



MARINHA DO BRASIL

INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ACÚSTICA SUBMARINA

LOCALIZAÇÃO DE FONTES SONORAS SUBMARINAS UTILIZANDO  
TIME-REVERSAL MIRROR E O MODELO DE RAIOS

Richard Barbosa Nobre

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

Orientador: Renato Peres Vio

Arraial do Cabo

Julho de 2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

**N754I** Nobre, Richard Barbosa

Localização de fontes sonoras submarinas utilizando time-reversal mirror e o modelo de raios / Richard Barbosa Nobre. – Arraial do Cabo, 2024.

101 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, 2024.

1. Localização de fonte 2. Teoria de raios. 3. Inversão temporal.  
I. Renato Peres Vio. II. Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. Programa de Pós-graduação em Acústica Submarina III. Título.

**CDD:620.25**

LOCALIZAÇÃO DE FONTES SONORAS SUBMARINAS UTILIZANDO TIME-  
REVERSAL MIRROR E O MODELO DE RAIOS

Richard Barbosa Nobre

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

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

Aprovada por: Prof. Rogério de Moraes Calazan, Ph.D.

Prof. Fabrício de Abreu Bozzi, Ph.D.

Prof. Natanael Nunes de Moura Junior, D.Sc.

ARRAIAL DO CABO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2024



# Agradecimentos

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço à minha mãe, Tania, e ao meu pai, Gessé, por seu amor incondicional, apoio inabalável e incentivo constante ao longo de toda minha jornada pessoal e acadêmica.

Ao meu filho, Matheus, que trouxe luz e alegria à minha vida, mesmo nos momentos mais intensos de estudo e pesquisa. Sua inocência e sorriso contagiante foram minha motivação diária para buscar a excelência acadêmica.

À minha esposa, Stefany, pela sua paciência infinita, compreensão e suporte incondicional. Seu amor e apoio foram fundamentais para superar os obstáculos e alcançar este marco importante em minha carreira acadêmica. Suas palavras de encorajamento foram o alicerce sobre o qual construí este trabalho e sua presença sempre foi um farol de esperança em momentos desafiadores.

Ao meu orientador, Comandante Renato Vio, pela orientação sábia, apoio constante e conselhos valiosos ao longo deste trabalho. Sua dedicação e experiência foram cruciais para moldar este estudo e para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, gostaria de estender meu profundo agradecimento aos professores do programa de acústica submarina. Suas aulas inspiradoras, orientações e feedbacks construtivos foram fundamentais para minha formação e para o sucesso deste trabalho.

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

## LOCALIZAÇÃO DE FONTES SONORAS SUBMARINAS UTILIZANDO TIME-REVERSAL MIRROR E O MODELO DE RAIOS

Richard Barbosa Nobre

Julho/2024

Orientador: Renato Peres Vio

Programa: Acústica Submarina

A localização de fontes no meio submarino apresenta desafios complexos relacionados à propagação do som neste ambiente. Este estudo se concentra nas técnicas de localização passiva baseadas em espelhos de inversão temporal (TRM), investigando o método em conjunto com um modelo acústico submarino. Esta dissertação aborda os modelos físicos de propagação sonora e os métodos de processamento de sinais necessários para a implementação da localização passiva, fundamentados no princípio de reciprocidade do campo sonoro e na teoria de raios. São apresentadas as fórmulas do TRM e estabelecidos algoritmos de localização passiva para um sensor único e para um arranjo vertical de sensores. O estudo revela que o grau de correspondência entre o canal sonoro simulado e o real determina o desempenho de localização passiva do TRM. Os resultados das simulações demonstram que o erro entre a localização real e a estimada é inferior a 1m para uma fonte à distância de 500m, mesmo na presença de ruído, embora possa ser sensível a incertezas ambientais, em especial a variações na velocidade do som no mar. Além disso, notou-se que o aumento do número de sensores empregados no processamento do TRM resultou em um melhor desempenho da busca. O resultado do processamento de dados experimentais com um arranjo vertical reforça o potencial do TRM, mas evidenciam a importância da cobertura vertical da coluna d'água para a redução de zonas de ambiguidade e melhoria da precisão do método proposto.

**Palavras-chave:** localização de fontes; teoria de raios; inversão temporal.

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

## UNDERWATER SOUND SOURCE LOCALIZATION USING TIME-REVERSAL MIRROR AND RAY MODEL

Richard Barbosa Nobre

July/2024

Advisor: Renato Peres Vio

Department: Underwater Acoustics

Underwater Source localization presents complex challenges related to sound propagation in this environment. This study focuses on passive localization techniques based on time reversal mirrors (TRM), investigating the method in conjunction with an underwater acoustic model. This dissertation explores the sound propagation models and signal processing methods necessary for implementing passive localization, rooted in the principle of reciprocity of the sound field and ray theory. The expressions of TRM were presented, and passive localization algorithms are established for both a single sensor and a vertical array of sensors. This study reveals that the correspondence between simulated and real acoustic channel is critical regarding the passive localization performance of TRM. Simulation results demonstrate that the error between the actual and estimated locations is less than 1m for a source at a distance of 500m, even in the presence of noise, although it may be sensitive to environmental uncertainties, especially variations of the sound speed in water. Furthermore, it was noted that increasing the number of sensors used in TRM processing resulted in better search performance. The result of experimental data with a vertical array reinforces the potential of TRM but points to the importance of vertical coverage of the water column for reducing ambiguity zones and improving accuracy of the proposed method.

**Keywords:** source localization; ray theory; time-reversal.

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Abreviaturas .....</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivo e justificativa .....	13
1.2 Técnicas de localização .....	16
1.2.1 Localização com sonar .....	16
1.2.2 A concepção do TRM e sua aplicação na acústica .....	18
1.2.3 Principais direções de pesquisa em localização com TRM .....	21
1.3 Localização com MFP e com PTRM .....	23
1.4 Principais conteúdos da dissertação .....	24
<b>2 Modelos de propagação acústica .....</b>	<b>26</b>
2.1 Modelos de propagação .....	27
2.2 O modelo de propagação de raios e o cálculo do campo sonoro .....	31
2.2.1 Solução da Equação Eikonal .....	32
2.2.2 Equação dos Raios .....	33
2.2.3 Solução da Equação de Transporte .....	34
2.2.4 Os Autorraios .....	35
2.3 Princípio de Reciprocidade do Campo Sonoro .....	36
2.4 Conclusão do Capítulo .....	39
<b>3 Localização de fontes com PTRM .....</b>	<b>40</b>
3.1 Localização com TRM de um único elemento .....	40
3.1.1 TRM com um único elemento .....	40
3.1.2 PTRM com um Único Sensor .....	43
3.2 Localização com PTRM e múltiplos sensores .....	45
3.3 Discussão sobre modelagem de canal e o ganho do arranjo .....	48
3.4 O campo sonoro em um arranjo de múltiplos hidrofones .....	50
3.5 Conclusão do Capítulo .....	52
<b>4 Localização de fontes usando PTRM com dados simulados .....</b>	<b>53</b>

4.1 Simulação de Localização com PTRM para um Único Hidrofone .....	53
4.1.1 Descrição do ambiente simulado.....	54
4.1.2 Aplicação do algoritmo de PTRM .....	56
4.2 O efeito do ruído.....	59
4.3 Localização com PTRM usando um Arranjo de Hidrofonos e Matriz de correlação de sinais.....	61
4.4 O efeito dos parâmetros do guia de ondas.....	65
4.5 Conclusão do Capítulo .....	69
<b>5 Análise de desempenho do PTRM com dados de ambiente real.....</b>	<b>70</b>
5.1 Experimento CALCOM'10: Uma Abordagem para Calibração de Campo por Inversão Acústica.....	70
5.2 Coleta dos Dados.....	71
5.3 Modelagem do ambiente .....	74
5.4 Aplicação do algoritmo de localização.....	76
<b>Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>82</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>84</b>
<b>A Código utilizado no algoritmo de localização .....</b>	<b>94</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Dispositivo do experimento de TRM no mar conduzido por Kuperman.....	19
Figura 1.2 – A relação entre o erro de localização do TRM e o erro de frequência angular. A variação de 20 Hz em frequência resultou em um erro de 300m na estimativa de localização. ....	20
Figura 2.1 – A pressão sonora induzida no ponto B por uma fonte colocada no ponto A (a) é a mesma induzida no ponto A se a mesma fonte for colocada no ponto B. O traçado dos autorraios demonstra o cenário recíproco ao inverter as posições entre a fonte e o receptor. ....	37
Figura 3.1 – Propagação de 3 raios (direto, refletido na superfície e refletido no fundo) a partir da fonte S e recebidos em R. Os multicaminhos provenientes das reflexões podem ser vistos como raios propagados a partir de fontes virtuais espelhadas pelas interfaces. ....	42
Figura 3.2 – Diagrama de blocos representando o método do TRM para localização de fontes utilizando um único elemento.....	43
Figura 3.3 – Diagrama de blocos representando o método do TRM para localização de fontes utilizando um arranjo com 2 elementos.....	46
Figura 4.1 – Perfil de velocidade do som constante utilizado na modelagem do canal .....	54
Figura 4.2 – Traçado dos autorraios e medição das amplitudes e atrasos dos raios entre a posição da fonte e o receptor gerado pelo TRACEO. Essas informações são necessárias para o cálculo da resposta ao impulso do canal modelado. ....	55
Figura 4.3 – Modelo de ambiente simulado com uma fonte na profundidade de 45m e um único receptor na profundidade de 10m. Esses dados servem de entrada para o modelo de traçado de raios. ....	55
Figura 4.4 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo de TRM. Na superfície de ambiguidade, o máximo global representa a estimativa da posição da fonte.....	57
Figura 4.5 – Índice máximo de correlação atingindo o foco na posição da fonte, localizada na distância de 500m e profundidade de 45m. ....	58
Figura 4.6 – Índice máximo de correlação obtido pelo algoritmo de localização com a adição de ruído ao sinal (SNR=10dB). ....	59
Figura 4.7 – Sinal recebido pelo hidrofone na profundidade de 10 metros após a introdução do ruído Gaussiano branco (SNR=10dB).....	60
Figura 4.8: Efeito do ruído na estimativa de distância da fonte com um único hidrofone para diferentes SNR (0dB, -10dB e -15dB).....	60
Figura 4.9 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo de TRM. Na superfície de ambiguidade, o máximo global representa a estimativa da posição da fonte.....	63
Figura 4.10 – Efeito do ruído na estimativa de distância da fonte com um arranjo binário de hidrofones para diferentes SNR (0dB, -10dB e -15dB).....	64
Figura 4.11 – Erro de estimativa de distância para uma fonte a 500m do receptor, variando a velocidade do som na água do mar. Mantendo o perfil de isovelocidade, variou-se a velocidade do som entre 1475 m/s e 1550 m/s. ....	65

Figura 4.12 – Erro de estimativa de distância para distâncias fonte-receptor de 250m, 500m e 750m. ....	66
Figura 4.13 – Erro de estimativa de distância para fontes às distâncias de 250m, 500m e 750m do receptor, variando a velocidade do som no sedimento entre 1525 m/s e 1700 m/s.....	67
Figura 4.14 – Erro de estimativa de distância para fontes às distâncias de 250m, 500m e 750m do receptor, mantendo a profundidade local constante e variando seu valor em $- + 10\%$ ....	68
Figura 4.15 – Erro de estimativa de distância para fontes às distâncias de 250m, 500m e 750m do receptor, variando a profundidade local a partir do receptor, produzindo uma inclinação no fundo de até 6 graus.....	69
Figura 5.1 – Espectrograma do sinal transmitido, utilizado no experimento de calibração de campo. A parte do sinal utilizada para localização da fonte foi o trecho entre os segundos 40 e 55, composto pelos multitons. ....	72
Figura 5.2 – Carta batimétrica com as posições do VLA e da fonte durante as transmissões do evento P6. ....	73
Figura 5.3 – Representação esquemática do guia de onda do experimento CALCOM'10 considerado no algoritmo de localização.....	74
Figura 5.4 – Saída do TRACEO contendo as amplitudes e atrasos dos autorraios que convergem para a posição estimada da fonte (1644,7) com os dados do modelo de ambiente representado na Figura 5.3. ....	75
Figura 5.5 – Regiões de ambiguidade após o processamento do algoritmo de localização para a transmissão P6-01 com apenas 6 elementos do arranjo vertical. Não foi possível obter um foco isolado na posição da fonte.....	76
Figura 5.6 – Resultado do processamento do algoritmo para os 8 primeiros hidrofones do arranjo vertical. Observa-se ainda a presença de diversas regiões de ambiguidade, sem a formação de um foco para localização da fonte. ....	78
Figura 5.7 – Resultado do processamento do algoritmo para os 10 primeiros hidrofones do arranjo vertical. É possível observar uma redução nas zonas de ambiguidade, mas ainda sem um foco específico que indique a posição da fonte sonora. ....	78
Figura 5.8 – Resultado do processamento do algoritmo para os 12 primeiros hidrofones do arranjo vertical. É possível observar a redução das ambiguidades em distância, restando áreas de incerteza principalmente na busca vertical. Ainda não foi possível obter um foco na posição da fonte sonora.....	79
Figura 5.9 – Resultado do processamento do algoritmo para os 14 primeiros hidrofones do arranjo vertical. Observa-se o aparecimento de um máximo global, ainda com áreas de ambiguidade, principalmente em profundidade. ....	79
Figura 5.10 – Região com o índice máximo de correlação após o processamento do algoritmo de localização com os 16 elementos do VLA, com o foco ocorrendo na posição (1643,6). A posição real da fonte era nas coordenadas (1644,7). ....	81

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Erros de posicionamento da fonte após a busca com o algoritmo de localização com 6 elementos.....	77
Tabela 2: Erros de posicionamento da fonte após a busca com o algoritmo de localização TRM com 16 elementos. ....	80

## Lista de Abreviaturas

MFP	<i>Matched Field Processing</i> – Processamento de campo casado, p. 14
TRM	<i>Time Reversal Mirror</i> – Espelho de tempo reverso, p. 14
PTRM	<i>Passive Time Reversal Mirror</i> – Espelho passivo de tempo reverso, p. 15
TMA	<i>Target Motion Analysis</i> – Análise de movimento do alvo, p. 16
VRA	<i>Vertical Receiver Array</i> – Arranjo de recepção vertical, p. 19
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i> – Interferência entre símbolos, p. 20
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> – Múltiplas entradas e múltiplas saídas, p. 20
TRA	<i>Time Reversal Analysis</i> – Análise de tempo Reverso, p. 20
FFP	<i>Fast Field Program</i> – Programa de campo rápido, p. 26
NM	<i>Normal Modes</i> – Modos Normais, p. 26
PE	<i>Parabolic Equation</i> – Equação Parabólica, p. 26
FE	<i>Finite Elements</i> – Elementos Finitos, p. 26
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier, p. 28
SIPLAB	<i>Signal Processing Laboratory</i> – Laboratório de Processamento de Sinais, p. 70
AOB	<i>Acoustic Oceanographic Buoy</i> – Boia acústico-oceanográfica, p. 70
VLA	<i>Vertical Linear Array</i> – Arranjo Linear Vertical, p. 70
SSP	<i>Sound Speed Profile</i> – Perfil de velocidade do som, p. 71
LFM	<i>Linear Frequency Modulation</i> – Modulação em Frequência Linear, p. 73

# Capítulo 1

## Introdução

A localização de fontes no meio submarino apresenta desafios complexos relacionados à propagação do som neste ambiente, como os efeitos de múltiplos caminhos, o ruído ambiental e a variação espacial dos sensores ao longo do tempo, causado pelas correntes oceânicas [1]. Este trabalho busca avaliar a eficácia do método de localização passiva com o espelho de tempo reverso visando contornar os problemas associados à localização de fontes neste meio.

A seção 1.1 deste capítulo descreve a importância e o desenvolvimento das técnicas de localização, os desafios que motivaram esta pesquisa e os objetivos deste trabalho. Na seção 1.2 são descritas algumas técnicas utilizadas na localização de fontes e o seu emprego na acústica. A seção 1.3 compara as técnicas de localização, descrevendo os métodos e as semelhanças entre eles, e a seção 1.4 lista os principais conteúdos presentes neste trabalho.

### 1.1 Objetivo e justificativa

A técnica de localização passiva tem sido uma das direções de desenvolvimento essenciais na evolução da tecnologia de sonar [2]. Se o equipamento de sonar puder fornecer dados de distância e profundidade, mesmo que sejam estimativas grosseiras, isso melhorará consideravelmente a velocidade de convergência dos algoritmos do sistema de combate de navios de guerra [3]. Além disso, também aumentaria a precisão da resolução de cálculos de movimento, melhorando assim a capacidade de ataque e segurança de embarcações [4]. Em comparação à tecnologia ativa de localização, a localização passiva também possui a vantagem de ser mais furtiva e não revelar a presença da própria embarcação [5]. Ao longo dos anos, Marinhas de outros países investiram significativos recursos humanos, financeiros e materiais no desenvolvimento de sonares de localização passiva [6]. No entanto, devido à complexidade do ambiente marinho e às dificuldades na implementação da tecnologia de localização passiva, o progresso na pesquisa e aplicação dessa tecnologia tem sido lento [7]. Mesmo quando a tecnologia de localização passiva é aplicada aos equipamentos de sonar, sua eficácia pode ser

comprometida quando se deseja uma rápida resposta de localização [7]. Portanto, a tecnologia de localização passiva continua a se desenvolver e a ser aprimorada constantemente, com novas abordagens e métodos inovadores [8].

A técnica de localização por processamento de campo casado (MFP - *Matched Field Processing*) é uma das maneiras eficazes de realizar a localização passiva, e vem sendo desenvolvida desde a década de 1970 [9]. Ela combina técnicas de processamento de sinal com as características físicas da propagação de ondas sonoras no oceano, aproveitando ao máximo as informações acústicas do sinal emitido pelo alvo. O princípio básico do MFP envolve a comparação dos sinais recebidos com padrões de propagação acústica previamente modelados, ajustando esses padrões para minimizar diferenças entre os sinais simulados e os sinais observados. Esse método aproveita a interferência construtiva e destrutiva dos sinais acústicos refletidos e refratados no ambiente submarino para inferir a posição da fonte [9].

No entanto, a complexidade e a variabilidade do ambiente submarino, bem como as limitações no conhecimento humano sobre ele, afetam o desempenho do processamento de sinais de campo casado e restringem a aplicação prática dessa técnica. Além disso, a demanda computacional necessária representa um desafio na tarefa de processamento do sinal acústico [7]. Portanto, a utilização de modelos de campo mais simplificados e algoritmos mais tolerantes a erros trazem vantagens como, por exemplo, em sistemas embarcados onde existam restrições de consumo energético e poder computacional.

A localização por espelho de inversão temporal (TRM - *Time Reversal Mirror*) é uma técnica similar à técnica de campo casado [10]. Ela consiste na retransmissão dos sinais registrados de volta ao ambiente submarino, mas de forma invertida no tempo. Esse procedimento tira proveito do princípio da reciprocidade do meio de propagação acústica, onde os caminhos do sinal original e do sinal retransmitido se sobrepõem, focalizando o sinal retransmitido na localização de origem fonte.

Desde os anos de 1990, a técnica de TRM tem produzido resultados significativos na área de comunicação submarina [11]. Ela pode reduzir a taxa de erro de comunicação submarina, sendo seu desempenho relacionado ao número de sensores e à geometria dos mesmos [12]. A comunicação submarina também é afetada pela propagação multicaminho. As características de autofoco do TRM podem mitigar as interferências, melhorando assim a estabilidade do canal de comunicação [12].

A supressão da reverberação é outro exemplo de aplicação do TRM, que tem efeitos significativos na melhoria da relação sinal-ruído [13]. A reverberação é uma interferência que afeta significativamente o desempenho do sonar ativo, criando zonas “cegas” de trabalho em certas posições na coluna d’água, prejudicando a detecção e localização de alvos [14]. O uso da técnica de espelho temporal, com suas características de filtragem espacial e temporal, pode reduzir a reverberação (processamento de supressão de reverberação) e melhorar a relação sinal-ruído [13].

A técnica de TRM tem um amplo potencial de aplicação. Sua aplicação na localização de uma fonte sonora, no entanto, ainda requer muito trabalho de pesquisa [15]. Sonares passivos tradicionais são limitados pela influência da propagação multicaminho, afetando a precisão das medições e o desempenho global do sistema [7]. O uso do TRM supera esses efeitos de multicaminho e aumenta a precisão da medição do sonar [15].

A técnica de TRM pode realizar a localização de uma fonte sonora com o emprego de um único hidrofone e possui vantagens em termos de carga computacional reduzida e menor custo de instalação, o que torna sua aplicação mais viável [15].

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o desempenho da técnica de espelho de inversão temporal passivo (PTRM – *Passive Time Reversal Mirror*), combinada com a teoria de raios, na localização de uma fonte sonora submarina. De modo a atingir este objetivo, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar os fatores associados à propagação da onda no meio submarino;
- Descrever modelos de propagação de ondas acústicas que possam ser usados para simular o guia de ondas; e
- Desenvolver um algoritmo de localização com base no PTRM para obter distância e profundidade de uma fonte sonora submarina.

## 1.2 Técnicas de localização

A localização de uma fonte sonora é utilizada em áreas como monitoramento ambiental, localização e acompanhamento de cetáceos, sonar, entre outros [16]. Em estudos recentes, a localização de fontes sonoras tem sido fundamental para monitorar e compreender padrões de ruído em ecossistemas aquáticos, permitindo a avaliação dos impactos humanos e naturais sobre a vida marinha [17]. Além disso, em pesquisas sobre comportamento animal, a localização de fontes sonoras é essencial para rastrear e estudar a migração, alimentação e interações sociais de cetáceos, contribuindo para a conservação dessas espécies e o entendimento dos ecossistemas oceânicos [18]. Diversos métodos de localização buscam alternativas para contornar a complexidade da propagação sonora no ambiente marinho e fornecer um posicionamento confiável de uma fonte emissora neste meio, como métodos de triangulação de posição, métodos baseados nos tempos de chegada dos sinais, entre outros. [19].

### 1.2.1 Localização com sonar

A técnica de localização com sonar pode ser dividida em duas grandes categorias: localização ativa e localização passiva [7]. A técnica de localização com sonar ativo é amplamente usada em equipamentos de sonar em serviço, especialmente em plataformas aéreas e navais [20]. A localização ativa com sonar depende da recepção de pulsos previamente transmitidos. Essa técnica determina a distância do alvo medindo o tempo de ida e volta do sinal transmitido, mas não pode determinar a profundidade do alvo [21]. Além disso, a maior desvantagem é que o sonar ativo pode revelar facilmente a presença da embarcação transmissora, o que limita sua utilização em submarinos. Por outro lado, a localização com sonar passivo permite manter a ocultação, pode determinar a distância e profundidade do alvo, e possui perspectivas promissoras [22]. As técnicas de localização com sonar passivo incluem geometria de localização por diferença de tempos de chegada, análise de movimento do alvo (TMA - *Target Motion Analysis*), MFP, entre outras.

A técnica de MFP é uma das mais importantes para a localização de sonar passivo [23]. O MFP é particularmente eficaz em baixas frequências, onde a propagação oceânica é

coerente a grandes distâncias [24]. O MFP é uma forma de filtro de correspondência espacial que utiliza a função de Green para determinar os sinais correlacionados (sinais-alvo) [25]. Existem várias abordagens e algoritmos MFP, incluindo abordagens convencionais e adaptativas, que podem ser implementadas em modelos de sinal de banda estreita ou larga. À medida que a pesquisa avança, surgem algoritmos MFP que podem lidar com a incerteza nas informações ambientais e nos parâmetros de localização [26].

As técnicas modernas de localização por arranjos de sensores têm incorporado as características físicas da propagação do som no guia de ondas como parte de seu escopo [27]. Essa incorporação das características físicas da propagação pode levar a melhorias no desempenho e permitir o desenvolvimento de algoritmos que exploram a complexidade do ambiente submarino. O MFP aproveita a complexidade espacial do campo sonoro no guia de ondas para a localização em distância, profundidade e azimute do alvo, ou para a estimativa dos parâmetros do guia de ondas. Todos os métodos de MFP envolvem alguma forma de relação entre o campo sonoro modelado, derivado da equação da onda, e os dados medidos pelo arranjo de sensores [9]. Devido ao fato de as previsões serem altamente dependentes das posições do alvo e dos parâmetros ambientais, o MFP pode ser visto como um problema de inversão acústica [10]. Até o momento, uma grande quantidade de literatura discute as questões teóricas e aplicadas do MFP. No entanto, o MFP também possui desafios significativos, incluindo a sensibilidade à falta de correspondência, que pode ser causada por desajustes ambientais, desajustes do sistema (calibração do arranjo de sensores, erros de posição etc.) e desajustes estatísticos (problemas de graus de liberdade finitos nas operações de covariância) [28].

A técnica de TRM para a localização de fontes sonoras é uma extensão do MFP, com relativamente poucos resultados de pesquisa publicamente divulgados [29]. No entanto, houve muitas pesquisas sobre a aplicação do TRM na comunicação submarina. O princípio fundamental da tecnologia de espelho temporal é a reciprocidade do campo sonoro [30].

## 1.2.2 A concepção do TRM e sua aplicação na acústica

A técnica de TRM em acústica foi adaptada da ótica [31], onde a técnica de conjugação de fase foi desenvolvida para compensar as diferenças de fase que a luz encontra ao passar por meios não uniformes [32].

Na acústica, a técnica do TRM começou a ser aplicada pela primeira vez no campo de ultrassom [33-43]. Em 1989, Fink propôs pela primeira vez a aplicação de um espelho de fase conjugada em meios não uniformes para focar reflexões de alvos e, assim, permitir sua localização [44]. Naquela época, a definição de TRM era um conjunto base de sensores transmitindo e reemitindo ondas sonoras para formar um foco no local de origem da onda sonora. Atualmente, esse conceito ainda é usado.

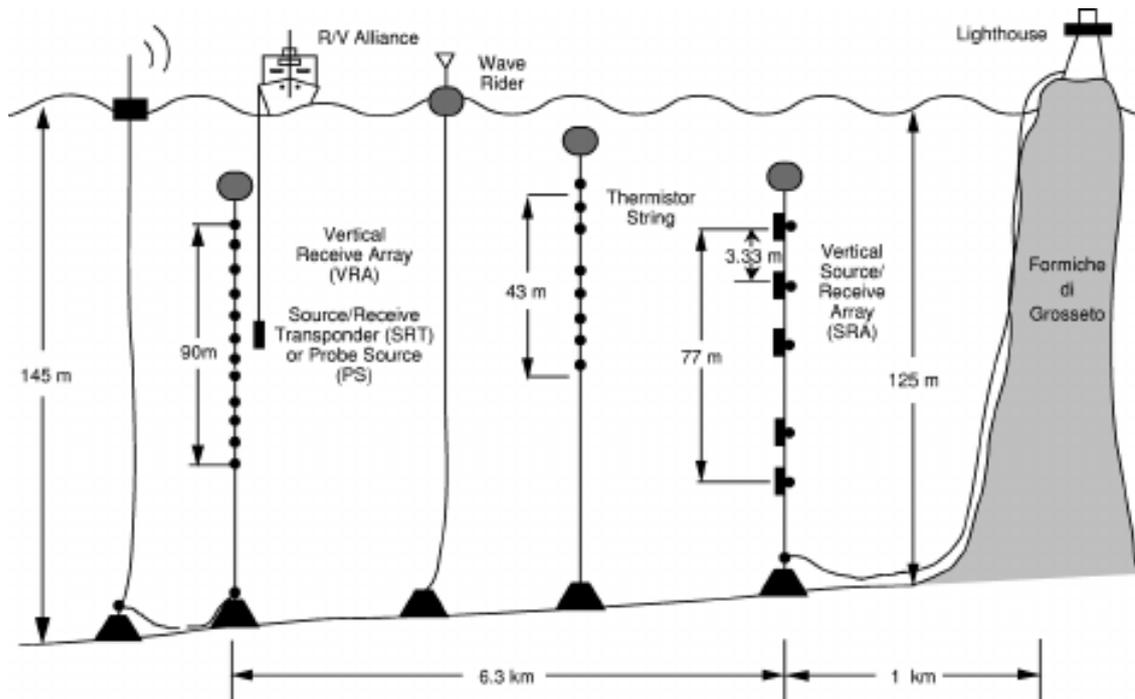
Um TRM pode, portanto, ser implementado com um arranjo fonte-receptor. O sinal incidente da fonte acústica é recebido, invertido no tempo e retransmitido por fontes na mesma posição dos hidrofones receptores. Uma vez que o TRM transmite as últimas chegadas primeiro, a estrutura de chegada se comprime formando um foco na posição original da fonte [45].

Fink et al. [44] usaram um arranjo linear de 64 elementos para avaliar o desempenho do TRM. Os resultados mostraram que o TRM pode compensar as distorções causadas pelo meio não uniforme e formar um foco. Quando existem múltiplos alvos no meio, o TRM pode formar foco iterativamente na área de reflexão mais intensa. Este processo envolve a repetição da inversão temporal das ondas acústicas capturadas até que a energia sonora seja predominantemente concentrada no alvo com a maior intensidade refletida. Esses experimentos também mostraram que o TRM pode alcançar o foco em meios não uniformes, onde as propriedades físicas, como a velocidade do som, variam espacialmente, pois realiza uma filtragem espacial e temporal correspondente da função de transferência do meio. O TRM demonstrou seu potencial na aplicação prática quando Fink realizou experimentos para quebra de pedras nos rins em 1992 [46].

A técnica de TRM combinada com o sonar ativo tem aplicação importante no campo de pesquisa de sonar [47-56]. O método TRM aplicado ao sonar ativo foi experimentalmente

testado em 1996 por Kuperman [57]. Neste experimento, realizado no Mar Mediterrâneo, um arranjo de recepção vertical (VRA - *Vertical Receive Array*) com 46 transdutores foi posicionado a uma distância de 6,3 km de uma fonte sonora (PS - *Probe Source*), conforme mostrado na Figura 1.1. Os sinais emitidos durante o experimento tinham uma frequência de 450 Hz. O experimento demonstrou que o TRM podia alcançar foco no tempo e no espaço na localização do alvo, superando os efeitos de múltiplos caminhos induzidos pelas interfaces no guia de ondas.

Figura 1.1 – Dispositivo do experimento de TRM no mar conduzido por Kuperman.

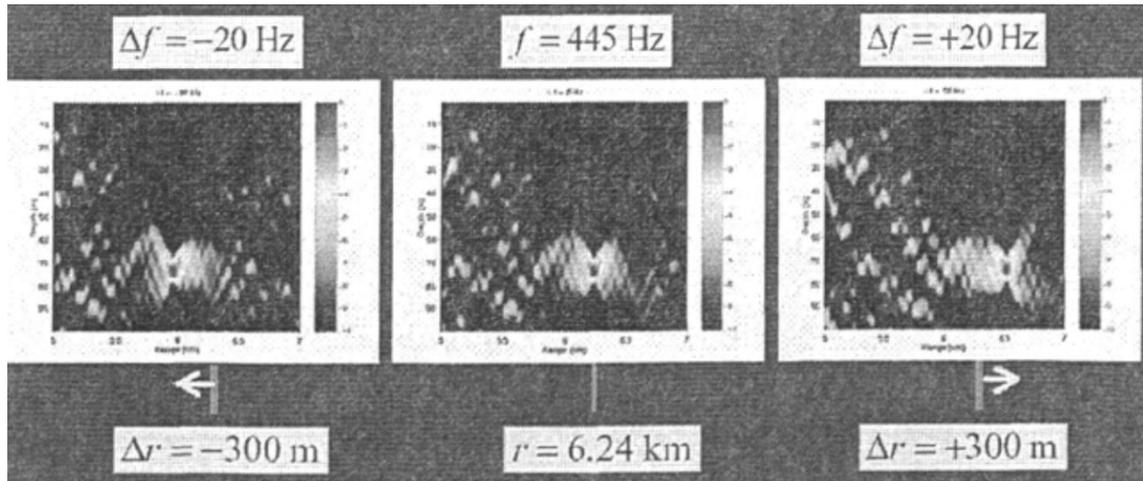


Fonte: Kuperman [57].

A aplicação bem-sucedida da tecnologia TRM ao sonar ativo demonstra sua eficácia na formação de foco em meios não homogêneos e complexos e tem aplicações promissoras em várias áreas, incluindo ultrassom e sonar [58].

Posteriormente, Kuperman *et al* [59] realizaram estudos sobre a estabilidade do TRM e erros de posicionamento. Eles concluíram que o erro de distância é proporcional ao erro em frequência, sob condições de águas rasas, conforme ilustrado na Figura 1.2:

Figura 1.2 – A relação entre o erro de localização do TRM e o erro de frequência angular. A variação de 20 Hz em frequência resultou em um erro de 300m na estimativa de localização.



Fonte: Kuperman *et al* [59].

A pesquisa concluiu que a taxa de variação da frequência angular é diretamente proporcional à taxa de variação da distância do alvo, o que pode ser aplicado para estimar a velocidade de um alvo, similar ao efeito Doppler de alvos em movimento.

Kuperman *et al.* realizaram estudos aprofundados sobre o uso do método de TRM na supressão de ruído [60] e melhoria da relação sinal/ruído [61]. Os resultados mostraram que era possível eliminar parcialmente os efeitos da reverberação, melhorando a relação sinal-ruído [62-64]. Essa abordagem é baseada em resultados de simulação de guias de ondas de Pekeris que validam sua correção.

Uma das aplicações do TRM é na área de comunicações submarinas. Usando a técnica de TRM, é possível realizar equalização adaptativa de canal, o que ajuda a suprimir a interferência entre símbolos (ISI – *Inter Symbol Interference*) e também oferece alguma capacidade de correção de erros, tornando a comunicação livre de erros uma possibilidade [65]. Vários estudos exploraram o uso do TRM em comunicações submarinas [66-69], incluindo a aplicação do PTRM, a aplicação do TRM em sistemas de comunicação submarina (FSK, PSK e OFDM), simulações de supressão de eco em comunicações submarinas [70] e o desenvolvimento de sistemas de comunicação submarina MIMO (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas) usando o TRM [71-73].

A técnica de Análise de Tempo Reverso (TRA – *Time Reversal Analysis*) com capacidade de ponderação adaptativa pode ser usada para ajustar o arranjo de TRM após a identificação do sinal do alvo mais forte [59]. Isso permite que a TRA ajuste o ponto zero para a direção do alvo já focalizado, possibilitando o foco em alvos que refletem sinais mais fracos. Essa técnica foi validada em experimentos de campo e tem potencial aplicação em seleção de foco de TRM, comunicações submarinas e supressão de interferência [74-76].

Ao analisar o desempenho de detecção em banda larga de alvos móveis com TRA, os resultados de simulação indicam que, quando a frequência central é de 500Hz e a velocidade do alvo é inferior a 20 m/s, o efeito do movimento do alvo na TRA pode ser negligenciado [46]. A TRA é mais sensível ao movimento do alvo em ambientes onde o canal acústico varia com a distância (“*range dependent*”), em comparação com ambientes onde o canal acústico não varia com a distância. Jackson [56] também fornece uma fórmula de avaliação da sensibilidade da TRA ao movimento do alvo nas condições em que o canal acústico não varia com a distância.

A pesquisa relacionada à TRA no campo da detecção passiva ainda é limitada, e a literatura inclui poucas referências sobre este processo. Em [77] descreve-se as características de filtragem espacial do TRM com hidrofones e oferece uma introdução teórica e com análises de simulação sobre os efeitos ao combinar sinais de sensores espacialmente distribuídos, ganho de processamento, capacidade de detecção e robustez. Em [78] é estudada a combinação da técnica de TRM com a tecnologia de sensor vetorial, usando as propriedades de múltiplos caminhos coerentes do canal oceânico.

A técnica de PTRM tem a vantagem de necessitar de um menor número de elementos e ter menos restrições de aplicação, possuindo um potencial significativo de aplicação [79].

### 1.2.3 Principais direções de pesquisa em localização com TRM

A vertente ativa do TRM é majoritariamente utilizada nas pesquisas envolvendo localização de alvos [53-55]. Esta técnica possui características distintas: seu significado físico é claro, pois aproveita a reciprocidade na propagação da informação no ambiente marinho; não requer conhecimento prévio do ambiente marinho, o que simplifica significativamente o

processamento de sinais; além disso, a capacidade do TRM de se adaptar a ambientes adversos é proeminente, sendo mais eficaz em condições oceanográficas mais severas [69].

A localização com PTRM é uma extensão e derivação da técnica de TRM. Comparada ao método de localização ativo, a técnica de PTRM reduz a complexidade do processamento e não requer um arranjo de retransmissão de sinal [80]. Além disso, em cenários de aplicação de confronto entre forças inimigas e aliadas, o uso do PTRM pode garantir a segurança da própria embarcação por manter a furtividade.

Em um PTRM, o sinal recebido da fonte acústica é invertido no tempo e retransmitido virtualmente. Utilizando um modelo de propagação para reproduzir as condições ambientais, busca-se o ponto no espaço onde há a reconstrução do sinal transmitido, assumindo como posição da fonte o ponto onde há maior correlação entre o sinal real e o sinal reconstruído.

O PTRM é uma técnica na qual o processo de retransmissão temporal ocorre durante o processamento de sinais. Ela precisa inicialmente estabelecer modelos precisos de previsão do canal marinho e obter uma resposta impulsiva modelada do canal ajustada ao resultado medido no canal oceânico real. Somente quando o canal simulado corresponder ao canal submarino real, o processo de retransmissão temporal permitirá a localização passiva com maior precisão [69]. Isso é crucial para o desempenho do PTRM. Melhorar a tolerância do método passivo a imprecisão dos parâmetros ambientais é outra direção de pesquisa importante para o desenvolvimento futuro dessa técnica [81]. Problemas como o acompanhamento de alvos usando PTRM, algoritmos rápidos para reduzir a carga computacional e instalação de arranjos verticais também são tópicos de pesquisa nesta área [82].

O uso de TRM em comunicação submarina [12, 35] é outra aplicação importante e pode ser um ponto de entrada para a aplicação prática do PTRM. O canal acústico submarino pode ser representado como um processo estocástico, variável no tempo e no espaço, e a reflexão nas interfaces e a propagação de múltiplos caminhos resultam em múltiplas variáveis, que geram ISI, sendo uma das principais barreiras para a comunicação acústica submarina. Para alcançar comunicações com baixa taxa de erro, é essencial suprimir a ISI. A técnica de PTRM possui amplo potencial de aplicação na resolução desse problema e na melhoria da qualidade da comunicação [65].

## 1.3 Localização com MFP e com PTRM

As técnicas de MFP e de PTRM são ambos métodos de processamento de sinais para detecção e localização de alvos, e compartilham muitas semelhanças. Ambas as técnicas de localização combinam o processamento de sinais com a modelagem do ambiente marinho. A propagação do som no mar é complexa, e as técnicas de processamento de sinais sonoros baseadas na suposição de ondas planas simplificam a propagação no ambiente submarino.

O MFP é uma técnica de inversão acústica que utiliza uma solução completa da equação da onda para o campo acústico e explora a estrutura desse campo em um guia de ondas. A técnica envolve três componentes principais: o vetor de dados, o modelo do sinal recebido e a função de correlação [28].

O vetor de dados é uma amostra do sinal recebido no arranjo de sensores, que é contaminada por ruído e precisa ser processada para obter uma estimativa do sinal real. O modelo do sinal recebido inclui modelos matemáticos de propagação de ondas, do ambiente e, ocasionalmente, de ruído, produzindo réplicas do sinal amostrado sob diversas combinações de parâmetros. A função de correlação compara a estimativa do sinal amostrado com a réplica modelada. A máxima correlação ocorre quando o vetor de réplica iguala o vetor de dados.

O MFP calcula a energia do processador para diferentes vetores de réplica, mapeando-a em uma grade de parâmetros, como distância e profundidade, gerando uma superfície de ambiguidade. O máximo global dessa superfície indica a combinação de parâmetros que melhor corresponde à estimativa de localização da fonte sonora.

O método de localização utilizando o TRM se baseia na reciprocidade do campo sonoro. O método consiste em gravar o sinal acústico emitido por uma fonte sonora utilizando um arranjo de hidrofones. Esse sinal é então invertido no tempo e retransmitido, de modo que as ondas acústicas formem um foco na posição original da fonte. O TRM é particularmente eficaz em ambientes submarinos complexos, adaptando-se às variações do meio, como temperatura e salinidade, além de contornos geológicos e obstáculos físicos [84]. Ao reverter o caminho de propagação, as ondas acústicas conseguem focalizar no ponto de origem da fonte.

O PTRM é uma extensão da técnica de TRM, que herda e expande a técnica de localização de campo casado, alcançando a focalização na posição da fonte pelo processamento

de sinais combinado às características do ambiente submarino modelado [85]. Nele, o processo de retransmissão temporal é feito de forma virtual, utilizando um guia de ondas modelado para representar o canal oceânico real. Quando canal modelado coincide com o canal real ocorre o processo de focalização na posição de origem do sinal transmitido.

Observa-se que ambas as técnicas de localização exigem a criação de modelos precisos de propagação do canal marinho com base nas condições reais. Elas buscam criar um "canal virtual" por meio do processamento de sinais, simulando o processo de propagação do sinal e usando a correspondência (*matching*) para combinar com o sinal medido em campo.

Se o modelo não é uma representação precisa, ocorre um problema denominado desajuste de modelo que possui implicações quanto à robustez da técnica. Ambas as abordagens são sensíveis desajuste de modelo, o que é uma restrição importante para o desenvolvimento delas. Como o TRM utiliza a reciprocidade em um meio invariante no tempo, o desempenho pode ser degradado em um guia de ondas variável [86], onde as condições de propagação mudam durante o tempo entre a propagação direta de um sinal e a retropropagação do sinal invertido no tempo.

Devido à necessidade de utilização de modelos acústicos numéricos em ambas as abordagens, exige-se uma carga computacional que pode inviabilizar seus usos em aplicações de tempo real. Este fato é agravado à medida que se aumenta o número de sensores [7].

Por fim, o PTRM pode ser usado para localização passiva com apenas um hidrofone, enquanto a técnica de correspondência de campo geralmente requer dois ou mais elementos para localização de alvos [87]. Neste caso, o PTRM necessita do conhecimento prévio do sinal transmitido, o que pode ser dispensado com o incremento do número de hidrofones, o que além de melhorar a precisão do método, permite a comparação entre os sinais reconstruídos por cada elemento individualmente para o processamento da localização.

## 1.4 Principais conteúdos da dissertação

Esta pesquisa é centrada na modelagem teórica e pesquisa de algoritmos para a localização com PTRM. Ela inclui o emprego de simulações para avaliação do desempenho do

método de localização passiva e análise de dados experimentais, validando assim a correção e o valor dos algoritmos.

Os principais conteúdos deste trabalho incluem:

**A. Descrição dos modelos de propagação sonora e fundamentação teórica do PTRM**

O capítulo 2 apresenta os modelos que utilizam a equação da onda para descrever a propagação do som no mar. São derivadas as principais equações empregadas na modelagem do ambiente é descrito o princípio da reciprocidade, que serve de base para o emprego do TRM na localização de fontes.

**B. Modelagem de Localização por Inversão Temporal com Arranjo Vertical**

Através da análise teórica, o capítulo 3 apresenta o modelo do algoritmo de localização por inversão temporal para um arranjo vertical. Os algoritmos para arranjos verticais com um elemento e com múltiplos elementos são derivados e apresentados com seus respectivos diagramas de implementação.

**C. Processamento de Dados de Simulação para Localização com PTRM**

Após a apresentação dos algoritmos e dos diagramas de implementação, o capítulo 4 exibe o processamento de dados de simulação para os algoritmos de localização por inversão temporal, incluindo arranjos verticais com um elemento e com múltiplos elementos.

**D. Análise de Dados Experimentais para Localização com PTRM**

Com o objetivo de examinar a aplicação prática dos algoritmos de localização por TRM, foram analisados experimentos específicos para arranjos verticais. No capítulo 5, os algoritmos de TRM foram aplicados para análise de dados reais, avaliando a eficácia dos algoritmos em situações práticas.

## Capítulo 2

### Modelos de propagação acústica

A propagação do som no oceano é descrita matematicamente pela equação da onda, cujos parâmetros e condições de contorno descrevem o ambiente submarino. A combinação da propagação sonora no oceano com o processamento de sinais, resultou no desenvolvimento de diversos modelos de propagação. Os modelos de propagação geralmente são classificados em cinco tipos [45]:

- (1) Modelo de raios;
- (2) Integração do número de onda ou “Fast Field Program” (FFP);
- (3) Modos normais (NM);
- (4) Modelo de Equação Parabólica (PE).
- (5) Modelo de Elementos Finitos (FE)

Em geral, os modelos de propagação resolvem a equação da onda através de simplificações ou aproximações, de acordo com suas propostas. Por exemplo, situações em que as propriedades do ambiente não variam em distância (“*range independent*”) levam a soluções baseadas em modelos espectrais ou modos normais; problemas de alta frequência são tratados de forma eficaz com o modelo de raios; e o modelo NM é adequado para cálculos de alta precisão em baixas frequências [45].

Neste capítulo, a seção 2.1 descreve as equações matemáticas e aproximações utilizadas nos principais modelos de propagação. A seção 2.2 aborda o modelo de traçado de raios e a derivação das equações utilizadas no cálculo do campo sonoro. Na seção 2.3 é apresentado o Princípio da Reciprocidade do campo sonoro, que serve de base para a aplicação do TRM na localização de fontes.

## 2.1 Modelos de propagação

Para uma fonte acústica de intensidade unitária em um ambiente isotrópico, temos a Equação da onda de Helmholtz em Coordenadas Cartesianas:

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2(\mathbf{x})} p = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0), \quad (2 - 1)$$

onde  $\nabla^2$  é o operador Laplaciano, que representa a soma das segundas derivadas parciais do campo de pressão acústica em relação às coordenadas espaciais;  $p$  descreve a pressão acústica em um ponto específico do espaço;  $c(\mathbf{x})$  é a velocidade do som no ar e  $\omega$  é a frequência angular da fonte localizada em  $\mathbf{x}_0$ . A função delta de Dirac ( $\delta$ ) é zero em todos os pontos, exceto em  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ , onde ela é infinitamente grande, de forma que sua integral sobre o espaço é igual a um.

### I. Modelo de Raios

A solução da Equação (2-1) tem o seguinte formato [45]:

$$p(\mathbf{x}) = e^{i\omega\tau(\mathbf{x})} \sum_{j=0}^{\infty} A_j(\mathbf{x}) \frac{1}{(i\omega)^j} \quad (2 - 2)$$

Onde  $\tau$  representa o tempo e  $A_j$  a amplitude do campo acústico associada à trajetória do raio  $j$ . Substituindo a Equação (2 - 2) em (2 - 1) e igualando termos da mesma ordem em  $\omega$ , as seguintes equações para as funções  $\tau(\mathbf{x})$  e  $A_j(\mathbf{x})$  podem ser obtidas:

$$\begin{aligned} O(\omega^2) & : |\nabla\tau|^2 = c^{-2}(\mathbf{x}) \\ O(\omega) & : 2\nabla\tau \cdot \nabla A_0 + (\nabla^2\tau)A_0 = 0 \\ O(\omega^{1-j}) & : 2\nabla\tau \cdot \nabla A_j + (\nabla^2\tau)A_j = -\nabla^2 A_{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2 - 3)$$

A equação  $O(\omega^2)$  é conhecida como equação eikonal [45]. As equações restantes para  $A_j(\mathbf{x})$  são conhecidas como equações de transporte.

O modelo das trajetórias de raios fornece uma representação visual da propagação de energia sonora. A forma de onda da fonte se propaga ao longo das trajetórias dos raios, com atrasos iguais ao tempo de viagem, e a atenuação da energia sonora depende da extensão da linha do raio. Diferentes raios que chegam ao mesmo ponto podem ter tempos de chegada diferentes.

## II. Modelo de integração do número de onda (FFP – *Fast Field Program*)

Este modelo calcula o campo acústico usando a integração no número de onda. Usando a transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) o FFP pode avaliar diretamente a solução da integral para obter uma solução numérica da equação da onda.

O FFP pressupõe que o oceano seja estratificado horizontalmente (independente da distância) e que o campo sonoro seja composto de senos e cossenos, somados em uma série de Fourier. Quando a série inclui somas discretas de senos e cossenos com diferentes números de onda horizontal, elas se tornam integrais.

Para um meio isotrópico, o campo acústico em função do tempo  $e^{-i\omega t}$  na camada  $m$  contendo a fonte pode ser expresso em termos de potenciais escalares de deslocamento  $\psi_m(r, z)$ , que satisfazem a equação de Helmholtz:

$$[\nabla^2 + k_m^2(z)]\psi_m(r, z) = f_s(z, \omega) \frac{\delta(r)}{2\pi r}, \quad (2 - 4)$$

Onde  $r$  é a coordenada radial horizontal e  $z$  é a profundidade. Aplicando a transformada de Hankel, obtemos a equação da onda separada em profundidade:

$$\frac{d^2\psi_m(k, z)}{dz^2} + \left( \frac{\omega^2}{c^2(z)} - k^2 \right) \psi_m(k, z) = \frac{f_s(z)}{2\pi} \quad (2 - 5)$$

A resolução da equação de profundidade mencionada acima é crucial para o cálculo numérico do FFP. Para determinar os parâmetros do campo acústico em um receptor a uma distância  $r$  e profundidade  $z$ , deve-se realizar a transformada inversa de Hankel da solução da equação da onda separada em profundidade em  $z$  [45]:

$$g(r, z) = \int_0^\infty g(k_r, z) J_0(k_r r) k_r dk_r \approx \frac{e^{-i\pi/4}}{\sqrt{2\pi r}} \int_0^\infty g(k_r, z) \sqrt{k_r} e^{ik_r r} dk_r \quad (2 - 6)$$

Onde  $g(r, z)$  representa o parâmetro de interesse, como a pressão acústica;  $J_0(k_r r)$  é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero e  $k_r$  o número de onda na direção radial. A função exponencial é mais adequada para integração numérica do que a função de Bessel, especialmente em termos de tempo computacional.

A partir da Equação (2-6), pode-se observar a existência de um número de onda máximo  $k$ , acima do qual a contribuição para o campo sonoro é muito pequena. Essa integral é, na prática, uma FFT em distância, daí o nome FFP (Programa de Campo Rápido).

### III. Modos Normais (NM)

Partindo da Equação de Helmholtz em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(z)} p = \frac{\delta(r) \delta(z - z_s)}{2\pi r} \quad (2 - 7)$$

a solução pode ser dada pela soma dos modos normais [45]:

$$p(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m(r) \Psi_m(z) \quad (2 - 8)$$

Onde  $\Phi_m$  é a amplitude modal ou a função de modo no domínio radial para o modo  $m$ , e descreve como a amplitude da pressão acústica varia na direção radial para o modo  $m$ .  $\Psi_m$  é a função de modo na profundidade para o modo  $m$ , e descreve como a pressão acústica varia com a profundidade  $z$  para o modo  $m$ . Usando a técnica de separação de variáveis na equação de Helmholtz em duas dimensões, pode-se obter a equação modal, representada a seguir:

$$\rho(z) \frac{d}{dz} \left[ \frac{1}{\rho(z)} \frac{d\Psi_m(z)}{dz} \right] + \left[ \frac{\omega^2}{c^2(z)} - k_m^2 \right] \Psi_m(z) = 0 \quad (2 - 9)$$

$$\Psi(0) = 0, \quad \left. \frac{d\Psi}{dz} \right|_{z=D} = 0$$

Substituindo a Equação (2-8) em (2-7), e utilizando a Equação (2-9) para simplificar os termos, a função de distância  $\Phi_n(r)$  para o  $n$ -ésimo termo fica:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\Phi_n}{dr} \right) + k_n^2 \Phi_n = -\Psi_n(z_s) \frac{\delta(r)}{2\pi r \rho(z_s)} \quad (2 - 10)$$

Cuja solução é:

$$\Phi_n(r) = \frac{i}{4\rho(z_s)} \Psi_n(z_s) H_0^{(1)}(k_n r) \quad (2 - 11)$$

Sendo, por fim:

$$p(r, z) = \frac{i}{4\rho(z_s)} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_s) H_0^{(1)}(k_m r) \quad (2 - 12)$$

Ou usando a aproximação assintótica da função de Hankel:

$$p(r, z) \approx \frac{i}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_s) \Psi_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}} \quad (2 - 13)$$

NM e FFP são complementares. O modelo de modos normais é frequentemente usado para simulações de longo alcance e propagação de som em águas profundas. Ele se baseia na decomposição do campo sonoro em uma série de modos, cada um representando uma forma específica de propagação das ondas. O principal emprego do modelo de modos normais é em estudos de propagação de som em grandes distâncias e em águas profundas, onde a complexidade do ambiente acústico é alta e a resolução detalhada é necessária. Por outro lado, o programa de campo rápido (FFP) é frequentemente usado para simulações em curto alcance. O principal emprego do FFP é em estudos de propagação de som em águas rasas e em aplicações onde é necessária uma resposta rápida, como em sistemas de sonar de curto alcance [45].

#### IV. Equação Parabólica

Assumindo como a solução para a Equação de Helmholtz (2 - 1) [45]:

$$p(r, z) = \psi(r, z) H_0^{(1)}(k_0 r) \quad (2 - 14)$$

onde  $k_0$  é o número de onda de referência. Substituindo na Equação (2-1) e assumindo aproximações para o campo afastado, obtemos a equação parabólica:

$$2ik_0 \frac{\partial \psi(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi(r, z)}{\partial z^2} + k_0^2 (n^2 - 1) \psi(r, z) = 0 \quad (2 - 15)$$

Essa aproximação assume que a energia sonora se propaga ao longo de trajetórias quase horizontais, o que é válido em longas distâncias, pois as trajetórias de ângulo íngreme contribuem pouco devido às múltiplas interações com o fundo e superfície do mar.

## 2.2 O modelo de propagação de raios e o cálculo do campo sonoro

Dentre os quatro modelos mencionados na seção anterior, pode-se fazer as seguintes considerações:

- NM é principalmente aplicado a baixas frequências, enquanto o modelo de trajetórias de raios é aplicado a altas frequências;
- FFP geralmente requer várias execuções e exige a solução precisa de todas as frequências espectrais. Embora a FFT seja usada para integração, o cálculo é relativamente mais lento;
- A principal vantagem do NM é a alta precisão e o cálculo rápido em baixas frequências (poucos modos), sendo facilmente estendido para ambientes dependentes da distância em longas distâncias.

Para descrever a propagação de sons de alta frequência no oceano, a teoria dos raios é o modelo mais prático, sendo empregado na modelagem do ambiente para utilização do algoritmo de localização proposto neste estudo.

O modelo de propagação de raios representa o trajeto percorrido pela frente de onda como a distância percorrida pelas linhas de raio; o tempo experimentado pelas trajetórias das ondas sonoras como o tempo de propagação das linhas de raio; e a energia transportada pelos raios como a energia acústica propagada.

Para altas frequências, pode-se utilizar a seguinte aproximação [88]:

$$\left| \frac{\nabla^2 A(\vec{x})}{A(\vec{x})} \right| \ll \frac{\omega^2}{c^2} \quad (2 - 16)$$

De acordo com essa aproximação, a amplitude e a velocidade de propagação do som não devem variar significativamente em distâncias comparáveis ao comprimento de onda.

A Teoria de Raios teve origem na ótica, sendo estendida à acústica na metade do século XX [89]. Fundamenta-se na solução da Equação Eikonal para a fase da onda propagante e na Equação de Transporte para a amplitude da onda. A Equação Eikonal delinea a geometria dos raios, representando uma aproximação de alta frequência. Um tubo de raios é composto por um feixe de raios adjacentes, com a equação de Transporte expressando que a energia acústica ao longo de tal tubo permanece constante [90].

A Teoria de Raios é computacionalmente rápida e permite a incorporação dos efeitos das variações de velocidade do som e das variações de batimetria ao longo da distância [91]. Contudo, desvantagens substanciais residem na ocorrência de soluções descontínuas nas proximidades de pontos focais e cóusticas, além da incapacidade de lidar eficazmente com o fenômeno da difração.

Na seção anterior, a partir da Equação de Helmholtz e das aproximações para altas frequências, foi possível chegar às equações descritas em (2–3), sendo a Equação  $O(\omega^2)$  conhecida como Equação eikonal e as equações restantes conhecidas como equações de transporte.

## 2.2.1 Solução da Equação Eikonal

A Equação Eikonal pode ser simplificada da seguinte forma:

$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{c^2(x)} \quad (2 - 17)$$

A Equação Eikonal é uma equação diferencial parcial de primeira ordem, não linear, que pode ser resolvida pelo método das características [45]. O método das características introduz uma família de curvas (raios) que descrevem a evolução da frente de onda, e que são perpendiculares à frente de onda em todos os lugares.

Como  $\nabla\tau$  é um vetor perpendicular às frentes de onda, pode-se definir a trajetória do raio pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{d\vec{r}}{ds} = c\nabla\tau \quad (2-18)$$

Onde  $s$  é o comprimento do arco ao longo do raio. O fator  $c$  foi incluído na equação de modo que o vetor tangente ao longo do raio tenha comprimento unitário.

A fase ao longo do caminho de um raio pode ser determinada substituindo a Equação (2-18) em (2-17) para obter:

$$\nabla\tau \cdot \frac{1}{c} \frac{d\vec{r}}{ds} = \frac{1}{c^2} \quad (2-19)$$

E simplificando, obtemos:

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{1}{c} \Rightarrow \tau(s) = \int_0^s \frac{1}{c(s')} ds' \quad (2-20)$$

onde  $\tau(s)$  é o tempo de viagem ao longo do raio. Em um ambiente de múltiplos caminhos,  $\tau(s)$  é importante para estimar o tempo em que diferentes chegadas alcançam o receptor [88].

## 2.2.2 Equação dos Raios

A equação de caminho acústico determina a trajetória do raio sonoro. Em coordenadas cilíndricas  $(r,z)$ , a equação dos raios pode ser escrita da seguinte forma [45]:

$$\frac{dr}{ds} = c \xi(s), \quad \frac{d\xi}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial r}, \quad (2-21)$$

$$\frac{dz}{ds} = c \zeta(s), \quad \frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (2-22)$$

onde  $[r(s), z(s)]$  é a trajetória do raio em termos de distância e profundidade. A partir das equações acima, pode-se deduzir que:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{\zeta}{\xi} \quad (2-23)$$

$$\frac{d\xi}{dr} = \frac{c_r}{\xi c^3} \quad (2-24)$$

$$\frac{d\zeta}{dr} = \frac{c_z}{\xi c^3} \quad (2-25)$$

Ao derivar a Equação (2-23) em relação a  $r$ , obtemos:

$$\frac{d^2z}{dr^2} = \frac{\zeta_r \xi - \zeta \xi_r}{\xi^2} \quad (2-26)$$

Usando (2-24) e (2-25) para eliminar  $\zeta_r$  e  $\xi_r$ , temos:

$$\frac{d^2z}{dr^2} = \frac{-c_z + (\zeta/\xi)c_r}{\xi^2 c^3} \quad (2-27)$$

Substituindo a Equação (2-23) na Equação (2-27), chegamos a:

$$\frac{d^2z}{dr^2} = \left[ 1 + \left( \frac{dz}{dr} \right)^2 \right] \left[ -\frac{c_z}{c} + \left( \frac{dz}{dr} \right) \frac{c_r}{c} \right] \quad (2-28)$$

Essa equação descreve a profundidade em função da distância. Analogamente, invertendo as posições de  $r$  e  $z$ , pode-se obter uma equação diferencial da distância em função da profundidade:

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \left[ 1 + \left( \frac{dr}{dz} \right)^2 \right] \left[ -\frac{c_r}{c} + \left( \frac{dr}{dz} \right) \frac{c_z}{c} \right] \quad (2-29)$$

Essas equações descrevem a trajetória do raio sonoro. Quando um perfil de velocidade do som e um conjunto de valores iniciais para profundidade e ângulo inicial de partida são dados, resolver essa equação fornece a trajetória de propagação do raio. O cálculo das amplitudes dos raios é possível através da solução da equação de transporte.

### 2.2.3 Solução da Equação de Transporte

A pressão acústica ao longo do raio pode ser escrita como [92]:

$$P(s, \omega) = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{c(s) \cos(\theta_0)}{c_0}} \frac{1}{J} e^{-\omega\tau(s)} \quad (2-30)$$

Onde  $\theta_0$  é o ângulo de saída do raio sonoro,  $c_0$  é a velocidade do som na posição da fonte e  $\tau(s)$  é o tempo de percurso do raio.  $J$  representa a seção transversal do tubo de raios que liga a posição da fonte à posição do receptor. Os pontos onde  $J = 0$  definem as cáusticas do campo de pressão. A solução clássica falha na vizinhança de cáusticas ( $J = 0$ ). A aproximação de feixes Gaussianos permite ultrapassar essa falha ao substituir os raios da aproximação clássica por feixes cuja amplitudes decrescem segundo uma curva Gaussiana na perpendicular ao eixo de propagação [93].

Com a aproximação por feixes Gaussianos, a equação da pressão acústica se torna:

$$P(s, n) = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{c(s) \cos(\theta_0)}{c_0 q_{\perp}(s) q(s)}} e^{-j\omega \left[ \tau(s) + \frac{1}{2} \frac{p(s)}{q(s)} n^2 \right]} \quad (2 - 31)$$

Onde  $n$  é a distância até o centro do feixe Gaussiano,  $p(s)$  representa a curvatura da frente de onda,  $q(s)$  é a largura do feixe acústico na direção do feixe no ponto  $s$  e  $q_{\perp}(s)$  é a largura do feixe acústico na direção perpendicular à direção do feixe no ponto  $s$ . Esta aproximação é a base para o cálculo das amplitudes dos raios no programa TRACEO [92].

## 2.2.4 Os Autorraios

Os raios acústicos representam a trajetória de propagação da onda no meio, sendo perpendiculares à frente de onda. Os autorraios representam a parcela dos raios acústicos que se propagam a partir da fonte e atingem o ponto de recepção. O cálculo dos autorraios é essencial para a estimativa da resposta ao impulso do canal, e pode afetar diretamente a precisão e velocidade de processamento do algoritmo de localização proposto. Sob a condição de meio estratificado, para uma determinada função de distribuição de velocidade do som  $c(z)$ , se a fonte estiver localizada na posição  $(r_0, z_0)$ , onde a velocidade do som é  $c_0$ , e o ângulo de saída é  $\theta_0$ , então a trajetória de propagação e o tempo de propagação de qualquer ponto  $(r, z)$  são dados por [94]:

$$r = r_0 + \iint_{c_0}^c \frac{\cos \theta_0}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \theta_0}} dz \quad (2 - 32)$$

$$t = \frac{1}{c_0} + \iint_{c_0}^c \frac{n^2(z)}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2\theta_0}} dz \quad (2 - 33)$$

onde,  $n(z) = \frac{c_0}{c(z)}$  é o índice de refração.

Calculando os parâmetros de amplitude e tempo de propagação dos autorraios do ponto de origem até o ponto de recepção, a função de resposta ao impulso do canal multipercurso pode ser determinada da seguinte forma:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - \tau_i) \quad (2 - 34)$$

onde,

$N$ = número total de caminhos de raios que contribuem para o campo acústico;

$A_i$ = amplitude normalizada da pressão sonora do autorraio que chega ao ponto de recepção ao longo do  $i$ -ésimo caminho de propagação;

$\tau_i$ = tempo de percurso da onda sonora ao longo do  $i$ -ésimo caminho de propagação até o ponto de recepção;

Se a profundidade local, o perfil de velocidade do som, a geometria entre a fonte e o receptor, e o perfil da superfície e do fundo do mar forem conhecidos, os parâmetros dos autorraios podem ser calculados. Com esses parâmetros, a resposta ao impulso do sistema de múltiplos caminhos pode ser determinada usando a Equação (2-34), completando assim o modelo do canal.

## 2.3 Princípio de Reciprocidade do Campo Sonoro

O primeiro trabalho conhecido sobre reciprocidade foi realizado por Hermann von Helmholtz. Em um artigo publicado em 1860 [95], ele afirmou que o comportamento acústico dentro de tubos de extremidade aberta exibia reciprocidade. Mais tarde, ele formalizou sua expressão para fontes pontuais (omnidirecionais) e pressões pontuais (registradas por um microfone omnidirecional) na presença de qualquer número arbitrário e forma de espalhadores

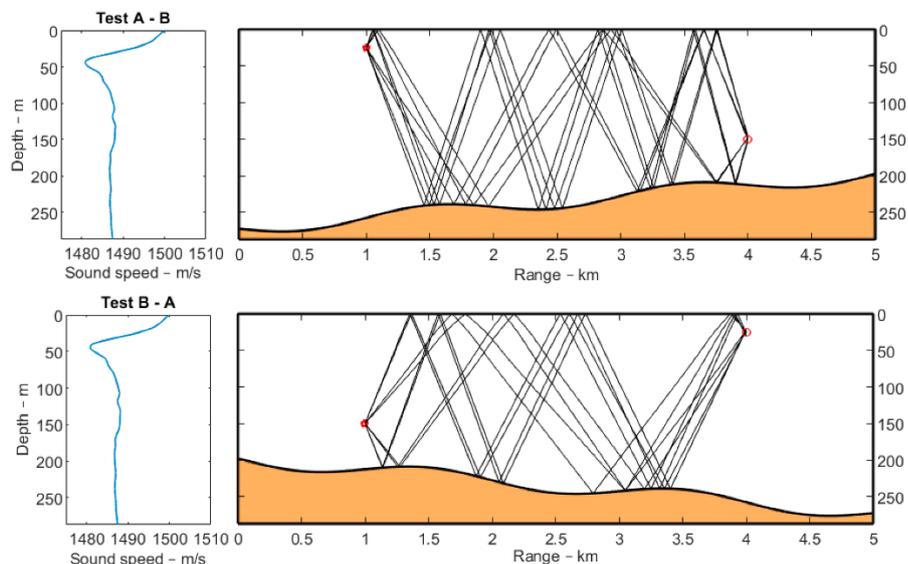
rígidos no fluido. No entanto, a proposição mais abrangente do princípio geral de reciprocidade para sistemas vibracionais foi apresentada por Lord Rayleigh em 1873 [96]. Ele apresentou uma teoria geral de reciprocidade vibracional aplicada a sistemas elásticos lineares distribuídos passivos com parâmetros físicos invariantes no tempo. Ele mostrou que, se uma força harmônica pontual é aplicada a uma coordenada e o deslocamento oscilatório é observado em outra, a razão complexa de deslocamento para força é invariante em relação à troca das coordenadas de entrada e saída.

O princípio de reciprocidade vibracional de Rayleigh é aplicável à acústica porque o ar em repouso é um fluido que se comporta como um meio elástico linear em resposta a pequenas perturbações aplicadas [97]. De acordo com o princípio da reciprocidade, sob as mesmas condições ambientais, se forem trocadas as posições entre uma fonte acústica elementar e um receptor, o sinal recebido permanecerá o mesmo [98].

A variável de entrada de uma fonte acústica elementar (fonte pontual) é a força da fonte  $Q$ , que é definida pela taxa de deslocamento de volume do fluido ao emitir o sinal. A variável de saída de hidrofone omnidirecional é a amplitude da pressão acústica aplicada pelo fluido. Assim, na acústica, a reciprocidade pode ser simplificada como [98]:

$$\frac{Q_A}{P_A(r)} = \frac{Q_B}{P_B(r)} \quad (2 - 35)$$

Figura 2.1 – A pressão sonora induzida no ponto B por uma fonte colocada no ponto A (a) é a mesma induzida no ponto A se a mesma fonte for colocada no ponto B. O traçado dos autorraios demonstra o cenário recíproco ao inverter as posições entre a fonte e o receptor.



Fonte: Hovem *et al.* [99].

Isto mostra que a razão entre a força da fonte (Q) e a amplitude da pressão (P) a uma distância  $r$  da fonte é a mesma para todas as fontes (na mesma frequência) no mesmo meio.

Assim, se considerarmos um meio acústico em repouso, ondas acústicas podem ser excitadas em qualquer ponto A e a pressão sonora resultante observada em um segundo ponto B são as mesmas, como teria sido em A, se B fosse a fonte acústica, conforme observado no traçado dos autorraios representado na Figura 2.1. Esta afirmação foi provada para meios arbitrariamente reflexivos, mesmo na presença de perdas por absorção [100].

O princípio de reciprocidade acústica também pode ser descrito em termos da função de Green, que é uma solução para a equação da onda não homogênea. A simetria da função de Green é um resultado do princípio geral de reciprocidade da acústica linear [45]. Sejam  $G_\omega(r, r_1)$  e  $G_\omega(r, r_2)$  duas funções de pressão de Green que satisfazem as equações diferenciais:

$$\rho(r)\nabla \cdot [\rho^{-1}(r)\nabla G_\omega(r, r_1)] + k^2 G_\omega(r, r_1) = -\delta(r - r_1)$$

$$\rho(r)\nabla \cdot [\rho^{-1}(r)\nabla G_\omega(r, r_2)] + k^2 G_\omega(r, r_2) = -\delta(r - r_2)$$

Multiplicando a primeira equação por  $G_\omega(r, r_2)$  e a segunda por  $G_\omega(r, r_1)$ , e subtraindo as duas, seguido pela integração sobre um volume  $V'$ , obtemos:

$$\frac{G_\omega(r_1, r_2)}{\rho(r_1)} - \frac{G_\omega(r_2, r_1)}{\rho(r_2)} = \int_{V'} \{G_\omega(r', r_2)\nabla \cdot [\rho^{-1}(r')\nabla G_\omega(r', r_1)] - G_\omega(r', r_1)\nabla \cdot [\rho^{-1}(r')\nabla G_\omega(r', r_2)]\} dV' \quad (2 - 36)$$

Usando integração por partes na forma da identidade de Green:

$$\int_V g\nabla \cdot f dV = - \int_V (\nabla g) \cdot f dV + \oint_S gf \cdot n dS \quad (2 - 37)$$

Com  $f = \rho^{-1}\nabla G_\omega$ , pode-se alterar a integral de volume para uma integral de superfície sobre a superfície  $S'$  do volume  $V'$ :

$$\frac{G_{\omega}(r_1, r_2)}{\rho(r_1)} - \frac{G_{\omega}(r_2, r_1)}{\rho(r_2)} = \int_{S'} \left\{ G_{\omega}(r', r_2) \rho^{-1}(r') \frac{\partial G_{\omega}(r', r_1)}{\partial n} - G_{\omega}(r', r_1) \rho^{-1}(r') \frac{\partial G_{\omega}(r', r_2)}{\partial n} \right\} dS' \quad (2 - 38)$$

Assim, a função de Green satisfaz a relação de reciprocidade:

$$\rho(r_2)G_{\omega}(r_1, r_2) = \rho(r_1)G_{\omega}(r_2, r_1) \quad (2 - 39)$$

se existir uma fronteira  $S'$  onde  $G_{\omega}$  satisfaz as condições de contorno da fórmula:

$$\frac{\partial G_{\omega}(r', r)}{\partial n} - \eta(r')G_{\omega}(r', r) = 0 \quad (2 - 40)$$

Onde  $\eta(r')$  é um fator arbitrário.

As condições de contorno incluem tanto a condição de contorno de Dirichlet (onde  $\eta(r') = \infty$ ), quanto a condição de contorno de Neumann (onde  $\eta(r') = 0$ ).

A partir da função de Green, pode-se observar que o campo sonoro gerado por uma fonte depende apenas das posições relativas entre a fonte e o ponto de recepção. Se a fonte for colocada no ponto de recepção e vice-versa, o resultado será o mesmo. Isso é conhecido como o princípio de reciprocidade do campo sonoro [45]. Este princípio é uma característica de acústica linear, e indica a reversibilidade da propagação do campo sonoro entre dois pontos.

## 2.4 Conclusão do Capítulo

Este capítulo descreveu os modelos de propagação sonora e derivou as equações utilizadas pelo modelo de raios para cálculo do campo sonoro. Foram fornecidas as equações empregadas no cálculo das amplitudes e atrasos dos autorraios e para a obter a resposta ao impulso do ambiente simulado. Por fim, foi apresentado o Princípio da Reciprocidade, que serve de fundamentação teórica para o método de localização proposto neste trabalho.

## Capítulo 3

### Localização de fontes com PTRM

O princípio físico por trás da localização com TRM é bastante intuitivo, utilizando a reciprocidade do campo sonoro para realizar um foco na posição da fonte sonora. A localização passiva com PTRM é uma técnica que utiliza o processamento de sinais para realizar o mesmo processo de reenfoque, economizando em hardware, reduzindo custos e mantendo a furtividade.

Este capítulo se dedica à derivação e apresentação do algoritmo de localização passiva com espelhos temporais para um único hidrofone e um arranjo linear de hidrofones. A seção 3.1 descreve os procedimentos para a localização de fontes com um único elemento de recepção. A seção 3.2 expande o método de localização para um arranjo de recepção com múltiplos elementos. Na seção 3.3 é discutido o ganho do arranjo e em 3.4 é equacionado o campo sonoro para cada elemento do arranjo.

#### 3.1 Localização com TRM de um único elemento

O uso de um único transdutor oferece vantagens como a redução de custos (com menos elementos necessários), menor complexidade de operação (pois não necessita de sincronização entre elementos) e menor espaço físico necessário para implementação. Esta seção discute o método de localização de fontes com TRM com o uso de um único transdutor.

##### 3.1.1 TRM com um único elemento

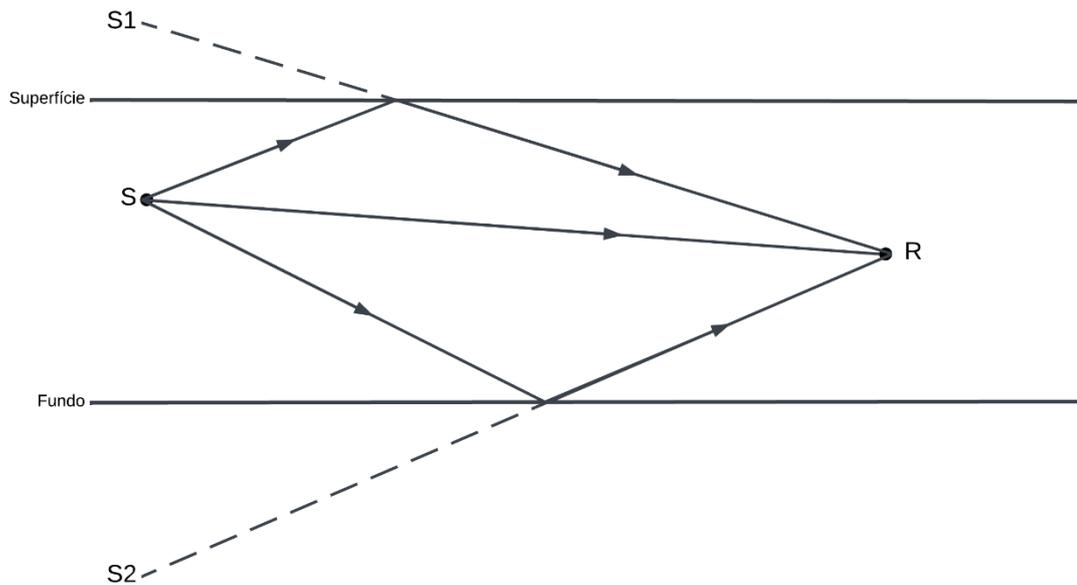
O TRM de um único elemento se refere à técnica de reenviar o sinal recebido após invertê-lo, formando automaticamente um foco na posição original da fonte. Este método de localização ativa supera os efeitos de múltiplos caminhos do sinal e pode utilizar a reciprocidade do canal para alcançar o foco automático com um único transdutor.

Considerando um guia de onda estacionário (em que as características físicas, como impedância e velocidade de propagação do som, permanecem constantes ao longo de sua extensão), como mostrado na Figura 3.1, onde a densidade do meio  $\rho$  e a velocidade do som  $c$  são assumidas constantes durante o tempo. O guia de onda possui uma fonte de emissão  $S$  e um receptor  $R$ , com múltiplos caminhos de propagação entre eles. Para simplificar a descrição, apenas três trajetórias de propagação sonora são mostradas (direta, reflexão única no fundo e reflexão única na superfície). A teoria dos raios mostra que o campo sonoro é a soma das contribuições dos raios sonoros [101], podendo ser considerado que cada raio é emitido da fonte ou de uma fonte virtual (imagem) formada na superfície ou no fundo.

Na Figura 3.1,  $S1$  e  $S2$  são fontes virtuais que correspondem à fonte  $S$ . O som refletido uma vez na superfície do mar é equivalente a um sinal emitido pela fonte virtual  $S1$ , com intensidade igual à intensidade do sinal emitido pela fonte  $S$ , mas com fase oposta. O som refletido uma vez no fundo do mar é equivalente a um sinal emitido pela fonte virtual  $S2$ , com intensidade igual à intensidade do sinal emitido pela fonte  $S$ , exceto pela perda na reflexão no fundo do mar, e com uma diferença de fase  $\alpha$  associada a ela. O ponto de recepção  $R$  recebe um sinal cuja intensidade é a soma fasorial das intensidades dos sinais emitidos pelas fontes  $S$ ,  $S1$  e  $S2$ , após a atenuação correspondente de cada caminho de propagação, considerando o tempo de chegada e duração do respectivo sinal.

Da mesma forma, quando existem mais caminhos do que os três considerados aqui, o ponto de recepção  $R$  também recebe um sinal que pode ser considerado equivalente à emissão de vários sinais virtuais de um transdutor único após a atenuação correspondente de cada caminho de propagação. Portanto, em um ambiente submarino com múltiplos caminhos, a emissão de sinal de um transdutor é equivalente à emissão de um sinal de um conjunto virtual de transdutores, verticalmente alinhados.

Figura 3.1 – Propagação de 3 raios (direto, refletido na superfície e refletido no fundo) a partir da fonte S e recebidos em R. Os multicaminhos provenientes das reflexões podem ser vistos como raios propagados a partir de fontes virtuais espelhadas pelas interfaces.



Fonte: elaborado pelo autor.

A técnica de TRM consiste em, ao receber o sinal em R, invertê-lo e retransmiti-lo posteriormente. De acordo com o princípio da reciprocidade do campo sonoro, o sinal retransmitido por R continuará a se propagar pelos caminhos mostrados na Figura 3.1. Nesse momento, a recepção pode ser equivalente à recepção por um arranjo virtual vertical composto por S, S1 e S2, pois o sinal retransmitido é inverso ao sinal recebido. Dessa forma, S, S1 e S2 receberão sinais em fase, resultando em uma sobreposição coerente e formando um ponto focal em S. No ponto S o sinal é recuperado, sendo máxima a correlação entre o sinal recuperado e o sinal transmitido. Portanto, a técnica de TRM possui a característica de compensar automaticamente as diferenças nos atrasos de propagação, apresentando a propriedade de focagem automática para os multicaminhos.

Assim, em um canal multicaminho, a focalização do TRM para um único transdutor é equivalente à focalização de um arranjo virtual vertical com esse transdutor como um de seus elementos. Essa é a base fundamental para a focalização do TRM com um único elemento. Cada trajetória de propagação sonora corresponde a um elemento de arranjo virtual, e quanto

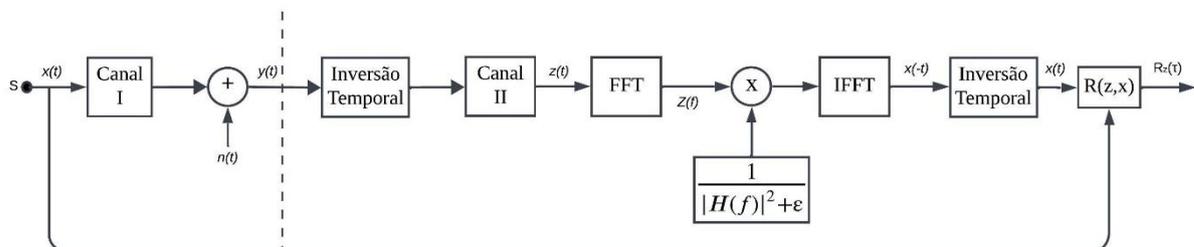
mais trajetórias, mais elementos virtuais teremos no arranjo vertical. Os ganhos do processamento do espelho temporal serão discutidos nas próximas seções.

### 3.1.2 PTRM com um Único Sensor

O PTRM se refere à implementação do processo de retransmissão temporal usando técnicas de processamento de sinal, podendo ser interpretado como uma "retransmissão virtual". Enquanto o TRM não requer conhecimento da estrutura do canal oceânico, sendo automaticamente focalizado, o PTRM precisa construir um canal virtual (bidimensional no espaço). Quando o canal virtual coincide com o canal real, a técnica de PTRM atinge o mesmo efeito de focalização automática do espelho temporal ativo, permitindo a localização do alvo.

A Figura 3.2 apresenta o diagrama de blocos do processamento do PTRM. À esquerda da linha pontilhada está o processo de recebimento do sinal pelo hidrofone após percorrer o canal submarino multicaminho. À direita da linha pontilhada está o processo virtual de retransmissão. No PTRM, o Canal II representa o canal virtual modelado. Durante a busca em uma faixa predefinida de distância e profundidade, amostras da função de transferência do Canal II são coletadas. Quando o Canal II virtual coincide com o Canal I real, ocorre a focalização de saída. A distância e profundidade onde o pico de focalização aparece são usadas para estimar a posição do alvo.

Figura 3.2 – Diagrama de blocos representando o método do TRM para localização de fontes utilizando um único elemento.



Fonte: elaborado pelo autor.

Suponha que o sinal emitido pela fonte sonora  $S$  seja conhecido e igual a  $x(t)$ , e as respostas ao impulso dos canais I e II sejam  $h_1(t)$  e  $h_2(t)$ , respectivamente. Para simplificar a

expressão, inicialmente, vamos ignorar a influência do ruído local, representado por  $n(t)$ . Então, o sinal recebido pelo hidrofone R pode ser expresso como:

$$y(t) = x(t) * h_1(t) \quad (3 - 1)$$

A saída  $z(t)$  do Canal II é dada por:

$$z(t) = x(-t) * h_1(-t) * h_2(t)$$

Fazendo a Transformada de Fourier de  $z(t)$ , obtemos:

$$Z(f) = X^*(f) \cdot H_1^*(f) \cdot H_2(f)$$

Quando o canal II é idêntico ao canal I,  $H_1(f) = H_2(f)$ , e a equação se torna:

$$Z(f) = X^*(f) \cdot H_1^*(f) \cdot H_1(f) \quad (3 - 2)$$

$$Z(f) = X^*(f) \cdot |H(f)|^2$$

$$X^*(f) = \frac{Z(f)}{|H(f)|^2 + \varepsilon} \quad (3 - 3)$$

A constante  $\varepsilon$  corresponde a um valor muito pequeno, que é inserido na equação de modo a evitar uma possível divisão por zero. A partir de (3-3) é possível recuperar o sinal transmitido:

$$IFFT\{X^*(f)\} = x(-t) \quad (3 - 4)$$

Invertendo o sinal recuperado no tempo, pode-se obter o sinal original.

Para o processamento da localização passiva, após a inversão do sinal recebido no tempo, o sinal não é retransmitido para o oceano da mesma forma que no modo ativo, mas sim através de um processo de retransmissão virtual, utilizando um modelo de propagação.

Quando o canal II é igual ao canal I, o algoritmo de localização realiza o foco na posição de origem do sinal, e as coordenadas correspondentes ao ponto focal são as coordenadas da posição da fonte sonora S. Este é o princípio básico da localização passiva com espelho de tempo, e o princípio de reciprocidade do campo sonoro no oceano é a base física para a detecção e localização de alvos.

A previsão de  $h_2(t)$  (resposta ao impulso do canal simulado) é crucial para a técnica de localização passiva com PTRM. Quando esta variável é convoluída com o sinal de recepção do hidrofone invertido no tempo, o processo de retransmissão do TRM pode ser realizado.  $H_{(i,j)}(f)$  é a resposta em frequência do canal de propagação em um ponto no espaço (representado bidimensionalmente por profundidade e distância) até o hidrofone receptor. Quando um desses canais de propagação coincide com o canal de transmissão real, a correlação do sinal de saída atinge o máximo, ou seja, atinge a localização do alvo.

É importante observar que, para o processamento da localização passiva com o PTRM, há necessidade de se conhecer previamente o sinal transmitido, sendo a posição da fonte transmissora obtida através da correlação entre o sinal recuperado e a réplica do sinal transmitido.

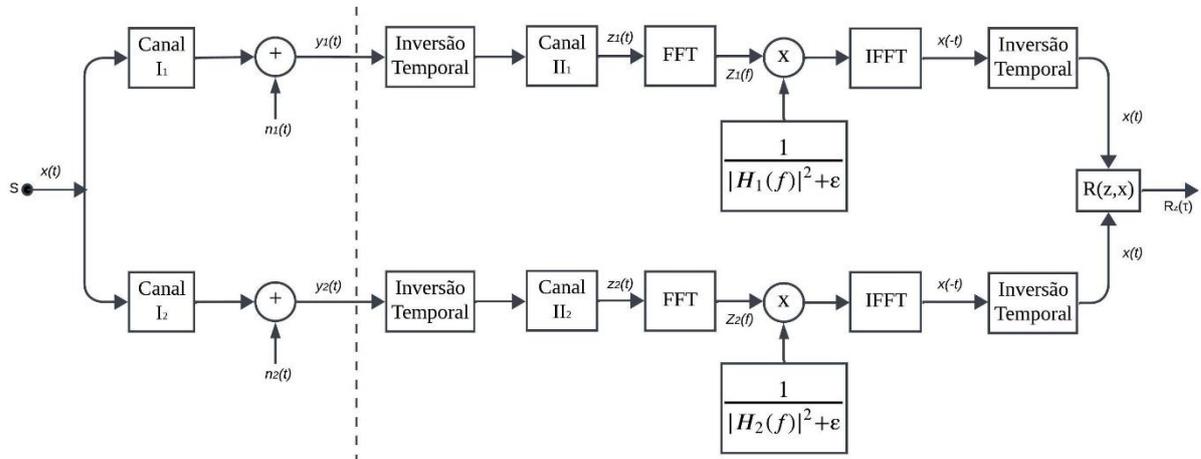
O alcance da busca (região) e o passo da busca determinam o tamanho do cálculo da operação do PTRM. Quanto maior o alcance da busca e menor o passo de busca (bidimensional de profundidade e distância), mais pontos precisam ser calculados, e, portanto, maior será a quantidade de operações necessárias. Determinar adequadamente o passo da busca e a região de busca é uma questão a ser aprofundada em pesquisas futuras.

## 3.2 Localização com PTRM e múltiplos sensores

O diagrama do princípio para a detecção de alvos usando o PTRM em um arranjo com 2 hidrofones é mostrado na Figura 3.3. Os canais  $I_1$  e  $I_2$  representam o canal acústico oceânico real, enquanto os canais  $II_1$  e  $II_2$  são canais simulados no processamento de sinal. O sinal é emitido pela fonte sonora S, propagando-se pelos canais oceânicos  $I_1$  e  $I_2$  até os pontos de recepção (hidrofones)  $R_1$  e  $R_2$ . Os sinais recebidos e a interferência local  $n_i(t)$  se somam para formar o sinal recebido pelos hidrofones, ou seja,  $y_1(t)$  e  $y_2(t)$ . No processamento do PTRM, os sinais  $y_1(t)$  e  $y_2(t)$  são primeiro invertidos no tempo, e então, ao contrário do modo ativo que re-irradia o sinal para o oceano, eles passam pelos canais simulados  $II_1$  e  $II_2$ . Isso permite simular o processo de retransmissão ativa usando a inversão de tempo em um computador. Após o processamento passivo do TRM, a saída para cada ponto espacial no oceano (dividido com passos pré-definidos) é  $z_1(t)$  e  $z_2(t)$  e, como os componentes do sinal são correlacionados enquanto os componentes de ruído são não correlacionados, os sinais de saída são somados e o

resultado dessa soma é submetido à correlação cruzada com a réplica do sinal transmitido. De acordo com o princípio de focagem do TRM, o ponto espacial que maximiza a correlação da saída do processo do espelho temporal é a estimativa da posição da fonte sonora  $S$ .

Figura 3.3 – Diagrama de blocos representando o método do TRM para localização de fontes utilizando um arranjo com 2 elementos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Partindo da perspectiva dos sistemas lineares invariantes no tempo, é possível fornecer uma breve explicação dos métodos mencionados.

Utilizando  $x(t)$  para representar o sinal transmitido, e  $h_{1i}(\tau_1, r_0, d_0)$  para representar a função de resposta ao impulso do canal I, onde  $(r_0, d_0)$  são as coordenadas da fonte sonora  $S$ , representando a distância horizontal da fonte para o hidrofone de recepção e a distância vertical até o plano do mar (profundidade do alvo).

Assim, após a transmissão pelo canal, a saída do sinal  $y_i(t)$  pode ser expressa como:

$$y_i(t) = h_{1i}(t) * x(t) \quad (3 - 5)$$

Invertendo no tempo o sinal de recepção do hidrofone na posição  $i$ ,  $y_i(t)$ , obtemos:

$$y_i(-t) = h_{1i}(-t) * x(-t) \quad (3 - 6)$$

Usando  $h_{2i}(\tau_2, r_i, d_i)$  para representar a função de resposta ao impulso do canal II, onde  $r_1$  é a distância horizontal do ponto de observação em relação ao receptor e  $d_i$  é a profundidade do ponto de observação. Como mencionado anteriormente, o canal II não é um canal acústico submarino real, mas sim um canal simulado. Se não houver erro de modelagem,

esse canal deve ser idêntico ao canal real. O sinal retransmitido através do canal II, após a simulação do canal, é representado por:

$$z_i(t) = h_{1i}(-t) * h_{2i}(t) * x(-t) \quad (3 - 7)$$

Onde  $z_i(t)$  representa o sinal recebido na posição da fonte. Fazendo a Transformada de Fourier do sinal  $z_i(t)$ , a equação se torna:

$$Z_i(f) = H_{1i}^*(f) \cdot H_{2i}(f) \cdot X^*(f) \quad (3 - 8)$$

Quando o canal II é idêntico ao canal I,  $H_{1i}(f) = H_{2i}(f)$ . A Equação (3-8) se torna:

$$Z_i(f) = X^*(f) \cdot |H_{1i}(f)|^2$$

$$X^*(f) = \frac{Z_i(f)}{|H_{1i}(f)|^2 + \varepsilon} \quad (3 - 9)$$

Na Equação 3-9, a constante  $\varepsilon$  corresponde a um valor muito pequeno, inserido de modo a evitar divisões por zero. Quando  $r_i \neq r_0$  ou  $d_i \neq d_0$ , os canais não estão em correspondência, fazendo com que a correlação entre o sinal transmitido e o sinal recuperado não seja máxima (o sinal recuperado não é igual ao sinal transmitido). A equação (3-9) indica que é possível recuperar a forma original do sinal  $x(t)$  através da Transformada inversa de Fourier. Isto demonstra que o TRM é capaz de reconstruir a forma de onda do sinal original.

Na presença de mais de um hidrofone, o sinal reconstruído na posição de origem da fonte a partir dos múltiplos hidrofones pode ser obtido adicionando os sinais recuperados individualmente. Neste caso, semelhante ao método de localização com apenas 1 sensor, há necessidade do conhecimento prévio do sinal transmitido, que será correlacionado com o sinal reconstruído para estimar a posição da fonte.

No entanto, caso o sinal transmitido seja desconhecido, utilizando um arranjo de sensores é possível aplicar o método de localização por PTRM através da correlação cruzada entre os sinais recuperados individualmente por cada hidrofone. Pelo princípio do foco na posição da fonte transmissora, a correlação entre os sinais recuperados será máxima na posição da fonte. Esta abordagem alternativa é um método a ser aprofundado em pesquisas futuras.

### 3.3 Discussão sobre modelagem de canal e o ganho do arranjo

O canal é o meio pelo qual as ondas acústicas se propagam entre dois pontos no espaço. O modelo de canal e as fórmulas de cálculo adotados pelo TRM de dois elementos são os mesmos que os utilizados no processamento de um único hidrofone, conforme descrito na Seção 3.1.2. Para um arranjo de dois elementos, a colocação dos dois elementos se reflete na profundidade do arranjo verticalmente. Portanto, para uma mesma fonte transmissora, os canais correspondentes aos N elementos diferentes no arranjo de recepção terão funções de transferência (canais) diferentes.

Uma combinação coerente dos sinais de saída de cada sensor pode permitir um incremento na relação sinal-ruído, ou seja, ao combinar todas as medições, deseja-se reforçar o sinal de interesse e atenuar os ruídos indesejáveis [102].

O ganho do arranjo pode ser definido como a melhoria na relação do sinal-ruído de um arranjo comparada à relação sinal-ruído obtido por apenas um hidrofone (o elemento central do arranjo), conforme simplificada na seguinte equação [103]:

$$AG = 10 \log \frac{SNR_A}{SNR_0} \quad (3 - 10)$$

Para um arranjo de recepção composto por M elementos, a relação sinal-ruído na saída do arranjo é a relação entre a parte de sinal e a parte de ruído da potência. Para cada saída  $s_i(t)$ , temos:

$$SNR = \frac{E[\sum_{i=1}^M |s_i(t)|^2]}{E[\sum_{i=1}^M |n_i(t)|^2]} \quad (3 - 11)$$

Supondo que as médias e variâncias do sinal  $x(t)$  e do ruído  $n_i(t)$  sejam:

$$E[x(t)] = 0; \quad Var[x(t)] = \sigma_s^2; \quad E[n_i(t)] = 0; \quad Var[n_i(t)] = \sigma_n^2$$

Quando temos um único hidrofone com o espelho temporal passivo, o sinal recebido é dado por  $y(t) = x(t) * h(t)$ , e a média e a variância do sinal recebido são:

$$E[y(t)] = 0; \quad Var[y(t)] = E[y^2(t)] - E^2[y(t)] = E[y^2(t)]$$

Portanto, a relação sinal-ruído na entrada do único hidrofone é:

$$SNR_0 = 10 \log \frac{E[y^2(t)]}{\sigma_n^2} \quad (3 - 12)$$

Considerando a contribuição individual na composição do sinal de saída, podemos descrever:

$$SNR_0 = 10 \log \frac{E[y^2(t)]}{\sigma_n^2} \approx 10 \log \frac{\sigma_s^2 \cdot A_i^2}{\sigma_n^2} \quad (3 - 13)$$

Sendo a pressão acústica de saída composta pela soma das contribuições individuais dos sinais que chegam até o ponto de recepção, a relação sinal-ruído na saída é dada por:

$$SNR_A \approx 10 \log \frac{(\sum_{i=1}^M A_i^2) \cdot \sigma_s^2}{\sigma_n^2} \quad (3 - 14)$$

O ganho de processamento para um arranjo de  $M$  hidrofones é:

$$\begin{aligned} AG &= 10 \log \frac{SNR_A}{SNR_0} \\ &= 10 \log \left\{ \frac{(\sum_{i=1}^M A_i^2) \cdot \sigma_s^2 \cdot \sigma_n^2}{\sigma_n^2 \cdot A_i^2 \cdot \sigma_s^2} \right\} \\ &= 10 \log \left( \frac{\sum_{i=1}^M A_i^2}{A_i^2} \right) \end{aligned} \quad (3 - 15)$$

Considerando  $A_i = a \forall i$ , podemos reduzir a:

$$AG = 10 \log M \quad (3 - 16)$$

Onde  $M$  é o número de elementos no arranjo.

Considerando as contribuições individuais dos autorraios na composição do sinal de saída em um único hidrofone, projetando um arranjo virtual conforme descrito na figura 3.1, pode-se inferir que, quanto mais caminhos de propagação de sinal existirem no canal, maior será o ganho de processamento do espelho temporal, o que é consistente com as conclusões da Seção 3.1.1.

Para um arranjo de múltiplos elementos, assumindo que as interferências entre os elementos são mutuamente independentes, o ganho de saída é expresso como a soma do ganho do arranjo e do ganho do processamento de sinal do elemento.

### 3.4 O campo sonoro em um arranjo de múltiplos hidrofones

Esta seção utiliza a teoria das ondas para descrever o processamento de sinal do TRM, que é complementar à teoria de raios. As leis fundamentais da acústica linear em um meio fluido ideal podem ser descritas pela equação da onda, dada por:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{p} = 0 \quad (3 - 17)$$

Onde:

$\nabla^2$  - é o operador Laplaciano, que tem diferentes formas em diferentes sistemas de coordenadas.

$\mathbf{p}$  - é a pressão acústica.

$c$  - é a velocidade do som, que é uma função da posição.

$t$  - é o tempo.

Sendo a fonte sonora uma fonte pontual, localizada em  $r_0$ , que emite uma onda com a força da fonte  $Q_\omega$ , a equação da onda pode ser simplificada para a equação de Helmholtz, no domínio da frequência:

$$[\nabla^2 + k^2]\psi(\mathbf{r}, \omega) = Q_\omega \delta(\mathbf{r} - r_0) \quad (3 - 18)$$

Usando a função de Green  $G_\omega(r, r_0)$  para representar o campo sonoro do j-ésimo elemento do arranjo de recepção, podemos substituir na equação anterior para obter [20]:

$$[\nabla^2 + k^2(z_j)]G_\omega(r, r_0) = -\delta(\mathbf{r} - r_0) \quad (3 - 19)$$

Onde:

- $k^2(z) = \omega^2/c^2(z)$ ;
- $\omega$  é a frequência angular da fonte sonora;
- $r$  é a posição do j-ésimo elemento do array de recepção;
- $r_0$  é a posição da fonte sonora;
- $z_j$  é a profundidade do j-ésimo elemento do array de recepção.

Como a Equação (3-18) é uma relação no domínio da frequência, podemos supor que  $Q(\omega)$  seja a transformada de Fourier do sinal emitido pela fonte sonora. Através da transformada inversa de Fourier, podemos obter a expressão temporal do campo sonoro no local do j-ésimo elemento do array:

$$P(r; t) = \frac{1}{2\pi} \int G_\omega(r, r_0) Q(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3 - 20)$$

Supondo que a pressão sonora seja nula em  $(0, \tau)$  no momento da emissão do sinal, a inversão temporal do sinal no j-ésimo elemento do array pode ser representada por  $P(r, z_j; T - t)$ , onde  $T > 2\tau$ , para garantir a causalidade do sistema. A expressão para  $P(r, z_j; T - t)$  pode ser dada por:

$$P(r, z_j; T - t) = \frac{1}{2\pi} \int G_\omega(r, r_0) Q(\omega) e^{i\omega(T-t)} d\omega \quad (3 - 21)$$

O processo de TRM é um processo similar ao de filtro casado. No entanto, esse filtro de correspondência não é aplicado ao sinal transmitido, mas sim ao canal de transmissão da onda sonora, ocorrendo a correspondência apenas na posição original da fonte emissora, permitindo a focalização da energia do sinal após a inversão temporal. Além disso, cada elemento do arranjo vertical passa pelo processo de inversão, reforçando o efeito de focalização e melhorando a reconstrução do sinal.

## 3.5 Conclusão do Capítulo

Este capítulo derivou algoritmos de localização e fórmulas de processamento de sinal para o espelhamento temporal com hidrofones. Além disso, foram fornecidos diagramas de blocos de processamento de sinal para o espelhamento temporal com um único sensor e um arranjo binário, elucidando os métodos de processamento para a localização com o TRM. Por meio dessa derivação teórica, um modelo de algoritmo foi estabelecido, proporcionando uma base para o processamento subsequente de dados de simulação e testes no mar do algoritmo de espelhamento temporal.

## Capítulo 4

# Localização de fontes usando PTRM com dados simulados

O algoritmo de localização com PTRM é proposto com base na derivação teórica descrita no capítulo 3. Para avaliar sua viabilidade, é comum validar o algoritmo usando dados de simulação. Ao processar dados de simulação com resultados conhecidos, o objetivo é verificar a eficácia do algoritmo. Simultaneamente, essa abordagem permite verificar a precisão da implementação dos códigos. O estudo de simulação com o algoritmo TRM se concentra principalmente na simulação de canais e na geração de dados de simulação. Ao analisar o sinal de uma fonte sonora simulada e aplicar o processo de inversão temporal em um canal conhecido, é possível realizar a focalização na posição da fonte, alcançando a localização bidimensional (distância e profundidade). Se os resultados de localização coincidirem com os resultados esperados, isso comprova a corretude do algoritmo e dos códigos.

As seções deste capítulo consistem em quatro partes. A primeira parte apresenta as condições de simulação e os resultados da aplicação do algoritmo para um único hidrofone. A segunda parte detalha os efeitos da introdução do ruído ao processamento de simulação. A terceira parte apresenta os resultados do processamento de simulação do TRM com um arranjo vertical de sensores. A quarta parte analisa o impacto dos erros na modelagem dos parâmetros do guia de ondas sobre a precisão do algoritmo e fornece conclusões do processamento de simulação.

## 4.1 Simulação de Localização com PTRM para um Único Hidrofone

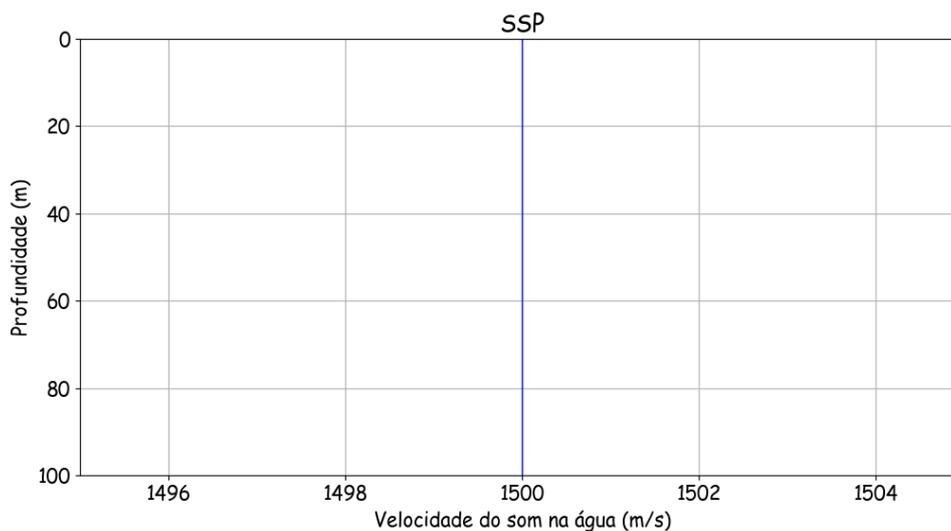
A técnica de localização PTRM depende do conhecimento dos parâmetros de propagação oceânica. No entanto, é capaz de localizar um alvo com um único hidrofone. Assim, para problemas de detecção e localização de sinais sob condições de limitação de espaço e alto

ruído, PTRM possui aplicabilidade promissora, como em cenários de uso para drones, bóias acústicas e minas inteligentes submarinas.

### 4.1.1 Descrição do ambiente simulado

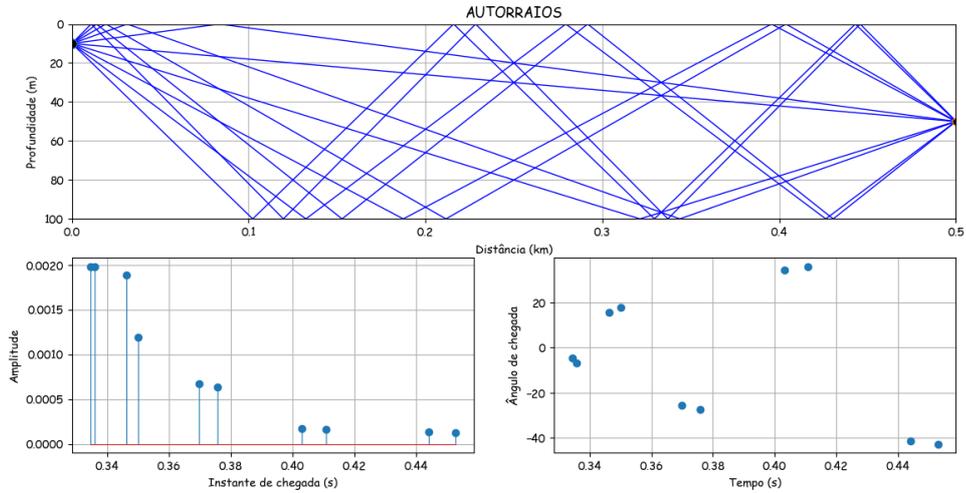
Com base no método de modelagem de canal apresentado na seção 3.1.2, utilizou-se um modelo de traçado de raios (TRACEO) para gerar um canal simulado entre dois pontos no espaço. Foi estabelecido um sistema de coordenadas cartesianas, onde o eixo X representa a distância horizontal e o eixo Y, a profundidade. Considerando as coordenadas do hidrofone de recepção como  $(0, Y_0)$  e as coordenadas de diversos pontos no espaço como  $(X_i, Y_i)$ , foi modelada a resposta do canal entre os pontos  $(0,10)$  e  $(500,45)$ . As condições de simulação incluíram um perfil de velocidade do som constante, conforme mostrado na Figura 4.1, sendo a velocidade do som na água de 1500 m/s; uma profundidade do mar de 100 metros; a densidade da camada de sedimentos é de  $1750 \text{ kg/m}^3$ , o coeficiente de atenuação no fundo é 1dB/km, e a velocidade do som no sedimento é de 1563 m/s. A fonte sonora simulada emitiu um tom com duração de 1 segundo na frequência de 1 kHz e a taxa de amostragem empregada foi de 6 kHz. A Figura 4.2 traz o traçado dos autorraios e o padrão de chegadas para o modelo base entre os dois pontos, ilustrado na Figura 4.3.

Figura 4.1 – Perfil de velocidade do som constante utilizado na modelagem do canal



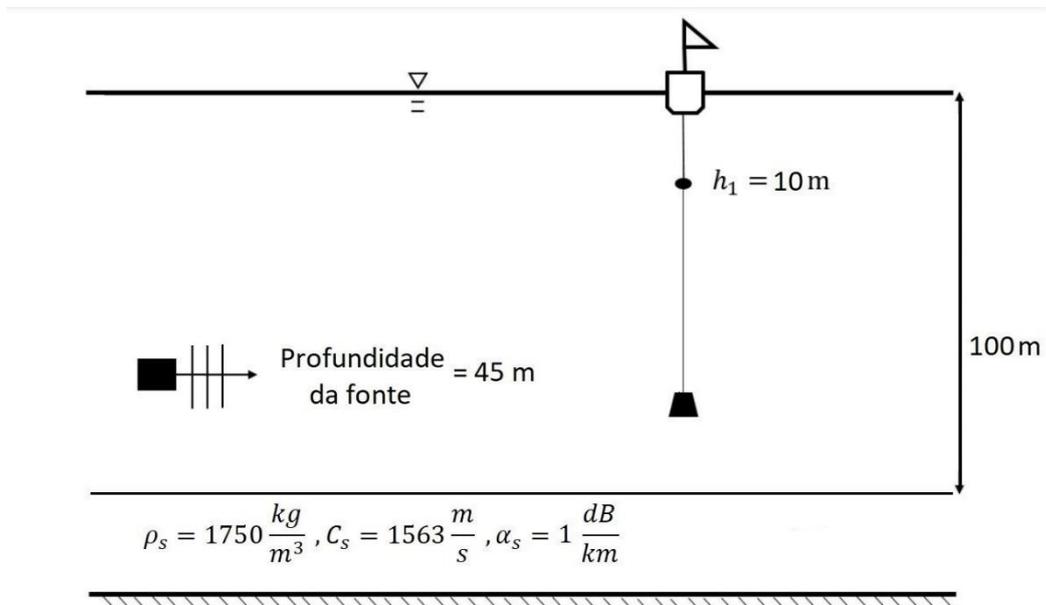
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.2 – Traçado dos autorraios e medição das amplitudes e atrasos dos raios entre a posição da fonte e o receptor gerado pelo TRACEO. Essas informações são necessárias para o cálculo da resposta ao impulso do canal modelado.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.3 – Modelo de ambiente simulado com uma fonte na profundidade de 45m e um único receptor na profundidade de 10m. Esses dados servem de entrada para o modelo de traçado de raios.



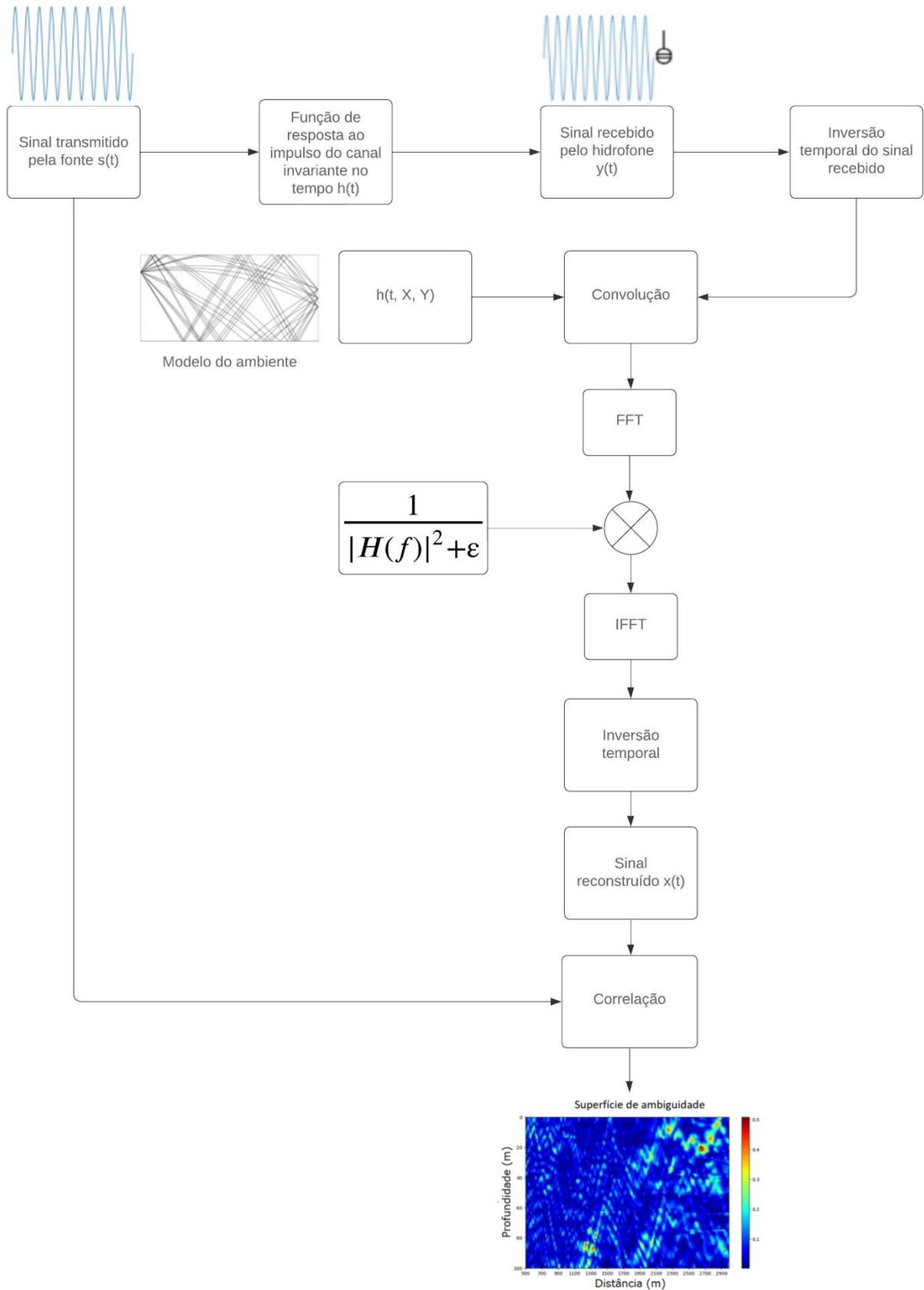
Fonte: Adaptado de LIU *et al.* [104].

## 4.1.2 Aplicação do algoritmo de PTRM

A seguir, são apresentados os passos para o processamento de dados de simulação para a localização com PTRM usando um único hidrofone. Para o emprego do algoritmo, pressupõe-se que o sinal transmitido  $s(t)$  é conhecido, então:

1. A fonte emite um sinal simulado conhecido  $s(t)$  na frequência de 1 kHz;
2. O sinal emitido, após percorrer o canal, é recebido pelo hidrofone, resultando no sinal simulado recebido  $y(t)$ ;
3. São estimados pontos em um espaço bidimensional de busca, como um conjunto de pontos com distância horizontal  $X_i$  em relação ao hidrofone e profundidade  $Y_i$  em relação à superfície da água, onde os passos de distância e de profundidade (passos de busca) determinam o limite de precisão de localização. Nestas simulações, foi utilizado o passo de busca de 1 metro, para distância e profundidade;
4. Utilizando o modelo de propagação de raios TRACEO, são calculados a amplitude e o atraso dos autorraios que chegam a cada ponto da grade bidimensional de busca e, a partir disto, é calculada a resposta ao impulso do canal  $h(t, X_i, Y_i)$  para um ponto específico no espaço;
5. O sinal recebido  $y(t)$  é invertido no tempo, obtendo  $y(-t)$ , e convoluído com a resposta ao impulso  $h(t, X_i, Y_i)$  para cada ponto da grade, resultando em um sinal  $z(t, X_i, Y_i)$ ;
6. Através da transformada de Fourier de  $z(t, X_i, Y_i)$ , é obtido o espectro em frequência  $Z(f, X_i, Y_i)$ , que é dividido por  $|H(f, X_i, Y_i)|^2 + \varepsilon$ , resultando em um sinal reconstruído  $X^*(f, X_i, Y_i)$ ;
7. Através da transformada inversa de Fourier, obtém-se a série temporal de  $x(-t, X_i, Y_i)$ , que é invertida no tempo, resultando em  $x(t, X_i, Y_i)$ ;
8. É feita a correlação cruzada entre o sinal buscado  $s(t)$  e  $x(t, X_i, Y_i)$ ;
9. O ponto com o máximo valor de correlação é assumido como a localização da fonte sonora.

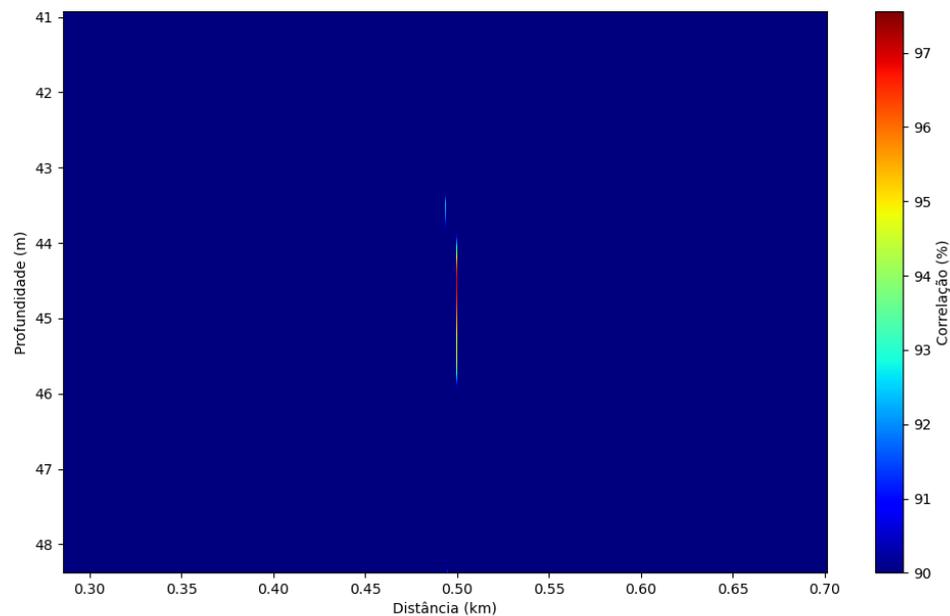
Figura 4.4 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo de TRM. Na superfície de ambiguidade, o máximo global representa a estimativa da posição da fonte.



Fonte: elaborado pelo autor.

Seguindo o processamento descrito na Figura 4.4, foi realizado um estudo de simulação para a localização com espelhamento temporal usando um único hidrofone, com o cálculo do canal conforme mencionado na seção anterior. As condições de simulação incluem um sinal na frequência 1 kHz, com duração de 1s, profundidade local de 100 metros, e velocidade do som na água conforme mostrado na Figura 4.1. A taxa de amostragem é de 6 kHz, e a profundidade do hidrofone é de 10 metros. O resultado do processamento, na ausência de ruído é mostrado na Figura 4.5:

Figura 4.5 – Índice máximo de correlação atingindo o foco na posição da fonte, localizada na distância de 500m e profundidade de 45m.



Fonte: elaborado pelo autor.

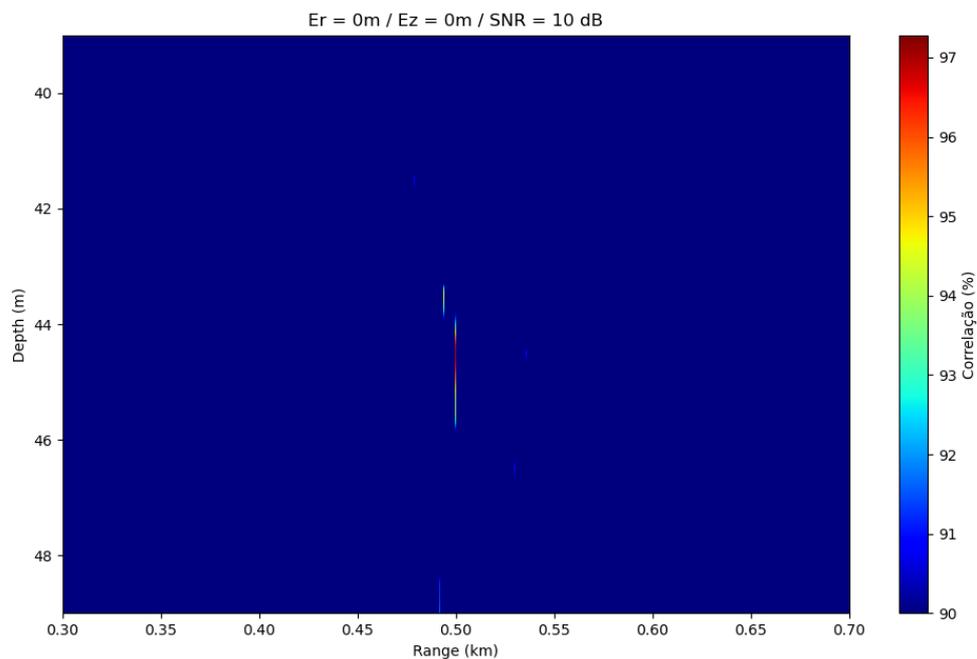
Na Figura 4.5, a posição da fonte sonora é definida como (500,45), em unidades de metros. Na figura, é possível observar que a busca bidimensional após o processamento TRM conseguiu alcançar o foco na posição da fonte sonora definida, atingindo boa precisão de localização, com erro zero para distância e profundidade. Assim, a técnica de localização passiva com TRM pôde realizar a estimativa sem erros para a localização de uma fonte sonora submarina com um único hidrofone, na ausência de ruído.

## 4.2 O efeito do ruído

O ambiente submarino apresenta várias perturbações que podem afetar o sinal sonoro que se propaga, chamadas de ruído acústico submarino. Esses ruídos podem ter como origem fontes naturais (como chuva e vento) ou fontes antropogênicas (como navios). Por simplificação, o ruído acústico pode ser modelado como ruído Gaussiano branco [105].

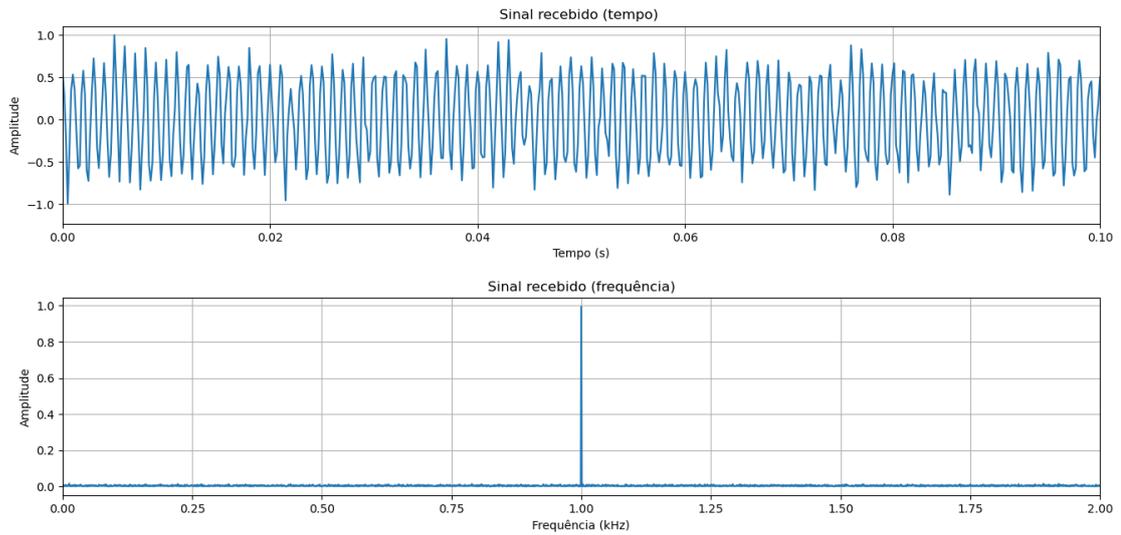
De modo a aproximar as condições simuladas de um ambiente real, pode ser introduzido um ruído de interferência local ao sinal de saída. Considerando a fonte na posição (500,45), e a presença de um ruído Gaussiano branco com SNR de 10 dB, as Figuras 4.6 e 4.7 ilustram o resultado do processamento do algoritmo de localização com TRM e o sinal recebido pelo hidrofone, posicionado na profundidade de 10m:

Figura 4.6 – Índice máximo de correlação obtido pelo algoritmo de localização com a adição de ruído ao sinal (SNR=10dB).



Fonte: elaborado pelo autor.

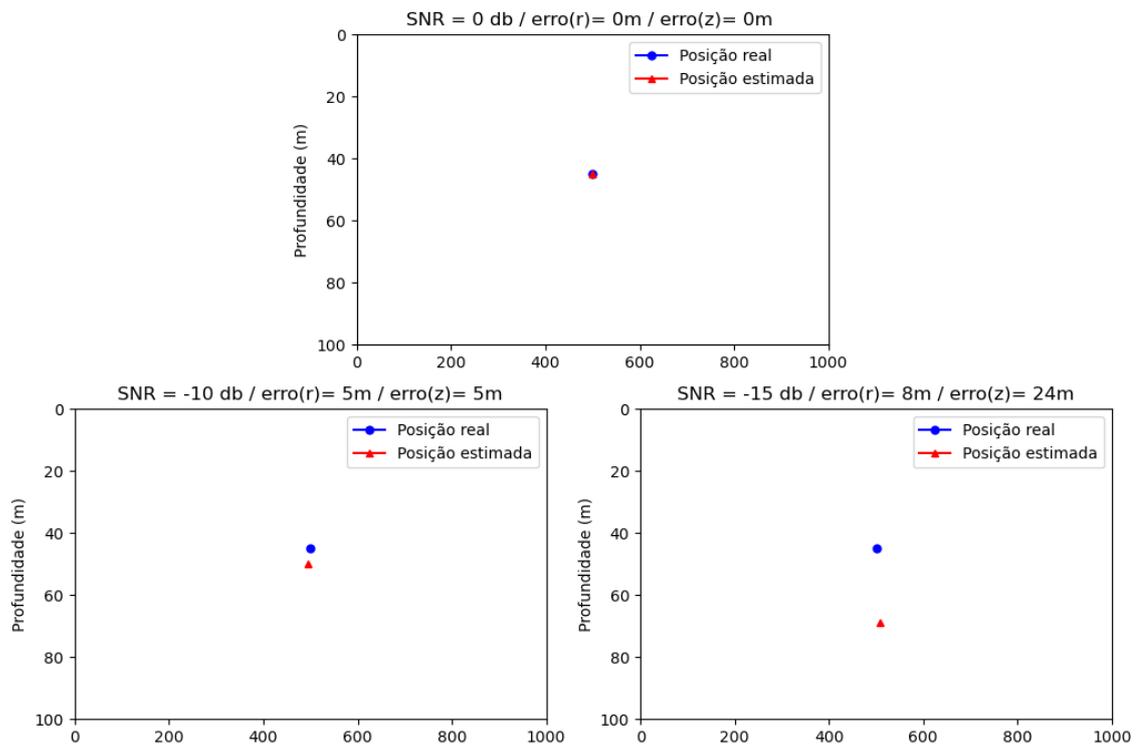
Figura 4.7 – Sinal recebido pelo hidrofone na profundidade de 10 metros após a introdução do ruído Gaussiano branco (SNR=10dB).



Fonte: elaborado pelo autor.

Podemos diminuir a relação sinal-ruído para avaliar o seu impacto na precisão do método proposto, obtendo os seguintes resultados:

Figura 4.8: Efeito do ruído na estimativa de distância da fonte com um único hidrofone para diferentes SNR (0dB, -10dB e -15dB)



Fonte: elaborado pelo autor.

Portanto, conforme observado na Figura 4.8, mesmo com a SNR de -15dB, a técnica conseguiu encontrar resultados com erro em distância de apenas 1,6%, sendo predominante o erro em profundidade (cerca de 20%). Este erro pode estar relacionado ao número de elementos de recepção, uma vez que o incremento do número de hidrofones e a soma dos sinais reconstruídos individualmente por eles pode melhorar o processo de reconstrução do sinal, permitindo um melhor foco na posição de transmissão.

No entanto, mesmo para o processamento TRM com um único hidrofone, o volume de cálculos é substancial, apresentando desafios na implementação em sistemas de tempo real, o que torna necessário pesquisar algoritmos de localização PTRM mais rápidos e eficientes.

## 4.3 Localização com PTRM usando um Arranjo de Hidrofones e Matriz de correlação de sinais

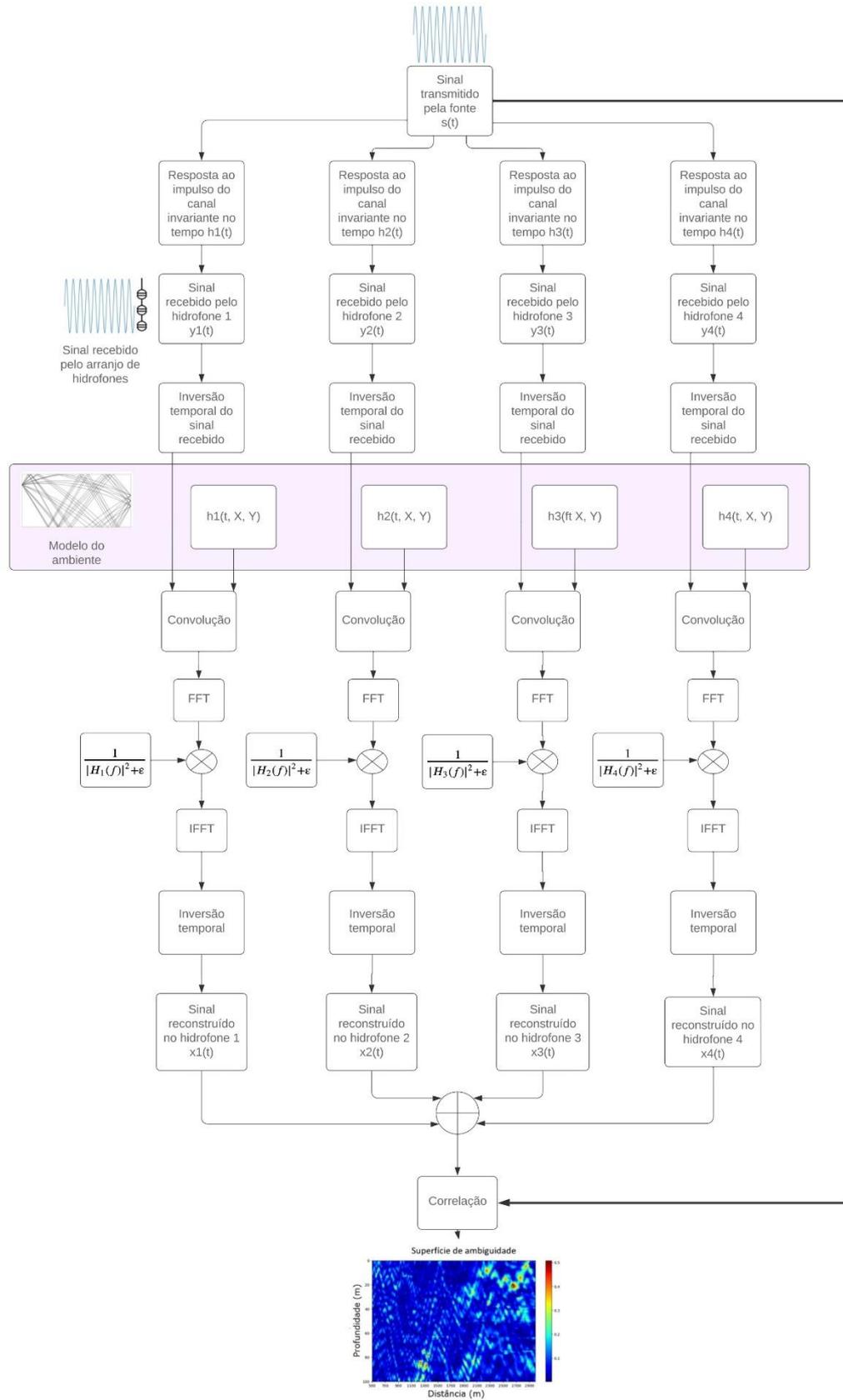
De acordo com a teoria convencional de formação de feixes, um arranjo bidimensional pode obter um ganho de 3 dB ( $10 \log 2$ ). Portanto, implementar a técnica de localização com TRM para um arranjo bidimensional de hidrofones, ou mesmo para um arranjo multidimensional, pode melhorar o desempenho do algoritmo de localização.

O processo de simulação de localização com PTRM para um arranjo de hidrofones é semelhante ao processo para um único hidrofone, com métodos de geração de canais simulados semelhantes. A Figura 4.9 ilustra as etapas principais do processamento da simulação, que incluem:

1. A fonte emite um sinal conhecido  $s(t)$  na frequência de 1 kHz;
2. O sinal emitido, após percorrer o canal, é recebido pelos hidrofones, resultando nos sinais recebidos  $y_1(t), y_2(t) \dots y_n(t)$ ;
3. São estimados pontos em um espaço bidimensional de busca, como um conjunto de pontos com distância horizontal  $X_i$  em relação ao arranjo e profundidade  $Y_i$  em relação à superfície da água, onde os passos de distância e de profundidade (passos de busca) determinam o limite de precisão de localização. Nestas simulações, foi utilizado o passo de busca de 1 metro, para distância e profundidade;

4. Utilizando o modelo de propagação de raios TRACEO, são calculados, a partir de cada hidrofone, a amplitude e o atraso dos autorraios que chegam a cada ponto da grade bidimensional de busca e, a partir disto, são calculadas as respostas ao impulso dos canais  $h_n(t, X_i, Y_i)$  para um ponto específico no espaço;
5. Os sinais recebidos  $y_n(t)$  são invertidos no tempo, obtendo  $y_n(-t)$ , e convoluídos com a resposta ao impulso  $h_n(t, X_i, Y_i)$  para cada ponto da grade, resultando em um sinal  $z_n(t, X_i, Y_i)$ ;
6. Através da transformada de Fourier de  $z_n(t, X_i, Y_i)$ , é obtido o espectro em frequência  $Z_n(f, X_i, Y_i)$ , que é dividido por  $|H_n(f, X_i, Y_i)|^2 + \varepsilon$ , resultando em um sinal reconstruído  $X_n^*(f, X_i, Y_i)$  para cada hidrofone;
7. Através da Transformada inversa de Fourier, obtém-se as séries temporais de  $x_n(-t, X_i, Y_i)$ , que são invertidas no tempo e somados, obtendo  $x_{soma}(t, X_i, Y_i)$ ;
8. É feita a correlação cruzada entre o sinal de referência  $s(t)$  e  $x_{soma}(t, X_i, Y_i)$ ;
9. O ponto com o máximo valor de correlação é assumido como a localização da fonte sonora.

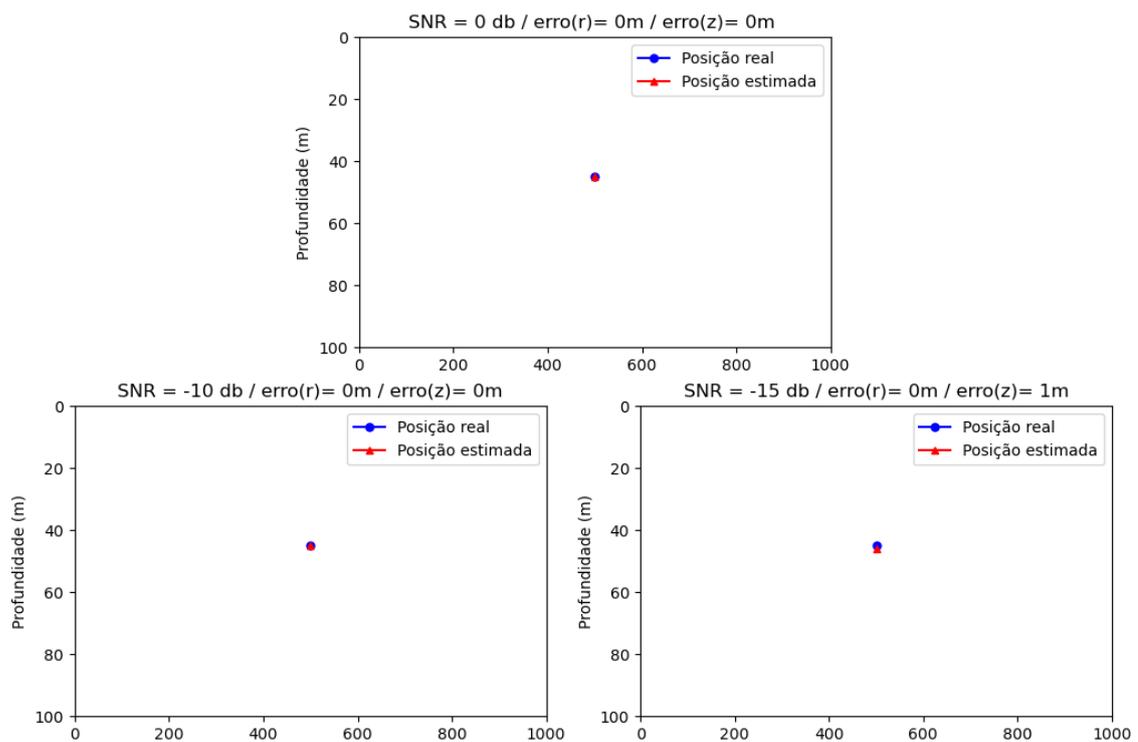
Figura 4.9 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo de TRM. Na superfície de ambiguidade, o máximo global representa a estimativa da posição da fonte.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 4.10 apresenta os resultados do processamento do algoritmo. Foi empregado um arranjo de recepção vertical com 2 hidrofones, espaçados de 5 metros entre eles, nas profundidades de 10 e 15 metros. A fonte sonora está disposta a uma profundidade de 45 metros e distância horizontal de 500 metros. A saída do TRM para o arranjo binário de elementos é obtida variando a relação sinal-ruído na entrada dos hidrofones. Os resultados do processamento para diferentes relações sinal-ruído, nomeadamente 0 dB, -10 dB e -15 dB, são mostrados a seguir.

Figura 4.10 – Efeito do ruído na estimativa de distância da fonte com um arranjo binário de hidrofones para diferentes SNR (0dB, -10dB e -15dB)



Fonte: elaborado pelo autor.

Portanto, comparando as Figuras 4.8 e 4.10, pode-se concluir que o incremento do número de sensores pode melhorar o processo de focalização e aumentar a precisão do algoritmo, otimizando o processo de reconstrução do sinal e, assim, melhorando o índice de correlação na posição correta a ser determinada.

No entanto, apesar do ganho de focalização ao se usar um arranjo de sensores, diversos sistemas e veículos submarinos são restritos em espaço, o que pode limitar o número de elementos em um arranjo vertical. Além disso, o aumento do número de sensores resulta em

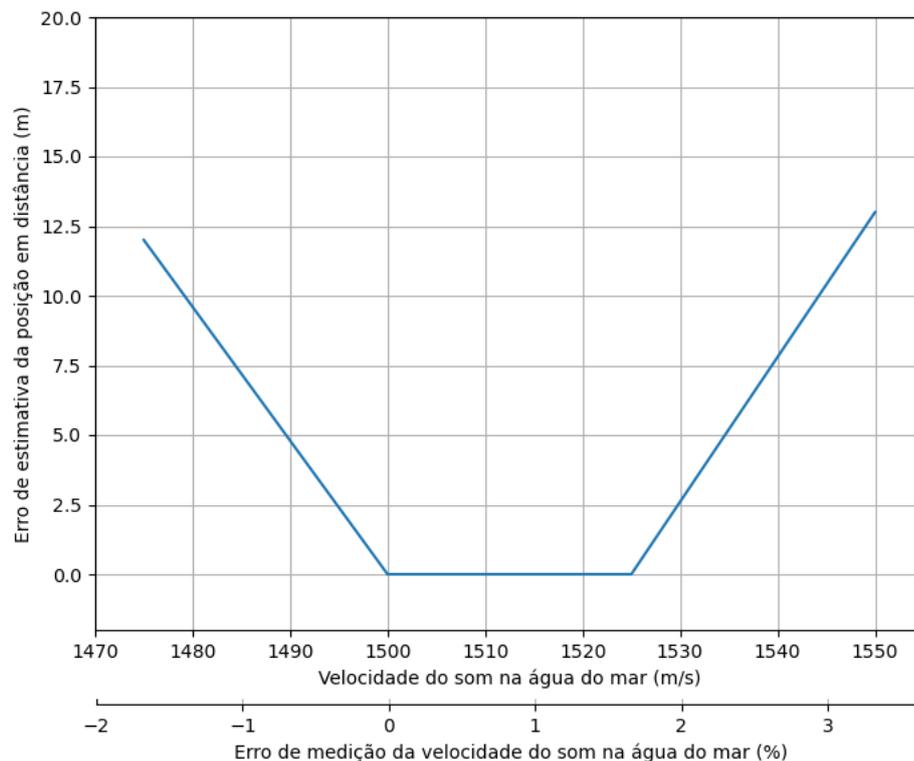
uma maior carga computacional, o que torna esta abordagem inadequada para processamento em tempo real.

## 4.4 O efeito dos parâmetros do guia de ondas

A propagação do som depende dos parâmetros do guia de ondas submarino. Para a modelagem do canal, assumimos que a velocidade do som na água, a profundidade local e as características do leito marinho são conhecidas. Nesta seção, é investigada a sensibilidade do algoritmo de localização aos parâmetros do guia de ondas.

Os resultados das simulações mostram que a estimativa de distância é principalmente influenciada pela velocidade do som na água. A Figura 4.11 mostra o erro de estimativa em distância para uma fonte à distância de 500 metros com as variações na velocidade do som na água. Mantendo o perfil de isovelocidade, uma variação de 3% na velocidade do som na água resultou em erros de estimativa de distância de até 13 metros.

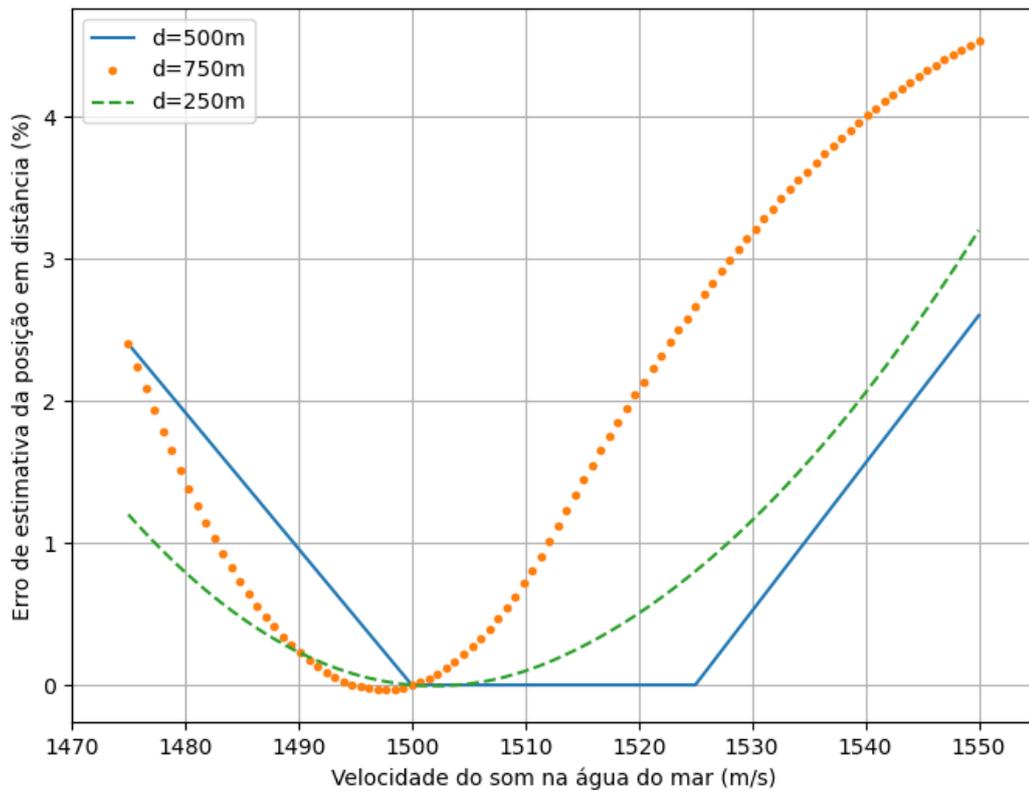
Figura 4.11 – Erro de estimativa de distância para uma fonte a 500m do receptor, variando a velocidade do som na água do mar. Mantendo o perfil de isovelocidade, variou-se a velocidade do som entre 1475 m/s e 1550 m/s.



Fonte: elaborado pelo autor.

Variando a distância fonte-receptor, é possível comparar as estimativas de erros e observar que a variação de 3% na velocidade do som na água pode resultar em erros de medição de distância de até 4,5%, conforme mostrado na Figura 4.12.

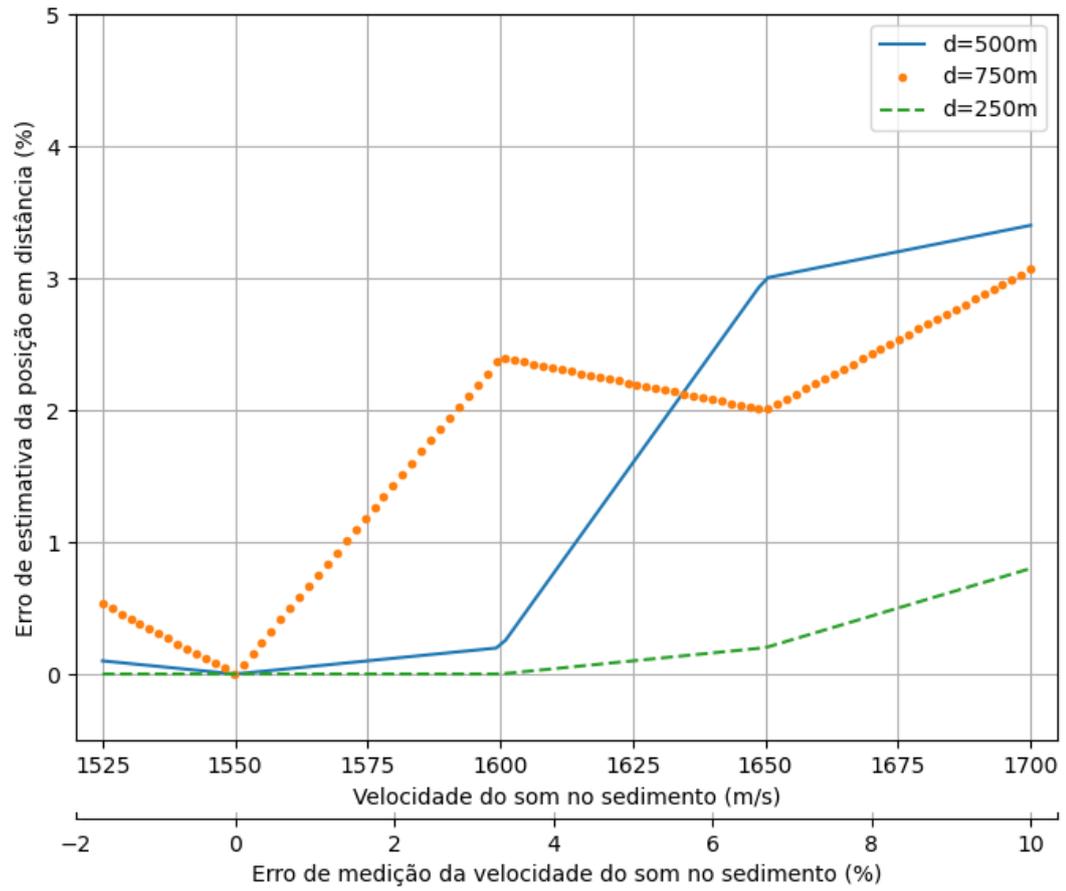
Figura 4.12 – Erro de estimativa de distância para distâncias fonte-receptor de 250m, 500m e 750m.



Fonte: elaborado pelo autor.

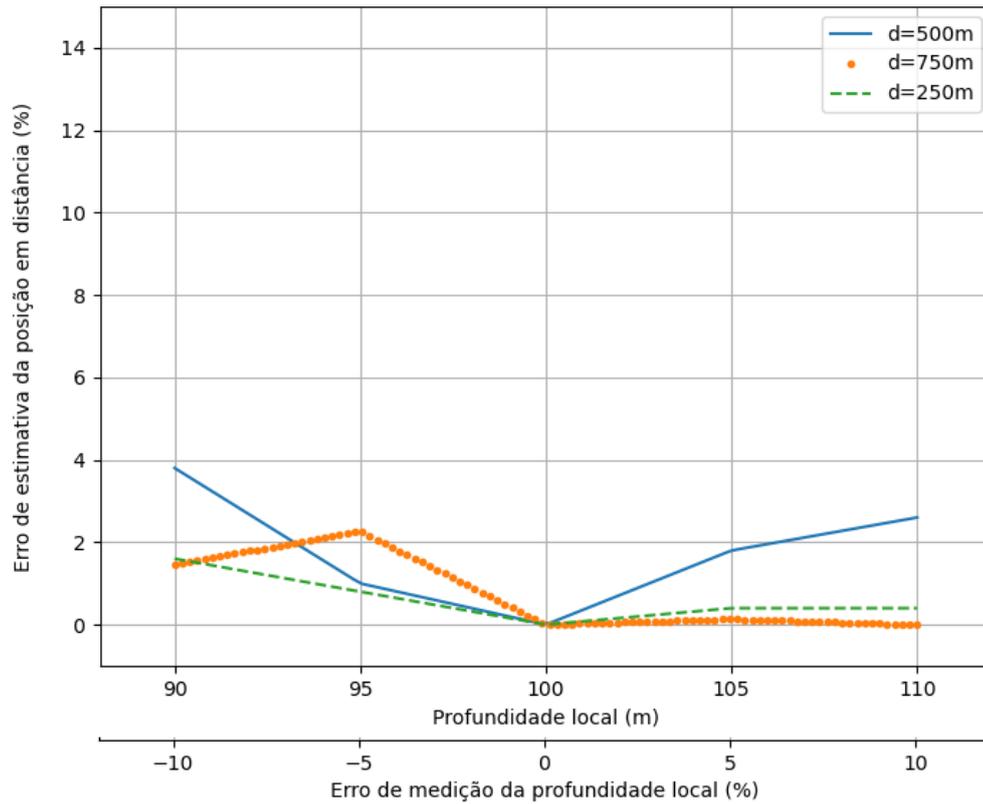
Pode-se observar que o erro de estimativa é mínimo quando a velocidade do som é igual a 1500 m/s, que corresponde ao valor verdadeiro. Os resultados das simulações mostram ainda que a estimativa de distância não é tão sensível a outros parâmetros do guia de ondas, como a velocidade do som no sedimento e a batimetria. Para fontes localizadas às mesmas distâncias das simulações anteriores, variações de até 10% na velocidade do som no sedimento resultaram em erros de estimativa de distância de menos de 4%, conforme observado na Figura 4.13, assim como variações de até 10% na profundidade local resultaram em erros de estimativa inferiores a 4%, conforme mostrado na Figura 4.14.

Figura 4.13 – Erro de estimativa de distância para fontes às distâncias de 250m, 500m e 750m do receptor, variando a velocidade do som no sedimento entre 1525 m/s e 1700 m/s.



Fonte: elaborado pelo autor.

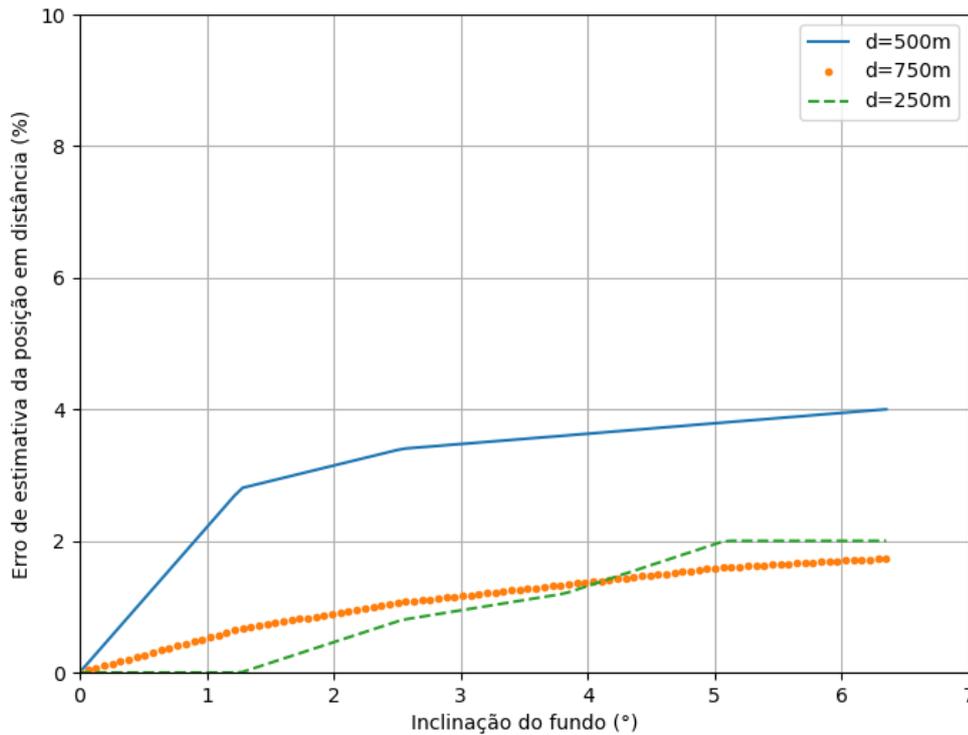
Figura 4.14 – Erro de estimativa de distância para fontes às distâncias de 250m, 500m e 750m do receptor, mantendo a profundidade local constante e variando seu valor em  $\pm 10\%$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Em seguida, foi proposta uma mudança no perfil da batimetria, com a inclinação do fundo, aumentando a profundidade a partir do receptor até a posição da fonte. A figura 4.15 mostra que os erros de estimativa de posicionamento neste caso foram inferiores a 4% para inclinações do fundo de até 6 graus.

Figura 4.15 – Erro de estimativa de distância para fontes às distâncias de 250m, 500m e 750m do receptor, variando a profundidade local a partir do receptor, produzindo uma inclinação no fundo de até 6 graus.



Fonte: elaborado pelo autor

## 4.5 Conclusão do Capítulo

Este capítulo investigou o desempenho do algoritmo de localização com PTRM sob condições simuladas. Os resultados da simulação indicam que os algoritmos de localização com TRM para um único hidrofone ou para um arranjo com 2 elementos podem realizar a localização passiva. Além disso, observou-se que ao diminuir a relação sinal-ruído a capacidade de localização do arranjo TRM de 2 elementos foi superior à do único sensor de pressão. Sob as condições simuladas neste capítulo, o processo de localização para esses algoritmos atingiu boa precisão de busca bidimensional, com erros de estimativa menores que 1 metro para SNR de até -15dB. Por último, ao testar a robustez do algoritmo quanto às variações dos parâmetros ambientais, os erros de estimativa de posição foram inferiores a 4% para variações de até 10% na velocidade do som no sedimento e inferiores a 4% para variações de até 10% na profundidade local ou inclinações do fundo de até 6 graus, enquanto variações de apenas 3% na velocidade do som no mar resultaram em erros superiores a 4,5%.

## Capítulo 5

### Análise de desempenho do PTRM com dados de ambiente real

Para avaliar o desempenho do algoritmo de localização com o uso de sinais reais, esta pesquisa utilizou dados experimentais coletados pelo Signal Processing Laboratory (SiPLAB) da Universidade do Algarve durante o experimento CALCOM'10. Neste capítulo, são detalhados o experimento em si e as técnicas empregadas na localização da fonte com base nos conjuntos de dados utilizados.

A Seção 5.1 aborda as características do experimento, incluindo informações sobre os sinais e as condições ambientais. Na Seção 5.2, é descrito o processo de coleta de sinais para gerar o conjunto de dados utilizado. A Seção 5.3 emprega as condições do ambiente descrito no experimento na construção de um modelo ambiental de referência. Na Seção 5.4, são apresentados os resultados do emprego do algoritmo na localização da fonte.

#### 5.1 Experimento CALCOM'10: Uma Abordagem para Calibração de Campo por Inversão Acústica

O experimento CALCOM'10, conduzido próximo ao litoral sul de Portugal, teve como objetivo principal testar a viabilidade da "calibração de campo" como uma ferramenta baseada em inversão acústica para ajustar os parâmetros de modelos ambientais em áreas de interesse [106]. Esta abordagem busca utilizar resultados de inversão acústica como parâmetros para modelagem ambiental, mesmo na ausência de informações detalhadas de batimetria e geoacústica.

O experimento envolveu o uso de duas boias acústico-oceanográficas (AOB), cada uma equipada com um VLA (*Vertical Line Array*) para gravação dos sinais, e uma fonte acústica Lubell LL-1424.

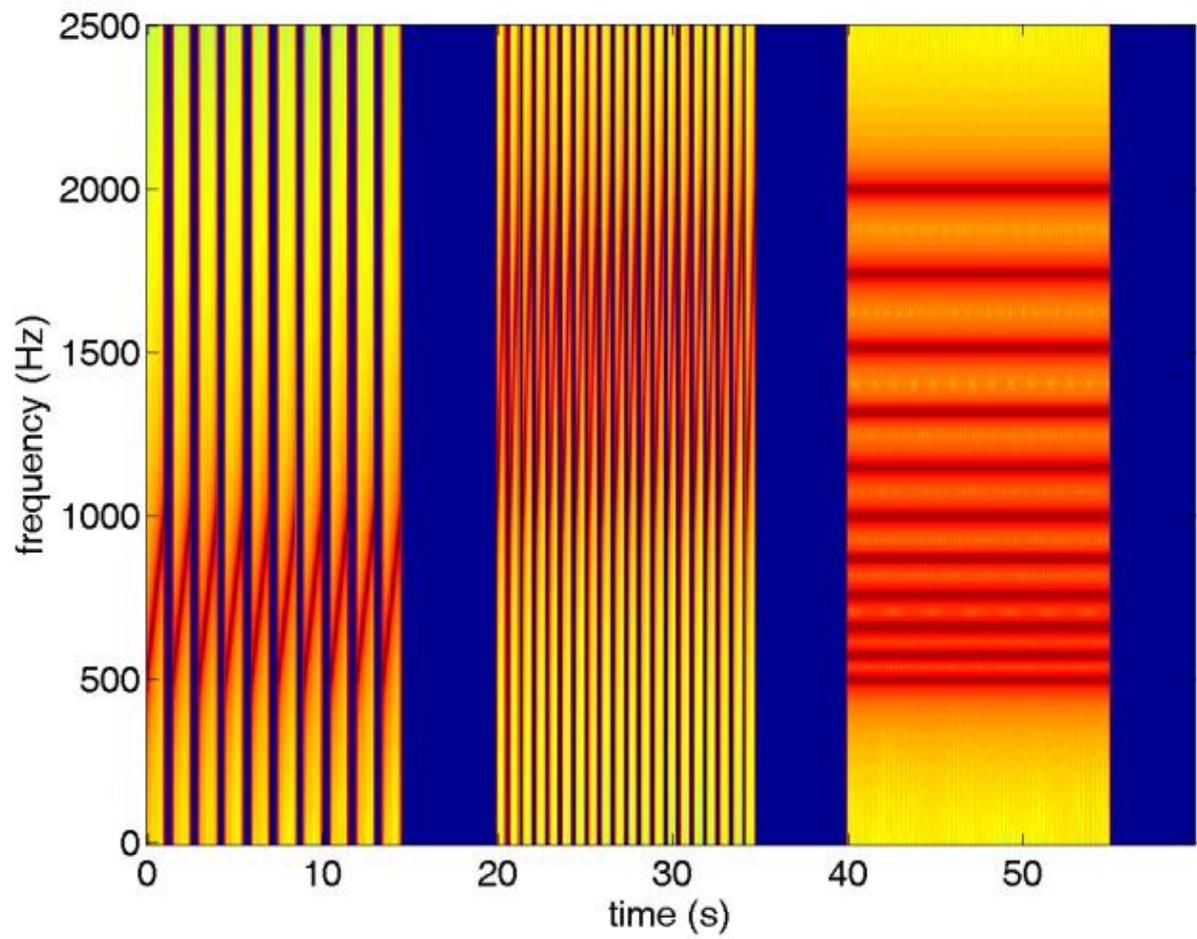
Os dados usados neste trabalho foram gravados por um VLA composto por 16 hidrofones espaçados 4 m entre si, com profundidades variando de 6,3 a 66,3m. Os sinais foram adquiridos com uma taxa de amostragem de 50 kHz e, em seguida, decimados para 5 kHz.

Uma das principais limitações do experimento é a falta de informações precisas sobre os parâmetros ambientais, tornando-o um estudo de caso interessante para técnicas de focalização. O Perfil de Velocidade do Som (SSP) foi calculado utilizando a equação de Mackenzie [107], considerando uma salinidade de 36 ppm e valores de temperatura obtidos por sensores de baixa resolução ( $0,5^{\circ}\text{C}$ ) instalados na posição de cada hidrofone. No entanto, esses dados fornecem apenas uma estimativa aproximada do SSP na posição do receptor, resultando em uma grande incerteza no conhecimento do ambiente.

## 5.2 Coleta dos Dados

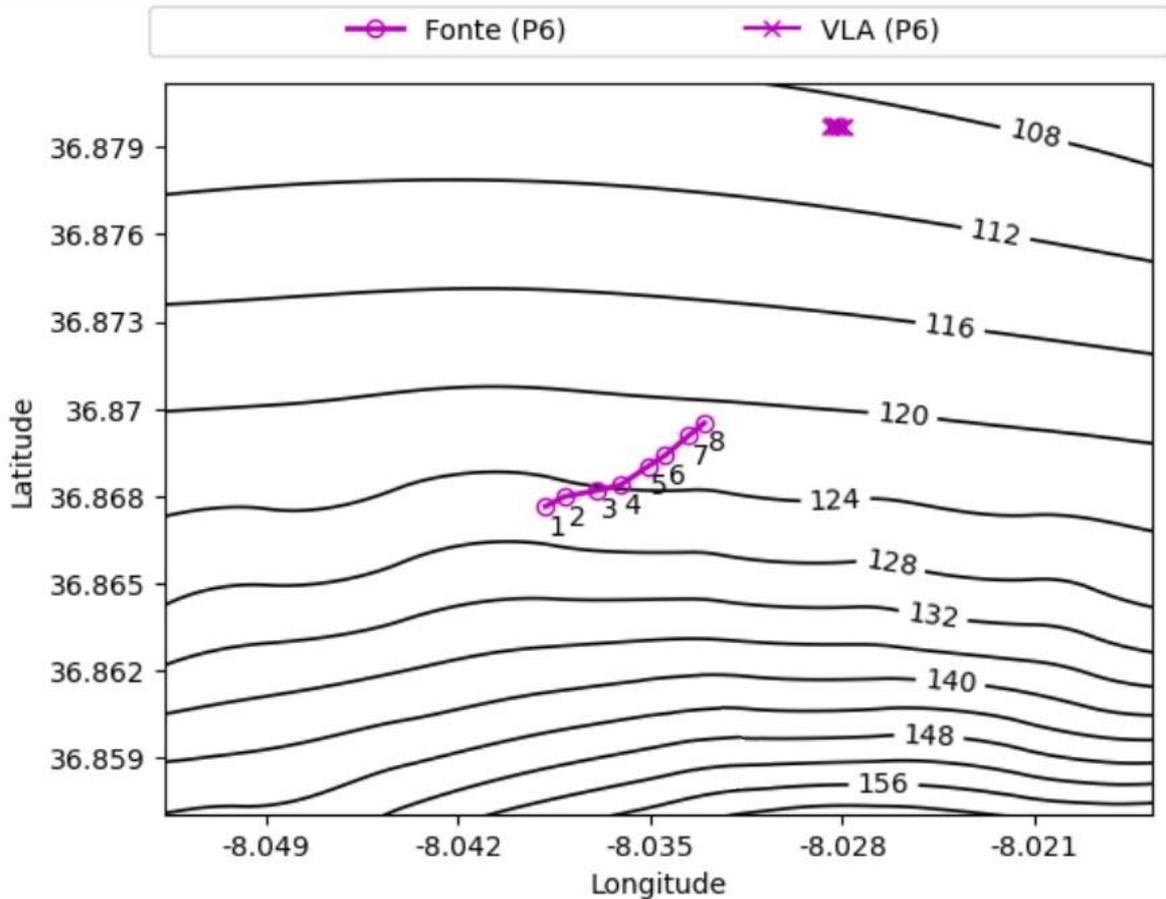
O experimento consistiu em duas etapas principais: a transmissão dos sinais pela fonte acústica rebocada e o registro dos dados pelos hidrofones do VLA. Durante a transmissão, a fonte emitiu uma série de sinais acústicos com duração total de um minuto, incluindo chirps e multitons na faixa de frequência de 500 a 2000 Hz, conforme mostrado na Figura 5.1, enquanto era rebocada a uma velocidade aproximada de 4 nós. Esses sinais foram repetidos ao longo de várias trajetórias designadas como eventos, resultando em pacotes de sinal de 1 minuto cada, cada um representando uma transmissão específica numerada sequencialmente (por exemplo: P6-01, P6-02, ...). O evento P6 foi utilizado neste estudo, com dados cedidos pelo SiPLAB. A Figura 5.2 traz uma carta batimétrica da região do experimento com as posições do VLA e da fonte em cada transmissão para o evento P6.

Figura 5.1 – Espectrograma do sinal transmitido, utilizado no experimento de calibração de campo. A parte do sinal utilizada para localização da fonte foi o trecho entre os segundos 40 e 55, composto pelos multitons.



Fonte: FELISBERTO *et al.* [106].

Figura 5.2 – Carta batimétrica com as posições do VLA e da fonte durante as transmissões do evento P6.



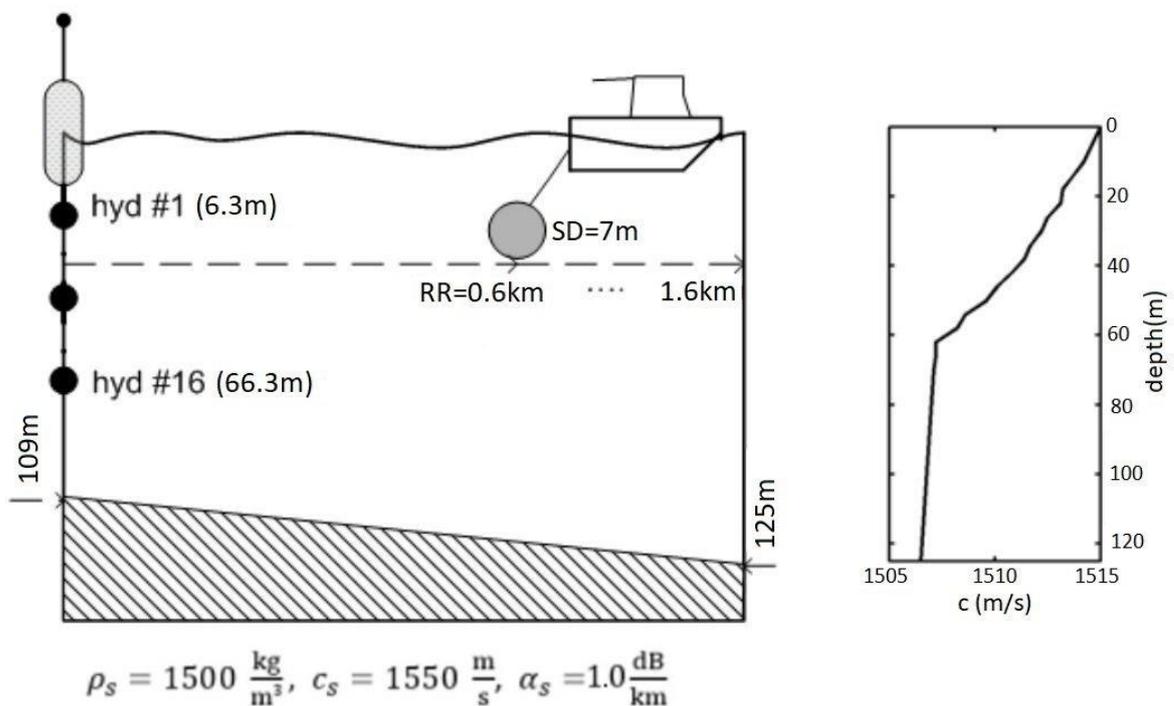
Cada transmissão começa com uma sequência de dez sinais LFM (Modulação em Frequência Linear) com duração de 1 segundo cada na faixa de 500-1000 Hz, espaçados de 500 ms, seguido por um período de silêncio de 5 segundos. O segundo bloco de sinal é composto por quinze sinais LFM de 0,5 s de duração, na faixa de 1000-2000 Hz, espaçados de 250 ms, seguido por um período de silêncio de 5 segundos. O último bloco de sinal é uma mistura de 11 tons cobrindo a faixa de 500-2000 Hz, nas frequências de 500, 574.3, 659.8, 759.9, 870.6, 1000, 1148.7, 1319.5, 1515.7, 1741.1 e 2000 Hz com duração de 15 segundos, seguido por 5 segundos de silêncio.

Como o espectro de frequências das assinaturas acústicas dos navios e submarinos é comumente composto por tons puros, que são frequências discretas e constantes, geradas por equipamentos rotativos, como hélices e motores, sendo os sinais LFM menos comuns [109], o trecho de interesse extraído de cada gravação foi selecionado entre os segundos 40 e 55, contendo a frequência de interesse de 1515.7 Hz.

## 5.3 Modelagem do ambiente

O modelo base do ambiente utilizado para simulações, representado na Figura 5.3, é baseado nas condições do evento P6, com distância fonte-receptor de até 1,6 km, profundidade da fonte de 7 m, profundidade local variando de 109 m (na posição do receptor) a 125 m (a uma distância do receptor de 1,6 km). O perfil de velocidade do som considerado nas simulações é o perfil médio de velocidade do som derivado pela fórmula de Mackenzie a partir dos dados de temperatura adquiridos pelo conjunto de sensores de temperatura no receptor, assumindo uma salinidade constante de 36 ppm e a posição da fonte foi obtida das informações do GPS.

Figura 5.3 – Representação esquemática do guia de onda do experimento CALCOM'10 considerado no algoritmo de localização.



Fonte: Adaptado de FELISBERTO *et al.* [106].

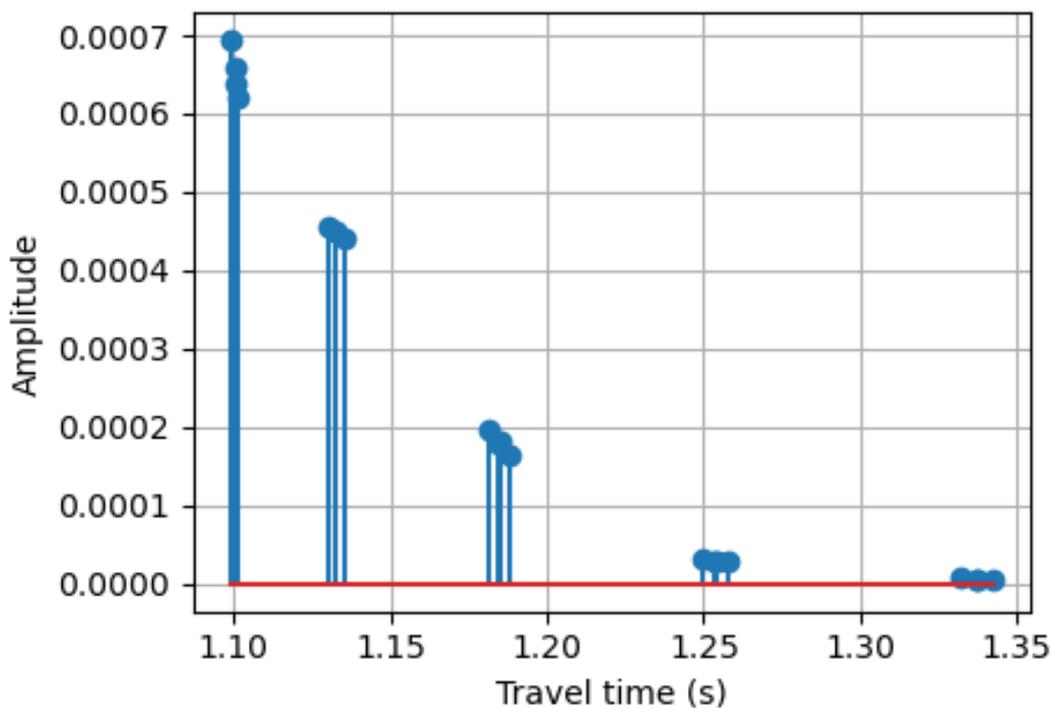
Não há dados detalhados disponíveis sobre o fundo do mar na região, apenas uma classificação descritiva, tendo sido este modelado como uma única camada, representando um fundo equivalente. O fundo foi descrito inicialmente como limoso, assumindo-se uma velocidade do som no sedimento (compressional) de 1650 m/s, uma densidade de  $1700 \text{ kg/m}^3$  e uma atenuação de 1.0 dB/km. A estrutura dos padrões de chegadas observadas e modeladas foi semelhante, mas o número e a intensidade das chegadas tardias foram maiores nos padrões

de chegada modelados do que nos observados, o que sugere que o fundo é mais macio do que o fundo assumido no modelo. Então, a velocidade do som no fundo foi alterada para 1550 m/s e a densidade para  $1500 \text{ kg/m}^3$  [105]. A atenuação permaneceu inalterada.

Os campos acústicos foram modelados usando o modelo de raios TRACEO devido à frequência relativamente alta dos sinais processados e à falta de informações detalhadas para um modelo geoacústico completo com múltiplas camadas. A incerteza nas informações ambientais, como a batimetria e o perfil de velocidade do som, aumenta a complexidade de elaboração do modelo.

A saída do modelo relativa a amplitudes e atrasos dos autorraios na posição estimada da transmissão P6-01, para o hidrofone a 6.3m, é mostrada na Figura 5.4. Esses dados são utilizados para o cálculo da resposta ao impulso do canal, permitindo a reconstrução do sinal transmitido na posição estimada da fonte.

Figura 5.4 – Saída do TRACEO contendo as amplitudes e atrasos dos autorraios que convergem para a posição estimada da fonte (1644,7) com os dados do modelo de ambiente representado na Figura 5.3.



Fonte: elaborado pelo autor.

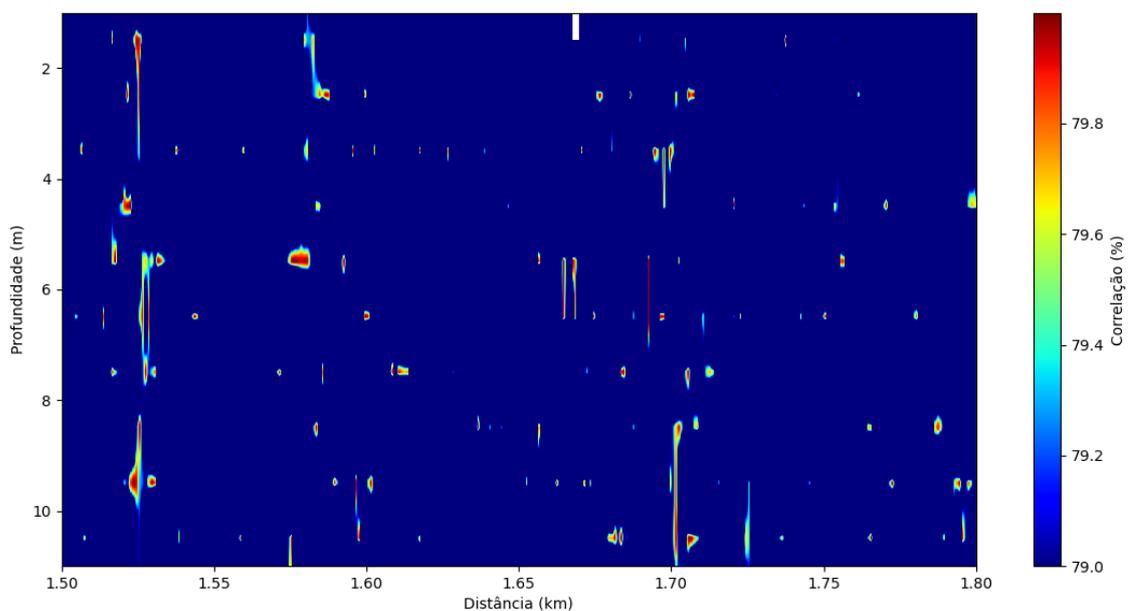
## 5.4 Aplicação do algoritmo de localização

O desempenho do algoritmo de localização foi investigado no capítulo anterior utilizando sinais sintéticos. Esta seção tem como objetivo utilizar sinais submarinos reais para avaliar o algoritmo de localização.

Neste experimento, um sinal real com forma de onda conhecida é empregado. Assumindo que o canal modelado na seção anterior forneça uma aproximação razoável do ambiente em análise, é possível recuperar o sinal através da deconvolução do sinal recebido, buscando assim o ponto que forneça a maior taxa de correlação entre o sinal transmitido e o sinal recuperado.

De modo a avaliar o impacto do número de sensores do arranjo sobre a precisão do método de localização e buscando reduzir o tempo de processamento do código, foram empregados inicialmente 6 hidrofones para a localização passiva. O passo de busca utilizado foi de 1 metro, tanto para distância quanto para profundidade. A figura 5.5 mostra a saída do algoritmo para a transmissão P6-01 com a utilização de apenas 6 hidrofones do arranjo vertical.

Figura 5.5 – Regiões de ambiguidade após o processamento do algoritmo de localização para a transmissão P6-01 com apenas 6 elementos do arranjo vertical. Não foi possível obter um foco isolado na posição da fonte.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 1 resume as localizações reais e estimadas da fonte durante o evento P6 com o emprego dos 6 hidrofones do arranjo mais próximos da superfície (menor cobertura da coluna d'água). Este modelo resultou em uma precisão de busca insatisfatória, com erros de estimativa de distância de até 130 metros, e não conseguiu obter o foco do sinal reconstruído na posição da fonte, proporcionando o surgimento de numerosas regiões de ambiguidade, como observado na Figura 5.5.

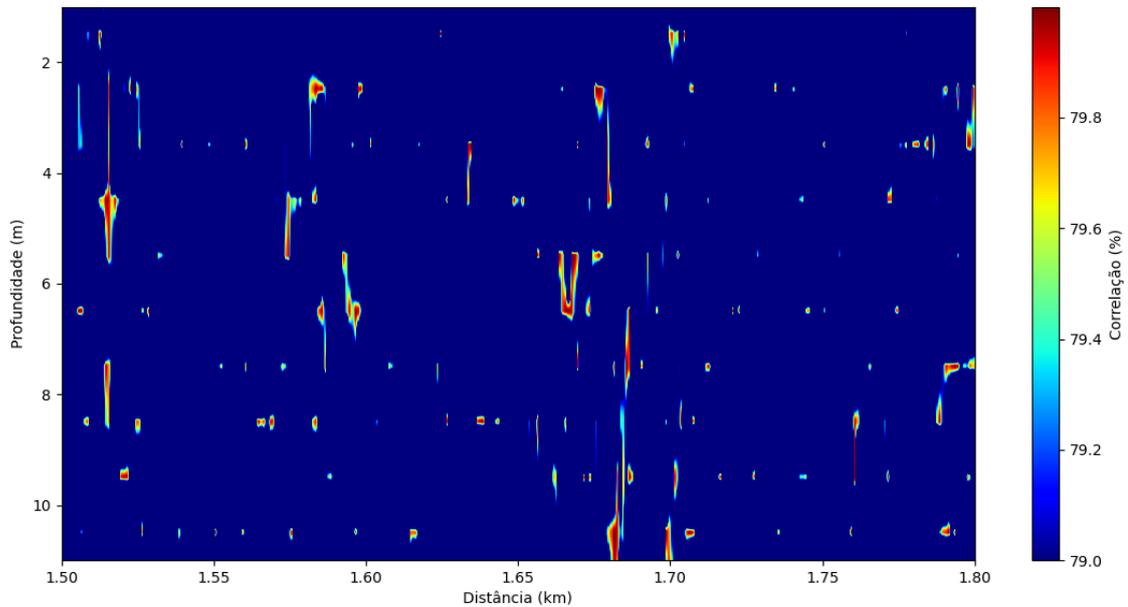
Tabela 1 – Erros de posicionamento da fonte após a busca com o algoritmo de localização com 6 elementos.

Evento	Posição real (m)	Posição Estimada (m)	Erro (m)
P6-01	r = 1644 m	r = 1693 m	49
	z = 7 m	z = 6 m	1
P6-03	r = 1582 m	r = 1680 m	98
	z = 7 m	z = 3 m	4
P6-06	r = 1513 m	r = 1465 m	48
	z = 7 m	z = 4 m	3
P6-08	r = 1464 m	r = 1394 m	70
	z = 7 m	z = 4 m	3
P6-13	r = 1305 m	r = 1176 m	129
	z = 7 m	z = 1 m	6
P6-16	r = 1213 m	r = 1258 m	45
	z = 7 m	z = 3 m	4
P6-18	r = 1154 m	r = 1103 m	51
	z = 7 m	z = 8 m	1

Fonte: elaborado pelo autor.

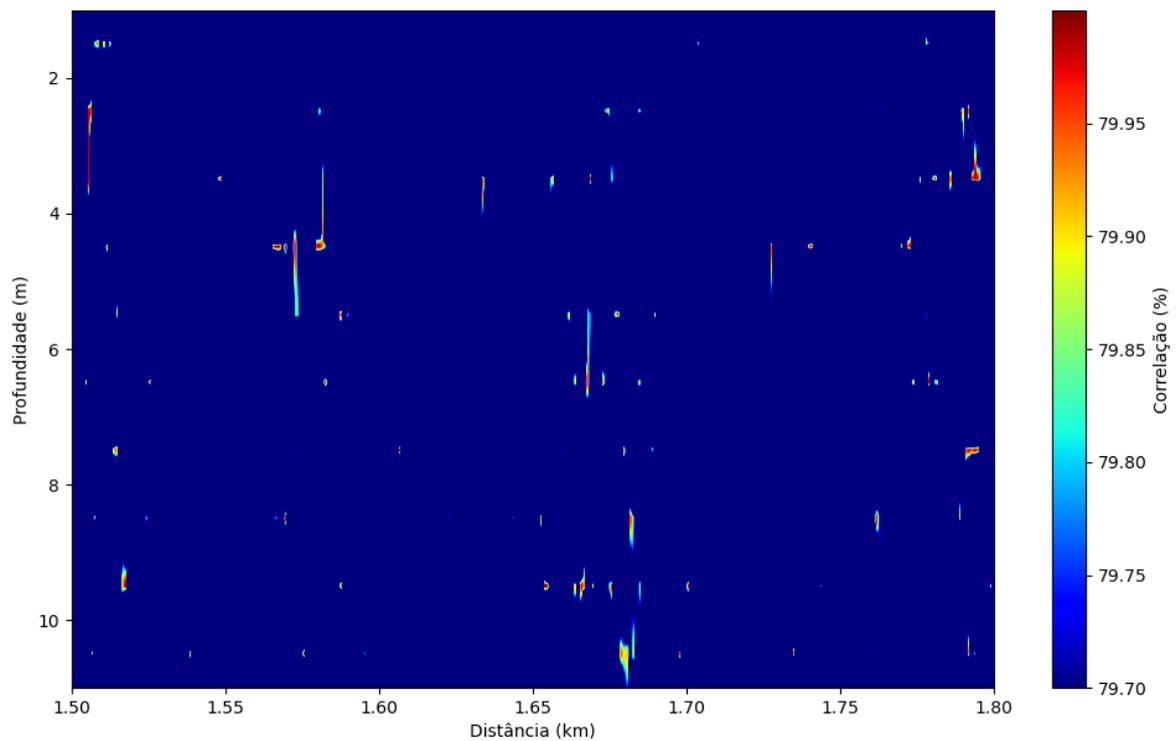
A fim de reduzir o número de regiões de ambiguidade e verificar impacto no desempenho do algoritmo, foram empregados mais hidrofones do arranjo vertical. As figuras 5.6 a 5.9 mostram a saída do algoritmo para o evento P6-01 com a utilização de 8, 10, 12 e 14 hidrofones, respectivamente:

Figura 5.6 – Resultado do processamento do algoritmo para os 8 primeiros hidrofones do arranjo vertical. Observe-se ainda a presença de diversas regiões de ambiguidade, sem a formação de um foco para localização da fonte.



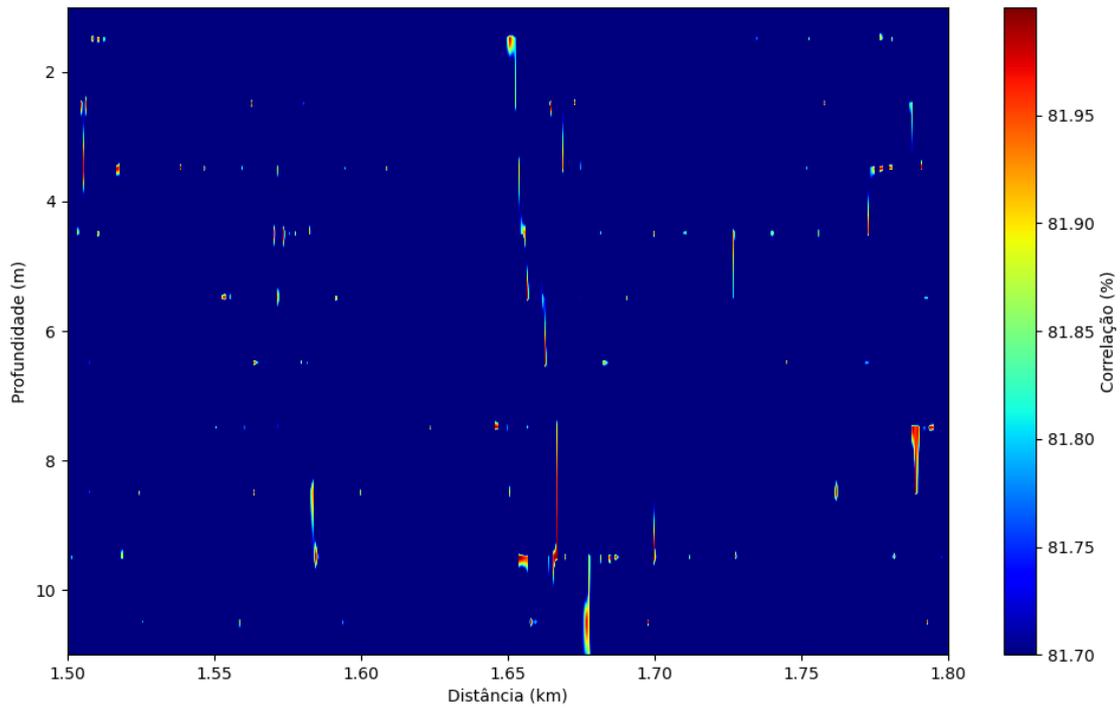
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 5.7 – Resultado do processamento do algoritmo para os 10 primeiros hidrofones do arranjo vertical. É possível observar uma redução nas zonas de ambiguidade, mas ainda sem um foco específico que indique a posição da fonte sonora.



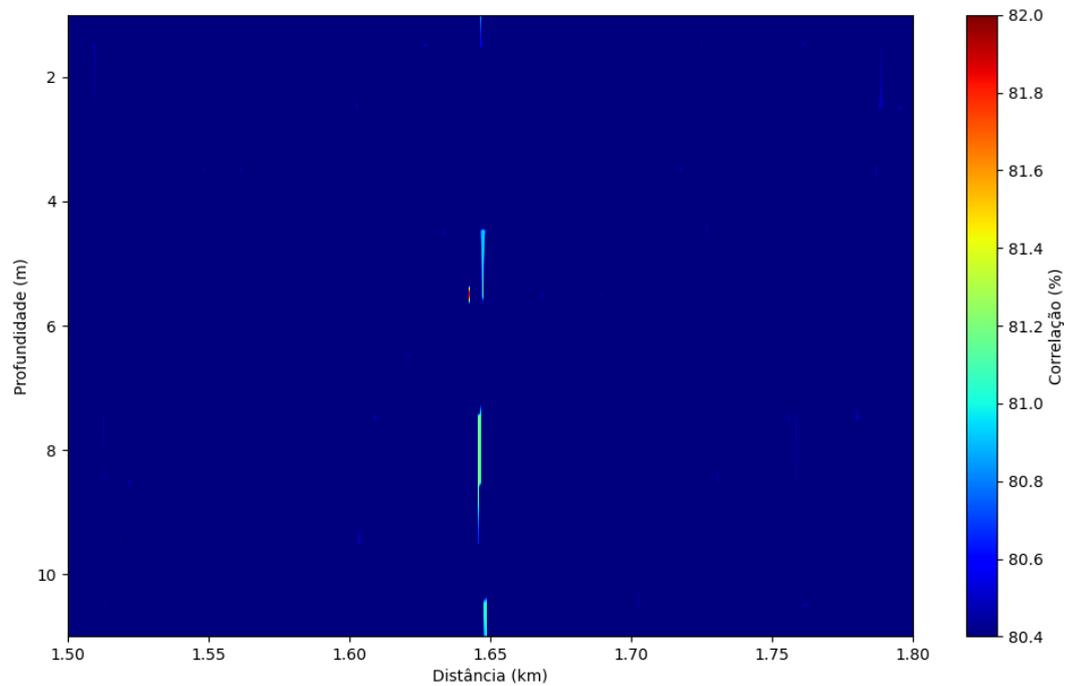
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 5.8 – Resultado do processamento do algoritmo para os 12 primeiros hidrofones do arranjo vertical. É possível observar a redução das ambiguidades em distância, restando áreas de incerteza principalmente na busca vertical. Ainda não foi possível obter um foco na posição da fonte sonora.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 5.9 – Resultado do processamento do algoritmo para os 14 primeiros hidrofones do arranjo vertical. Observa-se o aparecimento de um máximo global, ainda com áreas de ambiguidade, principalmente em profundidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

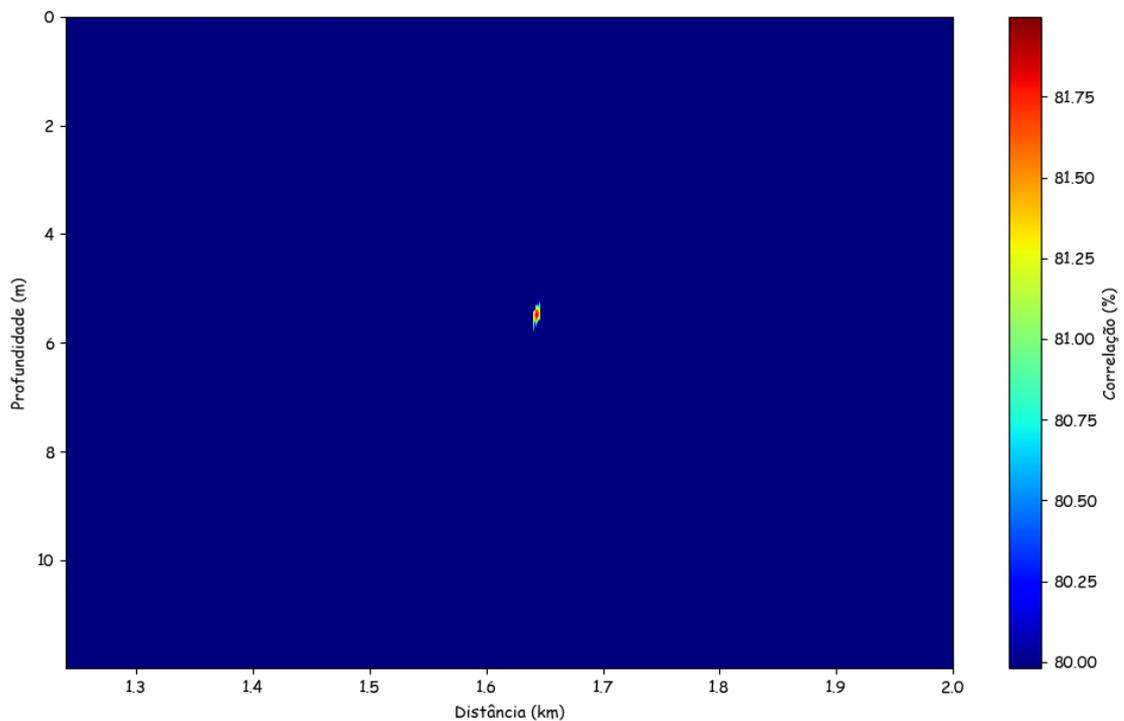
A Tabela 2 indica as posições estimadas com o emprego do algoritmo em um TRM de 16 elementos. Os resultados na tabela revelam que os erros de alcance, em geral, foram pequenos, e que a baixa precisão na localização pode ser melhorada instalando mais hidrofones no arranjo vertical, estendendo sua faixa de profundidade. Ela revela que os resultados do algoritmo empregado na localização estimada da fonte durante o experimento em campo foram consistentes, com a implementação de um TRM em um VLA de 16 hidrofones permitindo a estimativa de distância da fonte com erros inferiores a 4m, mesmo em distâncias de busca superiores a 1600m. A figura 5.10 mostra o efeito do foco na posição da fonte para o sinal recuperado da transmissão P6-01.

Tabela 2 – Erros de posicionamento da fonte após a busca com o algoritmo de localização TRM com 16 elementos.

Evento	Posição real (m)	Posição Estimada (m)	Erro (m)
P6-01	r = 1644 m	r = 1643 m	1
	z = 7 m	z = 6 m	1
P6-03	r = 1582 m	r = 1585 m	3
	z = 7 m	z = 6 m	1
P6-06	r = 1513 m	r = 1513 m	0
	z = 7 m	z = 7 m	0
P6-08	r = 1464 m	r = 1460 m	4
	z = 7 m	z = 4 m	3
P6-13	r = 1305 m	r = 1307 m	2
	z = 7 m	z = 2 m	5
P6-16	r = 1213 m	r = 1211 m	2
	z = 7 m	z = 3 m	4
P6-18	r = 1154 m	r = 1153 m	1
	z = 7 m	z = 8 m	1

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 5.10 – Região com o índice máximo de correlação após o processamento do algoritmo de localização com os 16 elementos do VLA, com o foco ocorrendo na posição (1643,6). A posição real da fonte era nas coordenadas (1644,7).



Fonte: elaborado pelo autor.

Algumas razões poderiam explicar os erros de posicionamento da fonte nos resultados obtidos dos testes de campo. O TRM foi instalado em uma boia flutuante, que se movia para cima e para baixo na superfície da água. A variação na posição vertical do TRM devido ao efeito das ondas superficiais e os efeitos das correntes locais aumentam a dificuldade de obter uma posição precisa da fonte sonora. No entanto, os resultados demonstram que, com o emprego do algoritmo de localização, foi possível obter o posicionamento com erros de profundidade inferiores a 5 metros e erros em distância inferiores a 4 metros para fontes a distâncias de até 1644 metros.

## Capítulo 6

### Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho avaliou o método PTRM para localização de fontes, abordando tanto a localização por meio de sensores de pressão acústica individuais quanto por meio de arranjos verticais.

O algoritmo TRM para localização foi apresentado, e notou-se que sua versão passiva pode ser interpretada como o processo ativo, com a retransmissão ocorrendo de forma virtual, através do processamento de sinais. Após analisar as características de vários modelos de propagação, foram derivados os princípios básicos e as fórmulas de localização passiva com TRM, e desenvolvido o algoritmo de localização utilizando o modelo de propagação de raios. Foram estabelecidos modelos de localização para sensores de pressão individuais e múltiplos, e os algoritmos foram testados com dados sintéticos e reais.

Foram empregados os códigos desenvolvidos para simular e verificar os algoritmos de localização, concluindo que esses algoritmos foram capazes de realizar a localização passiva da fonte mesmo na presença de ruído, com SNR de até -15dB, com erro zero para a busca em distância e erro de até 1m em profundidade, com passos de busca de 1 metro. Foi avaliada também a sensibilidade do método para localização de fontes em um ambiente com incertezas, que demonstrou que a velocidade do som no mar é a variável de maior impacto sobre a precisão do algoritmo, com uma variação de 3% na velocidade do som podendo resultar em erros de estimativa de distância superiores a 4,5%. Ao analisar o efeito de outros fatores ambientais, a variação de até 10% na velocidade do som no sedimento resultou em erros de estimativa inferiores a 4%, enquanto variações na batimetria também resultaram em erros menores que 4%.

Além disso, à medida que o número de elementos aumenta, a precisão do algoritmo de localização também aumenta, indicando que a melhora na capacidade de detecção por meio do ganho do arranjo é aplicável ao processamento de localização passiva com TRM. No processamento dos dados do experimento CALCOM, pôde-se observar que o aumento do número de sensores, além de melhorar o processo de focalização e reduzir o número de regiões de ambiguidade, aumentou o índice de correlação do sinal reconstruído de 79% (com 6

hidrofonos) para 82% (com 16 hidrofonos), o que indica que a cobertura vertical da coluna d'água é um fator relevante para a precisão do método empregado.

Enquanto esta pesquisa obteve resultados significativos na pesquisa da localização passiva com TRM, também enfrentou alguns problemas que precisam ser resolvidos em pesquisas futuras.

O autor acredita que os futuros trabalhos incluirão a pesquisa sobre acompanhamento de alvos com espelhos temporais. O acompanhamento é uma das etapas da classificação de um contato, e é crucial para análises de características do alvo. Além disso, é necessário ampliar o estudo sobre a estabilidade, sensibilidade e tolerância ambiental do algoritmo de localização, avaliando seu desempenho em locais diversos e os erros associados a outros fatores, como o efeito doppler e o efeito das correntes oceânicas sobre o arranjo de recepção.

A redução do volume de processamento do algoritmo de localização com TRM é outra questão importante que precisa ser resolvida para a aplicação prática. Encontrar modelos de propagação oceânica mais simplificados e técnicas de cálculo de canal mais simples, bem como algoritmos mais simples, são abordagens que podem reduzir o volume de processamento. Um algoritmo de otimização eficiente capaz de direcionar a região de busca se faz necessário para que o processo se torne mais rápido e aplicável a situações de tempo real.

## Referências Bibliográficas

1. QIAN, X; ZHOU, G; ZHANG, S. Efficient Underwater Acoustical Localization Method Based on TDOA with Sensor Position Errors. **Sensors**, v. 23, n. 12, p. 1-22, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/12/5555>. Acesso em: 11 jul. 2024.
2. GEBBIE, J. T. **Advances in Aquatic Target Localization with Passive Sonar**. 221 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Portland State University, Portland, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.15760/etd.1931>. Acesso em: 1 jul. 2024.
3. L3HARRIS. **Sonar systems improve combat system algorithms with accurate range and depth data**. 2021. Disponível em: <https://www.l3harris.com/newsroom/publications>. Acesso em: 01 jul. 2024.
4. COOK, G. E.; BROWN, M. B.; MACDONALD, I. G. A. **Smooth Operator's Guide to Underwater Sonars and Acoustic Devices**. Blue Robotics, 2014. Disponível em: <https://bluerobotics.com/learn/guide-to-underwater-sonars/>. Acesso em: 01 jul. 2024.
5. OTNES, R. *et al.* **Underwater Acoustic Networking Techniques**. 1ed. Springer Berlin, Heidelberg, 2012.
6. SANTOS, A. M. H.; CATALÃO, J. P. S. **Undersea Warfare: An Introduction to the Theory and Practice of Underwater Warfare**. Springer, 2018.
7. HODGES, R. P. **Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar**. Wiley-IEEE Press, 2010.
8. CRUM, L. A.; BAGGEROER, A. B. **Advances in Underwater Acoustics**. Springer, 2010.
9. BAGGENSTOSS, P. M.; NEUMAN, C. P. **Underwater Acoustic Signal Processing: Modeling, Detection, and Estimation**. CRC Press, 2019.
10. BAGGEROER, A.B.; HODGKISS, W.S. Matched Field Processing: A tutorial overview. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v.25, 2000.

11. ROUX, P.; HÉTET, J.P.; DE ROSNY, J. Time Reversal in Underwater Acoustics. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v.25, p. 1-9, 2000.
12. LU, M.; ZHANG, B.; WANG, C. Application of time reversal in underwater communication. **Acta Acustica**, v.30, n.4, p.349-354, 2005.
13. PRADA, C.; THOMAS, J.L.; FINK, M. The Iterative Time Reversal Process: Analysis of the Convergence. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 97, p. 62–71, 1995.
14. WANG, H.; HE, X.; HAO, C.; WANG, Z.; HU, Q. Underwater reverberation suppression via attention and cepstrum analysis-guided network. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 2, p. 313, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse11020313>. Acesso em: 11 jul. 2024.
15. LI, Z.; QIAO, G.; SUN, Z.; ZHAO, H.; GUO, R. Short baseline positioning with an improved time reversal technique in a multi-path channel. **Journal of Marine Science and Application**, v. 22, n. 3, p. 476-487, 2023.
16. CLARK, C. W.; ELLISON, W. T. **Potential use of passive acoustics in marine mammal science: Echolocation in bats and dolphins**. University of Chicago Press, p. 564–570, 2004.
17. WÜRSIG, B.; THEWISSEN, J. G. M.; KOVACS, K. M. **Encyclopedia of Marine Mammals**, 3rd ed., p. 2-5. Academic Press, 2018.
18. ZIMMER, W. M. X.; TYACK, P. L. **Behavioral response of marine mammals to anthropogenic sound: A review**. *Aquatic Mammals*, v.46, 2020, p.413-446.
19. STOJANOVIC, M.; PREISIG, J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. **IEEE Communications Magazine**, v. 47, n. 1, p. 84-89, 2009.
20. RICHARDSON, W. J.; GREENE Jr, C. R.; MALME, C. I.; THOMSON, D. H. **Marine mammals and noise**. San Diego: Academic Press, 1995.
21. MOURS, A.; IOANA, C.; MARS, J. I. Target depth estimation in active sonar: Cramer–Rao bounds for a bilinear sound-speed profile. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.140, n.3, p.1771-1782, 2016.

22. STANTON, T. K.; CHU, D.; PERKINS, P. E. Passive acoustic detection and localization. In: MCCARTHY, G. J.; LYNCH, J. F. (Eds.). **Ocean acoustic methods in marine physical ecology**. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 209-241, 2000.
23. GERSTOFT, P.; KUPERMAN, W. A. Matched field processing: 40 years of evolution. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 142, n. 4, p. 2147-2168, 2017.
24. ODOM, R. I.; CORNUELLE, B. D.; WORCESTER, P. F. Range-dependent matched field processing for ocean acoustic tomography. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 139, n. 4, p. 1790-1801, 2016.
25. COLLINS, M. D. Matched field processing: a tutorial overview. **Journal of the Acoustical Society of America**, vol. 97, n. 5, p. 3255-3274, 1995.
26. BAGGEROER, A. B.; KUPERMAN, W.A. Matched Field Processing in Ocean Acoustics. **Journal of Oceanic Engineering**, v.388, pp. 79-114, 1993.
27. LI, Y.; ZHANG, Z.; ZHANG, Y.; WANG, Y. Wideband underwater sound source localization based on deep learning and matched field processing. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 45, n. 2, p. 542-552, 2020.
28. CHAPMAN, N. R. **Inverse Methods in Underwater Acoustics**. In: Applied Underwater Acoustics, Elsevier, cap. 9, p. 553–585, 2017.
29. KUPERMAN, W. A.; INGENITO, F. **Matched field processing for underwater acoustics**. Singapore: World Scientific, 2012.
30. LI, J.; SONG, H. C. Time reversal underwater acoustic communication: A review. **IEEE Access**, v. 7, p. 120145-120157, 2019.
31. NIKOONAHAD, M.; PUSATERI, T. L. Real Time Ultrasonic Phase Conjugation. **IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings**, v. 2, p. 677-679, 1989.
32. FISHER, R. A. **Optical Phase Conjugation**. Academic Press, New York, 1983.
33. PRADA, C.; THOMAS, J.L.; FINK, M. The Iterative Time Reversal Process: Analysis of the Convergence. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 97, p. 62–71, 1995.

34. FINK, M. Time Reversal of Ultrasonic Fields. I. Basic Principles. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.39, n.5, p.555–566, 1992.
35. CASSEREAU, D.; FINK, M. Time Reversal of Ultrasonic Fields. III. Theory of the Closed Time Reversal Cavity. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.39, n.5, p.579–592, 1992.
36. CASSEREAU, D.; FINK, M. Focusing with Plane Time-Reversal Mirrors: An Efficient Alternative to Closed Cavities. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.94, n.4, p.2373–2386, 1993.
37. FINK, M. Time-Reversal Mirrors. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v.26, n.9, p.1333–1350, 1993.
38. FINK, M. Time Reversal Acoustics. **Physics Today**, v.50, p. 34–39, 1997.
39. FINK, M. Time Reversal Mirrors. **Acoustical Imaging**, v.21, p.1–15, 1995.
40. WEI, W.; WANG, C. H. Self-Focusing Performance of Time Reversal Method in the Presence of a Flat Interface. **Applied Acoustics**, v.18, p.1–5, 1999.
41. WEI, W.; LIU, C. Self-focusing of acoustical beam in solid by time-reversal processing. **Acta Acustica**, v.25, n.4, p.340–344, 2000.
42. WANG, C.; WEI, W. Distinguishing between target and interface in ultrasonic detection by a modified time reversal method. **Acta Acustica**, v.27, n.3, p.193–197, 2002.
43. ZHANG, B. X.; LU, M. H.; WANG, C. H. Study of self-focusing in underwater waveguide by time reversal method. **Acta Acustica**, v.27, n.6, p.541–548, 2002.
44. FINK, M.; PRADA, C.; WU, F.; CASSEREAU, D. Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors. **IEEE Ultrasonics Symposium**, v.2, p. 681–686, 1989.
45. JENSEN, F. B.; KUPERMAN, W. A.; PORTER, M. B. **Computational Ocean Acoustics**. 2nd ed. New York, Springer, 2011.
46. WU, F.; THOMAS, J.L.; FINK, M. Time Reversal of Ultrasonic Fields. II. Experimental Results. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.39, n.5, p.567–578, 1992.

47. CASSEREAU, D.; FINK, M. Time-Reversal Focusing through a Plane Interface Separating Two Fluids. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.96, n.5, p.3145–3154, 1994.
48. DRAEGER, C.; CASSEREAU, D.; FINK, M. Theory of the Time Reversal Process in Solids. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.102, n.3, p.1289–1295, 1997.
49. ING, R.K.; FINK, M. Time-Reversed Lamb Waves. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.45, n.4, p.1032–1043, 1998.
50. CHAKROUN, N.; FINK, M.; WU, F. Ultrasonic Non-Destructive Testing with Time Reversal Mirrors. **IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings**, v.2, p.809–814, 1992.
51. CHAKROUN, N.; WU, F.; FINK, M. Improvement of Time Reversal Mirror in Detection of Small Cracks and Metallurgical Defects in Sample with Ultrasonic Speckles Noise Level. **IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings**, v.2, p.705–710, 1993.
52. CHAKROUN, N.; FINK, M.; WU, F. Time Reversal Processing in Nondestructive Testing. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.42, n.6, p.1087–1098, 1995.
53. THOMAS, J.L.; ROUX, P.; FINK, M. Inverse Problem in Wave Scattering in a Small Acoustic Time-Reversal Mirror. **IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings**, v.2, p.1143–1148, 1993.
54. THOMAS, J.L.; WU, F.; FINK, M. Self-Focusing on Extended Objects with Time Reversal Mirror: Applications to Lithotripsy. **IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings**, v.3, p.1809–1814, 1994.
55. THOMAS, J.L.; FINK, M. Ultrasonic Beam Focusing Through Tissue Inhomogeneities with a Time Reversal Mirror: Application to Transskull Therapy. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.43, n.6, p.1122–1129, 1996.
56. JACKSON, D. R.; DOWLING, D. R. Phase Conjugation in Underwater Acoustics. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.89, p.171-181, 1991.

57. KUPERMAN, W.A. *et al.* Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of a time reversal mirror. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.103, n.1, p.25-40, 1998.
58. LEROSEY, G.; TOURIN, A.; FINK, M. Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal. **Science**, v. 315, n. 5815, p. 1120-1122, 2007.
59. KIM, J. S.; SONG, H. C.; KUPERMAN, W. A. Adaptive Time Reversal Mirror. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.109, n.5, p.1817-1825, 2001.
60. LINGEVITCH, J. F.; SONG, H. C.; KUPERMAN, W. A. Time Reversal Reverberation Focusing in a Waveguide. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.111, n.6, p.2609-2614, 2002.
61. KIM, S. *et al.* Echo-to-Reverberation Enhancement using a Time Reversal Mirror. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.115, n.4, p.1525-1531, 2004.
62. SONG, H. C.; KIM, S.; HODGKISS, W. S.; KUPERMAN, W. A. Environmentally adaptive reverberation nulling using a time reversal mirror. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.116, n.2, p.762-768, 2004.
63. SONG, H. C.; HODGKISS, W. S.; KUPERMAN, W. A.; ROUX, P.; AKAL, T. Experimental demonstration of adaptive reverberation nulling using time reversal. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.118, n.3, p.1381-1387, 2005.
64. KIM, S.; HODGKISS, W. S.; KUPERMAN, W. A.; SONG, H. C. Null-broadening in a waveguide. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.112, n.1, p.189-197, 2002.
65. OUYANG, H.; SONG, H. C. Time reversal communication over acoustic channels: Receiver design and experimental results. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 44, n. 3, p. 646-657, 2019.
66. EDELMANN, G. F. *et al.* An Initial Demonstration of Underwater Acoustic Communication Using Time Reversal. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v.27, n.3, p.602-609, 2002.
67. HEINEMANN, M.; LARRAZA, A.; SMITH, K. B. Experimental Studies of Applications of Time-Reversal Acoustics to Noncoherent Underwater

- Communications. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.113, n.6, p.3111-3116, 2003.
68. GOMES, J.; BARROSO, V. Time-Reversed OFDM Communication in Underwater Channels. **IEEE 5th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications**, p.626-630, 2004.
  69. EDELMANN, G. F. *et al.* Underwater Acoustic Communications Using Time Reversal. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v.38, n.4, p.655-666, 2013.
  70. CANDY, J. V. *et al.* Time-Reversal Processing for an Acoustic Communications Experiment in a Highly Reverberant Environment. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.115, n.4, p.1621-1631, 2004.
  71. DERODE, A. *et al.* Taking Advantage of Multiple Scattering to Communicate with Time-Reversal Antennas. **Physical Review Letters**, v.90, n.1, p.1-10, 2003.
  72. NGUYEN, H. T.; ANDERSEN, J. B.; PEDERSEN, G. F. The Potential Use of Time Reversal Techniques in Multiple Element Antenna Systems. **IEEE Communications Letters**, v.9, n.1, p.40-42, 2005.
  73. SONG, H. C. *et al.* Multiple-Input/Multiple-Output Coherent Time Reversal Communications in a Shallow Water Acoustic Channel. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v.31, n.1, p.170-178, 2006.
  74. FINK, M.; DORME, C. Phase Aberration Correction with Ultrasonic Time Reversal Mirrors. **IEEE 1994 Ultrasonic Symposium Proceedings**, v.3, p.1629-1638, 1994.
  75. ZHANG, B. X.; WU, H.; WANG, C. H. Time Reversal Self-Focusing in a Solid-Plate Waveguide. **Chinese Physics Letters**, v.21, n.2, p.337-340, 2004.
  76. KIM, J. S.; SHIN, K. C. Multiple Focusing with Adaptive Time-Reversal Mirror. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.115, n.2, p.600-606, 2004.
  77. SHENG, X.L.; BAO, X.Z.; HUI, J.Y.; LIANG, G.L. Underwater passive location technology using dummy time-reversal mirror. **Proceedings of the 3rd International Conference on Image and Signal Processing**, Cherbourg-Octeville, France, 2008.
  78. SHENG, X. L.; HUI, J. Y.; LIANG, G. L. Research on Spatiotemporal Filtering Technology of Vector Reversal Mirror. **Acta Acustica**, v.30, n.3, p.271-278, 2005.

79. TAN, Z.; LU, Y.; SONG, H. C. Passive time reversal mirror for underwater target detection. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 140, n. 4, p. 2670-2678, 2016.
80. EDELMANN, G. F. *et al.* Underwater acoustic communications using time reversal. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 30, n. 4, p. 852-864, 2005.
81. EDELMANN, G. F. *et al.* Environmental tolerance of time reversal focusing: Experimental study. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 117, n. 5, p. 2989-2995, 2005.
82. SONG, H. C.; HODGKISS, W. S.; KUPERMAN, W. A.; AKAL, T. Passive time reversal underwater acoustic communication. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 126, n. 6, p. 2404-2410, 2009.
83. KUPERMAN, W.A. *et al.* Potential applications of ocean acoustic time-reversal mirrors. **Sea Technology**, v.44, n.11, p.25–29, 2003.
84. LUO, Y.; SONG, H. C.; HODGKISS, W. S. High-resolution source localization using time reversal mirror in a shallow water environment. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 150, n. 3, p. 1785-1794, 2021.
85. ROUX, P.; KUPERMAN, W. A.; HODGKISS, W. S. Passive acoustic time reversal in the ocean. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 116, n. 4, p. 2207-2219, 2004.
86. DOWLING, D. R.; JACKSON, D. R. Narrow-band performance of phase-conjugate arrays in dynamic random media. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.91, n.6, p.3257–3277, 1992.
87. TOLSTOY, A.; HOROSHENKOV, K.V.; BIN ALI, M.T. Detecting pipe changes via acoustic matched field processing. **Applied Acoustics**, v.70, n.5, 2009, p. 695-702.
88. VIO, R.P. **Improved UUV positioning using acoustic communications and a potential for real-time networking and collaboration**. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2017.
89. KANKEY, A. T. **A Method for Focusing Sound in Harbor Environments at Low Frequencies: Theory and Experiment**. Tese (Doutorado) - The Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA, 2008.

90. BLACKSTOCK, D. T. **Fundamentals of Physical Acoustics.**, New York: Wiley-Interscience, 2000.
91. Collins, M. D. **Underwater Acoustic Modeling and Simulation.** 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020.
92. EY, E.; RODRÍGUEZ, O. C. **The cTraceo User Manual (Rep. 01/12 - SiPLAB).** Faro, Portugal, 2012. SiPLAB/FCT/Universidade do Algarve.
93. RODRÍGUEZ, O. C. **The TRACEO Ray Tracing Program.** Faro, Portugal, 2011. SiPLAB/FCT/Universidade do Algarve.
94. MINYI, F. **Simulation and application research on underwater acoustic channel.** Ph.D. thesis, Harbin Engineering University, 2000.
95. HELMHOLTZ, H. **Theorie der luftschwingungen in rohren mit offenen enden (Theory of air vibrations in pipes with open ends).** J. Reine Angew. Math. 1860, pp.1–72.
96. RAYLEIGH, J. W. S. B. Some general theorems relating to vibrations. **Proc. London Math. Soc.**, v.1, 1871, p.357–368.
97. SAMARASINGHE, P.; ABHAYAPALA, T. D.; KELLERMANN, W. Acoustic reciprocity: An extension to spherical harmonics domain. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.142, p.337-343, 2017.
98. KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics.** New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
99. HOVEM, J. M.; DONG, H. Understanding Ocean Acoustics by Eigenray Analysis. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 7, n. 4, p. 118, 2019.
100. RAYLEIGH, J. W. S. B. **The Theory of Sound.** Vol. 2, Macmillan, London, 1896.
101. URICK, R. J. **Principles of underwater sound.** Harbin Shipbuilding Engineering Institute Press, 1990, p.190-225.
102. JOHNSON, D. H.; DUDGEON, E. D. **Array signal processing: Concepts and techniques.** Prentice-Hall, Inc., 1993.

103. ZIOMEK, L. J. **Fundamentals of acoustic field theory and space-time signal processing**. Boca Raton: CRC Press, 1995.
104. LIU, K.-W.; HUANG, C.-J.; TOO, G.-P.; SHEN, Z.-Y.; SUN, Y.-D. **Underwater sound source localization based on passive time-reversal mirror and ray theory**. *Sensors*, v. 22, n. 6, p. 2420, 2022.
105. XAVIER, J. *et al.* A Methodology for the Characterization of Underwater Acoustic Noise Based on Long-Term Measurements. *Sensors*, v. 21, n. 18, p. 6297, 2021.
106. FELISBERTO, P.; JESUS, S.; ZABEL, F. **CALCOM'10 Sea Trial: Field calibration data report**. Relatório Técnico 04/10, SiPLAB, University of Algarve, Faro, Portugal, 2010.
107. MACKENZIE, K. V. Nine-term equation for sound speed in the oceans. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 70, n. 3, p. 807–812, 1981.
108. DINIZ, P. M. **Localização de fontes submarinas por processamento de Campo Casado, focalização e aprendizagem de máquina**. Dissertação (Mestrado em Acústica Submarina) – Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. Arraial do Cabo, p. 96. 2023.
109. NAVAL TECHNOLOGY. **Understanding acoustic signatures**. Naval Technology. Disponível em: <https://www.naval-technology.com/features/understanding-acoustic-signatures/>. Acesso em: 17 jul. 2024.

# APÊNDICE A

## Código utilizado no algoritmo de localização

```

import os

from math import *

import numpy as np

from scipy.io import loadmat

from traceotools import *

#=====
# DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO
#=====

freq = #frequência do sinal buscado#

Rmaxkm = #distância máxima da área de busca#

Rmax = Rmaxkm*1000

Dmax = #Profundidade máxima da área de busca#

ray_step = 10

zs = #Profundidade do hidrofone#

rs = 0

thetamax = #ângulo de abertura de saída dos raios#

ntheta = #definir em função do número de raios utilizados#

thetas = np.linspace(-thetamax,thetamax,ntheta)

source_data = { }

source_data['ds'] = ray_step

source_data['position'] = [rs,zs]

source_data['rbox'] = [rs-1,Rmax+1]

source_data['f'] = freq

```

```

source_data['thetas'] = thetas

#=====

# Define altimetry data:

#=====

alti = [rs-2, Rmax+2]

altimetry = np.array([alti,[0,0]])

surface_data = {}

surface_data['type'] = "V"#; %

surface_data['ptype'] = "H"#; % Homogeneous

surface_data['units'] = "W"#; % (Attenuation Units) Wavelength

surface_data['itype'] = "FL"#;

surface_data['x'] = altimetry #; % Surface coordinates

surface_data['properties'] = [0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0]

#=====

# Define sound speed data:

#=====

z1 = np.array([0,Dmax])

c1 = np.array([1500,1500]) #SSP#

ssp_data = {}

ssp_data['cdist'] = "c(z,z)" #; # Sound speed profile

ssp_data['cclass'] = "ISOV" # ISOV LINP

ssp_data['z'] = z1

ssp_data['r'] = []

ssp_data['c'] = c1

#=====

# Define object data:

#=====

object_data = {}

object_data['nobjects'] = 0 #; % No objects

```

```

#=====
# Define bathymetry data:
#=====

bati = [rs-2, Rmax+2]

bathymetry = np.array([bati, [Dmax, Dmax]])

bottom_data = {}

bottom_data['type'] = "E"

bottom_data['ptype'] = "H" #; % Homogeneous bottom

bottom_data['units'] = "W" #; % (Attenuation Units) Wavelength

bottom_data['itype'] = "FL" #; % Bottom interpolation type

bottom_data['x'] = bathymetry #; % Bottom coordinates

bottom_data['properties'] = [1563.0, 0.0, 1.75, 0.0, 0.0]

# Bottom properties [cp, cs, rho, alfap, alfas]

#=====

# Define output data:
#=====

array_range = #Distância horizontal de busca#

nra = #número de pontos na busca horizontal#

rarray = np.linspace(1,array_range,nra)

nza = #número de pontos na busca vertical#

zarray = np.linspace(1,Dmax,nza)

for i in range(1,zarray.size+1):

    for k in range(1,rarray.size+1):

        output_data={}

        output_data['ctype'] = "ADR" #";

        output_data['array_shape'] = "RRY" #";

        output_data['r'] = np.array([k])

        output_data['z'] = np.array([i])

```

```

output_data['miss'] = 0.1

#=====

# Call the function:

#=====

output_data['ctype'] = "ADR" #";

    wtraceoinfil('test',case_title,source_data,surface_data,ssp_data,object_data,bottom_data,output_data)

os.system('traceo.exe test.in')

zi = str(i)

rk = str(k)

name = 'aad' + '_' + zi + '_' + rk

# renomear o arquivo aad

caminho_atual = 'C:/aad.mat'

novo_nome = 'C:/' + name + '.mat'

os.rename(caminho_atual, novo_nome)

#####

# Importar o sinal recebido nos hidrofones

#####

y1 = # Sinal recebido pelo hidrofone y(t)

x1 = # Sinal transmitido pela fonte x(t)

yinv1 = np.fliplr(y1) #Sinal recebido invertido no tempo

#####

# Source Signal Frequency

#####

fmin = #frequência mínima da banda do sinal de interesse#

fmax = #frequência máxima da banda do sinal de interesse#

```

```

fs = 6000    # frequência de amostragem

# Number of samples (N = T*fs / T: seconds)

T = 1

N = T*fs

# frequency vector creation

f = np.arange(0,N,1)*fs/N

# Emitted signal time vector

duration = 1

t = np.arange(0, duration, 1/fs)

I1t = np.where(f >= fmin)    #índices de f para frequencias maiores que fmin
I2t = np.where(f >= fmax)    #índices de f para frequencias maiores que fmax

I1 = I1t[0][0]                #índice de f da frecuencia minima
I2 = I2t[0][0]                #índice de f da frecuencia maxima

# Model amplitudes and delays

Z = np.zeros((zarray.size, rarray.size), dtype=np.float64)

for z in range(1,zarray.size+1):

    for r in range(1,rarray.size+1):

        try:

            data = loadmat('C:/aad_'+ str(z) + '_' + str(r) + '.mat')

            neigrays = int( np.squeeze( data["neigrays"] ) )

            name = 'aad00000'

            tau = []

            amp = []

```

```

for i in range(1,neigrays+1):

    ri = str(i)

    aad = data[name[0:-len(ri)] + ri][0]

    tau.append(aad[2])

    # amplitude = (realpart + imagpart)e^(caustc)

    amplitude = ( (aad[3] + 1j*aad[4] ) * np.exp(1j* aad[5]) )

    amp.append( amplitude )

except (FileNotFoundError, ValueError):

    tau = []

    amp = []

# Compute H(w) using the time-delay property of FT

nrd = len(amp)

H = np.zeros(N,dtype=complex)

for l in range(nrd):

    for k in range(I1,I2+1):

        w0 = 2*np.pi*f[k]

        H[k] = H[k] + amp[l] * np.exp(-1j * w0*tau[l])

wl = I2-I1+1 # wl window length

window = signal.windows.tukey(wl,alpha=0.5)

H[I1:I2+1] = H[I1:I2+1] * window

H[ int(N/2)+1 : N ] = np.flip(np.conj(H[1:int(N/2)]))

H = H * N/2 # % divided by 2 to account for the negative frequencies

h = ifft(H)

z1 = signal.convolve(yinv1, h, mode='full')

z1x = z1[0:t.size-1] + z1[t.size:z1.size]

z1x = np.hstack([z1x, np.array([0])])

```

```
Z1x = fft(z1x)

Z1x = Z1x / ((np.abs(H)**2) + 1e-8) #Para evitar divisão por zero

z1x = ifft(Z1x)

z1x = np.fliplr(z1x)          # sinal transmitido recuperado

Z[z-1][r-1] = np.corrcoef(x1, z1x)[0, 1]

posicao = np.unravel_index(np.nanargmax(Z.real), Z.shape)
```