais medidos sem e com a presença da cortina de bolhas, considerando-se a largura da cortina na altura do hidrofone. O resultado, expresso em decibéis por metro (dB/m), é apresentado na Figura 36 por meio da sobreposição dos dados experimentais.

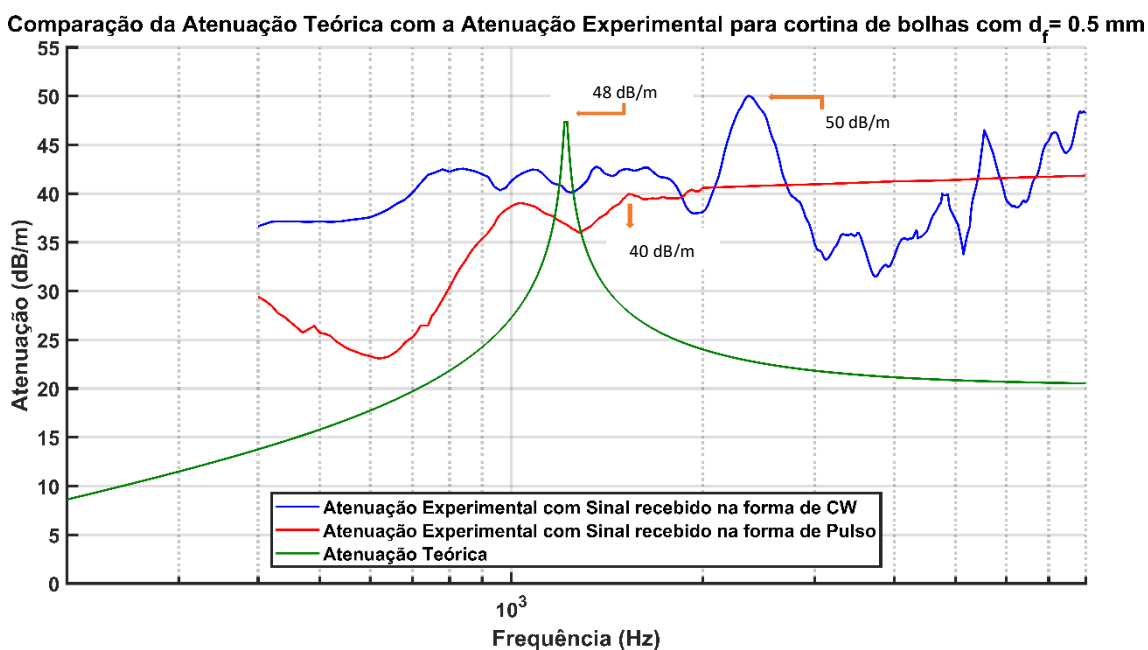


Na Figura 36, observam-se comportamentos irregulares caracterizados por picos e vales ao longo da faixa de frequências. Esses picos e vales são atribuídos às interferências construtivas e destrutivas entre a onda incidente e as múltiplas reflexões associadas às dimensões do tanque, fenômeno que persiste apesar dos esforços para minimizá-lo, como o uso de sinais multissenoidais de fase aleatória (sinal em azul).

Nota-se que, Figura 36, tais descontinuidades são mais pronunciadas nas frequências mais baixas, correspondentes a maiores comprimentos de onda, o que evidencia a influência das dimensões geométricas limitadas do ambiente experimental sobre o campo acústico estabelecido.

Por fim, realiza-se a sobreposição da atenuação teórica (verde, Figura 25) aos dados experimentais da Figura 36, correspondentes aos sinais na forma de pulso (vermelho) e onda contínua multissenoidal (azul), com a aplicação de um filtro de média para a suavização de picos e vales, conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37: Comparação da atenuação teórica com a atenuação experimental do sinal, filtrado por média móvel, nas formas de pulso e de CW multissenoidal.



Segundo Leighton (2012), a frequência de ressonância de uma bolha maximiza sua resposta à excitação acústica, promovendo forte atenuação por absorção e espalhamento. Na curva teórica da Figura 37, a frequência de 1.218 Hz (Tabela 3, p. 51) corresponde à ressonância da bolha, onde a atenuação atinge seu pico máximo. Com filtro de média aplicado, a atenuação experimental do sinal recebido na forma de onda contínua multissenoidal apresenta um pico equivalente nessa frequência, embora com amplitude diferente da ressonância teórica.

Esse comportamento justifica-se pelas flutuações na atenuação, que podem ser atribuídas a fatores como à distribuição de tamanhos das bolhas, as variações em suas trajetórias na coluna d'água, à ocorrência de interferências construtivas e destrutivas no sinal recebido, dada as dimensões do tanque. Assim, as diferenças entre as curvas de atenuação teórica e experimental decorrem das características físicas dos sinais utilizados nas dimensões do tanque, bem como da distribuição e dos tamanhos das bolhas.

No caso do sinal CW, a atenuação é fortemente influenciada por interferências construtivas e destrutivas associadas às limitações geométricas do tanque. Em contraste,

o modelo teórico considera uma fonte pontual sob condições ideais de propagação, desconsiderando reflexões e interferências.

Por outro lado, o uso de um sinal de onda contínua multissenoidal com fase aleatória, aliado à modificação da condição de contorno na superfície do tanque, reduz significativamente essas interferências, promovendo uma excitação mais contínua das bolhas e resultando em valores de atenuação superiores aos previstos teoricamente.

Com base no desenvolvimento experimental do comportamento acústico da cortina de bolhas, observa-se que é necessário considerar não apenas o diâmetro individual de cada bolha, mas também a forma como elas se distribuem em termos de tamanho na coluna d'água. Nesse contexto, a distribuição das bolhas em função do raio torna-se um fator determinante, podendo ser descrita por uma lei de potência, conforme proposto por Medwin (1977).

Segundo Medwin (1977), tal distribuição pode ser expressa como $n(r).dr = Kr^{-x}$, onde $n(r)$ representa o número de bolhas por unidade de volume com raio entre r e $r + dr$, K é uma constante de proporcionalidade, e x é o expoente que caracteriza a distribuição. Para que a integração dessa função seja convergente, o valor de x deve estar no intervalo $2 < x < 6$.

No presente estudo, os valores obtidos para os expoentes associados aos raios das bolhas, calculados com base nos diâmetros utilizados na cortina, variaram entre 2,92 e 3,25. Esses resultados indicam que a distribuição observada está de acordo com o comportamento teórico previsto.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

Neste estudo, analisou-se a técnica de cortina de bolhas, amplamente empregada em outros países para a atenuação de ruídos submarinos, a partir da combinação de análises teóricas e experimentais conduzidas em ambiente controlado, por meio de ensaios em tanque acústico.

Para determinar a atenuação teórica em decibéis por metro (dB/m), calculou-se a frequência de oscilação natural e a frequência de ressonância corrigida, considerando as contribuições da pressão interna do gás e da tensão superficial como forças restauradoras que resistem às oscilações radiais da bolha induzidas pelas ondas sonoras. Essa pressão interna, junto com a tensão superficial, contribui para a resistência da bolha às variações de tamanho e forma durante a interação acústica.

Os coeficientes de absorção acústica (que quantificam a fração de energia sonora incidente absorvida pela bolha), a condutividade térmica, a constante de amortecimento, bem como a seção transversal de espalhamento e a seção transversal de extinção, permitem uma avaliação detalhada do comportamento das bolhas em termos de dispersão e perda de energia sonora por reflexão e absorção, contribuindo para a atenuação.

Esses parâmetros físicos, juntamente com a densidade e o tamanho das bolhas, controlam a interação do sinal acústico com o meio água-ar. Nesse contexto, cada bolha atua como ressonador acústico, cuja frequência de ressonância depende principalmente do raio. O *Target Strength* (TS) quantifica a intensidade do espalhamento acústico individual, permitindo relacionar o efeito do diâmetro à magnitude da atenuação. Assim, a atenuação acústica apresenta maior magnitude próximo à frequência de ressonância, devido ao aumento dos processos de espalhamento e absorção.

Além disso, a densidade de bolhas determina o número total de interações onda-espalhador na cortina. Esse aumento na concentração da cortina eleva o coeficiente de extinção acústica do meio, promovendo maior atenuação por espalhamento múltiplo e perdas viscosas/térmicas associadas à oscilação das bolhas.

Para a caracterização da formação das bolhas, foram realizados experimentos em tanque acústico do IEAPM, utilizando-se quatro difusores lineares de 2,00 m de comprimento, cada um contendo furos uniformemente distribuídos com diâmetros de 0,5

mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm, respectivamente. Os difusores foram posicionados a 1 m do projetor e a 1 m do hidrofone (Figura 8), mantendo-se a abertura da válvula do compressor padronizada para todos os ensaios.

Com o uso do software *ImageJ* (NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, s.d.), foi possível realizar a análise das imagens (Figura 23, p.45) e coletar os dados que permitiram calcular as médias dos tamanhos das bolhas formadas na coluna d'água, bem como estimar a largura da cortina e a frequência de ressonância correspondente para os respectivos diâmetros (Tabela 2, p.50).

Para a geração das ondas mecânicas longitudinais, foram utilizados três projetores acústicos (Lubell 964, Lubell 1424 e EDO 610E). O sinal transmitido foi captado por um hidrofone, permitindo o registro da pressão acústica associada às ondas propagadas no meio submarino, possibilitando a comparação entre os sinais obtidos nas condições sem e com a cortina de bolhas.

Dadas as limitações do tanque e a resposta do sistema influenciada por reflexões e interferências, os experimentos foram conduzidos considerando duas abordagens. Na primeira, utilizou-se o sinal transmitido na forma de pulso (Figura 19), caracterizado por sua curta duração no domínio do tempo e por intervalos regulares entre emissões consecutivas, mantendo-se as condições de contorno originais do tanque.

Com esse tipo de sinal, observa-se, nas Figuras 26 e 27, somente para baixas frequências, a presença de vales e picos acentuados ao longo do espectro, o que possibilita a identificação dos pontos de maior atenuação. Essas oscilações são características de interferências construtivas e destrutivas, resultantes da superposição entre o sinal transmitido e as ondas refletidas nas paredes, fundo e superfície.

A curta duração desse tipo de sinal permite distinguir temporalmente a primeira chegada, associada ao caminho direto entre projetor e hidrofone, das chegadas subsequentes provenientes das reflexões nas interfaces do tanque. Esse comportamento é evidenciado na Figura 28, na qual se observa uma região (delimitada) praticamente livre de interferências. Nessa região, a forma de onda preserva principalmente as características da propagação direta, possibilitando uma análise mais precisa da resposta acústica do meio.

Para complementar a análise no domínio do tempo, a Figura 29 apresenta o espectrograma do sinal pulsado utilizado nos ensaios sem e com a presença da cortina de bolhas. Embora o sinal seja caracterizado por pulsos periódicos no domínio do tempo, cada pulso contém uma componente senoidal dominante, neste caso em 2 kHz, que se

manifesta no espectrograma como uma linha contínua nessa frequência, representada por um sinal monocromático predominante.

Observa-se, na mesma figura, a interação do sinal acústico com a cortina de bolhas. O acionamento da cortina ocorre aproximadamente aos 25 segundos de experimento, a partir de quando se verifica uma alteração significativa no conteúdo espectral do sinal. Após esse instante, o sistema leva cerca de 10 s para atingir uma condição de equilíbrio, indicando que a cortina de bolhas atua como uma fonte adicional de ruído acústico no meio.

Esse ruído próprio está associado aos processos de formação, ascensão e oscilação das bolhas, manifestando-se no espectrograma como um aumento da energia distribuída em uma faixa mais ampla de frequências, sobreposta ao sinal transmitido. Essa abordagem apresenta limitações inerentes às condições experimentais em tanque acústico.

Nota-se ainda que, à medida que a frequência aumenta, tais interferências tornam-se menos evidentes, uma vez que a redução do comprimento de onda diminui a coerência entre o sinal direto e as ondas refletidas, atenuando os efeitos de interferência no espectro.

Esse comportamento é corroborado pela curva de atenuação obtida a partir do sinal pulsado, representada em vermelho na Figura 35, que para baixas frequências, exibe picos e vales ao longo do espectro, característicos de interferências, para baixas frequências, construtivas e destrutivas decorrentes da superposição entre o sinal direto e as múltiplas reflexões nas paredes, superfície e no fundo do tanque.

Na segunda abordagem experimental tentou-se minimizar os efeitos das múltiplas reflexões associadas tanto ao sinal utilizado na abordagem anterior quanto às dimensões do tanque acústico. Para isso, adotou-se um sinal multissenoidal com fase aleatória, buscando reduzir a formação de padrões de onda estacionária no interior do tanque e, consequentemente, atenuar os efeitos de interferência por multicaminho.

Adicionalmente, foram realizados ajustes nos parâmetros geométricos do experimento, incluindo a variação das distâncias e profundidades dos sensores, bem como a utilização de material absorvente na superfície do tanque, com o intuito de reduzir as reflexões e controlar as condições de propagação do sinal acústico no meio.

Conforme observado na Figura 35, a curva de atenuação obtida a partir do sinal multissenoidal, representada em azul, apresenta picos e vales ao longo do espectro, característicos de interferências construtivas e destrutivas decorrentes da superposição entre o sinal direto e as componentes refletidas no tanque.

Com base nessa observação, a Figura 36 apresenta a comparação entre a atenuação teórica e as atenuações experimentais, após a aplicação de um filtro de média com o objetivo de suavizar as flutuações da curva experimental. Nota-se a presença de um pico associado à frequência de ressonância prevista teoricamente, em 1218 Hz com uma atenuação de 40 dB/m. Entretanto, a máxima atenuação experimental ocorre em aproximadamente 2380 Hz, evidenciando a influência residual das interferências e as limitações intensificadas pelas dimensões do tanque.

A comparação entre as atenuações obtidas a partir dos diferentes sinais revela diferenças sistemáticas, mostradas na Figura 36 (vermelha = atenuação do sinal pulsado, verde = atenuação teórica e azul = atenuação multissenoidal).

O sinal pulsado apresenta valores inferiores de atenuação 39 dB/m, uma vez que sua curta duração reduz a interação com a cortina e permite janelas temporais menos influenciadas por efeitos de reverberação. Já a atenuação teórica ocupa posição intermediária, baseada em modelo idealizado dos mecanismos primários de absorção/espalhamento, mas omite espalhamento múltiplo, ruído próprio e efeitos limitantes do tanque.

O sinal multissenoidal com fase aleatória exibiu o maior pico de atenuação (50 dB/m), favorecido pela excitação simultânea de diferentes frequências, que amplia a interação onda-bolha e intensifica mecanismos dissipativos como efeitos viscosos, térmicos e espalhamento em ressonâncias das bolhas. Esse resultado decorre também da adição de material absorvente na superfície do tanque, que minimiza distorções por reflexões e ondas estacionárias devido às suas dimensões finitas.

Esse comportamento indica que, apesar dos esforços adotados para reduzir os efeitos da reverberação, não foi possível eliminar completamente as interferências impostas pelas condições experimentais. Ainda assim, verificou-se que as atenuações experimentais são bem próximas da atenuação teórica, e estes valores comprovam a eficiência deste método de atenuação de ruídos acústicos submarinos.

Com isso, conclui-se que os experimentos realizados no tanque acústico, aliados à análise de processamento de sinais, comprovaram a eficácia do uso da cortina de bolhas na redução da pressão acústica para diferentes tipos de sinais. Tais resultados evidenciam que o estudo fornece uma compreensão sólida dos mecanismos físicos da atenuação sonora por meio da técnica de cortinas de bolhas, demonstrando sua viabilidade como uma solução prática e eficaz para o controle de ruídos gerados por construções e atividades submarinas.

Como perspectiva futura, propõe-se a realização de medições em ambiente marinho real, em maior escala, com profundidades variáveis, correntes e ruído ambiente, para consolidar a aplicabilidade em operações offshore e quantificar atenuação superior ou aproximada aos 50 dB/m observados no tanque acústico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Geração de energia elétrica**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 24 jan. 2024.

AINSLIE, Michael A.; LEIGHTON, Timothy G. Review of scattering and extinction cross-sections, damping factors, and resonance frequencies of a spherical gas bubble. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 130, n. 5, p. 3184-3208, 2011.

ANDERSON, Victor C. Sound scattering from a fluid sphere. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 22, n. 4, p. 426-431, 1950.

BELLMANN, Michael A. Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile Driving Noise. In: **Proceedings of Internoise**, Melbourne, Australia, 2014.

BERANEK, Leo Leroy; MELLOW, Tim. **Acoustics: sound fields and transducers**. San Diego: Academic Press, 2012.

BRASIL. **Lei nº 15.097**, de 10 de janeiro de 2025. Disciplina o aproveitamento de potencial energético offshore; e altera a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, a Lei nº 14.182, de 12 de julho de 2021, e a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2025/Lei/L15097.htm. Acesso em: 03 abr. 2026.

BRENNEN, Christopher E. **Cavitation and bubble dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

CLAY, Clarence Samuel; MEDWIN, Herman; URICK, R. J. **Acoustical oceanography: principles and applications**. New York: Wiley, 1978.

DAHL, Peter H.; MILLER, James H.; CATO, Douglas H.; ANDREW, Rex K. Underwater Ambient Noise. **Acoustics Today**, v. 3, n. 1, p. 23–33, 2007. Disponível em: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Dahletal2007.pdf>. Acesso em: 27 set. 2024.

DENARDO, Bruce C. **Equivalent circuits for transducers**. Material didático da disciplina PH4454. Monterey: Naval Postgraduate School, 2012.

DEVIN, Charles Jr. Survey of thermal, radiation, and viscous damping of pulsating air bubbles in water. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 31, n. 12, p. 1654-1667, 1959.

DUARTE, Carlos M. *et al.* The soundscape of the Anthropocene ocean. **Science**, v. 371, n. 6529, p. eaba4658, 2021.

ETTER, Paul C. **Underwater acoustic modeling and simulation**. Boca Raton: CRC Press, 2018.

EVEREST, F. Alton. **Master handbook of acoustics**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

FINNERAN, James J.; JENKINS, A. K. **Criteria and thresholds for US Navy acoustic and explosive effects analysis**. SPAWAR Marine Mammal Program, San Diego, California, 2012.

FIORAVANTI, Carlos. Mais vida no mar: censo internacional amplia conhecimento sobre a biodiversidade. **Revista Pesquisa FAPESP**, ed. 176. 2010.

GASALHA, M.A. Número de espécies descritas na Costa Brasileira pode chegar a 13 mil. **Agência Fapesp**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.labpesq.io.usp.br/index.php/dialogos/noticias/41-numero-de-especies-descritas-na-costa-brasileira-pode-chegar-a-13-mil>. Acesso em: 18 jan. 2024.

GIL, Antônio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GODIN, Oleg A. Rayleigh scattering of a spherical sound wave. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 133, n. 2, p. 709–720, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Mapa de Projetos de Complexos Eólicos Offshore disponibiliza novas ferramentas**. Brasília, 29 jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2024/mapa-de-projetos-de-complexos-eolicos-offshore-disponibiliza-novas-ferramentas>. Acesso em: 03 fev. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Ibama emite 1ª licença prévia para projeto eólico offshore no Brasil: empreendimento inédito marca avanço estratégico para a transição energética nacional**. Brasília, 24 jun. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2025/ibama-emite-1a-licenca-previa-para-projeto-eolico-offshore-no-brasil>. Acesso em: 03 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Mapas de projetos em licenciamento: complexos eólicos offshore**. Brasília, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>. Acesso em: 02 abr. 2026.

JENSEN, Finn B. Shock-excited pulsations of large air bubbles in water. **Journal of Fluids Engineering**, v. 96, n. 4, p. 389-393, 1974.

JENSEN, Finn B. *et al.* **Computational ocean acoustics**. New York: Springer New York, 2011.

JÉZÉQUEL, Youenn *et al.* Tank acoustics substantially distort broadband sounds produced by marine crustaceans. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 152, n. 6, p. 3747-3755, 2022.

JONES, Ian T.; STANLEY, Jenni A.; MOONEY, T. Aran. Impulsive pile driving noise elicits alarm responses in squid (*Doryteuthis pealeii*). **Marine Pollution Bulletin**, v. 150, p. 110792, 2020.

JORDAN, T. L.; OUNAIES, Z. **Piezoelectric ceramics characterization**. Hampton: NASA Langley Research Center, set. 2001. (NASA/CR-2001-211225; ICASE Report, n. 2001-28).

JUNIOR, G. C.; NAPOLI, E. Instalação de eólicas no mar pode afetar animais, diz Ibama. **Poder360**, 2023. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/energia/instalacao-de-eolicas-no-mar-pode-afetar-animais-diz-ibama/>. Acesso em: 19 out. 2023.

KINSLER, Lawrence E. *et al.* **Fundamentals of acoustics**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

KRUSE, Katrin *et al.* Plastic debris and its impacts on marine mammals. In: *Marine mammals: a deep dive into the world of Science*. Cham: Springer International Publishing, p. 49-62, 2023.

LEIGHTON, Timothy. **The acoustic bubble**. London: Academic Press, 2012.

LI, Huidong; DENG, Z. Daniel; CARLSON, Thomas J. Piezoelectric materials used in underwater acoustic transducers. **Sensor Letters**, v. 10, n. 3-4, p. 679-697, 2012.

LURTON, Xavier. **An introduction to underwater acoustics: principles and applications**. New York: Springer, 2002.

MACHADO, N. Eólica offshore quer política industrial para garantir demanda. **Diálogos da Transição Eólica e Hidrogênio**. Agência Epbr, 14 ago. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/eolica-offshore-quer-politica-industrial-para-garantir-demanda/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MEDWIN, Herman. Counting bubbles acoustically: a review. **Ultrasonics**, v. 15, n. 1, p. 7-13, 1977.

MEDWIN, Herman; CLAY, Clarence S. **Fundamentals of acoustical oceanography**. San Diego: Academic Press, 1998.

MENG, Jie; WANG, Yong Jie; CAI, Lei; WEI, Ran. Research on the combination of underwater acoustic countermeasure equipments against torpedo. In: **MATEC Web of Conferences**, v. 40, 2016.

MINNAERT, M. **On musical air-bubbles and the sound of running water.** Philosophical Magazine, Series 7, Volume 16, Issue 104, pages 235-248, 1933.

MOUNTAIN, David; ANDERSON, David; VOYSEY, Graham. The effects of sound in the marine environment (ESME) workbench: A simulation tool to predict the impact of anthropogenic sound on marine mammals. In: **Proceedings of Meetings on Acoustics.** AIP Publishing, 2013.

NATIONAL MARINE FISHERIES SERVICE (NMFS). **Update to: Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing (version 3.0): Underwater and in air criteria for onset of auditory injury and temporary threshold shifts.** Silver Spring: U.S. Dept. of Commerce. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-71, out. 2024.

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH (NIH). ImageJ: software de processamento de imagens. Disponível em: <https://imagej.net/ij/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

NEDWELL, J.; LANGWORTHY, J.; HOWELL, D. Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with background noise. **Subacoustech Report 544R0423.** COWRIE, 2003.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Fontes hidrotermais. **Ocean Exploration**, 2017. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/edu/materials/portugues-fontes-hidrotermais-ficha-technica.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2023.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica: fluidos, oscilações e ondas, calor.** 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

PARK, Cheolsoo *et al.* Acoustic insertion loss by a bubble layer for the application to air bubble curtain and air masker. **The Journal of the Acoustical Society of Korea**, v. 39, n. 4, p. 227-236, 2020.

PIJANOWSKI, Bryan C. *et al.* Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. **BioScience**, v. 61, n. 3, p. 203-216, 2011.

POPPER, Arthur N. Effects of anthropogenic sounds on fishes. **Fisheries**, v. 28, n. 10, p. 24-31, 2011.

RUSTEMEIER, J.; GRIEBMANN, T.; ROLFES, R. Underwater sound mitigation of bubble curtains with different bubble size distributions. In: **Proceedings of Meetings on Acoustics.** AIP Publishing, 2012.

SÁNCHEZ, Sergio *et al.* Foundations in offshore wind farms: Evolution, characteristics and range of use. Analysis of main dimensional parameters in monopile foundations. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 7, n. 12, p. 441, 2019.

SARKAR, K.; Prosperetti, A. Coherent and incoherent scattering by oceanic bubbles, **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 96, p. 332–341, 1994.

SEARS, F.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY, M.W. **Física II**. 12. ed., São Paulo: Pearson, 2008.

SOUZA, L. A. L. **Princípios de sonar**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), 1997.

SOUTHWORTH, M. F. **The sonic environment of cities**. Dissertação (Mestrado). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1967.

SOVIERZOSKI, M. A. Convolução de sinais: definição, propriedades e ferramentas. **Revista Ilha Digital**, v. 2, p. 81-95, 2010.

TSOUVALAS, A. Underwater noise emission due to offshore pile installation: A review. **Energies**, v. 13, n. 12, p. 3037, 2020.

URICK, R. J. **Principles of underwater sound**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1983.

WILD, R. (Ed). Acoustic theory of bubbles. In: **The physics of sound in the sea**. National Defense Research, Washington, DC. Summary Technical Report, p. 460-477, 1946.

ANEXO A: EXPERIMENTO NO TANQUE ACÚSTICO

Vídeo demonstrativo da atenuação do som utilizando a técnica de cortina de bolhas – IEAPM, 2025. Disponível em: <https://youtu.be/DKIuktdp9Es>.

Descrição técnica do conteúdo

Experimento realizado no tanque de teste do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), utilizando o projetor acústico como fonte de transmissão do sinal, sob a forma de pulsos senoidais na faixa de frequência de 2 kHz, conforme o esquema experimental apresentado na Figura 8.

O experimento foi conduzido com o objetivo de avaliar a eficiência da cortina de bolhas na redução da propagação de ondas mecânicas longitudinais, por meio da análise de parâmetros como a frequência de ressonância, as características do meio e a dinâmica das bolhas de ar, possibilitando a quantificação da atenuação em diferentes condições experimentais.

Os resultados indicam que a presença da cortina de bolhas contribui significativamente para a redução do nível de pressão sonora, evidenciando seu potencial como método de redução de ruído em operações submarinas.