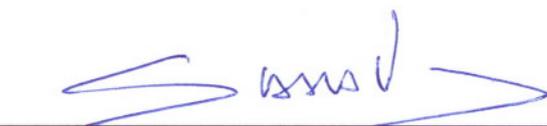


ESTIMAÇÃO DE DISTÂNCIA DE FONTES SONORAS NO MAR COM
TÉCNICAS ACÚSTICAS PASSIVAS

Ana Valéria Greco de Sousa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:



Prof. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.



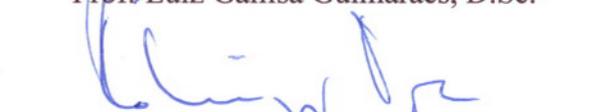
Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.



Prof. Webe João Mansur, Ph.D.



Prof. Luiz Galfisa Guimarães, D.Sc.



Prof. Andrés Reinaldo Rodríguez Papa, D.Sc.



Eng. William Soares Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

SOUSA, ANA VALÉRIA GRECO DE

Estimação de Distância de Fontes Sonoras
no Mar com Técnicas Acústicas Passivas [Rio de
Janeiro] 2008

VIII, 150 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Oceânica, 2008)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Localização de fonte sonora
2. Modos normais
3. Campo casado
4. Ruído de cavitação
5. Águas rasas
6. Acústica submarina

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedicatória

Ao meu marido Fernando e ao meu filho Bruno, por toda a paciência e o carinho nos momentos de maior desafio.

Aos meus pais, Alfredo e Edlaine, pelos ensinamentos que utilizei para chegar até aqui.

Agradecimentos

Não gostaria de ser injusta com alguém por colocar uma ordem neste espaço de agradecimentos ou até mesmo por deixar de citar algum nome. Por isso, saibam que todos, de alguma maneira, me ajudaram durante minha vida profissional, e que se, de algum modo, consegui subir mais este degrau, foi porque tive a ajuda e o carinho de vocês:

Ao meu marido Fernando e ao meu filho Bruno, que me deram muito amor e compreensão, em todos os momentos;

Ao meu mestre e amigo, prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, que sempre me orientou em minhas tarefas acadêmicas e profissionais. Sem a sua ajuda e incentivo, nada disso teria sido possível;

À minha orientadora, prof. Susana Beatriz Vinzon, que permitiu a realização desta Tese;

Ao Vice-Almirante (RM1) Uzeda, ex-Diretor da Diretoria de Sistemas de Armas da Marinha, e à Capitão-de-Fragata (EN) Marília Avelar Oliveira, por permitirem a realização deste Doutorado;

Aos amigos Cátia Galotta, Cleide Vital, Marcos Damas e William Soares Filho e demais membros do Grupo Sonar do Instituto de Pesquisas da Marinha;

À tripulação dos Submarinos “TAMOIO” e “TIMBIRA”, em especial ao Sr. Chefe de Operações, Capitão-Tenente Christian Hinsgt, por terem realizado a aquisição de dados necessária à realização deste trabalho;

Ao professor Sérgio Jesus, da Universidade do Algarve, que disponibilizou dados experimentais e auxiliou os primeiros passos deste trabalho;

Finalmente, agradeço a Deus, pois Ele orienta nossos caminhos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTIMAÇÃO DE DISTÂNCIA DE FONTES SONORAS NO MAR COM TÉCNICAS ACÚSTICAS PASSIVAS

Ana Valéria Greco de Sousa

Agosto/2008

Orientador: Prof. Susana Beatriz Vinzon

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho avalia a aplicação de métodos baseados na teoria de campo casado (“Matched Field Processing”-MFP) para a localização de fontes sonoras de forma passiva em águas rasas. Trata-se de um problema de inversão que também pode ser utilizado para determinar os parâmetros geoacústicos do ambiente. A propagação das ondas sonoras em águas rasas é descrita pela teoria de modos normais, e implementada por diversos modelos de propagação existentes e divulgados no meio científico. O método é testado por meio de simulações e utilizando-se dados experimentais fornecidos pela Universidade do Algarve (fonte sonora conhecida), e posteriormente, as técnicas são aplicadas ao ruído de cavitação de navios de superfície recebido pelos submarinos da Marinha do Brasil (fonte sonora desconhecida) a distâncias que variam de 6000 a 20000 m. O método apresenta acurácia para ser aplicado à medição de distância, porém ainda há dificuldade em estabelecer a influência do conhecimento da forma da onda da fonte sonora, por se tratar de um problema altamente não-linear.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DISTANCE ESTIMATION OF SOUND SOURCES AT SEA WITH PASSIVE
ACOUSTIC TECHNIQUES

Ana Valéria Greco de Sousa

August/2008

Advisor: Prof. Susana Beatriz Vinzon

Department: Oceanic Engineering

This paper presents a study of feasibility of applying methods based on the Matched Field Processing MFP for passive source localization. This technique can also be applied to other types of inversion problems such as environment geoacoustic parameters. The acoustic wave propagation in shallow waters is described with normal mode theory, and can be implemented in diverse existing and divulged models of propagation. Simulations for performance investigation despite of geoacoustic parameters uncertainties were held, and after that, the method is tested using experimental data supplied by University of Algarve (source waveform known), and with surface ships cavitation noise acquired by Brazilian Navy submarines (source waveform unknown), with distances from 6000 up to 20000 m. The method presents accuracy to be applied to the range measurement, however, there is still difficulty in establishing the influence of the knowledge of the source waveform, due to the fact that it is a highly non linear problem.

Índice

<u>Capítulo 1</u>	Página
1. Introdução	1
1.1 Histórico	3
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivo	5
1.4 Contribuições esperadas	5
1.5 Organização do texto	6
<u>Capítulo 2</u>	
2. Propagação em águas rasas	7
2.1 Características gerais	8
2.2 Teoria de Modos Normais	9
2.3 Modelos de propagação	34
<u>Capítulo 3</u>	
3. Processamento de sinais para localização de fonte	44
3.1 Método do Campo Casado	48
3.2 Sensores	70
3.3 Sinais de banda larga e de banda estreita.	73
3.4 Influência dos parâmetros ambientais	74
3.5 Movimento do alvo	78
<u>Capítulo 4</u>	
4. Ruído de cavitação	80
4.1 Fundamentos teóricos	84
4.2 Ruído de cavitação como fonte sonora para o MFP	86
4.3 Modelagem	88

Capítulo 5

5.1 Fonte conhecida e estática	92
5.2 Fonte desconhecida e dinâmica	98

Capítulo 6

6.1 Discussão	113
6.2 Conclusão	115
6.3 Propostas de continuação do tema.	116
6.4 Referências bibliográficas	116

Anexo

1 Simulação	130
2. Espectro da réplica para INTIMATE'96	150

Capítulo 1

Introdução

A acústica submarina começou a se desenvolver, principalmente, a partir da I e da II Guerras Mundiais, em virtude de cenários de operação navais em águas rasas e profundas. Durante a Guerra Fria, as pesquisas se concentraram em águas profundas devido à profundidade de atuação dos submarinos com mísseis balísticos. Atualmente, o foco das pesquisas reside em águas rasas, tipicamente, em profundidades inferiores a 200 m, pois os conflitos concentram-se nessas áreas (Golfo Pérsico, Leste europeu, por exemplo), e por causa da vigilância de portos, costas e plataformas de petróleo.

Em termos militares, estudar a propagação em águas rasas permite que se vislumbrem inúmeras aplicações dessa área do conhecimento, como a localização de alvos a longas distâncias e minas, determinação de parâmetros geoacústicos para a previsão de alcance sonar, comunicação acústica submarina, sistemas de vigilância de plataformas de petróleo, portos e costas e monitoração de explosões a longa distância, principalmente, as oriundas de testes com bombas nucleares. Como avanços tecnológicos militares sempre implicam em outras muitas aplicações civis, dentre elas destacam-se: exploração de riquezas renováveis (pesca), exploração de riquezas não renováveis (minerais), monitoração sísmica, mapeamento da estrutura do oceano e sua topografia, localização de artefatos arqueológicos, monitoração da biologia marinha, monitoração de variações da temperatura e fenômenos físicos associados, como o aquecimento global (TANTUM *et al.*, 2002, WAITE, 2003, JESUS *et al.*, 2006, KUPERMAN *et al.*, 2004, NIELSEN *et al.*, 2003, TAROUDAKIS e MAKRAKIS, 2001, THODE, 2004).

Apesar da acústica em águas rasas ser estudada intensivamente, tanto sua teoria quanto sua avaliação experimental, ela ainda permanece como sendo um grande desafio. No âmbito militar, detectar passivamente um alvo que irradia ondas sonoras de baixa potência em águas rasas ainda é uma meta a ser alcançada, pois os fatores abaixo citados contribuem significativamente para dificultar esse processo:

- As fontes de interesse são geralmente extremamente silenciosas;
- As águas litorâneas são caracterizadas por um grande número de interferências e de ruído ambiental, principalmente abaixo de 1 kHz, o que dificulta a detecção e a classificação do alvo; e
- O ruído acústico e a propagação variam temporalmente, espacialmente e geograficamente.

No entanto, o que é instigante na propagação em águas rasas é o fato de seus contornos, superfície e fundo serem de grande influência, propiciando um confinamento da energia no duto, e propagando as ondas a longas distâncias, para baixas frequências, em que quase não há efeito da absorção. Além disso, a relação entre frequência (comprimento de onda) e profundidade do duto (característica geométrica) indicam a ocorrência de modos propagantes, que implicam em padrões de interferência. Outro fato relevante é o decaimento das perdas de forma cilíndrica em relação a distância.

Assim, pode-se concluir que a propagação acústica em águas rasas é complexa, porém o seu conhecimento permitirá acrescentar informações a respeito do sinal recebido para análise, possibilitando avaliações mais próximas da realidade e conseqüentemente, mais precisas independente do tipo de aplicação (militar ou civil). O desafio atual é, a partir da física, extrair a informação do sinal que se propaga em um guia de onda com perdas e dinâmico, em meio ao ruído, que também é influenciado por essa mesma complexidade. Em acústica submarina, localizar é determinar a distância e a profundidade da fonte sonora. Neste trabalho, a fonte sonora é ruído irradiado por uma fonte na superfície, principalmente, o hélice. Vislumbra-se que associando-se um modelo de propagação adequado à determinada área de águas rasas, com padrões de interferência, a técnicas de processamento de sinais é possível determinar a distância e a profundidade de uma fonte sonora ou determinar parâmetros geoacústicos, uma vez conhecidos os dados da fonte. Devido às características do sinal da fonte, banda larga e o desconhecimento de sua forma de onda, aliado ao fato de que o sinal chega em um único receptor, o método de processamento de sinais selecionado foi o “Campo Casado” (MFP - Matched Field Processing).

1.1 Histórico

A técnica de processamento de sinais Campo Casado foi introduzida por BUCKER em 1976, baseando-se em um trabalho de conformação de feixe (“beamforming”), em que assume-se a propagação de uma onda plana. A eficiência da técnica foi demonstrada por experimentos usando “arrays” verticais na estação de gelo denominada FRAM IV, no Ártico, em 1984. Desde então, muitos algoritmos foram desenvolvidos e muitas experiências têm sido realizadas para explorar MFP. O conceito essencial de MFP reside na incorporação da física da propagação à conformação de feixe para “arrays” horizontais ou verticais, e também pode ser aplicada em hidrofones únicos, como alguns artigos recentes demonstram, sendo também uma proposta deste trabalho a sua utilização. Essa técnica permite a localização do alvo, isto é, a determinação da sua distância e da sua profundidade, e evita a degradação do ganho do sinal, se um modelo de onda plana é usado onde poderia ser aplicado um modelo de propagação mais complexo. Alternativamente, a ênfase pode ser direcionada para a tomografia combinada com o campo (MFT – “Matched Field Tomography”) que usa as mesmas técnicas para estimar parâmetros ambientais. Trata-se da associação de modelo de propagação de determinada área a técnicas de processamento de sinais, para extrair mais informação do sinal (TOLSTOY, 1998).

MFP (e MFT) tem agora pouco mais de vinte anos, o que torna possível avaliar o seu desempenho. A literatura aponta inúmeras demonstrações de sua eficiência na localização de fontes a grandes distâncias (centenas de quilômetros), principalmente em canais profundos. A experiência em águas rasas intensificou-se mais no final da década de 90 e ainda permanece um desafio. Em geral, todos os experimentos enfatizam a localização e a tomografia com relação sinal-ruído (SNR) alta, enquanto a detecção com SNR baixo é o problema mais importante para o sonar passivo. Além disso, utilizar sinais de banda larga, para agregar mais informação sobre o meio e permitir a redução no número de elementos dos “arrays”, passou a ser uma tendência somente nos últimos anos. Até o momento, não existe uma conclusão a respeito da eficiência do MFP com o conhecimento da fonte ou não, e ainda faz parte da literatura uma busca pela determinação das incertezas que inviabilizam a sua implementação.

1.2 Motivação

O sonar é o equipamento utilizado por navios e submarinos para detectar e localizar alvos submersos, no modo ativo ou passivo. Um sonar ativo transmite um sinal e obtém as informações do alvo a partir do eco de retorno. O sonar passivo trabalha em “escuta”. Ele detecta o alvo e fornece a sua marcação e como ela varia com o tempo. A distância do alvo, por sua vez, não é conhecida diretamente. Sinais comparáveis que chegam ao “array” podem ser resultado de uma fonte distante muito ruidosa ou de um alvo muito próximo e silencioso. Para determinar a distância do alvo, utiliza-se um processamento do ruído de cavitação do navio de superfície que chega nos “arrays” e manobras do submarino, que demandam tempo, e expõem o submarino.

A mudança do cenário das operações navais para águas rasas faz com que haja uma busca por técnicas de processamento de sinais que, aliadas ao conhecimento da propagação acústica submarina, possam ser aplicadas para auxiliar o equipamento e o operador na detecção e localização do alvo. A figura 1 ilustra a justaposição de espectros de ruído gerado por um navio de superfície recebido por um submarino da Marinha do Brasil em águas rasas. Esse é o tipo de sinal a ser investigado neste trabalho associado à técnica de campo casado, e será a partir do conhecimento dos padrões de interferência da propagação acústica que a distância entre a fonte sonora (navio) e o receptor (submarino) será determinada.

A técnica MFP tem seu desempenho comprovado desde a década de 80, e vem se aprimorando e aumentando os casos de aplicação até hoje, em virtude dos avanços das técnicas de processamento de sinais, do aumento da capacidade computacional e da acurácia dos modelos de propagação. Assim, a sua associação a modelos de propagação adequados ao ambiente em análise, indicam a sua aplicação à localização de alvos de superfície com sonar passivo do submarino.

É importante destacar que o “problema” da localização da fonte sonora pode ser equacionado de maneira simplista como uma parte propagação acústica e outra de processamento de sinais. No entanto, os principais fatores complicadores são o ruído ambiente e a própria natureza da fonte sonora, que tem baixa relação sinal-ruído (“Signal to Noise Ratio - SNR”), também sofre os mesmos efeitos da propagação, e não é controlada.

Outrossim, a mesma análise utilizada para localizar uma fonte sonora pode ser empregada para determinar os parâmetros geoacústicos. É uma compensação. Se tenhã o conhecimento dos dados de distância entre fonte e receptor, podem-se determinar os referidos parâmetros.

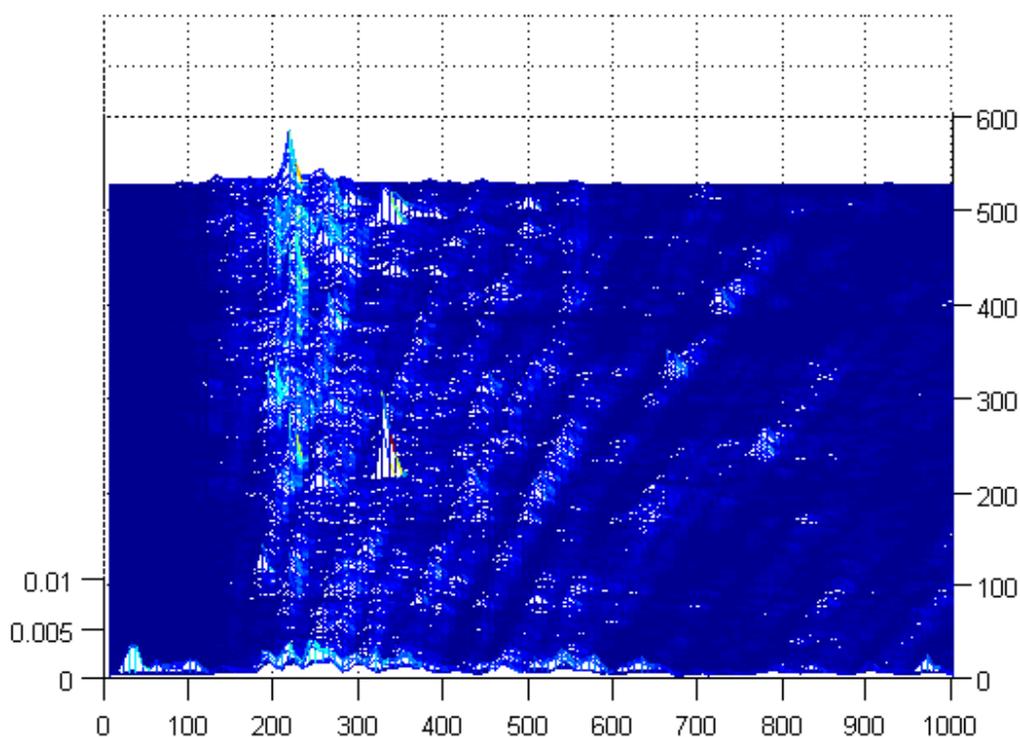


Figura 1 - Justaposição de espectros de sinais recebidos pelo sonar do submarino.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é determinar a distância de uma fonte sonora de forma passiva em águas rasas, associando um modelo de propagação à técnica de campo casado, e propiciando a sua localização a longas distâncias. Investiga-se, também, a possibilidade de se utilizar o ruído de cavitação gerado pela rotação do hélice de navios de superfície como fonte sonora a ser localizada.

1.4 Contribuições esperadas

Este trabalho pretende contribuir com a literatura vigente, principalmente, em relação aos seguintes aspectos:

- Utilização do ruído de cavitação como fonte sonora, pois este é de banda larga, não tem forma de onda conhecida, não é um sinal controlado (repetibilidade) e tem baixa relação sinal-ruído.
- Utilização de um modelo de propagação de modos normais conhecido e estabelecido em conjunto com a técnica MFP (conhecimento de parâmetros geométricos e geoacústicos) com um único receptor, estando tanto a fonte como o receptor em movimento; e
- Em termos militares, obter rapidez e precisão para determinar a distância, sem que seja necessário realizar manobras.

1.5 Organização do texto

Este trabalho está disposto em seis capítulos, incluindo este introdutório e um anexo. Os Capítulos 2 e 3 apresentam os fundamentos teóricos da propagação em águas rasas e do MFP, respectivamente. Em seguida, no Capítulo 4, são descritas as características do ruído de cavitação, que será a principal fonte sonora a ser investigada neste trabalho. O Capítulo 5 contém a descrição dos experimentos e seus resultados com fonte sonora conhecida e com o ruído de cavitação de navios mercantes como fonte. A discussão dos resultados e a conclusão encontram-se no Capítulo 6. No Anexo, são apresentados resultados de simulações.

Capítulo 2

Propagação em águas rasas

De acordo com ETTER (2003), há duas definições para águas rasas: uma hipsométrica e outra acústica. A definição hipsométrica baseia-se no fato da maior parte dos continentes ter plataformas continentais delimitadas por um contorno batimétrico de 200 m, e além do qual, a profundidade aumenta rapidamente para águas profundas. Assim, as “águas rasas” constituem, em média, a região de plataforma continental com profundidade inferior a 200 m.

Em termos de Acústica Submarina, as águas rasas ocorrem sempre que a propagação sonora for caracterizada por múltiplas interações com o fundo e a superfície marinha. Por esta definição, algumas áreas consideradas como “águas rasas” pela hipsometria são acusticamente profundas. Por outro lado, o oceano profundo pode ser considerado raso quando se têm condições de frequências baixas e propagação a longas distâncias com interações repetidas com o fundo e a superfície.

As regiões de águas rasas são distinguidas das de águas profundas pelo grande papel exercido pelos contornos espalhadores e refletores em águas rasas. As diferenças entre duas regiões de águas rasas são primeiramente originadas por diferenças de estrutura e composição do fundo do oceano. Apesar da profundidade da camada de água, o fundo marinho também é uma parte importante do ambiente para diferenciar águas rasas de profundas. Os sedimentos de fundo mais comuns são areia, argila e lama com velocidades de onda compressional maiores que na camada de água. Os sedimentos também são caracterizados por ondas cisalhantes que não estão presentes na água. A energia acústica que chega no fundo do oceano com ângulos de ataque suficientemente pequenos são quase totalmente refletidos de volta para a coluna d'água. Isso resulta em um duto levemente atenuante, com a sua perda na propagação podendo ser caracterizada aproximadamente por divergência cilíndrica para frequências entre 100 e 1500 Hz. Para frequências baixas, o

campo acústico pode se estender até o fundo com a energia acústica retornando para a água através da reflexão ou refração do subfundo.

2.1 Características gerais

Uma característica marcante da propagação sonora em águas rasas é a configuração do perfil da velocidade do som, que normalmente, apresenta um gradiente negativo ou aproximadamente constante na coluna d'água. Isto significa que a propagação a longas distâncias se deve quase que exclusivamente às interações do som com o fundo e a superfície, gerando os denominados multicaminhos.

A frequência da fonte é outro fator relevante na propagação, devido ao processo de absorção e atenuação do sinal. Considerando um fundo absorvedor, quanto mais baixa for a frequência, maior a penetração do som no fundo. Para frequências superiores a 1 kHz, a onda sonora é mais sensível à rugosidade da superfície e do fundo, e aos seres marinhos, acarretando maior espalhamento, e menor penetração no fundo. Logo, pode-se dizer que a propagação para baixas e médias frequências é dominada pela perda por reflexão no fundo; e para frequências altas, a perda por espalhamento é predominante. Há sempre uma “competição” entre esses fenômenos. Uma característica comum aos dutos acústicos é a existência de uma frequência baixa de corte. Ou seja, uma frequência crítica que abaixo dela o canal sonoro cessa de funcionar como um guia de onda, direcionando toda energia irradiada pela fonte diretamente para o fundo. Quando o comprimento de onda aumenta (frequência decai), a eficiência do duto de confinar o som se reduz. Para ilustrar essa característica, a equação (2.1) apresenta a expressão da frequência de corte inferior (f_0) para um meio homogêneo (água e fundo) e isovelocidade. Para um fundo rígido, $c_b \rightarrow \infty$, e o corte ocorre quando $H = \lambda/4$.

$$f_0 = \frac{c_w}{4H\sqrt{1-(c_w/c_b)^2}} \quad (2.1)$$

Onde,

c_w : velocidade de propagação na água;

c_b : velocidade de propagação no fundo.

Em suma, a propagação em águas rasas é muito complexa, pois a superfície, o volume e as propriedades do fundo são relevantes, variam espacialmente e os parâmetros, em geral, não são conhecidos em detalhes e com acurácia suficiente (JENSEN *et al.*, 1994). Por outro lado, uma vez que estes efeitos sejam conhecidos, é possível extrair toda essa riqueza de informação dos sinais propagados.

2.2 Teoria de Modos Normais

A análise por modos é oriunda da teoria de vibrações aplicada a uma corda com extremidades fixas, que sofre um deslocamento transversal sem amortecimento. Por analogia, a superfície da água e a interface água-fundo seriam as extremidades com a propriedade de reflexão total. Como inicialmente não se considera o amortecimento, a corda vibrará indefinidamente, deslocando meio ciclo de senóide com amplitude máxima no centro (antinodo), e nula nas extremidades (nodos). Este é o chamado 1º modo normal ou modo natural. Se a corda vibrar, tendo além dos pontos nodais nas extremidades, um outro nodo no centro, ela desenvolverá um ciclo de senóide completo e vibrará no segundo modo normal. Em seguida, ocorrem os modos subseqüentes. A figura 2.1 ilustra os três primeiros modos.

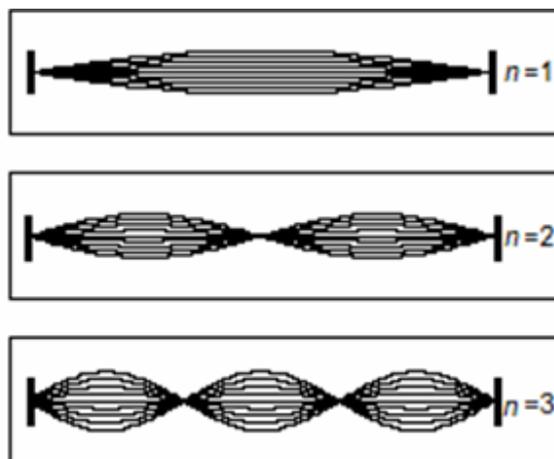


Figura 2.1 – Modos normais de vibração de uma corda presa nas extremidades. Retirada de SOUZA *et al.* (2007).

No modelo oceânico idealizado, a superfície da água é tratada como uma superfície livre (coeficiente de reflexão -1) e o fundo é perfeitamente rígido (coeficiente de reflexão +1), onde as reflexões são especulares. A velocidade do som na água (c_w) é constante e as ondas sonoras são consideradas planas. COATES (2002) aborda o problema como uma bola de bilhar que muda a direção de seu caminho conforme se choca com as paredes da mesa. A figura 2.2 ilustra a reflexão de uma frente de onda plana ao interagir com a superfície da água. A frente de onda (vermelho), de alta pressão, incide na superfície livre, reflete e inverte a fase, retornando ao ambiente como uma frente de onda de baixa pressão (verde). A sua direção de propagação é normal à frente de onda. Considera-se uma velocidade horizontal aparente da frente de onda equivalente a $c_w \sin \theta$, onde θ é o ângulo de incidência, ilustrado na figura 2.3 para uma irradiação periódica. Sendo o meio insonificado continuamente por ondas periódicas, haverá formação de um campo sonoro resultante das interferências construtivas e destrutivas entre as frentes de onda. Na figura 2.3(a), nota-se que as regiões de pressão máxima surgem no cruzamento das frentes de alta pressão (vermelho); as de mínima pressão, no cruzamento de frentes de pressão baixa (verde); e o cruzamento de uma linha de alta pressão com a de baixa pressão, ocasiona a interferência destrutiva, isto é, regiões de pressão nula.

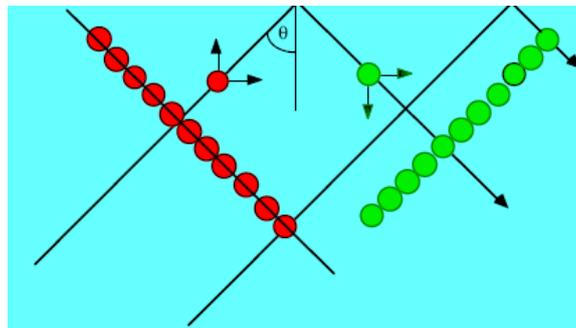


Figura 2.2 - Reflexão de uma frente de onda plana (vermelho) ao interagir com a superfície da água, mudando de direção (verde).

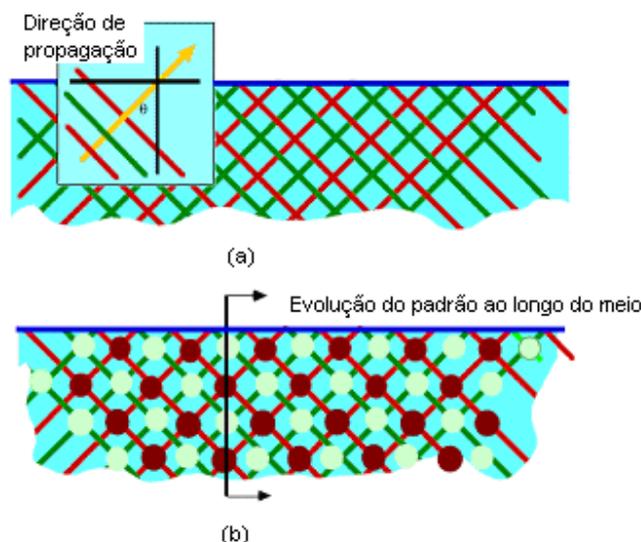


Figura 2.3 – Insonificação periódica de um canal sonoro e formação do campo de pressão por interferências entre as frentes de onda. O fluxo do padrão de interferências se move para a direita. (a) Reflexão das frentes de onda na superfície. (b) Deslocamento do padrão de interferência. Retirada de COATES (2002).

Assim, de maneira análoga à corda vibrante com extremidades fixas, o campo de pressão é aprisionado entre a superfície livre e o fundo rígido. Esse fenômeno só ocorre se a relação entre a profundidade da coluna d'água e a frequência de excitação da fonte propicia as condições adequadas de reflexão para os raios emitidos com ângulos de incidência específicos. A figura 2.4 ilustra 4 guias de ondas com profundidades distintas, as quais satisfazem as condições de confinamento de modos discretos. Todos os demais parâmetros, como c_w , frequência da fonte, densidade da água e as características da superfície e do fundo são constantes e iguais para todos os guias. Os pontos nodais são os pontos de pressão nula; e os antinodos, os pontos de pressão máxima. Essa função varia como uma senoide no tempo na frequência de excitação da fonte. Deve-se ressaltar que o posicionamento da fonte é importante para verificação dos modos. Caso a fonte seja colocada em um nodo de um determinado modo, este não será excitado. Portanto, é importante posicioná-la nos antinodos para se obter uma excitação máxima.

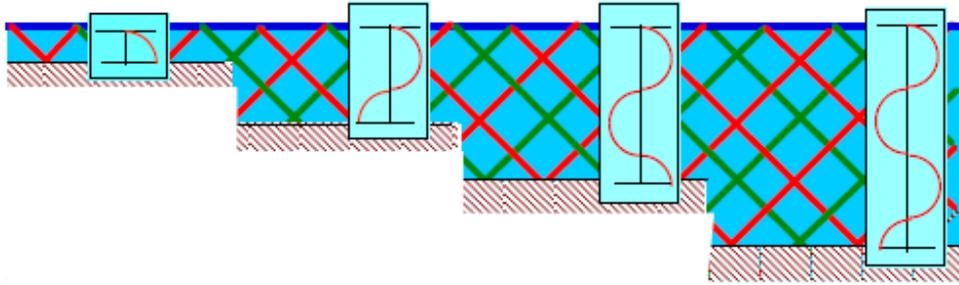


Figura 2.4 – Confinamento dos modos para 4 guias de ondas de profundidades distintas. Retirada de Coates (2002).

Como na prática não se pode escolher a profundidade do canal, ao selecionar uma frequência, verifica-se qual modo ou modos estão sendo excitados, para um determinado ângulo de incidência. A partir da figura 2.5, é possível estabelecer essa relação:

$$\theta_m = \cos^{-1} \left[\frac{\lambda}{2h} (m - 0,5) \right], \quad m = 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

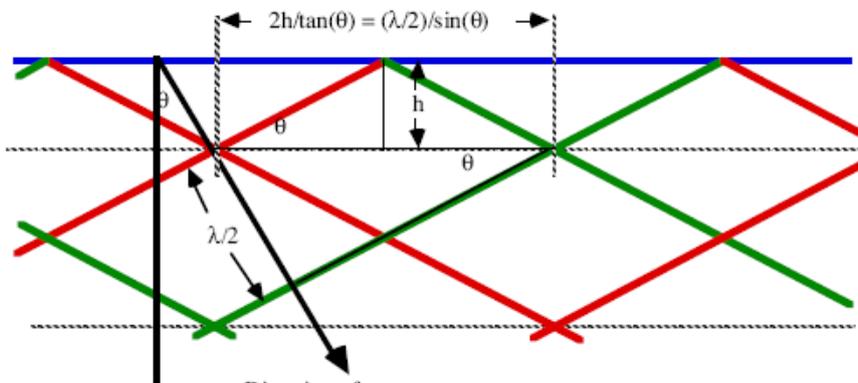


Figura 2.5 – Geometria para determinação da relação entre ângulo de incidência, comprimento de onda e a profundidade h . Retirada de COATES (2002).

A partir da expressão 2.2 pode-se dizer que se θ_m tender para 90° , as frentes de onda seguirão um alinhamento quase vertical, propagando-se praticamente com a velocidade de fase (c_w). Contudo, se a profundidade do canal é próxima de $\lambda/4$, θ_m tende para 0° , e as frentes de onda terão um alinhamento quase horizontal, formando ondas estacionárias, que

se refletem continuamente no fundo e na superfície. Neste caso, a velocidade de propagação do padrão de interferência, velocidade de grupo, será nula. A respectiva frequência em que isso ocorre é denominada de frequência de corte para o n -ésimo modo, pois para frequências abaixo dela, o modo deixa de existir. Como vários modos estão se propagando, cada qual com sua velocidade de grupo, o campo de pressão é constituído pela superposição das pressões geradas por cada modo.

2.2.1 Formulação matemática para um “guia de ondas ideal” e um “guia de ondas real”

Considerando um meio plano e em camadas, é conveniente abordar a equação da onda em coordenadas cilíndricas (2.3). Os modos normais são uma solução desta equação. A determinação do campo de pressão p para uma fonte harmônica ou de onda contínua pode ser descrita como um produto de soluções independentes em função da distância r , da profundidade z e do tempo t , utilizando a separação de variáveis:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

(2.3)

$$p \approx U(r)Z(z)T(t)$$

Substituindo a expressão de p na equação da onda possibilita-se a determinação de equações independentes, em função de apenas uma variável:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{U(r)} \left(\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} \right) + \frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} &= \frac{1}{c^2 T(t)} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} \\
\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} &= -\kappa^2 U(r) \\
\frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} &= -\gamma^2 Z(z) \\
T(t) &= e^{i\omega t} \\
k^2 &= \frac{\omega^2}{c^2(z)} \\
k^2 &= \kappa^2 + \gamma^2 \\
\kappa &= k \cdot \sin(\theta) \\
\gamma &= k \cdot \cos(\theta)
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

Onde,

k : número de onda;

κ : componente radial do número de onda;

γ : componente vertical do número de onda.

θ : ângulo de incidência

Considerando um guia ideal, como ilustrado na figura 2.6, a expressão (2.5) apresenta a solução $U(r)$. Esta solução considera apenas a onda propagante, pois esta se propaga a grandes distâncias, e é uma aproximação conveniente. Como $U(r)$ é função somente de r , κ é constante para toda a profundidade; e γ , depende de $c(z)$ e ω .

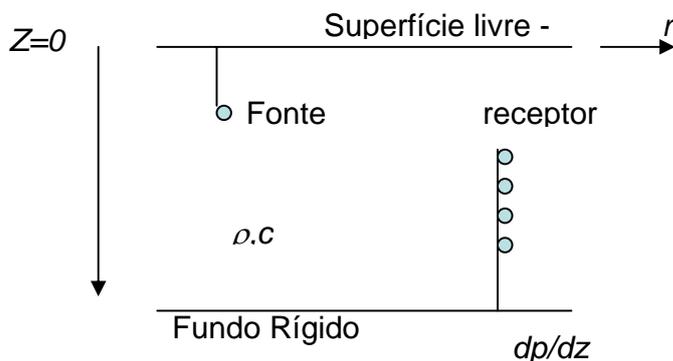


Figura 2.6 – Guia de ondas ideal.

$$U(r) = H_0^{(2)}(\kappa r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi \kappa r}} e^{-i(\kappa r - \pi/4)}, \text{ para } \kappa r \gg 1 \quad (2.5)$$

Onde $H_0^{(2)}$ é a função de Hankel.

Um guia de onda ideal consiste de um fluido homogêneo limitado por superfícies livres, com coeficientes de reflexão unitários. Nele, todas as ondas ficam aprisionadas. No guia real, existe uma distância mínima de aprisionamento, pois os raios têm que ser refletidos em ângulos maiores que os ângulos críticos de incidência.

Uma camada de água sobre uma camada de sedimento (fundo rígido) pode ser aproximada por um guia de onda ideal. As condições de contorno exigem que a pressão desapareça na interface superior e inferior. Desta forma, trata-se de um problema de Sturm-Liouville, cuja solução é formada por uma base de auto-valores e auto-funções ortogonais. As auto-funções $Z(z)$ devem satisfazer às condições de contorno (2.6).

$$\begin{aligned} Z(z) \Big|_{z=0} &= 0 \\ \frac{dZ(z)}{dz} \Big|_{z=h} &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \gamma_m h &= (m - 0,5)\pi \\ Z_m(z) &= \text{sen}(\gamma_m z) \end{aligned} \quad (2.7)$$

As autofunções $Z_m(z)$ também são chamadas de modos normais. Pode-se visualizar a propagação em modos como uma onda propagante na direção horizontal r , e estacionária em profundidade z .

A equação 2.7 (equação característica) permite inferir que quanto maior o número de modos, maior será a componente vertical do número de onda, e conseqüentemente, menor será o ângulo de incidência (medido entre o raio e a normal). Assim, reforça-se a idéia dos modos serem relacionados com a direção de propagação no interior do guia de ondas, e suas interações, interferências construtivas, geram as ondas estacionárias ao longo da profundidade. Assim, BREKHOVISKIKH *et al.* (2003) resume estas características dos modos normais considerando cada modo como uma onda propagante na direção horizontal

e uma estacionária na profundidade, e propõe uma representação dos modos normais como uma superposição de duas ondas propagantes quase-planas:

$$p_m(r, z) \approx r^{-1/2} \{ \exp[i(\kappa_m r + \gamma_m z)] - \exp[i(\kappa_m r - \gamma_m z)] \} \quad (2.8)$$

Uma das propriedades das autofunções é a ortogonalidade dos modos representada pela equação 2.9:

$$\int_0^h \rho \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{h}z\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{h}z\right) dz = v_m \delta(m-n) \quad (2.9)$$

Onde: $v_m = \rho h/2$ e $\delta(n-m) = 1$ para $n=m$ e 0 , para $n \neq m$.

Utilizando a integral de ortogonalidade, define-se o parâmetro v_m como uma variável proporcional ao fluxo médio de energia que passa pela seção vertical do guia:

$$v_m = \int_{-\infty}^{\infty} \rho Z_m^2(z) dz \quad (2.10)$$

Uma fonte sonora pontual localizada à profundidade z_s , é proporcional à função delta $\delta(z - z_s)$ e nula para $z \neq z_s$. Em analogia ao somatório de auto-funções e às séries de Fourier, essa fonte pode ser reescrita como:

$$\delta(z - z_s) = \sum_m A_m Z_m(z) \quad (2.11)$$

O procedimento padrão de determinação de A_m , é multiplicar ambos os lados da equação por $\rho Z_m(z)$, e integrar na profundidade do guia.

$$\int_0^h \rho Z_m(z) \delta(z - z_s) dz = \sum_m A_m \int_0^h \rho Z_m(z) Z_m(z) dz \quad (2.12)$$

$$A_m = \rho Z_m(z_s) v_m \quad (2.13)$$

A pressão sonora é o somatório das pressões em cada modo.

$$p(r, z_s, z, t) = A_s e^{i\omega t} \sum_{m=1}^M \frac{\rho_1}{v_m (2\pi\kappa_m r)^{1/2}} Z_m(z_s) Z_m(z) e^{-i(\kappa_m r - \pi/4)} \quad (2.14)$$

Onde,

A_s : depende da potência da fonte;

v_m : constante de ortogonalidade;

ρ_1 : densidade na água.

Segundo MEDWIN e CLAY (1998), sabendo-se o valor da potência da fonte (Π), é possível determinar A_s por:

$$A_s = 2\pi \sqrt{2\pi\rho_1 c_1 \Pi} \quad (2.15)$$

Assim, a equação 2.14 pode ser reescrita como:

$$p(r, z_s, z, t) = e^{i\omega t} 2\pi \sqrt{\rho_1 c_1 \Pi} \sum_{m=1}^M \frac{\rho_1}{v_m (\kappa_m r)^{1/2}} Z_m(z_s) Z_m(z) e^{-i(\kappa_m r - \pi/4)} \quad (2.16)$$

Define-se como modo de excitação a grandeza q_m e Π_0 é considerada uma potência de referência equivalente a 1 watt.

$$q_m = 2\pi \sqrt{\rho_1 c_1 \Pi_0} \frac{\rho_1}{v_m} \quad (2.17)$$

$$p(r, z_s, z, t) = e^{i\omega t} \sqrt{\Pi / \Pi_0} \sum_{m=1}^M \frac{q_m}{(\kappa_m r)^{1/2}} Z_m(z_s) Z_m(z) e^{-i(\kappa_m r - \pi/4)}$$

A amplitude da pressão da onda aprisionada no guia decresce de acordo com $r^{-1/2}$. As componentes de pressão em cada um dos modos têm dependências diferentes em relação à distância e à profundidade. A equação (2.17) pode ser reescrita, utilizando esse parâmetro e a separação do campo de pressão em um produto entre a função harmônica e a função transmissão ($P(\omega)$) inerente às características do guia e da frequência da onda. A

função de transmissão tem a dependência da frequência nos termos γ_m , κ_m , v_m e q_m . Ela também é conhecida como a função de Green, com a notação $G(\omega, r, z_s, z)$.

$$p(r, z_s, z, t) = e^{i\omega t} \sqrt{\Pi/\Pi_0} \sum_{m=1}^M \frac{q_m}{(\kappa_m r)^{1/2}} Z_m(z_s) Z_m(z) e^{-i(\kappa_m r - \pi/4)} \quad (2.18)$$

$$p(r, z_s, z, t) = e^{i\omega t} \sqrt{\Pi/\Pi_0} P(\omega, r, z_s, z) \quad (2.19)$$

Os nodos das auto-funções são pontos de amplitude nula, quando $\text{sen}(\gamma_m z) = 0$. Assim, o número do modo m também indica o número total de nulos ao longo da profundidade para cada modo. É importante destacar que caso uma fonte ou receptor seja colocado na posição de um “nulo” ou nodo, não será possível observar nenhuma contribuição do respectivo modo, o que ressalta a importância de se simular a propagação antes de se realizar o experimento.

Para considerar a dispersão geométrica ou de guia de onda, devem ser definidas duas grandezas físicas: a velocidade de fase e a de grupo, v_{rm} e u_{gm} , respectivamente. Tal fenômeno ocorre em guias de onda, e refere-se ao processo em que componentes diferentes de frequência do sinal se propagam com velocidades diferentes. A dispersão se deve à geometria e às propriedades físicas. A velocidade de fase corresponde à velocidade com que as superfícies de fase constante se propagam. A dispersão geométrica é responsável pela deformação do sinal se propagando na camada. É como se fosse possível escolher um modo e visualizá-lo se movendo ao longo da distância. A fase do m -ésimo modo é dada pela parte imaginária da equação 2.14.

$$\text{Fase do modo } m = (\omega t - \kappa_m r - \pi/4) \quad (2.20)$$

Logo, a velocidade de fase do modo m será r/t :

$$v_{rm} = \frac{\omega}{\kappa_m} = \frac{\omega}{\sqrt{k^2 - \gamma_m^2}} \quad (2.21)$$

A equação (2.21) reforça o conceito de que a velocidade de fase depende diretamente da frequência, e conseqüentemente do comprimento de onda, como foi apresentado, no início deste capítulo. Analisando o denominador de (2.21), apresentam-se três situações distintas:

Se $k^2 - \gamma_m^2 > 0$, existem modos se propagando radialmente, com velocidade de fase $v_{rm} > c$;

Se $k^2 - \gamma_m^2 \rightarrow 0$, $\kappa_m \approx 0$, não ocorre propagação em distância, somente existem ondas estacionárias puras, em profundidade. Essa análise permite que seja definido o número máximo de modos propagantes:

$$k^2 - \gamma_m^2 = 0 \Rightarrow 1 - \left[\frac{(m_{\max} - 0,5)\lambda}{2h} \right]^2 = 0 \Rightarrow m_{\max} = \frac{2h}{\lambda} + 0,5 \quad (2.22)$$

Além disso, pode-se definir o conceito de frequência de corte. Ou seja, a frequência a partir da qual não existem modos propagantes. De acordo com a equação 2.20, tem-se:

$$m_{\max} = \frac{2h}{\lambda} + 0,5 \Rightarrow \lambda = \lambda_c = \frac{2h}{m - 0,5} \Rightarrow \omega = \omega_c = \frac{(m - 0,5)\pi}{h} c \quad (2.23)$$

Se $k^2 - \gamma_m^2 < 0$, k_m e v_{rm} são imaginários, e os modos apresentam decaimento exponencial ou não homogêneo em relação à distância. São denominados modos evanescentes, virtuais ou “*leaky modes*”. São semelhantes aos modos discretos porém, apresentam decaimento exponencial ao longo da distância. Sua contribuição reside basicamente na região próxima a fonte, e onde a geometria garante apenas alguns modos discretos, ou até mesmo nenhum. No entanto, devido à dificuldade matemática em obter essa energia (integração de um número infinito de modos contínuos), e a região de interesse ser o campo distante, em geral, os modos evanescentes são desprezados.

A velocidade de grupo, u_{gm} , é uma medida da taxa de transporte de energia associada a um sistema dispersivo. É a velocidade com que a energia se propaga no guia de ondas. Outra definição para velocidade de grupo é a velocidade da propagação do padrão

de interferência de pressão para cada modo, isto é, a velocidade com que cada frequência se desloca (TOLSTOY, 1998). Assim, u_{gm} é definida matematicamente por:

$$u_{gm} = \frac{d\omega}{d\kappa_m} = \frac{d(v_{rm}\kappa_m)}{d\kappa_m} = v_{rm} + \kappa_m \frac{dv_{rm}}{d\kappa_m} \quad (2.24)$$

Através da manipulação algébrica das equações (2.23) e (2.24), u_{gm} é reescrita como:

$$\begin{aligned} \kappa_m &= \frac{\omega}{v_{rm}} = \frac{1}{c} \sqrt{\omega^2 - \omega_m^2} \\ v_{rm} &= \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_m^2}{\omega^2}}} \Rightarrow u_{gm} = c \sqrt{1 - \frac{\omega_m^2}{\omega^2}} \Rightarrow v_{rm} u_{gm} = c^2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

O padrão de interferência entre modos adjacentes é determinado pelo comprimento de onda de interferência λ_{mn} , denominado distância de salto ou de ciclo, expresso na equação (2.26):

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{\kappa_m - \kappa_n} \approx \frac{2kh^2}{m\pi}, \quad \text{para } m \gg 1 \text{ e } n = m + 1 \quad (2.26)$$

A figura 2.7 ilustra o caminho de uma onda correspondente ao m -ésimo modo gerada pela fonte com um ângulo θ_m , que se propaga ao longo do guia de ondas, chegando ao receptor com o mesmo ângulo. Utilizando essa abordagem, pode-se calcular o campo de pressão aplicando-se a teoria de raios.

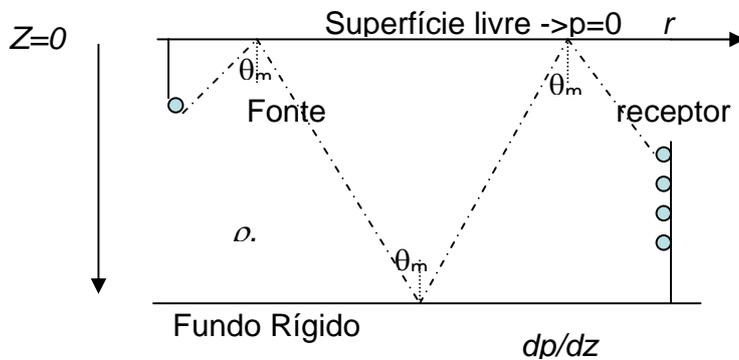


Figura 2.7 – Caminho da onda correspondente ao m -ésimo modo.

Em suma, os modos normais são derivados da equação de Helmholtz, assumindo-se um sistema de coordenadas cilíndricas, apropriado à geometria do problema, e variáveis separáveis. Em seguida, a solução é expressa como um somatório finito de autofunções ou modos ressonantes dependentes da profundidade. Esses modos satisfazem às condições de contorno e são análogos aos modos de vibração de uma corda. O comportamento da solução com relação à distância é usualmente expresso por meio da função de Hankel, cujo argumento depende do produto da distância da fonte e do número de onda do m -ésimo modo. A sua grande vantagem reside na apresentação de resultados acurados e de pouco custo computacional, principalmente para frequências baixas.

Para a análise de modos normais em um guia de onda real, parte-se do modelo teórico denominado Pekeris, que comporta meios estratificados (MEDWIN e CLAY, 1998). As interfaces são consideradas planas e paralelas. A figura 2.7 apresenta um guia de onda limitado por um plano superior, com coeficiente de reflexão R_s , e um plano inferior de coeficiente de reflexão R_f . A figura 2.8 ilustra o guia de onda de Pekeris.

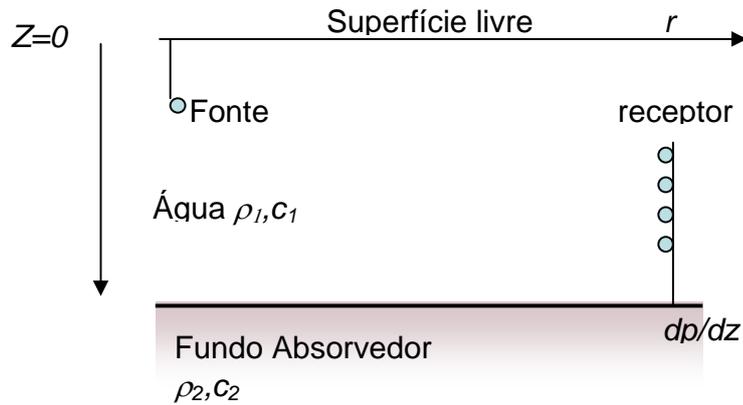


Figura 2.8 – Guia de onda de Pekeris.

Considerando que a solução da equação da onda é formada pelo produto de funções dependentes da profundidade e da distância, para um guia real, sugere-se que a função da profundidade seja a resultante da interferência de duas ondas planas: uma propagando-se para cima, e outra para baixo. A equação (2.27) representa a função $Z(z)$:

$$Z(z) = Ae^{i\gamma z} + Be^{-i\gamma z} \quad (2.27)$$

Assim, descreve-se R_s como a razão entre a onda refletida e a incidente na superfície:

$$R_s = \left. \frac{Be^{-i\gamma z}}{Ae^{i\gamma z}} \right|_{z=0} = \frac{B}{A} \quad (2.28)$$

Analogamente, no fundo ($z=h$) tem-se:

$$R_f = \left. \frac{Ae^{i\gamma z}}{Be^{-i\gamma z}} \right|_{z=h} = \frac{A}{B} e^{i2\gamma h} \quad (2.29)$$

Manipulando algebricamente as equações (2.28) e (2.29), obtém-se a equação característica:

$$R_f = \frac{1}{R_s} e^{i2\gamma h} \Rightarrow R_s R_f e^{-i2\gamma h} = 1 \therefore 1 - R_s R_f e^{-i2\gamma h} = 0 \quad (2.30)$$

De acordo com o conceito de ângulo crítico, $\theta_c = \arcsen(c_1/c_2)$, observa-se que:

Se $\theta < \theta_c$, $\rightarrow |R_f| < 1$. Então, a solução da equação da onda contém autovalores complexos (modos evanescentes).

Se $\theta > \theta_c$, $\rightarrow \begin{cases} |R_f| = 1 \\ |R_s| = -1 \end{cases}$, e ângulos de fase $2\phi_s$ e $2\phi_f$. Sendo a superfície livre, $\phi_s = \pi$, pois o

sinal reflete com inversão total da fase. Então:

$$\begin{aligned} R_s &= |R_s| e^{i2\phi_s} = e^{-i\pi_s} \\ R_f &= |R_f| e^{i2\phi_f} = e^{i2\phi_f} \\ \phi_f &= \arctan \frac{b\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 \cos \theta_0} \\ b &= \left[\left(\frac{c_2}{c_1} \right) \text{sen}^2 \theta_1 - 1 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Aplicando as equações de R_s e R_f na equação característica (2.31), obtém-se uma expressão para a componente vertical do número de onda (γ_m):

$$e^{i2(\phi_s + \phi_f - \gamma h)} = 1 \quad (2.32)$$

A partir dessa equação e considerando $2\phi_s = \pi$, determina-se γ_m :

$$2(\phi_s + \phi_f - \gamma h) = 2m\pi \Rightarrow \gamma_m = \frac{(m - 0,5)\pi + \phi_f}{h} \quad (2.33)$$

Ou, também pode ser re-escrita como:

$$\gamma_m = k \cos \theta_m = \frac{\omega}{c_1} \cos \theta_m \quad (2.34)$$

Se a incidência ocorrer no ângulo crítico, o ângulo de fase será nulo, e a equação (2.34) pode ser descrita como em (2.35), onde se ressalta a frequência de corte:

$$\gamma_m = \frac{2\pi f}{c_1} \cos \theta_m = \frac{(m-0,5)\pi + \phi_f}{h} \Rightarrow f = \frac{c_1(m-0,5)}{2h \cos \theta_c} \quad (2.35)$$

Então, o número total de modos é dado pelo menor número inteiro que atende à inequação abaixo:

$$m \leq \frac{f}{c_1} (2h \cos \theta_c) + 0,5 \quad (2.36)$$

São incorporadas as perdas por atenuação devido ao espalhamento cilíndrico, às reflexões imperfeitas tanto na superfície quanto no fundo; e às perdas por absorção no meio, sendo as duas últimas representadas pelo termo δ_m . Em termos práticos, a determinação teórica de δ_m requer um conhecimento profundo do meio. Assim, o seu valor é estimado pela calibração com dados experimentais.

$$p = \rho \exp(i\frac{\pi}{4}) r^{-1/2} \sum_m q_m Z_m(z_s) Z_m(z) \exp(-\delta_m r - i\kappa_m r) \quad (2.37)$$

Outro aspecto importante reside no fato da maior parte das fontes acústicas encontradas no ambiente oceânico serem espacialmente complexas e de banda larga. No caso da propagação em águas rasas, essas características da fonte complicam consideravelmente a análise dos dados acústicos recebidos. Uma abordagem simples e comumente empregada no problema de banda larga consiste em decompor o sinal recebido em um conjunto de dados de banda estreita. Isso permite que o problema seja tratado como múltiplos problemas de banda estreita CANDY e SULLIVAN (1998), como ilustra a figura

2.9. Implementando a decomposição em múltiplas bandas estreitas, a função de Green (2.37) é redefinida de acordo com pequenas faixas de frequência ω_q .

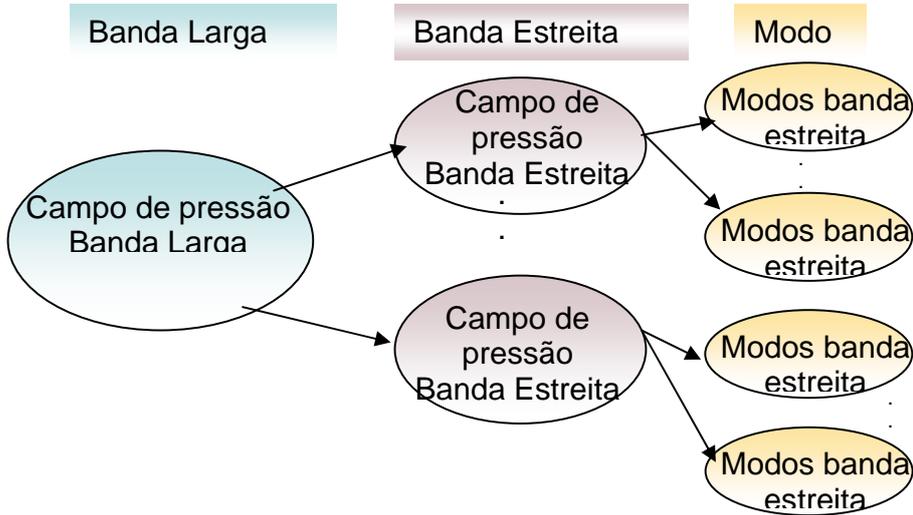


Figura 2.9 – Decomposição da propagação de banda larga.

$$P(\omega_q, r, z_s, z) = \sum_{m=1}^{M_q} \frac{q_m}{(\kappa_{mq} r)^{1/2}} Z_m(z_s, \omega_q) Z_m(z, \omega_q) e^{-i(\kappa_{mq} r - \pi/4) - \delta_{mq} r} \quad (2.38)$$

O parâmetro M , número total de frequências no modo, é definido pela expressão (2.39), onde M_q é o número de modos inerentes à frequência ω_q :

$$M = \sum_1^Q M_q \quad (2.39)$$

A relação de dispersão geométrica agora satisfaz a seguinte relação:

$$\frac{\omega_q^2}{c^2(z)} = \kappa^2(m, q) + \gamma^2(m, q) \quad (2.40)$$

A abordagem por decomposição permite que sejam escolhidas frequências de maior representatividade dentro do espectro total ω . Além disso, dependendo do objetivo da aplicação dos dados, é possível utilizar um valor médio do campo, uma soma coerente ou incoerente. Assim, a propagação de sinais de banda larga propicia uma maior riqueza de informações, apesar da complexidade inerente.

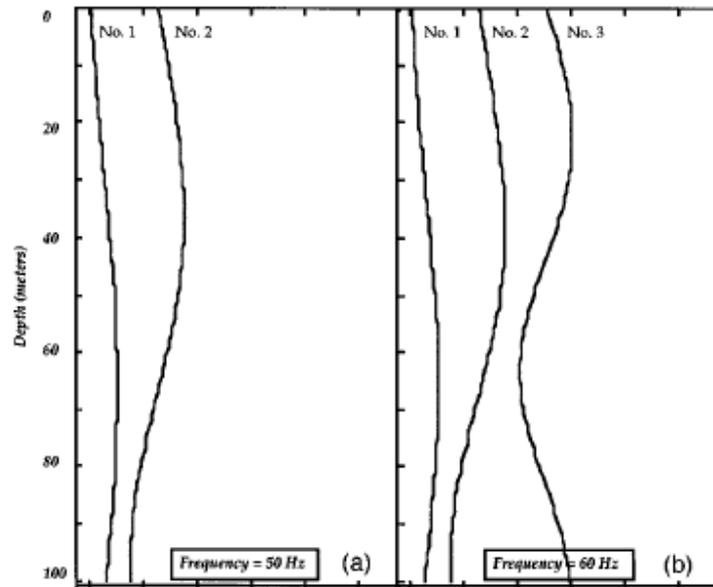


Figura 2.10 – Decomposição da propagação de banda larga. Retirado de CANDY *et al.* (1998).

2.2.3 Formulação matemática para um guia de ondas com fundo inclinado

Quando as características do guia de ondas dependem da distância, é necessário adaptar a teoria de modos normais. Como há variações de batimetria e no perfil de velocidade ao longo da distância e da profundidade, não é possível aplicar o método de separação de variáveis. Portanto, divide-se o guia em um número finito de segmentos independentes da distância (e com profundidades constantes), aplica-se a separação de variáveis a cada um deles, e o campo de pressão gerado para cada segmento é o campo inicial do seguinte. Essa teoria é conhecida como Modos Acoplados, e considera a conservação de energia, retroespalhada e propagante.

No entanto, por simplicidade matemática, pode-se optar por uma solução reduzida, que comporte somente energia propagante (“one-way”) e/ou desconsiderar o acoplamento

entre os modos. Este tipo de solução é denominado Aproximação Adiabática. Destaca-se que JESUS (1991) demonstrou que a desconsideração da energia retroespalhada não ocasiona discrepância significativa no campo de pressão, e sim, o tratamento inadequado das condições de contorno no fundo inclinado.

A aproximação adiabática é uma aplicação da Teoria de Modos Normais em meios cujo fundo varia suavemente com a distância, que desconsidera o acoplamento entre os modos. A energia contida em um modo, permanece no modo até ele deixar de existir. A inexistência de acoplamento entre modos é denominada conservação do índice modal. No entanto, a função da profundidade passa a também depender da distância, e a separação de variáveis é modificada para:

$$p=Z(z,r)U(r) \quad (2.41)$$

Substituindo-se p na equação de Helmholtz em coordenadas cilíndricas tem-se:

$$\begin{aligned} Z(r,z) \frac{\partial U^2(r)}{\partial r^2} + 2 \frac{\partial Z(r,z)}{\partial r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} + U(r) \frac{\partial Z^2(r,z)}{\partial r^2} + \frac{Z(r,z)}{r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} + \frac{\partial Z(r,z)}{\partial r} \frac{U(r)}{r} + \\ + U(r) \frac{\partial Z^2(r,z)}{\partial r^2} + \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} U(r) \frac{\partial Z(r,z)}{\partial r} + k^2 Z(r,z) U(r) = 0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Considerando somente os termos dependentes da profundidade e incluindo o somatório da representação por modos, determina-se:

$$\begin{aligned} U(r) \frac{\partial Z^2(r,z)}{\partial r^2} + \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} U(r) \frac{\partial Z(r,z)}{\partial r} + k^2 Z(r,z) U(r) = \kappa^2 Z(z,r) U(r) \Rightarrow \\ \Rightarrow \sum_m \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial z} \frac{r}{\rho} U(r) \frac{\partial U_m}{\partial r} Z_m + 2 \frac{\partial Z_m}{\partial r} \frac{\partial U_m}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{r}{\rho} \frac{\partial Z_m}{\partial r} \right) U_m - \sum_m \kappa_m^2 Z_m U_m = 0 \end{aligned} \quad (2.43)$$

Em seguida, são feitas as seguintes considerações:

- Aplica-se o operador $\int (\cdot) Z_n / \rho dz$;
- Assume-se ρ independente da distância; e
- Aplica-se a propriedade da ortogonalidade das autofunções.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_n}{\partial r} \right) + \sum_m 2B_{nm} \frac{\partial U_m}{\partial r} + \sum_m A_{nm} U_m + \kappa_n^2 U_n &= 0 \\ A_{nm} &= \int \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial Z_m}{\partial r} \right) \frac{Z_n}{\rho} dz \\ B_{nm} &= \int \frac{\partial Z_m}{\partial r} \frac{Z_n}{\rho} dz \end{aligned} \quad (2.44)$$

Portanto, a equação (2.44) expressa os modos acoplados. Porém, ao desprezar os coeficientes de acoplamento A e B , tem-se a Aproximação Adiabática. A solução final é a mesma obtida pelo Método de Modos Normais:

$$p = \rho e^{i\omega t} \sum_{m=1}^M \frac{q_m}{r^{1/2}} Z_m(z_s) Z_m(z) e^{-i(\kappa_m r + \delta_m r - \pi/4)} \quad (2.45)$$

2.2.3.1 Formulação matemática para um guia de ondas com fundo inclinado com profundidade crescente

Na presença de fundo inclinado, ocorre troca de energia entre modos. Essa transferência é dependente de quatro fatores:

- Comprimento de onda de interferência;
- Distância horizontal efetiva do fundo inclinado, L_m , definida como a distância da fonte até o ponto onde o modo m deixa de interagir com o fundo;
- Ângulo de inclinação do fundo, α ; e
- Taxa de variação do ângulo modal, $d\theta_m/dr$.

Como foi citado anteriormente, cada modo pode ser analisado como uma soma de duas ondas planas que se propagam para cima e para baixo, formando um raio equivalente com um ângulo de propagação igual ao ângulo modal. Em ambientes independentes da

distância, cada modo fica associado ao mesmo raio ao longo de toda distância. Quando o ambiente depende da distância, o mesmo modo pode ser associado a diferentes modos. Assim, o raio transporta, ao longo de sua trajetória, parte da energia de um modo para outros modos. A figura 2.11 ilustra o fato de que a cada reflexão no fundo, o seu ângulo de ataque (ângulo com a horizontal) é reduzido de 2α . O mesmo ocorre com o ângulo modal, pois conforme aumenta a profundidade, κ_m aumenta e γ_m diminui, de acordo com as equações (2.4) e (2.35). Segundo CLAY e MEDWIN (1998), se a diminuição do ângulo modal em um ciclo de distância do raio equivalente for menor que 2α , parte da energia desse modo será transferida para os modos de ordem inferior de forma dominante entre modos de ordens adjacentes se o fundo apresentar uma inclinação suave.

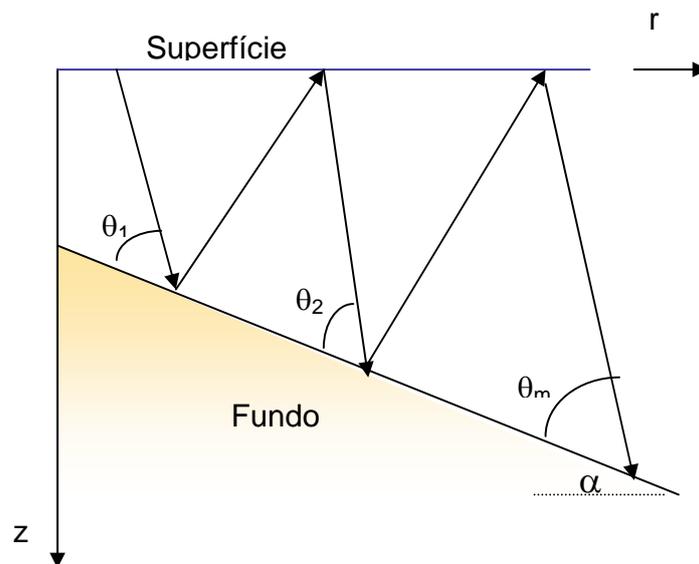


Figura 2.11 – Ilustração das reflexões múltiplas no fundo.

Portanto, estabelece-se o critério abaixo para conversão de energia modal:

$$\Delta\theta_m = -\frac{\partial\theta_m}{\partial r} \lambda_{m,m-1} < 2\alpha \quad (2.46)$$

Onde $\theta_m = \arccos(\kappa_m/k_{fundo})$

Quando a variação do ângulo modal é equivalente a 2α , não há transferência de energia entre modos, e a propagação é considerada adiabática. Se essa variação for maior, isso significa que há conversão de energia para os modos de ordem superior. Outro critério adotado estabelece que a distância horizontal efetiva L_m , deve ser maior que o comprimento de interferência, garantindo que os raios equivalentes incidam no fundo, ao menos uma vez antes que qualquer transferência ocorra.

$$\frac{L_m}{\lambda_{m,m-1}} > 1 \quad (2.47)$$

2.2.3.2 Formulação matemática para um guia de ondas com fundo inclinado com profundidade decrescente

A conversão de energia modal em um ambiente com um fundo inclinado e com profundidades decrescentes é apresentada por CLAY e MEDWIN (1998) de acordo com a figura 2.12, onde ilustra-se a propagação de um raio correspondente a um determinado modo.

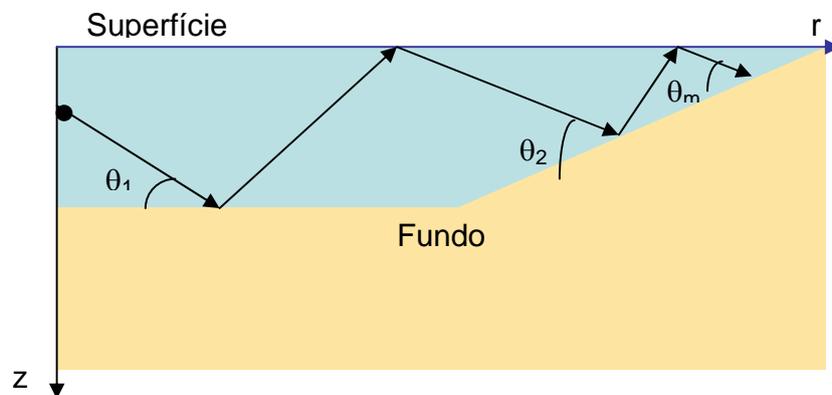


Figura 2.12 – Propagação de um raio em meio com profundidade crescente.

Conforme o raio vai subindo a inclinação do fundo, o ângulo de ataque vai aumentando até uma determinada distância, onde este ângulo ultrapassa o ângulo crítico. A partir deste ponto, as perdas na reflexão são muito elevadas e o raio passa a se propagar no fundo. Essa profundidade denomina-se profundidade de corte, pois determina o ponto onde

ocorre a conversão da energia modal (espectro discreto) em energia contínua (espectro contínuo do fundo). É importante ressaltar que esse processo não é pontual, sendo parte da energia a ser perdida no fundo, também transmitida para modos que possuem κ_m maiores, e portanto, profundidades de corte inferiores. Sugere-se que para ângulos de inclinação do fundo muito pequenos, pode-se adotar a aproximação adiabática, onde as funções modais $Z_m(z,r)$ devem se “alongar” conforme a profundidade da camada de água aumenta. A modelagem numérica do método é determinada assumindo-se a geometria da figura 2.13, e garantindo em cada segmento a teoria de modos normais seja válida e aplicada. O acoplamento entre os segmentos é efetivado através da aplicação das condições de contorno de continuidade de pressão e da continuidade da componente normal da velocidade da partícula nas interfaces.

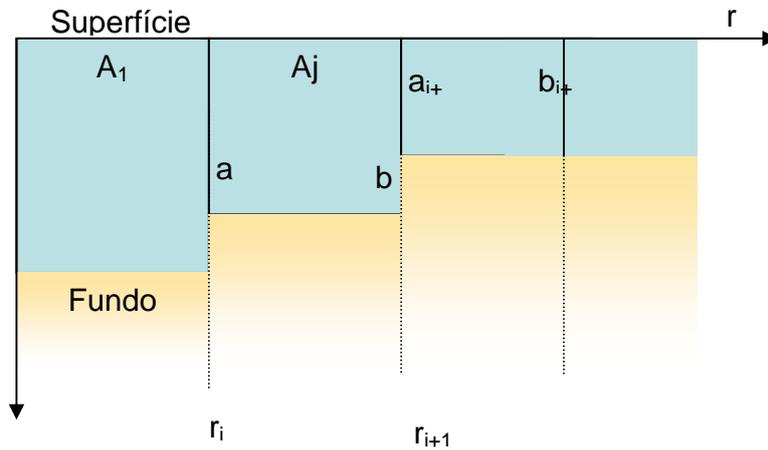


Figura 2.13 – Representação de solução adiabática em meio com profundidade crescente.

A solução analítica em cada segmento é obtida pela Teoria de Modos Normais, e o campo de pressão pode ser descrito como:

$$p_m^j(r, z) = \sum_{m=1}^M \left[a_m^j \bar{H}(1)_m^j(r) + b_m^j \bar{H}(2)_m^j(r) \right] Z_m^j, \text{ onde:} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned}\bar{H}(1)_m^j(r) &= \frac{H_0^1(\kappa_m^j r_j)}{H_0^1(\kappa_m^j r_{j-1})} \\ \bar{H}(2)_m^j(r) &= \frac{H_0^2(\kappa_m^j r_j)}{H_0^2(\kappa_m^j r_{j-1})}\end{aligned}\tag{2.49}$$

Onde,

j : número do segmento; e

m : número do modo.

É importante ressaltar que EVANS (1983) opta pela razão das funções de Hankel para evitar que ocorram singularidades provenientes das exponenciais nos modos virtuais. Em geral, o campo de pressão é calculado para as regiões de campo distante. Assim, as expressões de 2.48 e 2.49 podem ser substituídas por:

$$\begin{aligned}\bar{H}(1)_m^j(r) &\approx H1_m^j = \sqrt{\frac{r_{j-1}}{r_j}} \exp[i\kappa_m^j(r_j - r_{j-1})] \\ \bar{H}(2)_m^j(r) &\approx H2_m^j = \sqrt{\frac{r_{j-1}}{r_j}} \exp[-i\kappa_m^j(r_j - r_{j-1})]\end{aligned}\tag{2.50}$$

Aplicando as condições de contorno de continuidade da pressão e da componente normal da velocidade da partícula nas interfaces, tem-se:

$$\begin{aligned}p_j(r_j, z) &= p_{j+1}(r_j, z) \\ \frac{1}{\rho_j(z)} \frac{\partial p_j(r_j, z)}{\partial r} &= \frac{1}{\rho_{j+1}(z)} \frac{\partial p_{j+1}(r_j, z)}{\partial r}\end{aligned}\tag{2.51}$$

$$\sum_{m=1}^M \left[a_m^{j+1} + b_m^{j+1} \right] Z_m^{j+1}(z) = \sum_{m=1}^M \left[a_m^j H1_m^j(r_j) + b_m^j H2_m^j(r) \right] Z_m^j(z)$$

Após manipulação algébrica, obtêm-se expressões para os coeficientes a e b , para cada segmento. Essas equações são colocadas na forma matricial para a resolução do sistema ao longo de toda distância, apresentando uma solução global.

2.3 Outros Modelos de Propagação em Águas Rasas

Em virtude do estágio de desenvolvimento e experimentação atuais dos modelos de propagação acústica, serão considerados neste trabalho somente os modelos baseados em aproximações da equação da onda. Os modelos empíricos e semi-empíricos não serão abordados. Dentre eles, podem ser citados AMOS e COLOSSUS.

Segundo COATES (2002) e ETTER (2003), os modelos de propagação determinísticos em águas rasas podem ser divididos em 5 categorias, de acordo com os princípios básicos de sua teoria (vide tabela 1). Destaca-se que o limite de 500 Hz é um pouco arbitrário, mas reflete o fato de que acima de 500 Hz, muitos modelos teóricos tornam-se computacionalmente inviáveis. Além disso, abaixo de 500 Hz, a física de alguns modelos de raios podem ser questionáveis devido a restrições.

Devido ao avanço rápido dos computadores (processadores e memória) aliado a adaptações nos modelos, algumas restrições computacionais estão sendo ultrapassadas. A título de exemplo, os métodos baseados na equação parabólica foram destaque no Fórum Internacional de Acústica Submarina de Alta Freqüência em San Diego, E.U.A., 2004, patrocinado pelo “ONR” (Office of Naval Research da Marinha americana). Uma de suas aplicações atuais reside na comunicação acústica submarina (freqüências da ordem de kHz).

Os modelos de propagação que são dependentes da distância (RD – “Range Dependent”) implicam, principalmente, em variabilidade da batimetria e/ou do perfil de velocidade de propagação na coluna d’água com a distância. É possível que outros parâmetros também o sejam, e também podem ser incluídos na modelagem. Os modelos RD também podem ser empregados em ambientes independentes da distância (RI – “Range Independent”), desde que só se utilize um único perfil/batimetria ao longo da região a ser investigada sem prejuízo do modelo.

Tabela 1 – Classificação dos modelos de propagação baseados em aproximações da equação de onda. AFC: Aplicável fisicamente e computacionalmente. ACR: Aplicável com restrições de acurácia ou em velocidade de execução. Freqüência Baixa: <500Hz. Freqüência Alta: >500Hz (ETTER, 2003).

Tipo de	Águas Rasas
---------	-------------

Modelo	Frequência Baixa		Frequência Alta	
	Independente da Distância	Dependente da Distância	Independente da Distância	Dependente da Distância
Teoria de Raios	-	-	AFR	ACR
Modos Normais	AFC	ACR	AFC	ACR
Integração de Número de Onda	AFC	-	AFC	-
Equação Parabólica	ACR	AFC	-	-

2.3.1 Teoria de Raios

Um guia de ondas fluido, homogêneo, com perfil de isovelocidade na coluna d'água e superfícies limitantes perfeitamente refletoras é considerado ideal. Segundo JENSEN *et al.* (1994), a escolha deste fundo é bem próxima da realidade, pois um fundo que permita penetração da onda para ângulos de ataque pequenos reflete de forma semelhante a uma superfície livre. Além disso, a propagação a longas distâncias é dominada por pequenos ângulos de propagação, visto que a energia oriunda de ângulos grandes é rapidamente atenuada pela perda no fundo.

Uma abordagem simples, resume-se a considerar o caso de um semi-espaço, em que se obtém a solução do problema do guia de onda através do princípio da superposição. O campo produzido por uma fonte pontual em $(0, z_s)$ na ausência de fronteiras limitantes, é dado por:

$$\psi(r, z) = -S_\omega \frac{e^{ikr}}{4\pi R} \quad (2.52)$$

Em seguida, são acrescentadas as condições de contorno. Há dois métodos passíveis de serem utilizados: Imagem ou Espelho e Integral. O primeiro tem um apelo físico mais

fácil de ser compreendido, porém torna-se difícil a sua generalização para o guia de ondas de Pekeris. O método da integral é mais geral.

No método da Imagem, para o caso ideal, ocorre a superposição do campo livre com os campos gerados pelas imagens da fonte. No semi-espaço, há apenas uma imagem da fonte necessária para satisfazer às condições de contorno. A modelagem do guia de onda requer um número infinito de fontes imagem necessárias em virtude das múltiplas reflexões nas duas interfaces. A figura 2.14 ilustra as três primeiras imagens de uma fonte pontual em $(0, z_s)$ e a equação 2.53 representa o campo gerado. Os sinais negativos correspondem ao número ímpar de reflexões, e os sinais positivos, ao número par de reflexões. Os termos subsequentes são obtidos pelas imagens sucessivas dessas fontes para gerar uma expansão de raios para o campo total (eq. (2.54)).

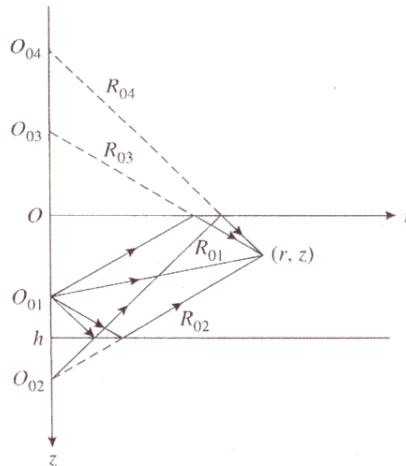


Figura 2.14 - Superposição da solução de campo livre e a solução para as três primeiras imagens da fonte em um guia ideal (JENSEN *et al.*, 1994; BREKHOVISKIKH *et al.*, 2003).

$$\psi(r, z) \approx -\frac{S_\omega}{4\pi} \left[\frac{e^{ikR_{01}}}{R_{01}} - \frac{e^{ikR_{02}}}{R_{02}} - \frac{e^{ikR_{03}}}{R_{03}} + \frac{e^{ikR_{04}}}{R_{04}} \right] \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned}
\psi(r, z) &= -\frac{S_\omega}{4\pi} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \left[\frac{e^{ikR_{m1}}}{R_{m1}} - \frac{e^{ikR_{m2}}}{R_{m2}} - \frac{e^{ikR_{m3}}}{R_{m3}} + \frac{e^{ikR_{m4}}}{R_{m4}} \right] \\
R_{mn} &= \sqrt{r^2 + z_{mn}^2} \\
z_{m1} &= 2Dm + z_s - z \\
z_{m2} &= 2D(m+1) - z_s - z \\
z_{m3} &= 2Dm + z_s + z \\
z_{m4} &= 2D(m+1) - z_s - z
\end{aligned} \tag{2.56}$$

Onde D é a profundidade vertical do guia de onda.

A característica mais importante da abordagem por imagem é a associação direta entre os termos individuais da expansão de raios e as múltiplas chegadas. No entanto, as chegadas individuais só devem ser identificadas na solução no domínio do tempo. Assim, somente pulsos de pequena duração e de alta frequência podem ser identificados individualmente como imagens verdadeiras do sinal da fonte. Para frequências baixas, as múltiplas reflexões irão se interferir no domínio do tempo, isto é, não haverá resolução temporal, e com isso ter-se-á um pulso distorcido. Por isso, a teoria de modos normais é mais adequada para esse caso.

A solução pela transformada integral define o campo total em função do número de onda horizontal k_r :

$$\begin{aligned}
\psi(r, z) &= \int_0^{\infty} \psi(k_r, z) J_0(k_r r) k_r dk_r \\
\psi(k_r, z) &= -S_\omega [g_\omega(k_r, z, z_s) + H_\omega(k_r, z)] \\
g_\omega(k_r, z, z_s) &= -\frac{e^{ik_z |z-z_s|}}{4\pi i k_z} \\
H_\omega(k_r, z) &= A^+(k_r) + A^-(k_r) = \frac{e^{ik_z z_s}}{4\pi i k_z}
\end{aligned} \tag{2.57}$$

As amplitudes das soluções homogêneas são determinadas pelas condições de contorno. Nas interfaces, $z=0$ e $z=D$, a pressão tem desaparecer, o que gera um sistema de 2 equações:

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
A^+(k_r)e^{ik_z D_s} + A^-(k_r)e^{-ik_z D_s} &= \frac{e^{ik_z |D-z_s|}}{4\pi i k_z} \\
A^+(k_r) + A^-(k_r) &= \frac{e^{ik_z z_s}}{4\pi i k_z}
\end{aligned} \right\} \psi(k_r, z) = -\frac{S_\omega}{4\pi} \begin{cases} \frac{\sin k_z z \sin k_z (D-z_s)}{k_z \sin k_z D}, & z < z_s \\ \frac{\sin k_z z \sin k_z (D-z)}{k_z \sin k_z D}, & z > z_s \end{cases}
\end{aligned}
\tag{2.58}$$

A solução do sistema apresenta expressões análogas às de modos normais:

$$\begin{aligned}
k_z D &= m\pi, m = 1, 2, \dots \\
k_r &= \sqrt{k^2 - k_z^2} \\
k_r &= \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{D}\right)^2}, m = 1, 2, \dots
\end{aligned}
\tag{2.59}$$

A equação 2.59 define um número infinito de valores para k_r que são responsáveis por singularidades: alguns são reais e outros puramente imaginários. Os valores reais contribuem diretamente para o campo acústico, pois a integral é resolvida no eixo real. A função do campo pode ser alterada, substituindo-se a função de Bessel por Hankel, considerando apenas ondas propagantes e $r \rightarrow \infty$:

$$\psi(r, z) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(k_r, z) H_0^{(1)}(k_r z) k_r dk_r
\tag{2.60}$$

Devido ao comportamento assintótico da função de Hankel, pode-se fechar o contorno de integração no semi-plano superior imaginário, substituindo a integral por uma soma de resíduos dos pólos englobados. Para satisfazer a condição de irradiação, somente os pólos referentes a ondas propagantes e ondas decaindo devem ser incluídas no somatório.

A avaliação direta da integral da eq. (2.60) é a abordagem das técnicas baseadas na integração do número de onda. Pode-se considerar o método da fase estacionária, que propicia a expansão em termos de “auto-raios” (auto-valores e auto-funções), ou seja, uma

série de raios conectando fonte e receptor, e esses termos se aproximam da representação de frentes de ondas planas. Para meios estratificados horizontalmente, a abordagem de fase estacionária da integral do número de onda é equivalente ao Traçado de Raios.

2.3.2 Expansão Multicaminhos

COATES (2002) desconsidera essa técnica como uma classe de modelo, e ETTER (2003) informa que a sua aplicação em águas rasas é limitada. Assim, é apresentado um breve sumário de seus fundamentos. As Técnicas de Expansão de Multicaminhos expandem a integral do campo acústico em termos de um conjunto infinito de integrais, sendo cada qual associada a uma família de caminhos de raios. Esse método também é conhecido como WKB, pois baseia-se numa aproximação geral WKB (Wentzel, Kramers e Brillouin) para resolver a equação dependente da profundidade derivada da solução de modos normais (eq. 2.59) (SHANG *et al.*, 1996). Cada modo normal pode ser associado a raios correspondentes. Normalmente, essa modelagem não comporta ambientes dependentes da distância.

A aproximação WKB (ou Liouville-Green) facilita a obtenção de uma solução assintótica da equação de modos normais, pois assume que a velocidade do som varia gradualmente como uma função da profundidade. A sua implementação requer o cálculo da integral (2.60) para um intervalo limitado do número de onda horizontal. Com isso, somente alguns modos são considerados, o que implica na simulação de uma fonte limitada em ângulo. Essa abordagem é mais adequada para águas profundas.

2.3.3 Integração de Número de Onda

Nos modelos baseados na integração do número de onda os parâmetros da equação da onda são, primeiramente, separados de acordo com a teoria de modos normais. Então, a expressão com a função de Hankel é substituída pelo primeiro termo de expansão assintótica:

$$H_0^{(1)}(k_r r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_r r}} e^{ik_r r}, \text{ para } k_r r \gg 1 \quad (2.61)$$

$$\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{2k_r}{\pi r}} g(z, z_s, k_r) e^{ik_r r}$$

A integral é determinada através da transformada rápida de Fourier (FFT), e por isso, o método também é conhecido por “Fast Field” (Campo Rápido). No entanto, a sua implementação em ambientes dependentes da distância tem se mostrado computacionalmente custosa, pois requer a utilização de métodos de elementos de contorno ou elementos finitos.

2.3.4 Equação Parabólica - PE

O emprego de aproximação parabólica em problemas de propagação vem desde meados da década de 40, em propagação de ondas de rádio a longa distância. Na década de 80, a sua aplicação em acústica submarina com avaliação experimental começou a ser divulgada. Em PE, assume-se que a energia se propaga com velocidades próximas a uma velocidade de referência, interagindo pouco com o fundo. O método fatora um operador para obter uma equação da onda propagante, que pode ser resolvida como um problema de valor inicial na distância. Essa fatorização é exata quando o ambiente é independente da distância. Meios dependentes da distância podem ser aproximados como uma seqüência de ambientes independentes com a distância, desprezando-se a energia retro-espalhada. Os campos transmitidos podem ser gerados usando o princípio da conservação da energia e correções de espalhamento único.

A modelagem básica é definida por:

$$\nabla^2 \psi + k_0^2 n^2 \psi = 0 \quad (2.62)$$

Onde,

k_0 : número de onda de referência;

n : índice de refração.

Reescrevendo a equação em coordenadas cilíndricas, desprezando-se a variação em azimute, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0 n^2 \psi = 0 \quad (2.63)$$

Assumindo-se uma solução da forma $\Psi = \phi(r, z) \cdot S(r)$, tem-se:

$$\phi \left[\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} \right] + S \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{S} \frac{\partial S}{\partial r} \right) \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] + k_0^2 n^2 \phi = 0 \quad (2.64)$$

Usando k_0^2 como constante de separação, a equação 2.64 pode ser dividida em duas.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} \right] &= -S k_0^2 \\ \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{S} \frac{\partial S}{\partial r} \right) \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] &= k_0^2 \phi \end{aligned} \quad (2.65)$$

Rearranjando os termos, obtém-se a equação de Bessel de 1ª ordem para a expressão de S .

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} \right] + S k_0^2 &= 0 \\ \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{S} \frac{\partial S}{\partial r} \right) \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] k_0^2 n^2 \phi - k_0^2 \phi &= 0 \end{aligned} \quad (2.66)$$

Considerando somente as ondas propagantes e o campo distante ($k_0 r \gg 1$), S pode ser descrito pela expansão assintótica.

$$S = H_0^{(1)}(k_0 r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r}} e^{i(k_0 r - \pi/4)} \quad (2.67)$$

A equação de $\phi(r,z)$ também pode ser simplificada:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + 2ik_0 \frac{\partial \phi}{\partial r} + k_0^2 (n^2 - 1)\phi = 0 \quad (2.68)$$

Assumindo-se que $\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \ll 2k_0 \frac{\partial \phi}{\partial r}$ tem-se a eq. (2.69) que é a equação parabólica da onda:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + 2ik_0 \frac{\partial \phi}{\partial r} + k_0^2 (n^2 - 1)\phi = 0 \quad (2.69)$$

A vantagem da PE reside na sua implementação computacional que pode ser feita por algoritmos que “marcham” na dimensão da distância, enquanto que a solução da equação elíptica deve ser resolvida numericamente para toda a região de distância-profundidade simultaneamente. O campo inicial é, em geral, gerado por um modelo modos normais ou de raios. A solução completa pode ser obtida por elementos finitos, diferenças finitas etc.

Muitos modelos em FORTRAN ou MATLAB têm sido divulgados na literatura com o intuito de serem testados no mundo todo, principalmente, para fins acadêmicos ou para a indústria civil, de modo a compatibilizar os resultados e facilitar a comparação dos mesmos. Assim, esses estão disponíveis na Internet. Há diversos modelos numéricos de propagação sonora em águas rasas como RAM, COUPLE, BELLHOP e KRAKEN, por exemplo. De acordo com a revisão bibliográfica realizada, os mais utilizados e de resultados mais compatíveis com experimentos são o KRAKEN, baseado em modos normais, o RAM, que fundamenta-se na solução da equação da onda parabólica, e o BELLHOP, de traçado de raios. Acrescenta-se também que a literatura aponta divergência nos resultados da fase obtida pelo RAM para grandes distâncias.

DALY (1999) compara os dois modelos em águas rasas e profundas, obtendo resultados semelhantes. Para frequência de 70 Hz e espaçamento na profundidade equivalente a 0.125m, os resultados em magnitude e fase são idênticos. No entanto, a

comparação de ambos softwares não pode ser feita de maneira direta, pois o RAM provê como saída o envelope $\psi(r,z)$, e não, a pressão $p(r,z)$. Logo, a portadora e a atenuação devido à divergência não estão incluídas:

$$\kappa_0 = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (2.70)$$

$$p_r(r, z) = \frac{\psi(r, z)}{\sqrt{z}} e^{j\kappa_0 r}$$

A saída gerada pelo KRAKEN é formada pelos números de modos e seu formato $\phi_n(z)$, que pode ser reconstruído usando a função de Green:

$$p_k(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=1}^N \phi_n(z_s) \phi_n(z) \frac{e^{-jk_n r}}{\sqrt{k_n r}} \quad (2.71)$$

Portanto, não é possível comparar diretamente p_r e p_k , visto que o termo exponencial acarreta oscilações que aumentam com a distância. Assim, o termo da portadora é retirado, e os resultados a serem comparados são:

$$g_r(r, z) = \frac{\psi(r, z)}{\sqrt{z}} \quad (2.72)$$

$$g_k(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=1}^N \phi_n(z_s) \phi_n(z) \frac{e^{-jk_n r}}{\sqrt{k_n r}}$$

Portanto, antes de se comparar resultados entre modelos de propagação disponíveis, deve-se verificar a compatibilidade das respostas dos mesmos.

Atualmente, a ferramenta mais simples e completa é o “Acoustic Toolbox” gerenciado pelo pesquisador Michael Porter, e disponibilizado na Internet no site www.cmst.curtin.edu.au/products/actoolbox para “download”. Ele permite a determinação da perda na propagação além da visualização de características específicas de cada modelo, como os modos normais, por exemplo. Ele contém os seguintes modelos:

- BOUNCE: cálculos baseados nos coeficientes de reflexão;
- BELLHOP: traçado de raios;
- FIELDS: função de Green;

- KRAKEN: modos normais;
- KRAKENC: modos normais complexos;
- RAMGEO: equações parabólicas para fundo com substrato fluido;
- RAMSGEO: equações parabólicas para fundo com substrato elástico;
- SCOOTER: função de Green.

Ainda é possível se conseguir os softwares RAY (de Woods Hole Oceanographic Institute, E.U.A) e EIGENRAY (da Universidade de Washington, E.U.A), baseados na teoria de raios; versões do RAM de Michael Collins (Naval Research Laboratory, E.U.A) para equações parabólicas; SNAP de modos normais, criado em Saclantcen (“Supreme Allied Commander Europe Atlantic Undersea Research Center” - Centro de pesquisas da OTAN na Itália), dentre outros.

Neste trabalho, optou-se pelo modelo de propagação KRAKEN, de modos normais, em virtude das características do ambiente a ser estudado e do seu bom desempenho ser amplamente divulgado na literatura em termos de robustez e acurácia. O modelo inclui a rugosidade da superfície e do fundo (DEBEVER e KUPERMAN, 2007), e tem sido constantemente atualizado e revisado, permitindo a inclusão de propriedades elásticas do fundo e subfundo, a abordagem dependente da distância e em 3 dimensões. Originalmente, foi desenvolvido para avaliar outros modelos, servindo como padrão no “Naval Ocean Systems Center” da Marinha dos Estados Unidos. Suas extensões foram feitas no “Naval Research Laboratory”, e, atualmente, faz parte da rotina da área de acústica submarina de SACLANTCEN, o centro de pesquisas em acústica submarina da OTAN, em La Spezia, Itália. Assim, devido às suas características teóricas e à sua facilidade de implementação, KRAKEN é o modelo de propagação mais adequado a ser implementado neste trabalho.

Capítulo 3

Processamento de sinais para localização de fonte sonora

A acústica submarina atua na medição ou detecção de sinais que se propagam em um oceano na presença de ruído. O método mais simples para localizar um alvo é utilizando um equipamento acústico ativo. Ou seja, ele transmite uma onda acústica e aguarda o retorno do seu eco. Porém, o seu emprego alerta a sua presença para o inimigo, e derruba a característica primordial do navio ou submarino: a discricção acústica. Segundo WAITE (2003), quando um sonar passivo detecta um sinal irradiado por um alvo, ele fornece a direção do alvo e como ela varia com o tempo, através da técnica de conformação de feixe (detalhada mais adiante, neste capítulo). Este equipamento somente “escuta” a emissão da fonte sonora. A distância do alvo, por sua vez, não é conhecida diretamente. Sinais comparáveis que chegam ao array podem ser resultado de uma fonte distante muito ruidosa ou de um alvo muito próximo e silencioso. As técnicas mais difundidas para localização passiva são aplicadas a submarinos que comportam longos “arrays” laterais, e que estes sejam muito silenciosos. No entanto, atualmente, há uma tendência mundial em se utilizar submarinos de pequeno porte, devido à mudança do cenário de guerra ter passado para regiões de águas rasas. O submarino é um alvo difícil de se detectar, por ser extremamente silencioso.

Por isso, é necessário desenvolver uma técnica para localizar a fonte sonora sob essas condições.

Com o sonar passivo, uma prática usual para determinação da distância do alvo é a Triangulação. Isto é, com dois “arrays” bem separados, é possível determinar a distância do alvo através da geometria envolvida, como pode ser ilustrado na figura 3.1. O submarino, com seu “array” horizontal rebocado, determina o ângulo de 145° e com o “array” cilíndrico de proa, define o ângulo de 30° . A acurácia da medida é dependente da acurácia do dado de marcação e da distância entre submarino e “array”. Para o exemplo, S é igual a 1000 m, e a distância é obtida por:

$$R = \frac{S \sin(145^\circ)}{\sin(5^\circ)} = 6581m \quad (3.1)$$

Caso haja um erro de $\pm 1^\circ$, a distância R passa a ser um valor entre 4823 e 10685 m. Para diminuir esse erro de marcação, a distância entre o “array” lateral e o rebocado deve ser a maior possível. Há valores práticos pré-estabelecidos, como $R/S \approx 5$ e a largura do feixe de 5° .

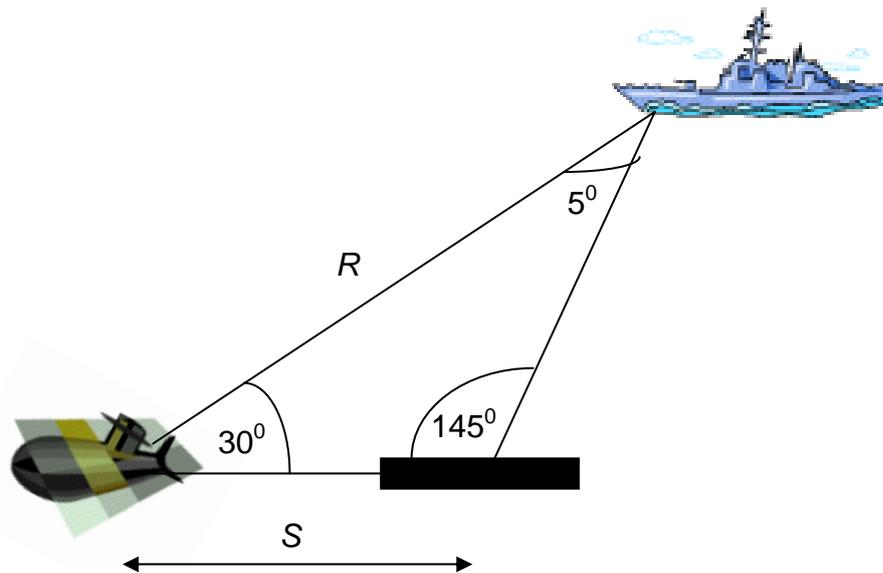


Figura 3.1 – Ilustração da triangulação para determinar a distância da plataforma de superfície.

Outra possibilidade de triangulação na ausência de um “array” rebocado é a utilização de manobras do próprio submarino, de modo a adquirir o sinal do alvo em diferentes posições. Por outro lado, essa medida demanda tempo, e expõe o submarino diante da ameaça. Há vários procedimentos matemáticos para auxiliar nos cálculos, mas a melhoria da acurácia é obtida através do aumento do tempo de observação.

Para evitar manobras do submarino, pode-se optar pela variação de profundidade do submarino. Medições dos ângulos verticais de chegada de sinais do alvo no “array” lateral são analisadas de acordo com a variação no tempo. Considerando somente o caminho de propagação ilustrado na figura 3.2, a distância é determinada através da seguinte expressão:

$$R = \frac{(2H - t)}{\tan(\theta)} \quad (3.2)$$

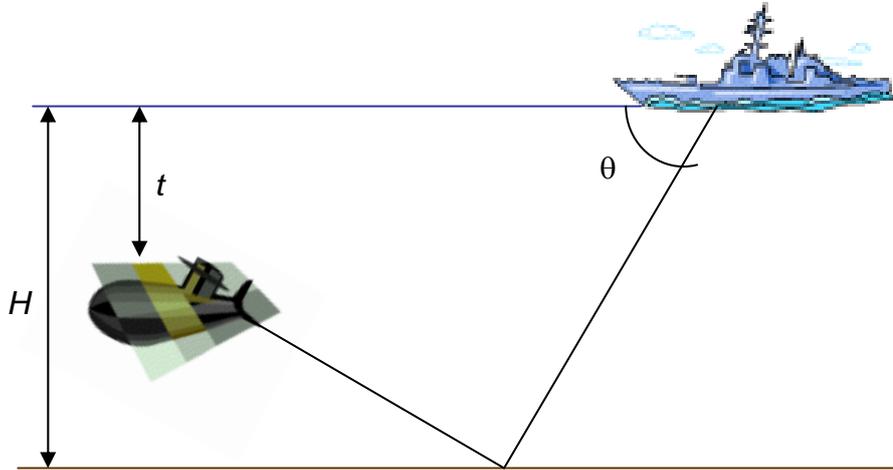
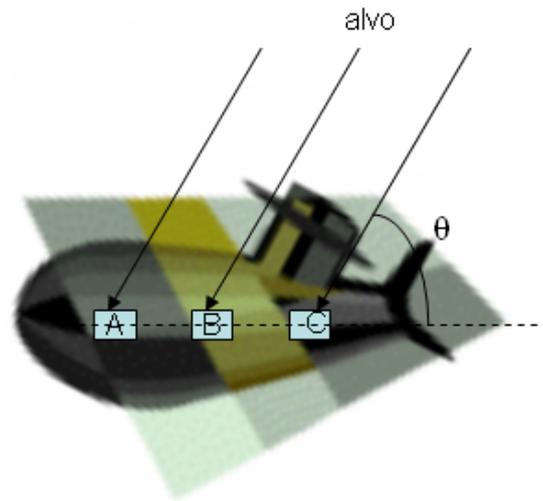


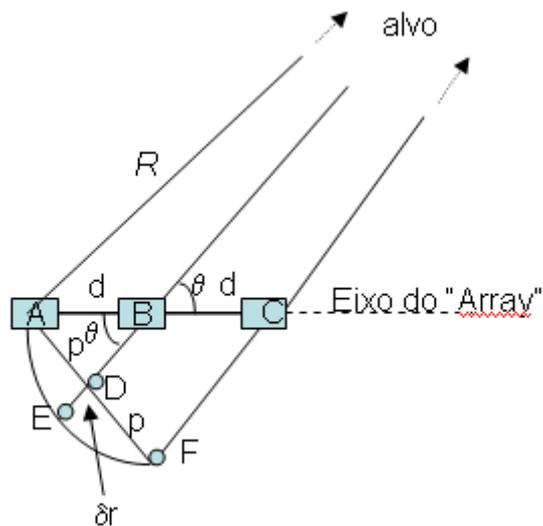
Figura 3.2 – Geometria da determinação da distância do alvo de superfície a partir da variação de profundidade do submarino.

Para atingir uma acurácia adequada, é importante que o “array” tenha boa resolução vertical para todas as frequências de interesse. “Arrays” de flanco e de proa são os mais aconselhados para essa técnica. O ângulo vertical máximo pode ser estimado pela amplitude ou fase do sinal.

É denominada medição horizontal direta passiva, quando a distância é medida diretamente por “array” nas laterais do submarino, a partir da curvatura da frente de onda que chega proveniente de um alvo distante. As figuras 3.3(a) e 3.3(b) ilustram o posicionamento do “array” no submarino e o caminho da frente de onda.



(a)



(b)

Figura 3.3 – Caminho da frente de onda e posicionamento do “array”. (a) Representação dos três conjuntos de “arrays” laterais no submarino. (b) Frente de onda emitida pela fonte sonora, e que chega ao sonar lateral. AF: representação da frente de onda plana. Arco AEF: curvatura real da frente de onda.

Considerando os três “arrays” colineares A, B e C, o alvo localizado a uma distância R , pode ser determinado a partir do ângulo θ e da aproximação δr , devido à curvatura.

$$\begin{aligned}
 R^2 &= p^2 + (R - \delta r)^2 \\
 p &= d \sin(\theta)
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Quando R é muito maior que d , tem-se:

$$R = \frac{(d \sin(\theta))^2}{2\delta r} \quad (3.4)$$

Assim, para obter a distância é necessário determinar δr e θ . Para um alvo distante, o ângulo θ é quase o mesmo para todos os três “arrays”. Na prática, θ é obtido medindo-se e fazendo-se a média dos ângulos de resposta máxima dos “arrays”. O segmento BE é encontrado através da correlação cruzada entre os “arrays” A e B; e CF, entre A e C. A estimativa da distância depende da acurácia de δr , que por sua vez, depende da medição precisa das diferenças dos tempos entre chegadas nos “arrays”. As posições dos “arrays” devem ser conhecidas precisamente. Os erros obtidos são consequência dos erros da curvatura e da soma de atrasos dos tempos de chegada. Para minimizá-los, o ideal é que a distância d seja a maior possível. Porém, essa passa a ser uma limitação das dimensões do próprio submarino. Além disso, em WAITE (2003), δr deve ser uma boa parte do comprimento de onda, no mínimo $\lambda/10$, para uma medição acurada. Para valores realistas de d e do tamanho dos “arrays”, isso implica em frequências mais altas, limitando a operação do equipamento.

$$\delta r = BE - \frac{CF}{2} \quad (3.5)$$

3.1 Método do Campo Casado

Pelo exposto anteriormente, ressalta-se a importância de se desenvolver uma técnica de medição de distância passiva em que sejam superadas limitações de dimensões e manobras do submarino e do próprio equipamento sonar. Com esse intuito, surgiu o “Matched Field Processing” (MFP – Processamento de Campo Casado), uma técnica de processamento de sinais de grande interesse pela comunidade científica, sendo inclusive tema de sessões especiais da Sociedade de Acústica da América (ASA) e de diversos workshops em todo o mundo. Desde a década de 90, tem sido considerada como a técnica de processamento de sinais mais aplicada em acústica submarina (TOLSTOY, 1998 e 2000). Como foi citado na introdução, esta técnica baseou-se em

um trabalho anterior sobre conformação de feixe modal. O conceito fundamental do MFP consiste em incorporar a física da propagação sonora ao processamento do “array” (conformação de feixe), e como o próprio nome diz, verificar o “casamento” entre o sinal recebido e o modelado pelo meio.

MFP têm pouco mais de 20 anos, e a literatura apresenta o que se conseguiu durante esse período, e quais são os futuros desafios. Certamente, há demonstrações de bons resultados na localização de fontes a vários quilômetros, em canais profundos. Porém, a experiência em águas rasas tem tido menos sucesso, por diversas razões. Na verdade, todos os experimentos enfatizam a localização (e tomografia) com relação sinal-ruído (SNR) alta, enquanto que a detecção com SNR baixo é o maior problema para o sonar passivo. Quando as frequências são muito altas (kHz), os níveis de ruído se elevam, ou o ambiente marinho dificulta a sua previsão por modelos teóricos, a técnica tem grande probabilidade de falhar. A utilização de sinais de banda estreita (tons) é a preferência da maior parte dos pesquisadores, em virtude de trazer menos custo computacional. No entanto, atualmente, há uma tendência de se desenvolver algoritmos para sinais de banda larga, com o objetivo de explorar as suas características nas diversas frequências, reduzir o número de elementos do “array”, e viabilizar a aplicação para um único hidrofone. As múltiplas frequências do sinal de banda larga trazem mais informação, que uma única frequência. Assim, a redução do número de receptores seria compensada pelas informações presentes nas diversas frequências (KUPERMAN *et al.*, 2001; DEBEVER e KUPERMAN, 2007; ORRIS *et al.*, 2006; BOOTH *et al.*, 2000 e 1996; KNOBLES e KOCH, 2003; WESTWOOD, 1992; SOARES e JESUS., 2003; MICHALOPOLOU, 1998; D’SPAIN *et al.*, 1999; CAWENBERGHS *et al.*, 2001, MACKINNES, 2004).

O desempenho do MFP depende diretamente dos parâmetros do ambiente e do modelo de propagação escolhido, isto é, da sua capacidade de representação do ambiente marinho real. Atualmente, ainda há dúvidas a cerca da utilização de modelos de propagação coerentes ou incoerentes, e da importância do conhecimento do sinal da fonte, por exemplo. Isso torna a aplicação de MFP para localização de um alvo através de um sonar passivo, num tema de grande relevância e que necessita de muita análise e experimentos antes de se gerar um sistema de determinação da distância. A literatura demonstra que MFP é factível, porém é necessário determinar quando, como e onde aplicar (BAGGEROER, 2008).

3.1.1 Teoria

A teoria de MFP fundamenta-se na conformação de feixe de onda plana, comumente chamada de “Plane Wave Beamforming” (ZIOMEK, 1995). Conformação de feixe ou "Beamforming" é uma técnica de processamento de sinais usada para controlar a direcionalidade da recepção ou transmissão de um sinal em um “array” de transdutores. Com isso, torna-se possível direcionar a maior parte da energia transmitida por um grupo de elementos do “array” em uma determinada direção angular, melhorando-se a relação sinal-ruído e possibilitando a redução de lóbulos laterais. Na recepção, pode-se também calibrar um grupo de elementos de modo a receber sinais predominantemente de uma direção pré-escolhida.

Seja $f_n(t)$ a função temporal que representa o campo de pressão recebido no n ésimo elemento de um array vertical, ilustrado na figura 3.4. A saída conformada $g(t)$ é dada por:

$$g(t) = \sum_{n=1}^N w_n f_n(t - \tau_n) \quad (3.6)$$

Onde, w_n é o valor da amplitude real, podendo ser considerada como uma função peso; τ_n são os atrasos, e N é o número de elementos do “array”.

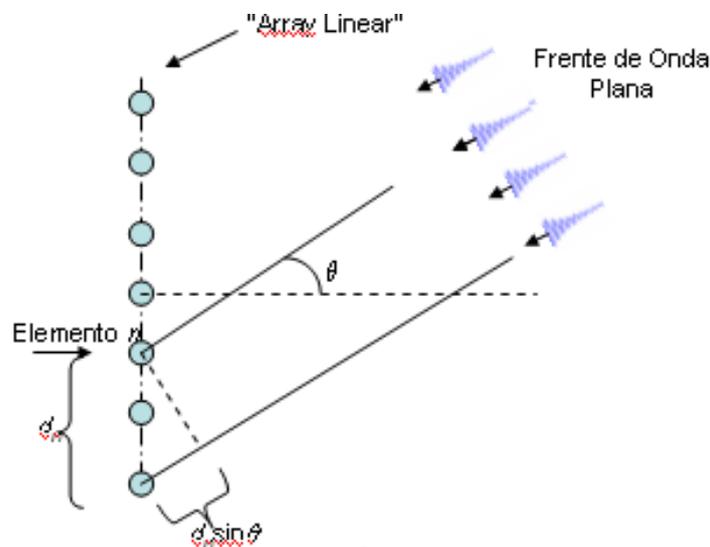


Figura 3.4 – Geometria da conformação de feixe de onda plana padrão.

A transformada de Fourier da equação 3.6 resulta em (3.7), que permite a visualização da natureza da onda plana:

$$G(\omega) = \sum_{n=1}^N w_n F_n(\omega) e^{-i\omega\tau_n} \quad (3.7)$$

$$\tau_n = \frac{d_n \sin(\theta)}{c}$$

Outra interpretação possível, é a correlação entre o campo $F_n(\omega)$ e o campo de onda plana $e^{i\omega m}$, quando w_n é constante para todo n . Atualmente, o termo MFP é usado quando não é possível aplicar o modelo de onda plana para a propagação, e sim, um modelo de propagação mais completo. MFP utiliza a complexidade do ambiente para acrescentar informações. Para localização de fontes, os algoritmos de MFP comparam os sinais de pressão recebidos com simulações teóricas de transmissões de uma fonte em um conjunto de distâncias e profundidades de teste r_{tr} e z_{tr} (CLAY e MEDWIN, 1998). A fonte está em uma distância e profundidade desconhecidas, r_{uk} e z_{uk} . Considera-se que o campo de pressão devido à fonte é recebido com boa relação sinal-ruído (SNR), e portanto, a frequência do sinal é conhecida. As pressões sonoras são recebidas por um “array” vertical, como na figura 3.4, e a pressão no j -ésimo elemento é p_j . O vetor de pressões é dado por:

$$P_{uk} \equiv \begin{bmatrix} p_1 \\ \dots \\ p_N \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

As fases relativas nos receptores dependem da distância e da profundidade da fonte. Para eliminar a dependência no tempo, calcula-se a covariância cruzada dos campos de pressão médios:

$$c_{jk} = \langle p_j p_k^* \rangle \quad (3.9)$$

Os sinais simulados são colocados no vetor $s_{tr} = [s_1 \dots s_N]$. O fator de detecção (DF – “Detection Factor”) é definido pela expressão 3.10. Ele quantifica a semelhança entre o sinal modelado e o sinal real. Quando o sinal simulado coincidir com o recebido, o fator DF será igual a 1. É a correlação entre o espectro do sinal recebido e o modelado.

Define-se como Superfície de Ambigüidade (AMS) o mapeamento de DF como função de r e z . A quantidade e a amplitude de falsos picos são os maiores problemas na

localização de fontes por MFP. Neste trabalho, são tratados alvos na superfície e um único receptor. Deste modo, as profundidades da fonte e do receptor são pré-definidas.

$$DF \equiv \frac{s_{tr}^* C_{uk} s_{tr}}{(s_{tr}^{*T} s_{tr})^{1/2} (p_{uk}^{*T} p_{uk})^{1/2}} \quad (3.10)$$

3.1.2 Processadores

Denomina-se processador à função que determina o DF . Neste item, são descritos os processadores já estabelecidos na literatura, como o linear, o de variância mínima e o de modo casado. Os processadores de entropia, auto-vetores, e ortogonal não são apresentados, pois fogem ao escopo deste trabalho em termos de implementação experimental. Só podem ser aplicados à “arrays” ou dependem do conhecimento prévio da forma de onda da fonte. Em seguida, são descritos os processadores de FRAZER e PECHOLCS (1990), os processadores de minimização de erro quadrático e de auto-vetores, voltados para aplicações com um único hidrofone; além do processador com auto-correlação, e os processadores para algoritmos genéticos, que podem ser aplicados com um ou mais receptores. De acordo com as características do ambiente e dos sinais transmitidos pela fonte sonora, processadores diferentes terão desempenhos diferentes.

O processador mais utilizado em MFP é o linear (P_{lin}) ou Bartlett (THODE *et al.*, 2004; TOLSTOY, 1998; BAGGEROER *et al.*, 1993; BAGGEROER, 2008), descrito na seção anterior. A sua implementação é simples, e é um dos mais robustos diante de ruído. Outra forma de abordá-lo é correlacionando diretamente o campo mensurado (F) com a sua réplica modelada teoricamente (\hat{F}) e feita a sua transformada de Fourier, como descrito nas equações 3.11 e 3.12. É importante ressaltar que trata-se do campo de pressão no domínio da frequência. O espectro da réplica gerado pelo modelo de propagação é obtido por síntese de Fourier, em que se obtém o comportamento do modelo para cada frequência. O emprego da matriz de espectro cruzado é uma tentativa de se minimizar variações de amplitude e fase em função do tempo. A montagem dos espectros e a implementação dos processadores é realizado por um programa desenvolvido para MATLAB (Mathworks Inc., versão 7.0).

$$P_{lin} = w^+ C w \quad (3.11)$$

Onde,

$$\begin{aligned}
 w &= \hat{F} \\
 C &= \langle FF^+ \rangle \\
 F &= (F_1, F_2 \dots F_N)^T \\
 \hat{F} &= (\hat{F}_1, \hat{F}_2 \dots \hat{F}_N)^T
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

Há outros métodos de supressão de lóbulos laterais, também conhecidos por conformação de feixe adaptativo, em que o processamento do sinal constrói vetores ponderadores dependentes do sinal recebido. Como as características do ruído podem variar, a utilização de um filtro adaptativo faz-se necessária (NUTTALL *et al.*, 2000). O filtro resultante é adaptativo no sentido de que é capaz de responder às mudanças de ruído ambiente. O método mais divulgado é o baseado no método de Máxima Verossimilhança ou Mínima variância sem Distorção. Em geral, os métodos adaptativos são caracterizados pela aplicação de funções não-lineares aos sinais recebidos (JENSEN *et al.*, 1994).

Para melhorar o desempenho da correlação cruzada, podem ser associados filtros de acordo com as características dos sinais (SOUSA, 2001; SONG *et al.*, 2003). Com o intuito de reduzir os problemas de lobos laterais do processador linear, foi desenvolvido o processador de variância mínima (MV), também conhecido como de máxima verossimilhança (ML), energia mínima ou Capon (TABRIKIAN *et al.*, 1997). Seu objetivo é otimizar a relação sinal ruído de saída sem que haja distorção do sinal. Assim, buscam-se pesos (w) que minimizam a variância (σ^2) da resposta do processador em relação ao campo de saída do filtro (F_{out}).

$$\sigma^2 = \left\langle \left| F_{out} - \bar{F}_{out} \right|^2 \right\rangle
 \tag{3.13}$$

$$F_{out} = \sum_{n=1}^N \omega_n^* F_n = \sum \omega_n^* (S_n + N_n)
 \tag{3.14}$$

Para que haja ganho unitário estabelece-se que:

$$w^+ S = 1
 \tag{3.15}$$

Então, tem-se:

$$F_{out} = 1 + \sum_1^N w_n^* N_n$$

e

$$(3.16)$$

$$\langle N_{out} \rangle = \left\langle \sum_1^N w_n^* N_n \right\rangle \Rightarrow \bar{F}_{out} = 1$$

Assim, a expressão para a variância é dada por:

$$\sigma^2 = \left\langle \left(\sum_{l=1}^N \omega_l^* F_l \right) \left(\sum_{m=1}^N \omega_m^* F_m \right) \right\rangle - 1 = w^+ C w - 1$$

$$(3.17)$$

Os pesos são determinados a partir da minimização da equação 3.18, gerada a partir da criação de um operador funcional Σ^2 , que incorpora uma limitação do sinal e une as expressões 3.16 e 3.17. Substituindo S por F estimado, descreve-se o processador como:

$$\Sigma^2 = w^+ C w + \lambda \text{Re}(w^+ S - 1) - 1$$

$$(3.18)$$

Minimizando a equação 3.18, obtém-se:

$$\frac{\partial \Sigma^2}{\partial w} = 2Cw + \lambda S = 0 \Rightarrow \begin{cases} \lambda = \frac{-2}{S^+ C^{-1} S} \\ w = \frac{C^{-1} S}{S^+ C^{-1} S} \end{cases}$$

$$(3.19)$$

Nota-se que w é uma função não-linear da matriz de dados C , e por isso, é considerado como um filtro adaptativo. Esse vetor peso não é conhecido antes da observação. Substituindo S por \hat{F} e retornando à expressão 3.11, a variância será minimizada considerando ruído médio nulo, o processador é definido como:

$$P_{mv} = \frac{1}{\hat{F}^+ C^{-1} \hat{F}}$$

$$(3.20)$$

Esse processador utiliza a matriz inversa de C , o que pode complicar a sua determinação, sendo por vezes necessário acrescentar algum valor maior que zero à sua diagonal, para garantir a execução do cálculo.

Outro processador também utilizado para a localização de fontes é o de Modo Casado, também conhecido por conformação de feixe modal (“Modal Beamforming”) (JESUS, 1991). Foi desenvolvido a partir da observação de que para um campo sonoro em modos normais, a informação de distância é contida exclusivamente na fase do sinal, enquanto que a informação sobre a profundidade está nas autofunções modais. MFP padrão opera com o campo acústico recebido total. Em MMP, o processo ocorre no espaço dos modos. A sua vantagem reside no fato de que antes do processamento, pode-se filtrar os dados a fim de eliminar os modos que degradam a localização (modos modelados de maneira pobre ou ruidosa). É necessário que o número de hidrofones seja igual ou maior que o número de modos. A resolução deste processador é usualmente limitada pelo número efetivo de modos vistos pelo “array”. Foram desenvolvidos “refinamentos” nos procedimentos como, por exemplo, o compromisso da resolução da profundidade $\Delta_z P \approx H/m$; e o espaçamento entre elementos do “array” ser inferior a $\lambda_m/2$. A potência do processador MMP (ou o DF) é dada pela expressão 3.22, obtida a partir da decomposição do campo em uma função amplitude (a_m) e uma função da profundidade (φ_m).

$$\begin{aligned}
 F_n &= \sum_{m=1}^M a_m \varphi_m(z_n) \rightarrow a_m = \frac{A}{\sqrt{k_m r_s}} \varphi_m(z_s) e^{ik_m r_s} \\
 \hat{F}_n &= \sum_{m=1}^M \hat{a}_m \hat{\varphi}_m(z_n) \rightarrow \hat{a}_m = \frac{A}{\sqrt{\hat{k}_m \hat{r}_s}} \hat{\varphi}_m(\hat{z}_s) e^{i\hat{k}_m \hat{r}_s} \\
 A &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \\
 P_{MMP}(\hat{x}_s) &= \left| \sum_{m=1}^M \hat{a}_s^* \hat{a}_m \right|^2
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Onde,

φ : função modal de profundidade (real);

k : número de onda complexo horizontal.

Em geral, a acurácia de MMP depende da determinação exata das excitações modais a_m , principalmente para “arrays” verticais que amostram discretamente e espacialmente o campo/modos. Neste caso, assume-se que o formato dos modos e os números de onda são conhecidos (WAGE, 2004). O MFP também é considerado como um filtro espacial, e são equivalentes quando $\hat{\varphi}_m \approx \varphi_m$.

$$P_{MMP} \approx \left| \sum_1^N \sum_1^M \hat{a}_m^* \hat{\varphi}_m(z_n) F_n \right|^2 = \left| \sum_1^N F_n^* F_n \right|^2 = P_{Lin} \quad (3.22)$$

Os métodos clássicos de MFP usam arrays de hidrofones verticais e horizontais com aberturas significativas de modo a obter discriminação espacial suficiente para localização de fonte. A aplicação de um único hidrofone compensa a falta de resolução espacial (abertura) com a utilização de um processamento no domínio do tempo.

O casamento no domínio do tempo é muito dependente da habilidade dos modelos numéricos em prever a amplitude do sinal recebido e, principalmente, a sua fase. Para evitar a dependência da determinação exata da fase, têm-se utilizado a MFP incoerente. JESUS *et al.* (2000) calcula por máxima verossimilhança o tempo de chegada e verifica a estimativa mais próxima. Outra abordagem assume que há características (“clusters” de chegadas acústicas) que são descorrelacionadas, o que permite a separação de subespaços de SNR. Neste caso, estimar a localização de uma fonte sonora é equivalente a medir a distância entre o subespaço do sinal recebido e o subespaço gerado pelo sinal atrasado previsto pelo modelo acústico escolhido.

Assumindo um modelo linear para o sinal recebido em uma posição $\theta_s(r_s, z_s)$ e que o meio entre a fonte e o receptor atua como um canal de atrasos temporais múltiplos, tem-se:

$$\begin{aligned} y_n(t, \theta_s) &= p_n(t, \theta_s) * s_0(t) + \varepsilon_n(t) \\ p_n(t, \theta_s) &= \sum_{m=1}^M a_{n,m}(\theta_s) \delta[t - \tau_m(\theta_s)] \end{aligned} \quad (3.23)$$

São consideradas n janelas de tempo, e a variabilidade das mesmas é desprezada.

$$\begin{aligned}
y_n(\theta_s) &= S[\tau(\theta_s)]a_n(\theta_s) + \varepsilon_n \\
\tau(\theta_s) &= [\tau_1(\theta_s), \dots, \tau_M(\theta_s)]^t \\
S[\tau(\theta_s)] &= [s_0(\tau_1), \dots, s_0(t - \tau_M)] \\
a_n(\theta_s) &= [a_{n,1}(\theta_s), \dots, a_{n,M}(\theta_s)]^t \\
s_0(\tau) &= [s_0(-\tau), \dots, s_0(T\Delta t - \tau)]^t
\end{aligned} \tag{3.24}$$

A determinação de τ consiste em um problema de mínimos quadrados, podendo ser representado de acordo com a equação 3.25:

$$\begin{aligned}
e(\tau, a) &= \|y - S(\tau)a\|^2 \\
\hat{a} &= (S^*S)^{-1}S^*y
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Depois de se obter \hat{a} , recorre-se à minimização da função erro. Considerando o espaço de S ortogonal, $S^*S=I$, e N vetores de y , obtém-se:

$$e(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \|y_n^* S(\tau)\|^2 \tag{3.26}$$

Comparando-se esse trabalho ao de PORTER *et al.* (2000), observa-se que este baseia-se na correlação do logaritmo do padrão do sinal recebido e o logaritmo do padrão do sinal modelado, reforçando a importância do padrão do sinal recebido, e não, a sua amplitude. No trabalho de JESUS *et al.* (1998), enfatizam-se os tempos de chegada dos caminhos individuais de cada raio que se propaga, analisando apenas os pontos previstos corretamente. Ambos os estudos apresentam a possibilidade da aplicação de um único sensor e destacam a importância da utilização de um bom modelo de propagação acústica. O padrão de tempos de chegada e as predições de campo de pressão na frequência são obtidos utilizando o software de modelagem de propagação acústica “BELLHOP”, que se baseia na teoria de raios. A implementação de subespaços é complexa e não agregou resultados positivos à utilização de um único hidrofone, pois há dificuldade em se distinguir o subespaço de ruído do subespaço de sinal. Nota-se que praticamente não há distinção na posição dos atrasos. No entanto, ambos estudos denotam a possibilidade da aplicação de um único sensor e destacam a importância da utilização de um bom modelo de propagação acústica.

PORTER *et al.* (2000) abordam o problema através da correlação cruzada e assumem inicialmente que a forma do espectro da onda da fonte sonora é conhecida.

O primeiro estágio do processamento consiste em correlacionar a onda recebida com a réplica da forma da onda da fonte:

$$rr(t) = \int r(\tau - t)s(\tau)d\tau \quad (3.27)$$

A função resultante, $rr(t)$, é definida como o *correlograma da réplica*. A correlação da réplica é também uma fase usual para a tomografia acústica oceanográfica. Para entender essa abordagem, considera-se uma visão teórica da propagação de raios ao longo do guia de onda. Desprezando-se a fase, a forma de onda recebida é o somatório de versões atrasadas e escalonadas da forma de onda da fonte:

$$r(t) = \sum A_i s(t - t_i) \quad (3.28)$$

Então, a correlação com a réplica representa:

$$rr(t) = \int \sum A_i s(\tau - t + t_i)s(\tau)d\tau = \sum A_i ss(t - t_i) \quad (3.29)$$

Onde,

$$ss(t) = \int s(\tau - t)s(\tau)d\tau \quad (3.30)$$

O objetivo desse processo é produzir uma forma de onda, $rr(t)$, com características robustas para a localização. Em particular, busca-se sempre que $ss(t)$ seja uma função com seu pico bem definido e estreito, próximo da função delta de Dirac, para que não haja dúvida sobre a posição de seu máximo. Assim, o correlograma da réplica se parece com a resposta impulsiva do guia de onda, ou canal, como também é definido. Seus picos coincidem com as amplitudes e atrasos dos ecos no canal. Qualquer forma de onda da fonte, que possua um espectro plano, terá uma função *sinc* como auto-correlação. Em geral, a largura dos picos de correlação dos processadores indica a sua capacidade de resolução, sendo considerada como uma medida de sua qualidade (NARARSIRNHAN e KROLIK, 1995).

Para localizar a fonte, são realizadas comparações entre $rr(t)$ e as réplicas modeladas $hh(t; r_s, z_s)$, para buscar as coordenadas da fonte (r_s, z_s) . Isso é feito por intermédio de correlação.

$$C(t; r_s, z_s) = \int rr(t - \tau)hh(\tau; r_s, z_s) d\tau \quad (3.31)$$

A determinação da posição da fonte pode ser obtida através da localização do pico de máxima correlação (processador coerente) ou considerando-se a energia total (processador incoerente).

Apesar dessa “assinatura” do canal auxiliar na busca de uma assinatura da localização da fonte, a variabilidade do ambiente impede que os modelos acústicos façam uma previsão correta do padrão de ecos. Então, para capturar as características robustas para a localização da fonte, altera-se o processador. Em primeiro lugar, ao invés de se comparar os correlogramas, comparam-se os envelopes de cada um deles. O envelope é insensível às inversões dos sinais que ocorrem quando o som se reflete na superfície do oceano, e a mudanças de fase mais complexas durante a reflexão no fundo. Quando este é precisamente conhecido, essas mudanças de fase são informações extras que auxiliam na localização da fonte, o que dificilmente ocorre, e portanto, essas incertezas só prejudicam a análise e degradam a solução.

Depois de formar os envelopes, aplica-se o logaritmo, para em seguida fazer a correlação entre modelo e dado. Isso significa balancear as informações de ecos mais fracos e ecos mais fortes. O resultado é um algoritmo mais sensível à posição dos ecos, e não às suas amplitudes. Assim, o processador é representado por:

$$\begin{aligned} r_{le}(t) &= 20 \log[env(rr(t))] \\ h_{le} &= 20 \log[env(hh(t; r_s, z_s))] \\ C(t; r_s, z_s) &= \int r_{le}(\tau)h_{le}(\tau - t; r_s, z_s) d\tau \\ P(r_s, z_s) &= \max|C(t; r_s, z_s)| \end{aligned} \quad (3.32)$$

Para generalizar, tal método pode ser utilizado com um único hidrofone ou com um array, somando as correlações cruzadas entre os elementos. No caso em que não há conhecimento da forma da onda da fonte, propõe-se a auto-correlação de cada elemento do array. Se mesmo assim, a função $rr(t)$ não possuir pico, pode-se corrigir com a implementação do pré-branquiamento do sinal.

Em FRAZER e PECHOLCS (1990), são apresentados 5 estimadores de localização com um único hidrofone, inclusive o pioneiro, o processador de Clay. Todos utilizam a função de Green ($g(\mathbf{X},t)$) para modelar a propagação, considerando:

\mathbf{X} : localização da fonte;

$w(t)$: a forma de onda emitida; e

$d(t)$: sinal temporal medido.

Então, a localização mais provável da fonte é aquela que maximiza o processador Clay:

$$X = \frac{|h(X,-t) * d(t)|}{\|h(X)\|_2 \|d\|_2}$$

$$norma = \|f\|_p = \left(\int_{-\infty}^{\infty} dt |f(t)|^p \right)^{1/p} \quad (3.33)$$

$$h(X,t) = g(X,t) * w(t)$$

Como o denominador da eq. 3.33 é uma norma, surgem novas famílias de localizadores de mesmos princípios:

$$X_n^m = \frac{\|h(X) * d\|_m}{\|h(X)\|_n * \|d\|_n} \quad (3.34)$$

$$\mu_n^m = \frac{\|h(X) * d\|_m}{\|h(X) * d\|_n}$$

Considerando a transformada de Fourier do sinal recebido $d(t)$ e da função de Green obtêm-se:

$$\begin{aligned}
\varphi_n^m &= \frac{[\|D(\varpi)\|_m / \|G(X)\|_m]}{\|D/G(X)\|_n} \\
\theta_n^m &= \frac{\|D/G(X)\|_m}{\|D/G(X)\|_n} \\
\beta_n^m &= \frac{\|d * g(X)^{-1}\|_m}{\|d * g(X)^{-1}\|_n} \\
\nu_n^m &= \frac{[\|d_{\varpi}^2 |D| \|_m / \|d_{\varpi}^2 |G(X)| \|_m]}{\|d_{\varpi}^2 / |G(X)| \|_n} \\
d_{\varpi}^2 &= d^2 / d\omega^2
\end{aligned} \tag{3.35}$$

Experimentos indicam que os melhores resultados dos processadores são obtidos para valores de m e n , quando maior for a razão m/n , pois maior será a resolução do processador. Caso haja algum problema no cálculo numérico dos processadores supracitados, sugere-se substituir o denominador dos processadores φ e θ por:

$$\|D/G(X)\| \approx \frac{DG^*(X)}{(|G|^2 + \varepsilon)} \tag{3.36}$$

Onde ε é valor muito menor que $\|G(X)\|_2$.

O modelo de propagação simples só é realista em águas rasas com um fundo moderadamente rígido e um sub-fundo homogêneo. Além disso, a eficiência dos processadores φ , θ e ν depende da suavidade de $|W|$ em relação a $G(X)$. Os processadores da eq. 3.35 não necessitam do conhecimento do espectro da fonte. Mas, uma estimativa do seu espectro, já é informação suficiente para contribuir na melhoria da solução. Assim, os processadores apresentados demonstram a possibilidade de se utilizar um único hidrofone para localizar fontes sonoras.

Para reduzir os erros devido às incertezas dos parâmetros aplicados aos modelos, SOARES *et al.* (2003) emprega um algoritmo genético para pré determiná-los. Em seguida, desenvolve o MFP convencional (Bartlett ou correlação) em um processo de banda larga. Deve-se ressaltar que para que se possa aplicar MFP, é necessário que haja uma SNR boa, normalmente acima de 20 dB, de modo a garantir a definição correta da

frequência e do padrão do sinal (KUPERMAN *et al.*, 2001; XU *et al.*, 2006; ARAVINDAN *et al.*, 1993; FIALKOWSKI *et al.*, 2000).

Essa abordagem modifica a interpretação do MFP, transformando-o em um problema de otimização. Segundo a literatura, ele passa então a ser denominado focalização, e sendo considerado, por muitos autores, como um método que obtém uma solução artificial, para todos os parâmetros envolvidos na propagação, e que não representa o cenário real. Na prática, a focalização é aplicada principalmente para determinar os parâmetros geoacústicos, em um ambiente em que os dados da fonte são controlados, como forma de onda e posição. Em suma, a focalização pode ser definida como a expansão do espaço distância e profundidade da fonte para parâmetros ambientais e do array (THODE *et al.*, 2007; FIALKOWSKI *et al.*, 2003; COLLINS *et al.*, 1992; SOARES *et al.*, 1997). Em geral, há duas linhas de ação para o problema de focalização acústica: algoritmos genéticos (GA) e “Simulated Annealing” (SA). Na verdade, é uma forma de se tentar reduzir a influência de diversos fatores que deterioram o desempenho do MFP:

- Adequabilidade do modelo de propagação gerador das réplicas de sinal ao ambiente real;
- Dependência do perfil de propagação com a distância; e
- Determinação a priori dos parâmetros acústicos do ambiente, como velocidade de propagação do som no fundo e no sedimento, e as profundidades de cada camada, por exemplo.

Assim, com o intuito de minimizar os erros devidos às incertezas do ambiente, observa-se na literatura, a implementação de algoritmos associados ao MF de modo a se determinar a localização da fonte e também valores dos parâmetros acústicos. Basicamente, pode se fazer uma distinção entre parâmetros da fonte (distância e profundidade), parâmetros geoacústicos (velocidade de propagação, atenuação e profundidade da camada de sedimento e do fundo) e parâmetros do receptor (profundidade do último sensor, no caso de um array vertical). A complexidade do problema aumenta, e seu custo computacional também. A cada variável incluída no processo, agrega-se mais uma dimensão ao mesmo. Portanto, o problema original de localização de fonte sonora que possui 2 dimensões (profundidade e distância da fonte), passa a ter, no mínimo 5, devido à inclusão dos parâmetros geoacústicos (densidade da

água e do sedimento, profundidade do guia de onda, velocidade de propagação na água e no sedimento etc).

Em geral, o primeiro passo é estimar uma condição inicial do modelo, assumindo valores fixos para todas as variáveis, e depois, considerar uma faixa de variação para os mesmos. A obtenção da localização da fonte é realizada por algum método numérico para localização do ponto ótimo. No entanto, devido ao número elevado de estimativas, é possível que este caia em algum mínimo local, distante do valor correto.

Com o propósito de reduzir o custo computacional e o erro por ambigüidade da solução, GERSTOFT (1994 e 1995) e GINGRAS e GERSTOFT (1995) optou por incluir algoritmos genéticos para selecionar, dentro da faixa estimada de valores dos parâmetros, os melhores “candidatos” à melhor solução de campo casado.

Segundo Gerstoft, a inversão de campos sonoros para a determinação de parâmetros do ambiente pode ser separada em quatro fases: discretização do ambiente e dos dados; modelagem adequada da propagação; procedimentos eficientes de otimização e análise de incerteza. A primeira fase se refere ao modo de coletar e discretizar o campo sonoro mantendo a informação física necessária à inversão, e determinar que parâmetros serão passíveis de inversão. Este item leva a um conjunto de parâmetros ambientais conhecidos, e aos limites das faixas de variação dos mesmos. Com base nos parâmetros estabelecidos, a segunda fase consiste em calcular um campo casado. Através de um processo iterativo, a terceira fase, é responsável por “casar” os dados calculados e os observados (experimentais), variando os parâmetros até obter a solução ótima. A partir dos melhores modelos obtidos, é possível gerar estimativas dos parâmetros e seus respectivos desvios padrão (quarta fase).

Gerstoft apresenta um método para obter somente os parâmetros geoacústicos, e considera que o problema de inversão não-linear pode ser descrito como um problema de otimização. Encontrar o vetor modelo \mathbf{m} que minimiza a expressão de desvio quadrático ϕ (função objetiva):

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{m}) &= \left\| \mathbf{d}_{obs} - r \mathbf{d}_{cal} \right\|^2 / \left\| \mathbf{d}_{obs} \right\|^2 \\ r &= \frac{\left\| \mathbf{d}_{obs} \right\|}{\left\| \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}) \right\|} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Onde,

\mathbf{d}_{obs} : dado observado (com n observações); e

d_{cal} : dado calculado.

Minimizar a função objetivo é semelhante a maximizar a função ambigüidade em MFP baseado no coeficiente de correlação (processador Bartlett). Normalmente, em algoritmos genéticos, a função de ajuste do algoritmo é maximizada, mas na análise em questão, ela será minimizada. Os dados calculados podem ser de n_1 distâncias, n_2 profundidades e n_3 frequências, que podem gerar $n_1n_2n_3$ observações. Os dados calculados são obtidos utilizando-se o modelo de propagação escolhido com o vetor modelo de entrada.

Se a informação de fase é disponível e confiável, é melhor utilizar uma versão modificada do processador Bartlett como função objetiva:

$$\phi(m) = \sqrt{1 - \frac{\|d_{obs} * d_{cal}(m)\|^2}{\|d_{obs}\|^2 * \|d_{cal}\|^2}} \quad (3.38)$$

Deve-se ressaltar que a função objetivo possui muitas oscilações, o que indica a implementação de um método de otimização global, para diminuir a possibilidade da solução ser estabelecida em um ponto de mínimo local. Outra vantagem reside no fato de que otimização global requer o cálculo da função objetivo somente em alguns pontos arbitrários. A dificuldade reside no número de mínimos locais e nas dimensões do espaço de procura. Para uma função objetivo que oscila muito e que foi parcialmente amostrada, como é o caso em estudo, não se tem certeza de se obter um mínimo absoluto, principalmente em um ambiente com ruído. Por isso, deve-se incluir uma análise estatística das soluções.

O princípio básico de GA é simples: de todos os modelos de vetores, uma população inicial com q membros é selecionada. O ajuste de cada membro é calculado baseando-se na diferença entre o dado observado e o calculado. Então, através de passos evolutivos, a população inicial se desenvolve de modo a se ajustar mais aos dados observados. Um passo evolutivo consiste em selecionar a distribuição de pais da população inicial que tendem a prover indivíduos que mais se ajustem. Os pais são combinados em pares, e operadores são aplicados a eles para formarem os filhos. Os operadores são, normalmente, o “crossover” e a mutação. Finalmente, os filhos substituem os pais como parte da distribuição inicial para se obter uma população mais

ajustada. A cada geração, os pais podem ser substituídos totalmente ou parcialmente. GA processa simultaneamente vários vetores modelos durante as iterações.

De acordo com GERSTOFT *et al.* (1995), o ambiente sismoacústico é discretizado em M parâmetros ambientais contidos em um vetor modelo \mathbf{m} . Cada um desses parâmetros pode receber 2^{n_j} valores discretos conforme uma determinada distribuição de probabilidade retangular, onde n_j é o número de bits. A distribuição a priori de cada parâmetro é definida pelo usuário, podendo ser gaussiana ou outra qualquer. O parâmetro discretizado pode ser definido por:

$$\begin{aligned}\theta_{j,i_j} &= \theta_j^{\min} + \Delta\theta_j i_j \\ i_j &= 0, \dots, 2^{n_j} - 1 \\ \Delta\theta_j &= (\theta_j^{\max} - \theta_j^{\min}) / (2^{n_j} - 1)\end{aligned}\tag{3.39}$$

GINGRAS *et al.* (1995) aplicam algoritmos genéticos associados ao MFP para estimar os parâmetros geoacústicos e os geométricos para melhorar o desempenho na localização e no acompanhamento de fonte sonora (a 5,6 km distante) em uma frequência (170 Hz, com banda de 20 Hz), utilizando um array vertical de 48 elementos em área predominantemente argilosa com 130 m de profundidade. O modelo de propagação padrão é independente da distância, e possui camada de sedimento e de fundo. São estabelecidos 4 grupos de parâmetros a serem determinados:

- Geométrico: distância e profundidade da fonte, profundidade do array e batimetria;
- Sedimento: velocidade de propagação, espessura da camada e atenuação;
- Fundo: velocidade de propagação, espessura da camada e atenuação; e
- Velocidade de propagação na água.

Destaca-se que o número de variáveis a serem determinadas indica a dimensão do problema. Portanto, aplicam-se os valores médios dos parâmetros de fundo e sedimento (e uma faixa de estimativas para GA), e considera-se que o perfil de velocidade de propagação na água não se altera ao longo da distância em estudo.

O problema inverso é resolvido como um problema de otimização global, onde a função objetivo advém de um vetor de observações \mathbf{q} e um vetor de previsões $\mathbf{w}(\mathbf{m})$. O seguinte processador Bartlett foi usado:

$$P(m; w_j) = \frac{w^*(m) \hat{R}(w_j) w(m)}{\|w(m)\|^2} \quad (3.40)$$

Onde $\hat{R}(w_j)$ é a matriz espectro-cruzado formada pelos vetores de observação em uma única frequência w_j .

MECKLENBRÄUKER *et al.* (2000) desenvolvem processadores para sinais de banda estreita e de banda larga, com ou sem o conhecimento prévio do sinal da fonte sonora baseando-se na teoria Bayesiana. Isto é, a solução do problema de inversão é obtida a partir da distribuição da probabilidade *a posteriori* dos parâmetros desconhecidos. Esse tipo de formulação é mais conveniente para problemas de otimização global, quando se busca um conjunto de parâmetros desconhecidos, dentro de um espaço de busca amplo, mas conhecido. Podem ser associados às redes neurais ou a algoritmos genéticos. Essa abordagem é denominada focalização e é aplicada, principalmente, em problemas de MFP direcionados à determinação de parâmetros geoacústicos (DOSSO *et al.*, 2006). Este método também é utilizado para localização de fontes sonoras em ambientes “incertos”, isto é, onde não se tem certeza dos valores dos parâmetros acústicos, incluindo o perfil de velocidade. O aumento significativo de parâmetros desconhecidos, e conseqüentemente do volume computacional, torna a abordagem de busca global uma ótima saída. No entanto, a desvantagem deste método reside no fato de se poder encontrar uma solução para o conjunto de parâmetros que não represente o ambiente real. Cada variável possui um espaço de busca, e a interseção de todos os espaços pode não ser exatamente o valor real dos parâmetros do ambiente (GILLARD *et al.*, 2003; FIALKOWSKI *et al.*, 2003). RENDAS e BIENVENU (1997) associam a teoria Bayesiana para melhorar a eficiência computacional das implementações com algoritmos genéticos.

Os processadores ou funções objetivas, como podem ser chamados no âmbito de problema de otimização, são determinados assumindo-se erros gaussianos e princípios de máxima verossimilhança. Portanto, possuem boas propriedades: são consistentes e eficientes. A tendência (“bias”) desaparece assintoticamente e a variância do estimador se aproxima de zero. As funções de verossimilhança (L) são relacionadas com as funções objetivas ($\phi(m)$) através da seguinte expressão:

$$L(m) = k \exp\left(\frac{-\phi(m)}{T}\right) \quad (3.41)$$

Onde k é um fator de normalização, T é um parâmetro de escala e m é o conjunto de parâmetros desconhecidos.

A densidade de probabilidade *a posteriori* σ é definida em função de L e $\rho(m)$ (densidade de probabilidade *a posteriori*):

$$\sigma(m) = L(m)\rho(m) \quad (3.42)$$

Os dados são modelados como:

$$\begin{aligned} q(\omega_l) &= q_l = p(m, \omega_l) + \text{erro} \\ p(m, \omega_l) &= w(m, \omega_l)S(\omega_l) \end{aligned} \quad (3.43)$$

A função de verossimilhança para banda larga (\mathcal{A}) é o produto das verossimilhanças de cada frequência. Da mesma forma, pode-se reescrevê-la como um somatório dos respectivos logaritmos, como ilustrado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Funções objetivas para MFP baseada na teoria Bayesiana.

Função Objetiva	
Banda Estreita	Banda Larga
$\ q - w(m)S\ ^2$	
$\ q\ ^2 + S ^2 \ w(m)\ ^2 - 2 S q^* w(m) $	$\phi_{l,3}(m) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\ q_{l,k}\ ^2 + S_l ^2 \ w_l(m)\ ^2 - 2 S_l q_{l,k}^* w_l(m) \right) \Rightarrow$ $- \sum_{l=1}^L \log \phi_{l,3}(m) + \text{const}$

$\ q\ ^2 - \frac{ q^* w(m) }{\ w(m)\ ^2} \Rightarrow \text{Bartlett}$	$\phi_l(m) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left\ q_{l,k} - \frac{w_l^*(m) q_{l,k}}{\ w(m)\ ^2} w_l(m) \right\ ^2 \Rightarrow$ $- NK \sum_{l=1}^L \log \phi_l(m) + \text{const}$
$\ q\ ^2 + S ^2 \ w(m)\ ^2 - 2 S q^* w(m) $	$\phi_{l,1}(m) = \ q_l\ ^2 + S_l ^2 \ w_l(m)\ ^2 - 2 S_l \left \sum_{n=1}^N q_{l,1,n} w_{l,n}(m) \right \Rightarrow$ $- \frac{N}{2} \sum_{l=1}^L \log \phi_{l,1}(m) - \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \log w_{l,n}(m) + \text{const}$
$\ q\ ^2 - \left(\frac{ q^* w(m) }{\ w(m)\ ^2} \right)^2$	$\phi_{l,4}(m) = \frac{ q_l^* w_l(m) }{\ w_l(m)\ ^2} \Rightarrow$ $- \frac{N}{2} \sum_{l=1}^L \log \phi_{l,4}(m) - \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \log w_{l,n}(m) + \text{const}$

Onde,

q_l : dado observado (pressão acústica complexa na frequência ω_l);

w_l : vetor de réplica (função de transferência da pressão acústica complexa na frequência ω_l);

S_l : sinal complexo da fonte na frequência ω_l).

Há outros processadores que foram testados na década de 90, mas cujo desempenho é bem limitado, e que foram praticamente descartados depois da análise de sua implementação junto aos dados experimentais. Dentre eles, podem ser citados:

- Processador de Auto-vetor: $P_{Av} = N_0 [F^+ \varepsilon_{inc} F]^{-1}$, sendo ε_{inc} a matriz de auto-vetores; e N_0 , menor auto-valor.
- Processador de Máxima Entropia ou Técnica de Markov ou Estimador Autoregressivo: $P_{ME} = [aa^*]^{-1} \Leftarrow a = F^+ C^{-1} u_j \Leftarrow u_j = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T$.
- Processador de Coeficiente de Verossimilhança Variável: $P_{CVV} = [F^+ C^{-\alpha} F]^{-1/\alpha}$.

De acordo com a literatura, foram destacados os seguintes processadores que serão avaliados com dados experimentais: processadores Phi (φ) e Teta (θ) (FRAZER *et al.*, 1990), SJ (SOARES *et al.*, 2002) e MP (PORTER *et al.*, 2008). Eles foram

escolhidos, por terem características distintas, como operação no tempo ou na frequência, e possibilidade de aplicação com um único hidrofone. Em geral, o método de campo casado tem tido desempenhos melhores com processadores implementados em frequência, para evitar a necessidade de “casamento” entre as fases do sinal gerado pelo modelo e o sinal recebido no hidrofone no tempo. Utiliza-se o espectro do sinal recebido. Os processadores φ e θ e β (FRAZER e PECHOLCS, 1990) são modificações de processadores desenvolvidos por CLAY em 198), sem a utilização do sinal da fonte. Empregam-se somente o sinal recebido em um único hidrofone e o sinal modelado, o que dispensa a necessidade do conhecimento da forma de onda gerada pela fonte. O processador apresentado por SOARES *et al.* (2002), *SJ*, é obtido através do cômputo do erro mínimo quadrático, considerando o sinal no tempo e a forma da onda da fonte sonora. O processador desenvolvido por PORTER *et al.* (2004), *MP*, detecta a envoltória do sinal da fonte e do sinal recebido e realiza a convolução cruzada dos mesmos. Este processamento tem por objetivo “disensibilizar” o método da informação de fase, que é influenciada por reflexões no fundo e superfície, utilizando o envelope do sinal modificado de modo a ter um grande pico de correlação. Com isso, o pico máximo representa o grau de correlação entre os sinais. Quando não se tem a forma do sinal da fonte é possível modelá-lo e empregar uma aproximação deste sinal nesses processadores, de modo a acrescentar mais informação. Além disso, PORTER *et al.* (2004) sugere que quando o sinal da fonte não é conhecido, deve-se optar pela implementação das envoltórias da auto-correlação dos sinais recebidos nos hidrofones com as dos sinais modelados.

$$\begin{aligned}
 r(t) &= s(t) * g(t) \\
 \varphi_n^m &= \left[\frac{\|R\|_m}{\|G\|_m} \right] / \|R/G\|_n \\
 \theta_n^m &= \left[\frac{R/G\|_m}{\|R/G\|_m} \right] / \|R/G\|_n \\
 SJ = \min(\text{erro}) &= \|r - s * g\|^2
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

$$MP = \max\left(\int r_{le}(t)h_{le}(\tau - t)d\tau\right);$$

$$r_{le}(t) = \{20 * \log[\text{env}(r(t))]\}; \text{recepção}$$

$$h_{le}(t) = \{20 * \log[\text{env}(g(t))]\}; \text{modelagem}$$

Onde:

R : sinal recebido na frequência;

G : campo de pressão gerado pelo modelo na frequência;

$s(t)$: sinal da fonte no tempo;

env : envelope do sinal.

O casamento dos sinais no domínio do tempo é muito dependente da habilidade dos modelos numéricos em prever a amplitude do sinal recebido e, principalmente, a sua fase. Para evitar a dependência da determinação exata da fase, têm-se utilizado a MFP incoerente. No trabalho de JESUS *et al.* (2000), enfatizam-se os tempos de chegada dos caminhos individuais, analisando apenas os pontos previstos corretamente. Deve-se ressaltar que para que se possa aplicar MFP, é necessário que haja uma SNR boa, normalmente acima de 20 dB, de modo a garantir a definição correta da frequência e do padrão do sinal (KUPERMAN *et al.*, 2001; XU *et al.*, 2006; ARAVINDAN *et al.*, 1993; THODE *et al.*, 2002).

3.2 Sensores - Desempenho de MFP em Arrays Verticais, Horizontais e Hidrofones Únicos

Os métodos clássicos de MFP usam “arrays” de hidrofones verticais e horizontais com aberturas significativas de modo a obter discriminação espacial suficiente para a localização de fonte sonora. Muitas vezes a escolha do processador e o modelo do “array” não são suficientes para eliminar os lobos laterais, ou seja, garantir uma solução única do problema. A maioria das aplicações iniciais, com dados experimentais, foram executadas usando “array” vertical, pois este amostra o campo acústico com a variação da profundidade, em escalas que correspondem aos números de onda verticais. Conseqüentemente, as técnicas de MFP aproveitam essa vantagem de coerência espacial do campo (BAXLEY *et al.*, 2000; DEBEVER *et al.*, 2007; SIDERIUS *et al.*, 2003). Entretanto, os “arrays” horizontais fornecem vantagens operacionais significativas nos termos da facilidade da distribuição e da mobilidade (para sistemas rebocados). Isso tem estimulado um interesse maior nessa geometria para inversão geoacústica. CAITI *et al.* (1996) e recentemente SIDERIUS *et al.* (2001) descreveram resultados das experiências com disposições horizontais rebocadas. KNOBLES *et al.* (2003), TOLLEFSEN *et al.* (2003) e NICOLAS *et al.* (2003) apresentaram resultados para inversões de parâmetros geoacústicos usando “array” horizontal no fundo e aplicando MFP aliado à teoria Bayesiana para redução de erros devido ao ruído ambiente. BARLEE *et al.* (2005) apresenta um “array” linear composto de três “braços”

(forma de “Y”) que demonstrou aplicabilidade para determinar o valor da atenuação no fundo e comprovar um modelo geoacústico para a região do experimento. SIDERIUS *et al.* (2001) apresentam uma comparação de desempenho entre o “array” vertical e o horizontal para aplicações de inversão geoacústica com resultados semelhantes. Contudo, há inúmeras vantagens, principalmente, para determinação de parâmetros geoacústicos com o auxílio de “arrays” horizontais rebocados (STTOTS *et al.*, 2006). Estes “arrays” são facilmente lançados de uma plataforma móvel; e essa mobilidade os torna mais indicados para a varredura de grandes áreas para determinação de propriedades do fundo. Além disso, se a metodologia a ser aplicada usa uma fonte rebocada e um “array” receptor também rebocado, e a distância entre os dois pode ser mantida bem reduzida, isto reduz a exigência de uma modelagem de propagação dependente da distância.

Com “arrays” verticais é possível obter uma discretização da profundidade que permite uma melhoria na resolução em profundidade, pois os diversos elementos amostram o campo sonoro, e dependendo do seu espaçamento, pode-se verificar as contribuições dos diversos modos de propagação. Para fontes sonoras muito próximas à superfície, pode tornar-se difícil a distinção entre o sinal direto para o receptor e aquele que se reflete na superfície, e só depois trafega até o receptor. Por isso, perde-se em resolução na profundidade na localização da fonte (banda estreita). Outro fator que influencia a sua aplicação, é a variação do espaçamento entre elementos durante o experimento que ocasiona um efeito de “blurring” da solução. Em geral, são utilizados “arrays” com separação de elementos inferior ao comprimento de onda envolvido, e com um número maior possível de elementos para reduzir os lobos laterais e aumentar a resolução do pico (ou mínimo) da função ambigüidade. No entanto, devido à dificuldade em mantê-los livres de flutuações, como os efeitos de correntes submarinas, por exemplo, tem-se observado uma tendência em reduzir o número de elementos dos “arrays”. Em geral, os chamados “short arrays” (arrays curtos) possuem 4 elementos distantes de 2 m entre si. Os resultados são animadores, apesar da redução da capacidade de discretização do ambiente, e, por conseguinte, perda de resolução, principalmente para frequências mais altas (SUPPAPOLA *et al.*, 2004; HEANEY *et al.*, 1998; CZENSAK *et al.*, 1997; DOSSO *et al.*, 2006; THODE *et al.*, 2006; JESUS *et al.*, 2000).

Inicialmente, a literatura científica indicava que os “arrays” verticais seriam sensíveis à distância e à profundidade, e os horizontais, à marcação. No entanto, os

experimentos realizados a partir da década de 90 têm demonstrado que para fontes em profundidades diferentes a do “array” horizontal, ambos tipos de “arrays” têm o mesmo desempenho em relação à distância. Além disso, o emprego de sinais de banda larga auxilia na redução ou até mesmo no cancelamento das ambigüidades. A discriminação da profundidade da fonte é resultado da habilidade de um “array” em amostrar os aspectos dependentes da profundidade do campo sonoro, como por exemplo, a funções modais $Z(z)$. A figura 3.5 ilustra a geometria do “array” horizontal em relação à fonte.

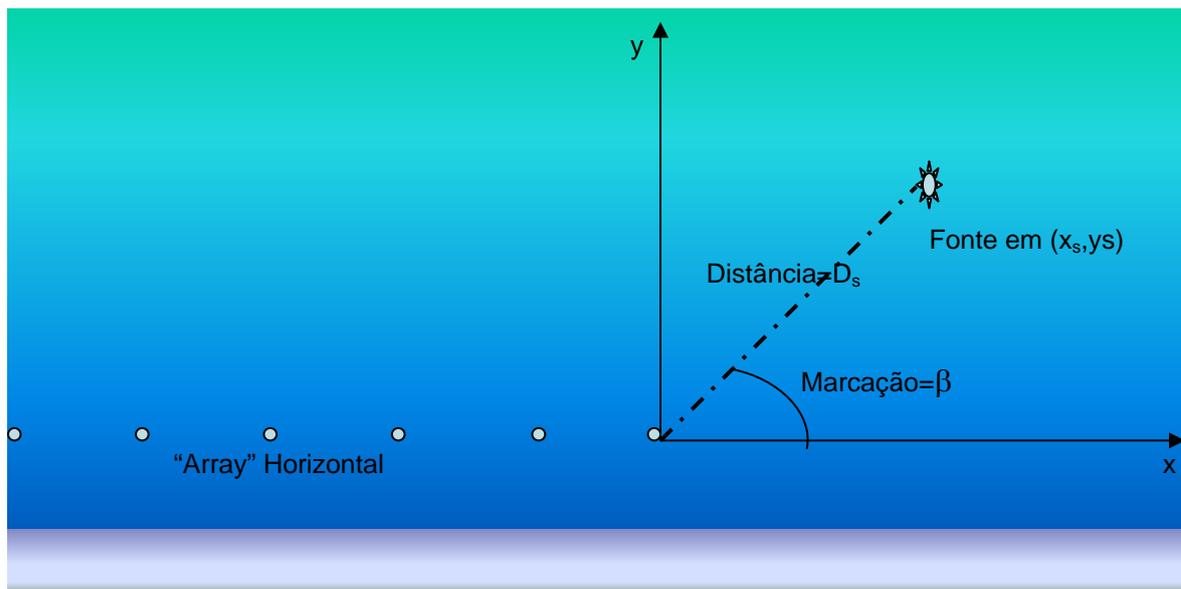


Figura 3.5 – Geometria do problema com “array” horizontal.

A aplicação de um único hidrofone compensa a falta de resolução espacial (abertura) com a utilização de um processamento para sinais de banda larga. O mesmo pode ser feito para reduzir as ambigüidades no “array” horizontal (TOLSTOY, 2000; LAPLANCHE, 2007), por exemplo. LE-GAC *et al.* (2003) e JESUS *et al.* (2000) utilizam os dados da campanha INTIMATE’96, para com um único hidrofone, determinar os parâmetros geoacústicos e a localização da fonte sonora, respectivamente. Quando o fundo absorve boa parte do sinal transmitido, não chega informação suficiente ao hidrofone.

3.3 Sinais de banda larga e de banda estreita

De acordo com TOLSTOY (1998), para sinais de banda estreita, nota-se que os campos acústicos e as figuras de ambigüidade variam em função da frequência e apresentam mais resolução para frequências superiores a 10 Hz. Quanto maior a frequência, maior a resolução. Porém, frequências mais altas requerem modelos de propagação mais acurados (MICHALOPOLOU *et al.*, 1996, 1998; LYNCH *et al.*, 1988; KNOBLES e MITCHELL, 1994).

MFP de banda larga pode ter duas abordagens distintas: incoerente e coerente. Segundo ORRIS *et al.* (2000) e YANG e SUN (2004), o mais correto deveria ser denominar MFP multi-frequência, pois, na verdade, não se usa uma banda contínua, e sim, um número limitado de frequências. Como exemplo, BOOTH *et al.* (1996) utilizam 10 tons entre 50 e 200 Hz no processador por correlação. Para ser incoerente, o campo acústico para uma determinada frequência deve ser descorrelacionado com o gerado para qualquer outra frequência da banda. Isto é, suas fases devem ser descorrelacionadas. Em geral, as figuras de ambigüidade definidas para cada frequência são somadas em dB, para reduzir a influência de pequenos lobos laterais ou fazer um pré-branqueamento espacial, que consiste em substituir C por $Q^{-1}CQ^{-1}$, onde Q é a matriz de ruído ambiente (de difícil definição). SOARES *et al.* (2002) consideram que um processador em um ambiente sem descasamento de dados, se utilizará de uma réplica de campo de pressão correto, bem próximo de outros campos candidatos. Assim, a discriminação depende do grau de complexidade do sinal recebido do campo acústico. Como exemplo, um único tom possui dois parâmetros discriminantes: a amplitude e a fase. Se um sinal banda larga é transmitido, têm-se tantas amplitudes e fases quanto frequências, e a complexidade do sinal recebido é naturalmente aumentada, proporcionando uma discriminação maior para o MFP.

O procedimento padrão para utilização do sinal banda larga é realizar o MFP para cada frequência da banda, e em seguida, somar as figuras de ambigüidade. Este procedimento reforça os picos reais, e proporciona o cancelamento ou redução de falsos picos. Não existe uma relação pré-definida entre o número de frequências necessárias e o número de elementos do “array”. A literatura apresenta inclusive o emprego do sinal de banda larga (com 20 frequências) e um único hidrofone. Isso permite que o usuário escolha as frequências a serem implementadas pelo modelo de propagação.

3.4 Influência dos parâmetros ambientais

A capacidade de um sistema baseado em MFP para localizar com sucesso uma fonte sonora é altamente dependente da exatidão do modelo das réplicas e dos dados inseridos. Muitos fatores podem ser responsáveis por degradar os resultados de MFP, quando aplicados no mundo real (SNELLEN *et al.*, 2001). Primeiramente, o modelo de propagação escolhido para calcular as réplicas pode não ser acurado o bastante para representar o campo real, incluindo efeitos de dependência com a distância e todas as interações com o fundo do oceano, como as conversões de ondas cisalhantes e a atenuação. O modelo de ruído pode não ser suficientemente realista, quando a SNR não é muito alta. Finalmente, a descrição do ambiente e o posicionamento do sensor podem não ser bem acuradas (ZAKARAUSKAS *et al.*, 1996). Desde 1985, esse tema tem sido objeto de diversas pesquisas a fim de se estudar a sensibilidade do MFP para definir erros e delimitar as influências de cada parâmetro, como perfil da velocidade do som, as inclinações do “array”, a profundidade da água, erros introduzidos pela superfície do mar, pelas ondas internas e pelos parâmetros geoacústicos (DOSSO, 2003; DOSSO e NIELSEN *et al.*, 2002; DOSSO *et al.*, 2001; RUBANO, 1980; RUTHERFORD e HAWKER, 1978). Por MFP tratar-se de um problema altamente não-linear, é praticamente impossível delimitar e quantificar a influência de cada parâmetro. Em geral, a literatura apresenta o comportamento do processador Bartlett para variações desses parâmetros em um determinado cenário, determinando as suas contribuições. Muitos trabalhos indicam que a interação com o fundo é significativa, e que o parâmetro mais sensível é a batimetria. Além disso, medir com precisão de metros a profundidade local é difícil, e o estado do mar interfere diretamente nesse valor.

Os resultados numéricos de simulação recentes que utilizam um modelo de propagação independente da distância mostraram que erros significativos podem ser introduzidos nas predições de localização, se a profundidade da água for estimada incorretamente. Essas informações são apresentadas no Anexo, com todos os dados e cenários que simulei utilizando o modelo de propagação KRAKEN (“Acoustic Toolbox”) e um programa que desenvolvi para MATLAB (Mathwork Inc., versão 7.0).

A título de ilustração, se a profundidade da água for superestimada, o processador superestima a distância da fonte, e subestima a sua profundidade. Se a profundidade for subestimada, o oposto ocorre e a fonte será localizada demasiado perto e demasiado profundo (KROLIK *et al.*, 1989). ZHANG *et al.* (2004) apresentam dados experimentais que confirmam a importância em se utilizar a aproximação adiabática

para esses casos. D'SPAIN *et al.* (1999), por exemplo, estimam que para um grande erro de profundidade local, ocasiona-se um erro na distância e na profundidade da fonte com um fator de 2.

O trabalho de HAMSON e HEITMEYER (1989) avalia o comportamento do processador Bartlett através de simulações e análise de dados experimentais para situações em que há erros de estimação de parâmetros geoacústicos e do próprio sistema de aquisição. A partir da teoria de modos, destaca-se que a obtenção de alta qualidade dos resultados é decorrente da existência de um número significativo de modos de propagação (>10), e do “array” vertical compreender a coluna d’água. Mudanças no ambiente acústico que reduzem o número efetivo de modos degradam o desempenho do MFP. Erros de descasamento entre características ambientais e do fundo não afetam os resultados significativamente. Contudo, pequenos descasamentos no perfil de velocidade de propagação e na profundidade da coluna d’água ocasionam erros que podem tornar a MFP inviável. Outra observação importante é o fato de que conforme a distância aumenta, o número de modos que contribuem efetivamente na propagação diminuem devido à atenuação, e portanto, há degradação dos resultados.

Considerando três grupos distintos de erros possíveis, podem-se resumir as influências de cada parâmetro de acordo com a tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Efeitos que contribuem para o desempenho do MFP.

Efeitos dos Parâmetros Ambientais	Efeitos dos parâmetros do Sistema	Efeitos de “Descasamento” entre Parâmetros Ambientais Reais e Assumidos
Profundidade da camada de água	Comprimento do “array”	Condições de Fundo
Frequência	Número de elementos do “array”	Perfil de velocidade
Fundo	“Tilt”	Profundidade da camada de água
Perfil de velocidade		

3.4.1 Efeitos dos Parâmetros do ambiente

- **Profundidade da camada de água** → ao reduzir a profundidade da camada de água, aumenta a área coberta por lóbulos laterais devido à componente em distância do campo de pressão. Essas ambigüidades podem ser explicadas considerando o termo da distância do somatório de correlação para a profundidade da fonte verdadeira em dois modos particulares:

$$\exp[i(\kappa_m r_s - \kappa_n r'_s)] + \exp[i(\kappa_n r_s - \kappa_m r'_s)] \quad (3.45)$$

Para um casamento perfeito, $r_s = r'_s$, esse termo é real e tem valores máximos em:

$$r_s = 2n\pi / (\kappa_m - \kappa_n) \quad (3.46)$$

Lembrando que a distância de interferência de modos é equivalente à equação acima para $n=1$, diz-se que a distância entre ambigüidades na profundidade da fonte é a distância de interferência de modos. Como as diferenças nos números de onda variam inversamente com a profundidade, conforme o número de modos que contribuem aumenta, esse efeitos se tornam menos significantes.

- **Frequência** → comparando o uso de duas frequências, sendo uma a metade da outra, pode-se dizer que, com a metade da frequência, metade dos modos ocorrem, e o número de lóbulos laterais aumenta. No entanto, as frequências mais baixas sofrem menos atenuação.
- **Fundo** → se fosse possível não haver perda provocada pelo fundo, efetivamente haveria um número maior de modos contribuindo na propagação, que reduziriam os lóbulos laterais e melhorariam a resolução do pico de correlação. A inclusão de uma camada de sedimento pode afetar os resultados se as suas propriedades são significativamente diferentes do subfundo. Um sedimento altamente absorvedor poderia afetar os resultados, pois atenuaria os modos de ordem superior.

- **Perfil de velocidade** → dependendo do perfil, os modos podem ficar aprisionados abaixo da termoclina, e por isso, a sua determinação correta é importante para evitar a degradação dos resultados. A obtenção do perfil não é difícil, e pode ser feita diversas vezes ao longo do experimento com o emprego dos equipamentos de instrumentação oceanográfica XBT, CTD etc.

3.4.2 Efeitos dos Parâmetros do Sistema

Para que o MFP explore todas as propriedades ortogonais dos modos normais, o VLA deve compreender toda profundidade e conter um número suficiente de hidrofones para amostrar em profundidade com a resolução de duas vezes a frequência espacial do modo de ordem mais alta. Um “array” mais curto não amostrará completamente a dependência dos modos de frequência baixa com a profundidade, pois estes possuem poucos ciclos. Um “array” longo, com poucos hidrofones, provê um comportamento oposto, onde os modos de baixa frequência serão bem amostrados, e os de alta, não o serão. Em geral, considera-se um espaçamento de $\lambda/2$, ideal para a conformação de feixe.

Outro aspecto do sistema a ser considerado, é o “tilt”. Isto é, o VLA não permanece exatamente na vertical, devido às correntes marinhas por exemplo, ocorre o “deslocamento” da posição esperada para os hidrofones. Os autores consideram que um erro de 1° é suficiente para inviabilizar ao MFP, e que deve ser acrescentado um fator de correção do “tilt” para compensar tal desvio (TRACEY *et al.*, 2000; WONG e ZOLTOWSKI, 1997).

3.4.3 Efeitos de “Descasamento” entre Parâmetros Ambientais Reais e Assumidos

- **Profundidade da camada de água** → um erro de 4% na estimativa de profundidade é suficiente para inviabilizar o MFP. É um parâmetro muito sensível, pois afeta os números de onda, número de modos e suas amplitudes. DEL BALZO *et al.* (1988) encontrou valores semelhantes em simulações, e LAPINSKI *et al.* (2003) compara os resultados do MFP ao considerar batimetria variável ao longo da região do experimento, reforçando a importância deste parâmetro.

- **Fundo** → considerações de erros de atenuação de 150% e 200 m/s na velocidade de propagação degradam a superfície de ambigüidade, mas não impedem que a fonte seja localizada corretamente. Essa informação é muito relevante, pois há grande dificuldade em se obter uma representação acurada do fundo.
- **Perfil de velocidade** → há degradação dos resultados do MFP caso seja utilizado um perfil de base de dados, pois o perfil muda ao longo do dia, mês, estação do ano, na presença de correntes, chuva etc.

3.5 Movimento do alvo

Em geral, os cálculos de MFP não consideram o movimento do alvo, o que pode ocasionar efeitos indesejáveis nos resultados processados. Tem-se, por exemplo, o efeito Doppler e o alargamento do espectro do sinal. Eles podem ser introduzidos na modelagem da réplica, como uma dependência no tempo e alterações na fase do sinal. Além disso, o ambiente marinho deixa de ser estacionário, acarretando em dificuldades na amostragem do sinal. Vários autores apresentam sugestões para suavizar os efeitos desse problema. A forma mais simples e usual, é abrir janelas de aquisição de sinal ao longo da trajetória do alvo e verificar os valores de distância estimados (ZURK *et al.*, 2003; ZALA e OZARD, 1992; DAUGHERTY e LYNCH, 1990; FIALKOWSKI *et al.*, 2001; CHOCEYRAS e KOPP, 1995; JEFERS *et al.*, 2000; ABAWI *et al.*, 2000). É importante a determinação da velocidade do alvo para que seja realizada a previsão de seu deslocamento. TOLSTOY (2000) considera que a fonte tem um deslocamento linear uniforme especificado por um ângulo θ e magnitude v , ilustrado na figura 3.6.

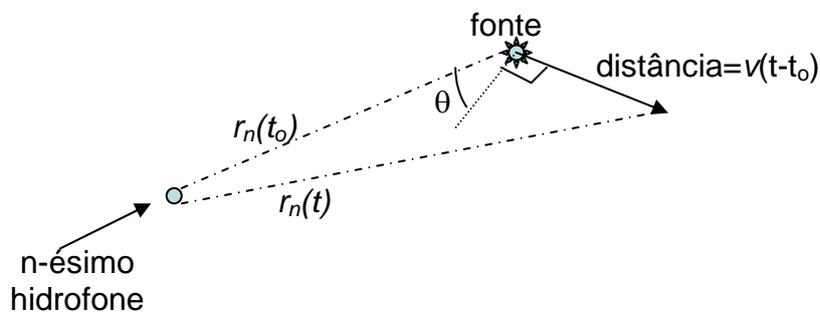


Figura 3.6 – Vista da configuração apresentada por TOLSTOY (1998).

Assim, utilizando a movimentação do alvo e a teoria de modos tem-se:

$$\begin{aligned}
 r_n(t) &= \sqrt{\{r_n^2(t_0) + v^2(t-t_0) + 2v(t-t_0)r_n(t_0)\sin(\theta)\}} \\
 p_n(t) &\approx A e^{i\omega t} \sum_{m=1}^M \frac{Z_m(z)Z_m(z_s)}{\sqrt{\kappa_m r_n(t_0)}} e^{i\kappa_m r_n(t)\beta_m(\theta)} \\
 \beta_m(\theta) &= 1 - \frac{v}{u_{gm}} \sin(\theta) + \dots \\
 A &= iQ\sqrt{2\pi} e^{-i\pi/4}
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

Onde,

Q : potência da fonte.

Os fatores $r_n(t)$ e $\beta_m(\theta)$, juntos, são responsáveis pela inclusão do efeito Doppler na modelagem para cada modo, e introduzem um “alargamento” espectral. A expressão de r_n pode ser expandida por uma série de Taylor. Para simplificar a análise, somente os dois primeiros termos de $r_n(t)$ são de grandeza significativa, e se considerar $v \ll u_{gm}$, $\beta_m(\theta) \approx 1$, resultando na eq. (3.48):

$$\begin{aligned}
 r_n(t) &\approx r_n(t_0) + v(t-t_0)\sin(\theta) \\
 p_n(t) &\approx A e^{i\omega t} \sum_{m=1}^M \frac{Z_m(z)Z_m(z_s)}{\sqrt{\kappa_m r_n(t_0)}} e^{i\kappa_m (r_n(t_0) + v(t-t_0)\sin(\theta))\beta_m(\theta)}
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Capítulo 4

Ruído

MEDWIN e CLAY (1998) definem “Sinal” como sendo uma mensagem que traz a informação desejada no receptor; e “Ruído”, é tudo que vem junto com a informação, mas não é desejado. Os tipos de sinais acústicos recebidos nos hidrofones podem ser impulsos, tons de CW (onda contínua) de pequena ou longa duração, com frequência fixa ou variável (LFM – “Linear Frequency Modulation”), mensagens codificadas (comunicação acústica submarina). No âmbito militar, os navios de superfície são dotados de sonares ativos, e os submarinos, de sonares passivos, como comentado no Capítulo 1. Uma plataforma de superfície gera “ruído” suficiente, para ser detectado pelo submarino, sua maior ameaça. Por outro lado, os submarinos são cada vez mais silenciosos, tornando-se necessário à sua detecção a emissão de um pulso/”ping” para que o sinal de retorno, o eco, destaque a sua localização. Por isso, há a necessidade de um sonar ativo. Já o submarino, deseja manter-se o mais incógnito possível, limitando seu próprio ruído, e mantendo-se em operação de escuta passiva. O submarino só emite um sinal (operação em modo ativo), quando não há outra possibilidade de se determinar a distância do alvo. Em geral, as emissões de um sonar ativo variam entre 180 e 230 dB.

Cada modo de operação tem as suas particularidades, mas todas são afetadas pelo ruído ambiente. No modo ativo, o sinal pode sofrer com a reverberação (de fundo, superfície e volume), resultante da energia espalhada pelo pulso emitido interagindo com as não-homogeneidades do meio e de seus contornos (BURDIC, 2003; ZIOMEK, 1995). Assim, a reverberação e o ruído ambiente são fatores altamente limitadores do desempenho do sonar. Para o sonar passivo, o ruído gerado pelo maquinário do alvo e pela cavitação gerada pelas pás de seu hélice são sinal, pois permitem a detecção do alvo, além de trazerem informações a respeito da classe a que o navio pertence, e outros dados da propagação acústica que possibilitam a sua localização.

ROSS (1976) apresenta os tipos básicos de ruído acústico submarino, podendo ser divididos da seguinte maneira:

- *Ruído Irrradiado*: ruído irradiado na água que pode ser usado por um sonar passivo para detectar a presença de um alvo a distâncias consideráveis. Pode ser originado pelas máquinas da plataforma ou pela cavitação gerada pelo hélice.
- *Ruído Ambiente*: todos os ruídos associados a um meio em que um sonar opera, e que existem no meio sem a plataforma sonar. JENSEN *et al* (1994) aborda o ruído ambiente sob o seu impacto na acústica submarina considerando-o como o campo acústico residente no oceano, e por isso, também é um diagnóstico do ambiente oceânico; e é a interferência na detecção ou em qualquer outro sinal de interesse a ser medido.
- *Ruído Próprio*: ruído associado à plataforma e seus equipamentos.
- *Ruído de Fundo do Sonar*: todo ruído na saída do “array” do sonar que limita a detecção de sinais por um processador de sinais.

Os níveis de fontes de ruído são comumente definidos como o valor rms (“root-mean-square”- valor médio quadrático) do nível de pressão do som em uma banda de 1 Hz (nível de espectro). A figura 4.1 ilustra as diversas fontes de ruído no ambiente marinho relacionando com estimativa de frequência e nível espectral da fonte (ETTER, 2003). A curva de Wenz (COATES, 2002), figura 4.2, apresenta a distribuição dos tipos de ruído, sua faixa de frequência e intensidade. A primeira faixa de ruído de baixas frequências é dominada pela atividade sísmica e fluxos turbulentos. Abaixo de algumas centenas de Hertz e acima dessa região, uma componente dominante do ruído ambiente é originário de navios e outras fontes criadas pelo homem. Nas frequências médias predominam os ruídos gerados pelo efeito do vento sobre a superfície das ondas. Para frequências muito altas, 100 kHz, o ruído dominante é o térmico, ocasionado pela agitação das moléculas de água no oceano. Essa curva auxilia na estimativa de ruído, principalmente em modelagens para detecção de sinais.

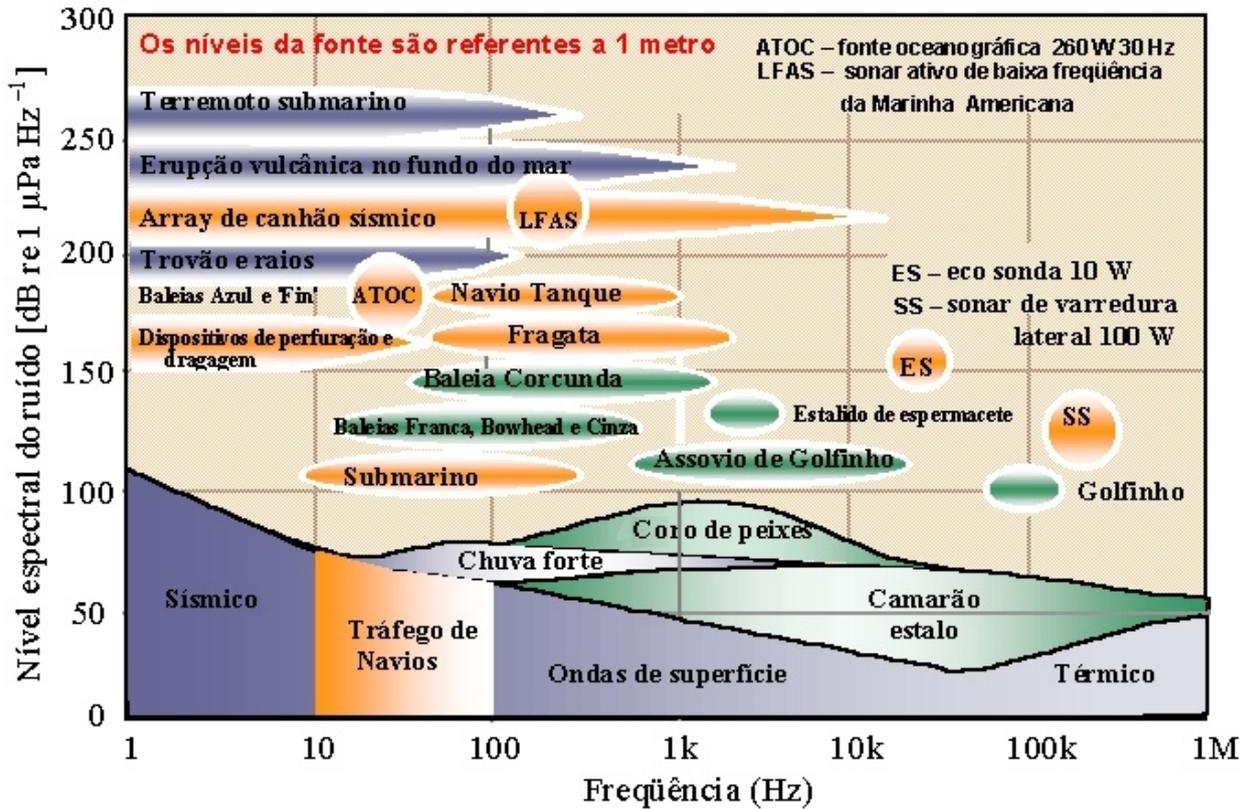


Figura 4.1 – Apresentação das fontes de ruído do ambiente marinho com a estimativa de nível da fonte e frequência. Figura traduzida de COATES (2002).

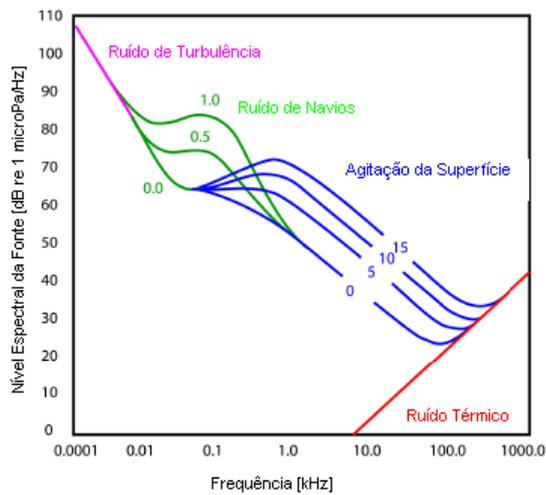


Figura 4.2 – Curva de Wenz. Retirada de COATES (2002).

O ruído irradiado por navios ou submarinos fazem parte de sua assinatura acústica BURDIC (1991). As principais fontes de ruído irradiado são:

- Sistema de propulsão;

- Propulsor (apesar de fazer parte do sistema de propulsão, é discutido à parte devido a sua contribuição significativa). É resultado da cavitação gerada pela rotação das pás do hélice;
- Máquinas auxiliares; e
- Efeitos hidrodinâmicos.

O espectro irradiado contém uma componente de banda larga contínua, e componentes de banda estreita conhecidas como tons ou linhas discretas. Dependendo de suas origens, as várias componentes espectrais podem ser funções da velocidade, profundidade ou outros fatores relacionados à operação da plataforma. O ruído de cavitação é a maior componente da assinatura acústica de navios de superfície. Quando a cavitação do hélice está presente, o propulsor modula a amplitude do ruído irradiado. Essa modulação é na taxa de rotação das pás do hélice e essa é uma boa indicação da classificação do alvo. É um ruído de banda larga, com frequências de 5 Hz a 100 kHz (ROSS, 1976). Em adição ao ruído de cavitação, componentes tonais podem resultar de vibrações nas pás do hélice. O ruído do maquinário também apresenta tons.

Deve-se ressaltar que a assinatura acústica pode ser alterada pelas características de propagação no meio. No caso dos tons de banda estreita, a variação ao longo do tempo e as propriedades de multicaminhos do meio podem modificar a sua banda aparente e a própria amplitude relativa.

Portanto, a redução e o controle do ruído é um problema importante no desempenho de sistemas acústicos submersos. O som gerado por um propulsor é crítico na detecção acústica e, normalmente, está relacionado à sobrevivência de um navio em termos militares. É o principal componente limitador da eficiência militar de sistemas navais. Os submarinos são particularmente mais susceptíveis a essa limitação, pois os sons irradiados por eles podem revelar a sua presença ao inimigo. Além disso, eles dependem dos sinais acústicos para a comunicação e usam o equipamento sonar para detectar qualquer inimigo, cujas funções também são limitadas por ruído. Assim, pode-se dizer que para sistemas passivos de vigilância, o ruído é o grande inimigo de seu desempenho (ROSS, 1976; SEOL *et al.*, 2005; WAITE, 2001).

Os submarinos não são os únicos sistemas navais em que o ruído acústico submarino tem papel vital. Os sons irradiados por navios de superfície revelam a sua presença para os submarinos inimigos; e como o submarino, o ruído próprio limita a sua capacidade de detectar alvos. Em alguns casos, os sons irradiados por um navio de

superfície podem interferir no desempenho do sonar de outro navio. Outro exemplo de limitação por ruído próprio é o caso dos torpedos de busca acústica passiva (“passive acoustic homing torpedoes”), que utilizam os sons irradiados por navios e submarinos para localizar estes alvos. Finalmente, a eficiência de outros sistemas “silenciosos” como bóias, pode ser determinada pelo ruído ambiente de fundo (“background noise”).

Assim, reconhece-se que o ruído acústico submarino desenvolve um papel dominante na Guerra Acústica Submarina (GAS). Esforços consideráveis têm sido realizados para reduzir os ruídos e para desenvolver métodos que os explorem. A maior parte deste conhecimento é sigilosa, de cunho estratégico, e portanto, de difícil aquisição. No entanto, os fenômenos envolvidos são relacionados a tópicos da física e da mecânica, e que podem ser discutidos sem a divulgação de aspectos classificados de sistemas militares. Outros citam experimentos relacionados à II Guerra Mundial ou se detêm, obviamente, ao ruído de navios mercantes.

A emissão de ruídos é inevitável, pois não há como gerar um sistema que não vibre. Apesar dos níveis de potência irradiados por navios, submarinos e torpedos na água sejam relativamente baixos, isso não significa que o ruído acústico submarino seja desprezível. Fontes que emitem 1 watt de potência acústica podem ser detectadas a distâncias relativamente longas por sonares modernos. No ar, esta energia pouco se propagaria. Isto advém do fato da água ser muito menos compressível que o ar. Como é a compressibilidade de um meio que torna o som possível, a mesma energia mecânica gera mais energia sonora no ar que na água.

4.1 Fundamentos teóricos

Este trabalho focaliza o conhecimento do ruído irradiado pelo navio de superfície, principalmente, o ruído de cavitação. O termo cavitação refere-se à ruptura de um líquido ou de uma interface líquido-sólido causada pela redução da pressão estática local. Uma “ruptura” é a formação de uma bolha macroscópica ou visível. Os líquidos contêm muitos “vácuos” microscópicos ou sub-microscópicos que funcionam como um núcleo para a cavitação. Mas, só ocorre cavitação quando esses “vácuos” atingem um tamanho significativo. A cavitação se distingue da ebulição por ser causada pela redução da pressão estática local, e não, pelo aumento de temperatura.

A cavitação ocorre de diversas maneiras, podendo apresentar efeitos benéficos ou deletérios, ou produzindo luz (sono-luminescência). A cavitação controlada é utilizada pela indústria do ultra-som para limpeza e corte de determinados materiais,

como metais. Esse processo também é aplicado para acelerar reações químicas, e pode ser empregado na medicina para destruir células indesejáveis e na litotripsia. No entanto, o maior interesse na cavitação reside em tentar evitá-la. Afinal, a cavitação além de gerar ruído acústico, também ocasiona a deterioração por erosão de válvulas, dutos, turbinas e propulsores.

Na acústica submarina, a cavitação é a forma de ruído mais importante. Em veículos marítimos, a cavitação ocorre principalmente pelo propulsor. Submarinos e torpedos podem evitar a cavitação operando em águas mais profundas. Portanto, a cavitação é inevitável para o navio de superfície, sendo inclusive uma fonte de ruído para demais plataformas. A cavitação gerada pelo propulsor dos navios de superfície, normalmente, é dominante em um espectro que varia desde frequências sub-sônicas até ultra-sônicas (5 Hz a 100 kHz).

Outro aspecto importante refere-se à limitação imposta à saída dos transdutores. Uma causa da cavitação é a queda da pressão que ocorre no ciclo negativo de uma onda sonora. A título de exemplo, uma onda sonora em um líquido com um nível de pressão de 220 dB re 1 μ Pa tem um pico negativo acima de 1 atm. Esse nível de cavitação acústica é suficiente para limitar a saída de um transdutor, mas também pode ser benéfico em equipamentos de ultra-som. Uma segunda causa de queda de pressão é o fluxo de líquidos em sistemas hidráulicos, chamando-se cavitação hidráulica. Um terceiro tipo está associado ao movimento de “corpos” em um líquido, ou de forma equivalente, o movimento de líquidos sobre um corpo estacionário. Assim, as extremidades das pás do hélice do propulsor, usualmente, são a primeira parte de um veículo marítimo a cavitare. Assim, a cavitação do propulsor é a fonte de ruído submarino mais importante. Pode-se representar o efeito da cavitação como um conjunto de bolhas colapsando de forma randômica. O resultado final é uma fonte mudando o seu diâmetro – uma fonte sonora pulsátil. Como ela envolve mudança de volume, ela é, em geral, considerada como uma fonte de ruído monopolo. A figura 4.3 representa um espectro de cavitação idealizado.

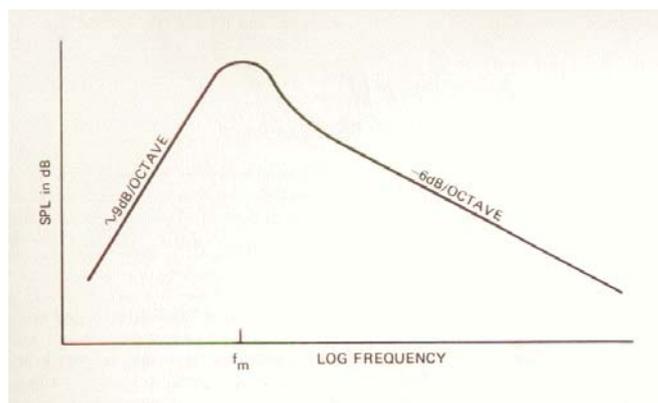


Figura 4.3 – Espectro de cavitação idealizado. SPL: “Sound Pressure Level” (nível de pressão sonora). Retirada de ROSS (1976).

4.2 Ruído de cavitação como fonte sonora para o MFP

Nos últimos anos, a literatura indica uma tendência em se utilizar fontes sonoras de banda larga controladas, com o intuito de se aproveitar a informação nas diversas frequências, possibilitando a redução do número de hidrofones para a recepção. Com isso, alguns autores (KOCH *et al.*, 2005; PARK *et al.*, 2005; BATTLE *et al.*, 2003; NICOLAS *et al.*, 2003; HARRISON e SIMONS, 2002) passaram a vislumbrar a utilização do ruído de cavitação do próprio navio de pesquisa como fonte sonora para realizar o MFP para determinar os parâmetros geoacústicos do ambiente de águas rasas, tentando reduzir os custos dos experimentos. Há desenvolvimentos teóricos e apresentações experimentais.

O problema inicial dessa aplicação reside no fato do ruído irradiado não ser uma fonte sonora controlada, e de espectro conhecido. Assim, o processamento dos sinais deve ser independente da determinação do espectro específico. Isso já limita o número de processadores de MFP que podem ser implementados no problema. Outra questão relevante para o sucesso do MFP é a seleção da banda de frequência para ser analisada e a qualidade do sinal recebido, como SNR alta. O movimento do próprio navio também pode dificultar a aquisição dos sinais.

KOCH *et al.* (2005) utiliza um array (52 elementos) colocado no fundo do oceano em águas rasas, e o navio se desloca inúmeras vezes por cima dele. O MFP é realizado com 10 frequências da banda de 120 a 200 Hz, para suprimir as influências sísmicas existentes na região do experimento. Os resultados foram considerados similares aos obtidos com fontes sonoras conhecidas, porém foi observado que a

utilização de múltiplos sinais ao longo de trechos de deslocamento, ao invés de amostras instantâneas de sinais, traz resultados de menor variação estatística. As estimativas mais robustas foram consideradas de perfil de velocidade de propagação e espessura da primeira camada de sedimento. Os autores esperam que experimentos a distâncias mais curtas (< 4 km) permitam a avaliação de camadas mais profundas. Numa configuração semelhante, Nicolas et al (2003) apresentam resultados de simulações, que mostram a viabilidade da sua aplicação.

BATTLE *et al.* (2003) utilizam um array horizontal rebocado pelo próprio navio. Assim, fonte e receptor se deslocam em conjunto. A propagação acústica analisada é de campo próximo, devido à distância entre esses dois componentes. Desde a II Guerra Mundial, considera-se uma grande distância para que não haja interferência nos sinais adquiridos. Em geoacústica, o próprio array mede centenas de metros. Nesse trabalho, determina-se a velocidade de propagação do som no sedimento, considerando-se que o fundo é um subespaço. Os resultados obtidos foram encorajadores, inclusive pela baixa SNR, mas houve a necessidade de se incluir a distância entre a fonte e os receptores do array como um parâmetro a ser determinado pelo algoritmo de otimização.

Outro aspecto importante reside no fato desse sinal vir misturado a outro. Isto é, pode acontecer de se gravar o ruído de navios distintos, em marcações diferentes, mas que venham juntos. Nesse caso, é necessário, antes de se efetuar o MFP, fazer a separação dos sinais. Uma das técnicas possíveis é a decomposição de Componentes Independentes (LI e SEJNOWSKI, 1995). Eles utilizam ICA para localizar fontes sonoras através de um array de sensores. Na verdade, a técnica permite a determinação da direção. Atualmente, há técnicas de ICA que podem ser aplicadas para detecção, localização e acompanhamento do alvo simultaneamente (TORKKOLA, 1996).

CAUWENBERGHS *et al.* (2002) desenvolvem uma técnica de localização cega do alvo utilizando expansão dos sinais instantâneos em séries temporais. Esta abordagem evita o problema de sinais misturados, usando as derivadas espaciais. Pode ser também considerada como ICA, pois a emprega para obter o ângulo de onde provêm as ondas e depois faz procedimentos complementares. Em suma, propõe-se a separação de misturas de sinais instantâneos relacionados a fontes sonoras usando uma sucessão de derivadas temporais de ordem superior. Assim, com dados disponibilizados pelo Instituto de Pesquisa da Marinha e gravados a bordo de um Submarino pelo seu equipamento “sonar de proa”, foram realizados testes com a referida técnica e

publicados no *7th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, ISDA 07 (MOURA *et al.*, 2007), demonstrando a sua aplicabilidade e eficiência para o referido problema.

4.3 Modelagem

Cada plataforma tem o seu próprio espectro de ruído de cavitação, dependente da velocidade de rotação das pás do hélice (ou mais de um hélice), do seu comprimento e do seu deslocamento. Os conceitos de hidrodinâmica do propulsor são fundamentais para determinar as contribuições. A figura 4.4 ilustra um propulsor cavitando e a figura 4.5, a relação entre cavitação, profundidade e velocidade. Nota-se que o submarino, em condições normais de operação, mergulhado e com velocidade inferior a 25 nós, não cavita.

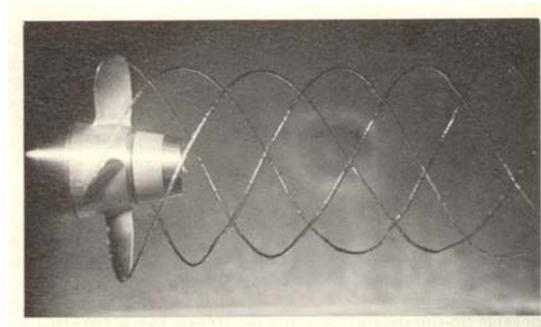


Figura 4.4 – Exemplo de cavitação de propulsor. Retirado de ROSS (1976).

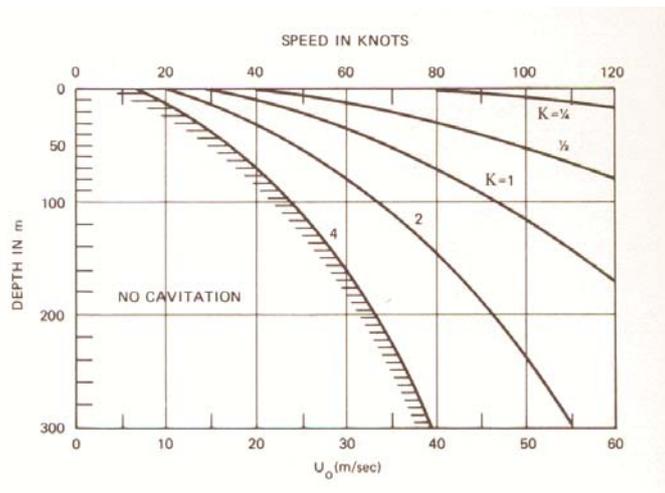


Figura 4.5 – Relação entre cavitação, profundidade e velocidade. Retirado de ROSS (1976).

As figuras 4.6 e 4.7 ilustram os espectros de cavitação de um submarino e o de um navio de superfície. Há uma diferença de comportamento dos espectros para baixa

frequência (até 400 Hz) e para alta frequência (> 400 Hz): usualmente, o espectro de baixa frequência é dominado por tons em harmônicos da frequência de rotação, sendo a taxa das pás, os harmônicos mais intensos. WALES e HEITMEYER (2002) e SEOL *et al.* (2005) apresentam divisões do espectro semelhantes. Destaca-se também que o espectro de baixa frequência possui componentes não-lineares, de difícil predição. Possivelmente, isso decorre das flutuações dos volumes de cavitação, representados por uma grande bolha, às interações das bolhas com o próprio casco e outras variações hidrodinâmicas. Por outro lado, o ruído de alta frequência é gerado pelo colapso da bolha ou por uma onda de choque.

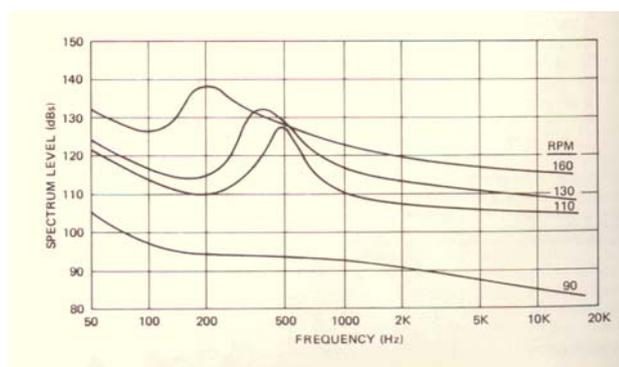


Figura 4.6 – Espectros do ruído de cavitação para submarinos. Retirado de ROSS (1976).

Em geral, os propulsores de navios operam entre 60 e 350 rpm, e possuem de 3 a 6 pás. As frequências de repetição fundamentais estão compreendidas entre 1 e 18 Hz. As componentes mais fortes são harmônicos entre 10 e 70 Hz. Essa irradiação direta de tons ocorre nas mesmas frequências como uma modulação do meio de cavitação. Considerando o volume total de bolhas de cavitação em uma pá, atuando como um único volume, então, as flutuações desse volume causadas pela operação em diversos ângulos de ataque podem ser abordadas como uma fonte sonora monopolo irradiando, como uma bolha pulsátil. O colapso de bolhas individuais produz um espectro contínuo de 50 ou 100 Hz até mais de 50 kHz, como também os pulsos do volume agregado cavitante irradiam fortes tons abaixo de 70 Hz. É importante ressaltar que esses dados são oriundos de pesquisas logo após a II Guerra Mundial (ROSS, 1976), e são considerados até hoje como válidos devido à escassez de publicações não sigilosas sobre o assunto.

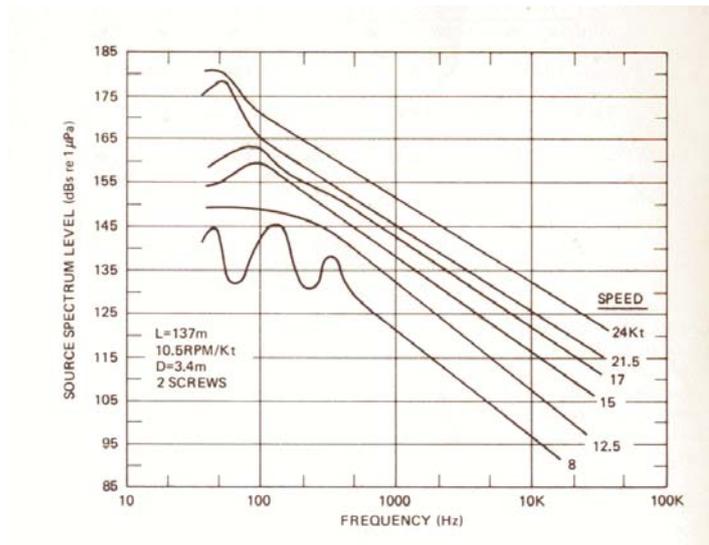


Figura 4.7 – Espectros do ruído de cavitação para navios mercantes. Retirado de ROSS (1976).

ROSS (1976) descreve o espectro de ruído de cavitação como um espectro base, S_0 , acrescido de outras parcelas dependentes da velocidade de rotação das pás e do deslocamento do navio, considerando frequências acima de 100 Hz e navios de comprimento superior a 100 m. A fonte é um monopolo na superfície do mar, cuja propagação é determinada por espalhamento esférico em um meio homogêneo.

$$S(f) = S_0 + 20 - 20 \log f \quad (4.1)$$

$$S_0 = 175 + 60 \log \frac{U_t}{25} + 10 \log \frac{B}{4}$$

Onde:

U_t : velocidade de rotação do hélice em m/s;

B : Número de pás do hélice;

f : frequência.

De acordo com WALES e HEITMEYER (2002), a fonte se localiza entre os pontos 15% abaixo do topo do arco feito pelas pás do hélice e o topo máximo. Isso em geral, proporciona uma fonte a uma profundidade entre 6 e 7 m, distribuída linearmente na vertical, para um navio mercante. Ou seja, o volume de cavitação pode variar de uma pequena região próxima do topo do hélice até o próprio topo. Uma análise rigorosa sobre esse aspecto exige o conhecimento da propagação do som no local que prescinde a determinação do formato, da localização do casco e das pás do hélice, o raio e a

distribuição das bolhas e a interação com a superfície do mar. Isto é, uma análise altamente não-linear, oriunda de fontes hidrodinâmicas e mecânicas.

WALES e HEITMEYER (2002) modelam a fonte de ruído de cavitação como uma fonte distribuída ao invés de pontual, monopolo, ao longo do diâmetro do hélice, seguindo uma distribuição gaussiana com desvio padrão igual a um quarto do diâmetro do propulsor. Essa dedução advém da análise de um banco de dados de ruído de cavitação coletados de 272 navios mercantes no Mar Mediterrâneo e ao leste do oceano Atlântico (em águas profundas), ao longo de 7 anos (1986 a 1992). Os sinais foram adquiridos por duas sonobóias a 300 m de profundidade, em cada bordo do navio, no ponto de máxima aproximação (aproximadamente 360 m), durante 10 minutos, e constitui a maior base dados de ruído de navios mercantes já divulgada na literatura. Seus resultados demonstram que os espectros não são bem reproduzidos por uma relação de potência, como Ross sugere. Esse modelo superestima a variabilidade de um conjunto de espectros. Assim, eles propõem um espectro modificado racional (eq. 4.2) para a banda de 30 a 1200 Hz.

$$\bar{S}(f) = 230 - 10 \log(f^{3.594}) + 10 \log\left(1 + \left(\frac{f}{340}\right)^2\right)^{0.917} \quad (4.2)$$

Nesse artigo, a aplicação dos dois métodos à base de dados citados anteriormente gerou os resultados apresentados na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Resultados de erro rms dos espectros do ruído de cavitação da base de dados utilizada por WALES e HEITMEYER (2002) e retirado desta publicação.

Modelo	Erro RMS (%) do espectro	
	30-400 Hz	400 – 1200 Hz
Ross (1976)	9,38	8,54
Wales et al (2002)	4,41	3,14

A apresentação dessas duas formulações tem o intuito de aplicá-las na avaliação experimental do MFP com e sem a modelagem da fonte de ruído de cavitação, e comparar os resultados. Apesar das formulações terem sido geradas a partir de dados de navios mercantes ou navios de guerra da II Guerra Mundial, é interessante avaliar o seu desempenho para posteriormente implementá-los em navios de guerra.

Capítulo 5

Avaliação experimental

Neste capítulo são apresentados 3 conjuntos de experimentos para localização de fonte sonora em águas rasas. O objetivo dos experimentos é avaliar a viabilidade da implementação do MFP com o ruído de cavitação como fonte, a contribuição do conhecimento da forma de onda da fonte e do perfil de velocidade de propagação do som.

5.1 Fonte conhecida e estática

A primeira análise experimental para avaliação do comportamento e do desempenho dos processadores de MFP foi realizada utilizando-se os dados do experimento INTIMATE'96 (“INternal Tide Investigation by Means of Acoustic Tomography Experiment”), disponibilizados pela Universidade do Algarve, a partir da internet <ftp://ftp.ualg.pt/users/siplab/intimate96/>. A realização de um experimento controlado implica em custos elevadíssimos, devido à necessidade de embarcação e equipamentos de instrumentação oceanográfica, por exemplo. Tal experimento foi fruto dos interesses em se comprovar a eficiência e as possibilidades de aplicação das técnicas de MFP na década de 90, principalmente, em relação à tomografia acústica em águas rasas, e até hoje, seus dados são utilizados (HURSKY *et al.*, 2004). Devido à necessidade de se avaliar a influência das ondas internas na modelagem da propagação, e possivelmente determinar a sua contribuição no “descasamento” dos espectros dos sinais, assim, foi criado um projeto entre algumas instituições renomadas em acústica submarina: o Serviço Hidrográfico e Oceanográfico da Marinha francesa (SHOM), o Instituto Hidrográfico de Portugal (IH), a Universidade do Algarve (UAL) e o New Jersey Institute of Technology (NJIT). O primeiro experimento exploratório foi realizado em junho de 1996 na costa de Portugal, e foi o primeiro experimento em acústica submarina desenvolvido em Portugal. O objetivo do experimento foi estudar os problemas inversos para a estrutura do oceano e para a localização de fontes sonoras.

A descrição completa do experimento encontra-se em PORTER *et al.* (2000) e nos relatórios “carvoeiro1” e “carvoeiro2” disponíveis no site citado. A figura 5.1 ilustra

a disposição experimental. Ressalta-se a importância dos equipamentos de apoio, inclusive os de natureza mecânica, para eliminar ou minimizar a flutuação e os efeitos de correntes submarinas na aquisição dos sinais. Há uma fonte de banda larga rebocada e um “array” vertical de 4 elementos. Foram coletados dados durante cinco dias, incluindo “pernadas” em que o navio que rebocava a fonte estava em movimento ou parado em uma estação. Houve pesquisas intensas dos dados ambientais utilizando XBT (“Expendable Bathythermograph”), CTD (“Conductivity, Temperature and Depth”) e ADCP (“Acoustic Doppler Current Profiler”), além da determinação da batimetria e dos parâmetros geoacústicos.

O experimento consistiu da aquisição de transmissões acústicas entre a fonte rebocada e o “array” com hidrofones posicionados a 35, 70, 105 e 115 m, com uma taxa de amostragem de 1 kHz. A distância horizontal entre fonte e “array” era de 5500 m. Próximo ao “array” também foi colocado um ADCP. Os sinais recebidos nos hidrofones eram transmitidos e processados a bordo do navio hidrográfico português NRP “ANDRÔMEDA” para análise em tempo real. O sinal emitido era uma onda “chirp” de 300 a 800 Hz, de 2 segundos de duração, emitida a cada 8 segundos (figura 5.2). Trata-se de uma fonte LFM (“Linear Frequency Modulation”), porém são “varridas” somente 15 frequências distintas cujo espectro é ponderado e ilustrado na figura 5.3. Isso dificulta a sua modelagem, para inclusão nos processadores de MFP. Para realizar o MFP, é necessário realizar a síntese de Fourier para compor o espectro do sinal modelado (réplica). O modelo de propagação KRAKEN gera uma matriz com o valor de pressão complexa para cada coordenada de distância e profundidade a ser determinada de acordo com a frequência estabelecida. Como a banda de frequência é de 500 Hz e empregou-se um passo de 0,5 Hz, são gerados 1000 arquivos, de onde são extraídos os valores do campo de pressão para uma determinada profundidade, ao longo da distância de interesse. Em seguida, é necessário gerar o espectro de frequência simétrico e conjugado, prosseguindo com a síntese de Fourier.

As figuras 5.4 a 5.6 ilustram o espectro da fonte sonora, o espectro modelado pelo KRAKEN e o modulado por esta fonte. O espectro da fonte é muito diferente do modelado, e atua como um modulador desse sinal. É importante ressaltar que os sinais e os espectros são normalizados.

A figura 5.7 mostra os perfis de velocidade de propagação obtidos durante os dias do experimento. O fundo é plano e arenoso, com velocidade compressional de 1700 m/s e atenuação de 0,9 dB/comprimento de onda. Trata-se de uma região cujos

parâmetros de fundo e de perfil de velocidade de propagação não variam com a distância.

Os resultados apresentados em PORTER *et al.* (2000) mostram que o efeito da oscilação da superfície do mar ocasiona uma flutuação periódica da posição da fonte ao longo do tempo, ± 100 m da posição real, com uma faixa de busca de 5000 a 10000 m.

Foram disponibilizados 15 minutos de gravações de sinais propagados até três receptores nas posições 1, 3 e 4 (correspondendo a 35, 105 e 115 m), com navio parado. Em virtude dos comprimentos de onda do sinal da fonte variarem entre 1,8 m e 5 m e sua localização ser a 5500 m, optou-se por gerar “espectros” do sinal modelado pelo KRAKEN, variando a distância entre 4000 e 10000 m com passo de 0,5 m. Neste caso, trabalhou-se com o sinal médio a cada minuto e foram geradas 15 estimativas de distância para cada hidrofone. A qualidade dos sinais em cada hidrofone é bem diferente, podendo-se afirmar que o hidrofone 4 possui melhor SNR que os demais.

A tabela 5.1 apresenta os valores de acurácia e de desvio padrão obtidos por cada processador, com a fonte chirp modelada (300 a 800Hz) a 5500 m de distância do “array” vertical, com 3 elementos (recepção). Os resultados são semelhantes aos de PORTER *et al.* (2000) e JESUS *et al.* (1998, 2000), e por isso, indicam que os processadores Teta, Phi, SJ e MP podem ser aplicados nos experimentos com o ruído de cavitação como fonte.

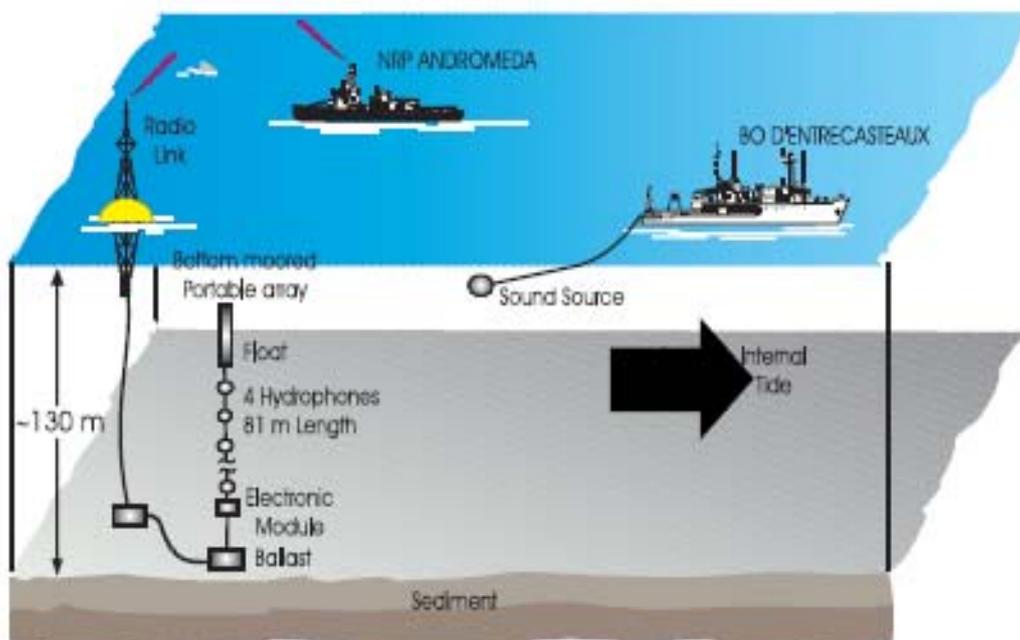


Figura 5.1 – Representação 3-D da montagem do experimento INTIMATE'96.

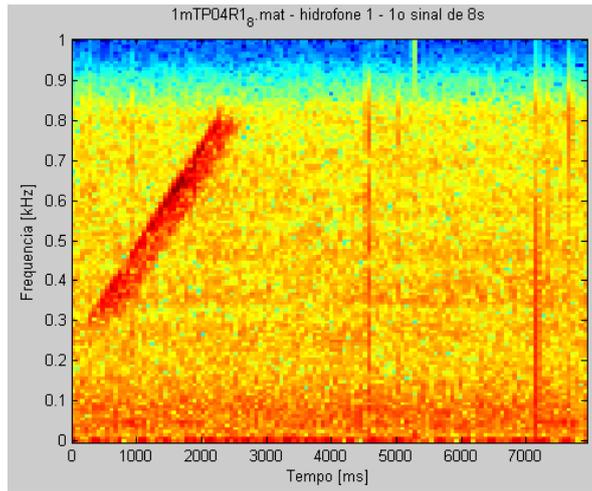


Figura 5.2 – Espectrograma do sinal recebido no hidrofone 1 nos primeiros 8s de gravação.

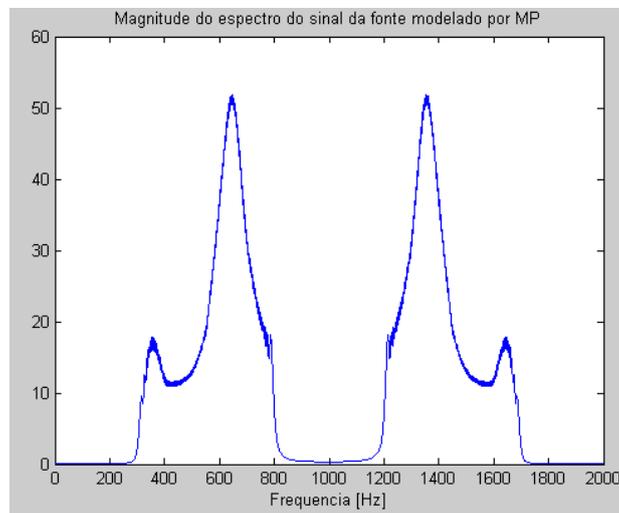


Figura 5.3 – Magnitude do espectro do sinal da fonte.

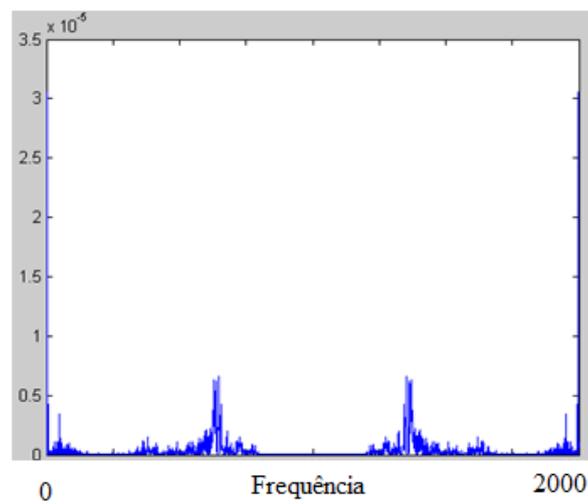


Figura 5.4 – Espectro de potência do sinal recebido no hidrofone 1 nos primeiros 4s de gravação.

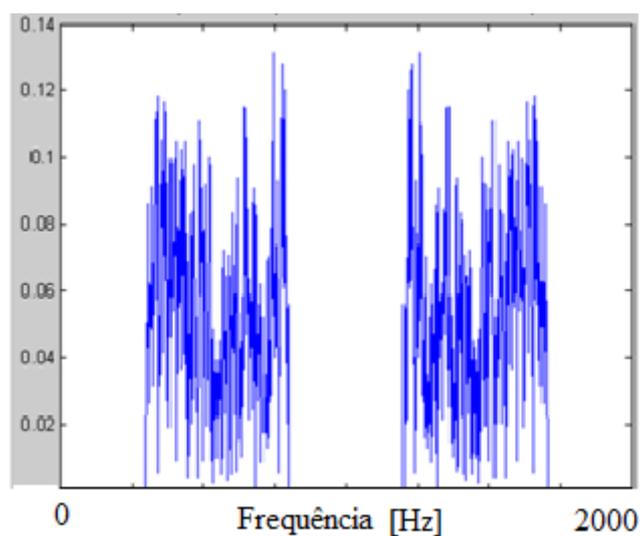


Figura 5.5 – Espectro da réplica. A primeira metade é gerada pelo modelo KRAKEN, e em seguida, é feito o “rebatimento” para que se possa recuperar o sinal no tempo. Magnitude versus número de pontos.

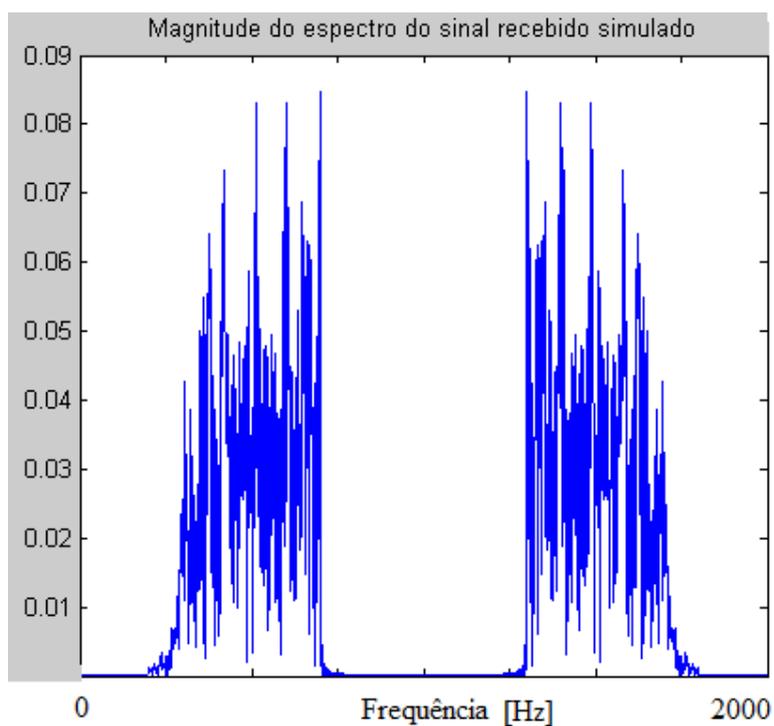


Figura 5.6 – Magnitude do espectro da réplica com a inclusão da informação do espectro da fonte.

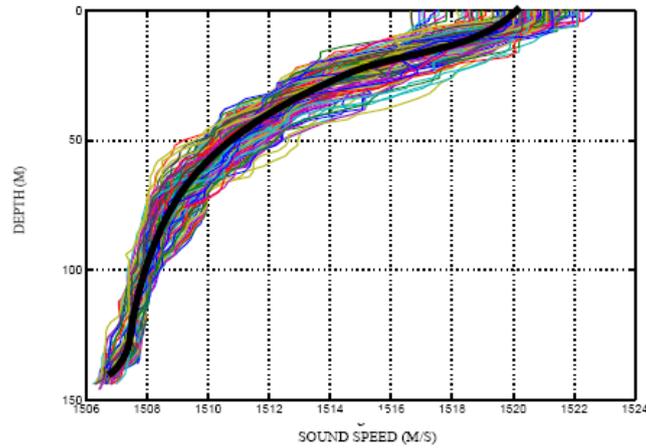


Figura 5.7 – Conjunto de perfis de velocidade de propagação do som para o experimento.

Tabela 5.1 – Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, SJ e MP.

Processador	Erro RMS (%)	DP (%)	Distância Estimada
Teta	1,5	16,2	5473 m
Phi	4,9	1,8	5718 m
SJ	9,9	0,3	4953 m
MP	2,4	0,5	5363 m

A figura 5.8 ilustra uma figura de ambigüidade do processador Phi. O pico representa o ponto da melhor estimativa de distância desse processador.

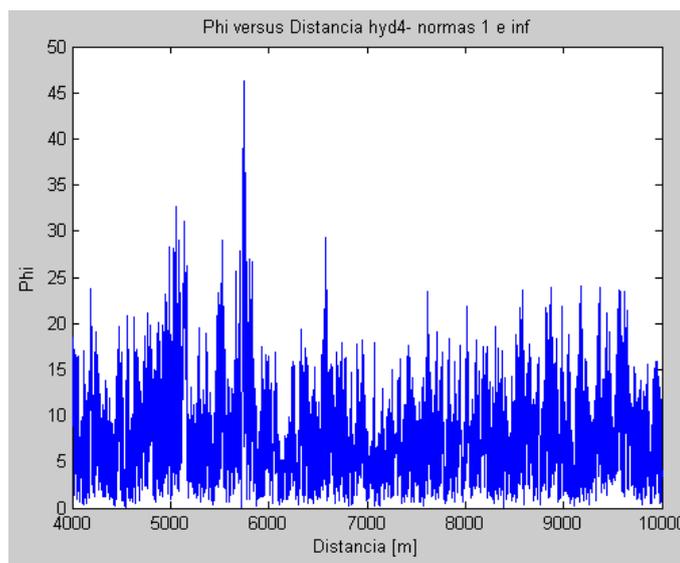


Figura 5.8 – Figura de ambigüidade do processador Phi sem normalização.

Quando não é possível deter o conhecimento prévio da forma da onda da fonte, SJ foi substituído pelo processador Bartlett (correlação cruzada). A tabela 5.2 apresenta os resultados dos processadores sem o conhecimento da forma de onda transmitida pela fonte. Nota-se que há ambigüidade.

Tabela 5.2 - Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, sem o conhecimento da forma da onda da fonte. DP: Desvio Padrão.

Processador	Erro RMS [%]	DP [%]	Distância Estimada [m]	Distância Estimada Pelo 2º pico (DP)
Teta	49,6	50,5	8232	5233 (7%)
Phi	80,6	79,5	9935	6473 (17%)
Bartlett	5,4	27,1	5201	5814 (11%)
MP – com auto-correlação	27,3	33,2	7002	5243 (9%)

Estes resultados foram apresentados no VII Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina, realizado no Instituto de Pesquisas da Marinha, no Rio de Janeiro (SOUSA e RIBEIRO, 2007).

5.2 Fonte desconhecida e dinâmica

A realização de um experimento controlado com navios e submarinos da Marinha Brasileira (MB) com o objetivo único de atender a este trabalho, é extremamente difícil em virtude dos custos envolvidos e da própria disponibilidade destes meios, dos equipamentos e da tripulação. Portanto, os dados experimentais são obtidos durante exercícios ou operações navais programadas, mas sem que haja um planejamento exato da coleta a ser feita. É importante enfatizar o sigilo dos dados de navios da Marinha, sendo, por isso, utilizados somente sinais oriundos de navios mercantes. Assim, é realizado um treinamento da tripulação, apresentando os requisitos necessários à coleta de dados e à aquisição dos sinais. Além disso, o ambiente marinho muitas vezes não permite a aquisição de sinais em virtude das condições climáticas, que influenciam o estado do mar e as correntes marinhas, ocasionando condições inóspitas à propagação acústica submarina. Outro aspecto importante reside no fato das próprias

operações navais impedirem que o submarino faça “exploratórias”, ou seja, mergulhos para adquirir o perfil de velocidade de propagação em diversas distâncias, e mesmo assim, a precisão dessa medição do submarino é muito inferior às realizadas com o XBT ou o CTD, pois a descida do submarino não é vertical.

Neste trabalho, os experimentos com sinais reais, foram na verdade, coletas de dados obtidas durante o acompanhamento de navios mercantes, de oportunidade, durante comissões navais, ao longo da costa brasileira, denominadas UNITAS (gravações U) e PASSEX (gravações P). Por motivo de sigilo, não são apresentadas as características confidenciais do sonar do submarino, sendo somente descritas suas características gerais. O sonar, que capta os sinais da fonte sonora, é formado por um “array” cilíndrico de proa. A equipe de processamento de sinais do Instituto de Pesquisas da Marinha desenvolveu um sistema de aquisição dos sinais recebidos pelo equipamento após o módulo “beamformer”, ou conformador de feixe. Este disponibiliza um sinal resultante dos elementos desse “array”, com a informação de marcação do alvo. Apesar de não se ter acesso a todos os elementos do “array”, a determinação da marcação do alvo ajuda a reduzir a ambigüidade. Utilizou-se uma banda de 300 a 600 Hz.

Os dados da Gravação U1 são apresentados abaixo e na tabela 5.3:

- **Velocidade do Submarino:** 6 nós
- **Velocidade do Alvo:** 13 nós
- **Profundidade do Alvo:** 6 m.
- **Profundidade local:** 130 m
- **Tipo de fundo:** areia lamosa ($\rho=1,772 \text{ g/cm}^3$; $v=1656 \text{ m/s}$; atenuação=0,55 dB/ λ (HAMILTON, 1980)
- **Distância:** 16244 a 19418 m

Tabela 5.3 - Perfil de Velocidade de propagação da Gravação U1: isovelocidade (25 m) seguido de gradiente negativo.

Profundidade [m]	Velocidade de propagação [m/s]
0	1534,5
15	1529,5
30	121,5
45	1518,5

55	1521,5
130	1510

Segundo informações do mapa de coleta de dados do submarino, este se move a 6 nós, sendo a distância praticamente mantida, com este acompanhando o alvo. O submarino desloca-se, no total, 926 m. Compensando a cinemática de ambos e das informações do submarino e do alvo, pode-se dizer que, durante o intervalo de tempo de gravação, a distância entre o submarino e o alvo foi alterada aproximadamente de 800 m. Devido à cinemática do experimento e da impossibilidade de ser divulgada a acurácia da medição de distância do sonar do submarino, apresenta-se a distância do alvo como uma faixa entre 16250 a 19500 m (valor central de 17850 m). O espaço de busca inicial foi de 10000 a 25000, e verificou-se a concentração de resultados entre 12000 e 20000 m, com base em características operativas.

A tabela 5.4 apresenta as estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP. Foram efetuadas 2 abordagens distintas:

- Utilizam-se 31 sinais de 0,5 segundo ao longo da gravação e obtidos os valores médios das estimativas disponibilizadas por cada processador; e
- Somam-se as figuras de ambigüidade geradas por cada processador a partir de cada um dos 31 sinais gravados, com o intuito de suprimir picos espúrios que prejudicam a convergência para a solução verdadeira. Segundo TOLSTOY (1989, 1993 e 2000), trata-se de um processamento incoerente, cujos lobos laterais aleatórios não são reforçados pelo somatório, enquanto que as energias correspondentes à localização verdadeira serão. É possível também se contabilizar a diferença de amplitude entre tais picos, ou simplesmente aceitar o pico de valor máximo obtido após tal somatório. A figura 5.9 ilustra a figura de ambigüidade resultante de um somatório incoerente para o processador MP.

Em princípio, gera-se o espectro de sinal modelado para a banda de frequência desejada. Em seguida, escolhe-se a região mais “linear”, de modo a evitar comparar com um espectro de sinal deteriorado.

Tabela 5.4 – Estimativas de distância com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP obtidos através das abordagens de valor médio (μ) e de somatório de figuras de ambigüidade (Σ). Gravação U1.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	17347	17618	-	-
Phi	17029	17600	-	-
Bartlett	16609	16208	-	0,002
MP	17284	17743	-	-

Todos os resultados podem ser considerados como válidos e denotam grande coerência com a distância determinada pelo próprio equipamento do submarino, e não possuem divergências entre si. O emprego do valor médio e do método de somatório converge para valores aceitáveis e próximos da distância real. O processador MP destaca-se dos demais devido à redução da faixa de variação das estimativas. Não há diferença significativa no tempo de máquina necessário aos cálculos de cada processador, utilizando-se um Pentium III 2,7 GHz e 1,5 Gb de memória RAM. Com relação à determinação da distância através dos equipamentos de bordo, deve-se ressaltar que o método proposto obteve um tempo de computação 7 vezes menor e dispensa a movimentação do submarino.

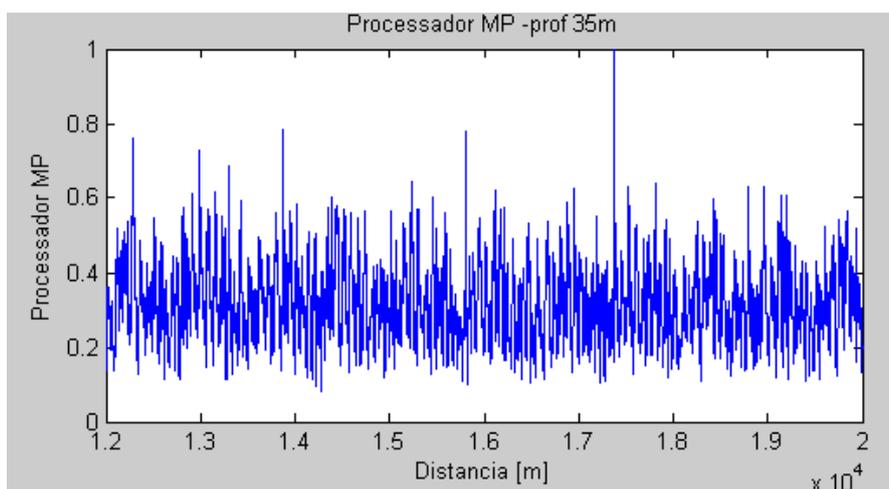


Figura 5.9 - Figura de ambigüidade resultante de um somatório incoerente para o processador MP. O pico representa o ponto da melhor estimativa de distância desse processador.

Outra análise realizada consistiu de se avaliar a qualidade das respostas diante de uma estimativa errada da profundidade do submarino. A tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos para as profundidades de 25, 35, 45 e 55 m. Nota-se a divergência dos resultados.

Tabela 5.6 - Estimativas de distância com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP obtidos através das abordagens de valor médio (μ) e de somatório de figuras de ambigüidade (Σ) para as profundidades de 25, 35, 45 e 55 m. Gravação U1.

Processador	25 m		35 m		45 m		55 m	
	μ [m]	Σ [m]						
Teta	17666 ±2499	18835	17347 ±1084	17618	14917 ±1846	12358	16631 ±2490	14448
Phi	19116 ±1178	19043	17029 ±956	17600	15810 ±979	16578	15994 ±694	16158
Bartlett	18390 ±2826	19963	16609 ±916	16208	15243 ±1683	15243	15859 ±1825	12200
MP	15494 ±2483	15155	17284 ±790	17743	16013 ±2243	17360	14212 ±1226	12878

Abaixo, encontram-se os dados de ambiente relativos à gravação U2, e na tabela 5.6 são listados os valores de velocidade de propagação do som em relação à profundidade:

- **Velocidade do Submarino:** 6 nós
- **Velocidade do Alvo:** 12 nós
- **Profundidade do Alvo:** 6 m.
- **Profundidade local:** 86 m
- **Tipo de fundo:** areia lamosa ($\rho=1,772$ g/cm³; $v=1656$ m/s; atenuação=0,55 dB/ λ (HAMILTON, 1980)
- **Distância:** 9500 a 12300 m

Tabela 5.6 - Perfil de Velocidade de propagação da Gravação U2: isovelocidade (25 m) seguido de gradiente negativo.

Profundidade [m]	Velocidade de propagação [m/s]
------------------	--------------------------------

0	1539
15	1538,1
30	1537,9
45	1533,5
55	1531,6
86	1520

A tabela 5.7 contém as estimativas de distância obtidas com os dados da Gravação U2, seguindo os mesmos procedimentos implementados para a Gravação U1.

Tabela 5.7 – Estimativas de distância com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP obtidos através das abordagens de valor médio (μ) e de somatório de figuras de ambigüidade (Σ). Gravação U2.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	9220	10332	2,9	-
Phi	10185	10860	-	-
Bartlett	9210	9300	3,0	2,1
MP	10790	10860	-	-

Abaixo, encontram-se os dados de ambiente relativos à Gravação U3, e na tabela 5.8 são listados os valores de velocidade de propagação do som em relação à profundidade:

- **Velocidade do Submarino:** 6 nós
- **Velocidade do Alvo:** 8 nós
- **Profundidade do Alvo:** 6 m.
- **Profundidade local:** 92 m
- **Tipo de fundo:** areia lamosa ($\rho=1,772$ g/cm³; $v=1656$ m/s; atenuação=0,55 dB/ λ (HAMILTON, 1980)
- **Distância:** 6500 a 8500 m.

Tabela 5.8 - Perfil de Velocidade de propagação do Gravação U3: isovelocidade (25 m) seguido de gradiente negativo.

Profundidade [m]	Velocidade de propagação [m/s]
0	1535
15	1534,8
30	1525,1
45	1518,3
55	1516,8
92	1510

A tabela 5.9 contém as estimativas de distância obtidas com os dados da Gravação U3, seguindo os mesmos procedimentos implementados para a Gravação U1. Tabela 5.9 – Estimativas de distância com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP obtidos através das abordagens de valor médio (μ) e de somatório de figuras de ambigüidade (Σ). Gravação U3.

Processador	μ[m]	Σ[m]	Erro$_{\mu}$[%]	Erro$_{\Sigma}$[%]
Teta	6415	7300	1,1	-
Phi	6990	7255	-	-
Bartlett	8290	7785	-	-
MP	7345	7670	-	-

Durante a comissão UNITAS foram adquiridos sinais de outros navios mercantes, mas os mapas de coleta de dados não foram preenchidos completamente, faltando muitas informações fundamentais à execução do MFP. A título de exemplo, avaliou-se uma gravação de 5 minutos em que não há os valores do perfil de velocidade de propagação, e sim, apenas uma descrição geral, como “gradiente fortemente negativo”. Além disso, só há a informação de distância de 10516 m do alvo, e devido à dinâmica do alvo, gera uma faixa de 9500 a 11500m. Outro fator relevante é a presença de ruído ambiental elevado. São avaliados os mesmos processadores, e nota-se a dificuldade em se convergir para uma solução única de distância. O procedimento utilizado foi utilizar uma banda de sinal de 300 a 600 Hz para uma busca inicial entre 5000 e 20000 m com passo de 100 m. Em seguida, os sinais são reprocessados com uma banda de 400 a 600 Hz, para avaliar a influência da separação do espectro citada no capítulo 5. Após a determinação da faixa de variação das estimativas, são utilizadas as

50 frequências mais altas para averiguar com mais precisão a estimativa de distância. Os resultados são apresentados na tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Estimativas de distância com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP obtidos através das abordagens de valor médio (μ) e de somatório de figuras de ambigüidade (Σ) para as faixas de frequência: 300 a 600 Hz, 400 a 600 Hz e 550 a 600 Hz. Experimento U4.

Processador	300 a 600 Hz		400 a 600 Hz		550 a 600 Hz	
	μ [m]	Σ [m]	μ [m]	Σ [m]	μ [m]	Σ [m]
Teta	12640	9950	10835	13550	10540	11000
Phi	12540	17600	12786	13850	12940	13850
Bartlett	12370	9200	12950	9800	11600	12800
MP	8260	8150	8000	8000	8000	8000

Os dados da comissão naval “PASSEX” de 2003 na costa brasileira, não possuem um mapa de coleta de dados completo, que detenha o perfil de velocidade de propagação do som no mar. Por isso, foi utilizado com o intuito de se avaliar a precisão das estimativas de distância geradas pelos processadores de MFP diante dessa incerteza e avaliar a contribuição da estimativa do espectro do ruído de cavitação como informação sobre essa fonte sonora. A tabela 5.11 mostra os dados do ambiente e da fonte utilizados na modelagem da propagação para todas as gravações. As tabelas 5.12 a 5.15 contêm os resultados das estimativas de distância obtidas com a média e com a soma incoerente, quando não há a inclusão da modelagem do ruído de cavitação. As tabelas 5.16 a 5.19 mostram os resultados quando se inclui a modelagem de WALES e HEITMEYER (2002) no intervalo de 400 a 600 Hz.

Tabela 5.11 – Dados do ambiente, da fonte e do alvo para as gravações da comissão PASSEX.

Perfil de velocidade de propagação	Isovelocidade (1500 m/s)
Densidade da água	1024 g/cm ³
Densidade do sedimento	1941 g/cm ³
Velocidade de propagação no sedimento	1749 m/s

Atenuação no sedimento	0,55 dB/λ
-------------------------------	-----------

A figura 5.10 ilustra o gráfico de distribuição das estimativas obtidas com e sem a inclusão da modelagem do ruído de cavitação. É importante destacar que, as estimativas de distância que são pertencentes ao intervalo de solução, foram representadas nas tabelas como um traço “-”. As figuras 5.11 e 5.12 ilustram a distribuição do erro percentual por processador para o valor médio e para a soma incoerente, respectivamente. O processador MP demonstrou ser o mais acurado e preciso. A inclusão da modelagem do ruído de cavitação não apresentou melhorias nos resultados em termos de acurácia e precisão.

Tabela 5.12 - Erro e desvio padrão para as estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, sem o conhecimento da forma da onda da fonte (MP* – com auto-correlação) e do perfil de velocidade de propagação. Gravação P1: distância entre 5000 e 6000 m. Profundidade local: 66 m. Profundidade do receptor: 33 m.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	9600	4200	60	16
Phi	4200	5800	16	-
Bartlett	3800	3800	24	24
MP*	7000	4200	17	16

Tabela 5.13 - Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, sem o conhecimento da forma da onda da fonte e do perfil de velocidade de propagação. Gravação P2: distância entre 6800 e 9100 m. Profundidade local: 60 m. Profundidade do receptor: 42 m.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	5080	11200	25,3	23,1
Phi	4640* Ambigüidade com o ponto em 8150	11200	31,7	23,1

Bartlett	8000	8000	-	-
MP*	7120	7120	-	-

Tabela 5.14 - Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, sem o conhecimento da forma da onda da fonte e do perfil de velocidade de propagação. Gravação P3: distância entre 3000 e 4000 m. Profundidade local: 60 m. Profundidade do receptor: 42 m.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	2450	2450	18,3	18,3
Phi	2480	2480	18,2	18,2
Bartlett	2450	2800	18,3	6,6
MP*	4200	4200	5	5

Tabela 5.15 - Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, sem o conhecimento da forma da onda da fonte e do perfil de velocidade de propagação. Gravação P4: distância entre 6000 e 7000 m. Profundidade local: 60 m. Profundidade do receptor: 42 m.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	11200*	6000	71,4	-
Phi	4640	6000	22,6	-
Bartlett	7000	7000	-	-
MP*	7000	4200	-	30

O resultado de Teta* na tabela 5.15 possui ambiguidade. O segundo pico recai na faixa entre 6000 e 7000 m.

Tabela 5.16 - Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, com o conhecimento da forma da onda da fonte e do perfil de velocidade de propagação. Gravação P1: distância entre 5000 e 6000 m. Profundidade local: 66 m. Profundidade do receptor: 33 m.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	3680	9560	26,4	59,3
Phi	4040	4760	19,2	0,05
SJ	3560	3560	28,8	28,8
MP	4240	7040	15,2	17,3

Tabela 5.17 - Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, com estimativa do espectro da onda da fonte e do perfil de velocidade de propagação. Gravação P2: distância entre 6800 e 9100 m. Profundidade local: 60 m. Profundidade do receptor: 42 m.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	11200*	11200	8,4	8,4
Phi	4640	11200	22,6	8,4
SJ	5000	8000	25,5	-
MP	7080	11200	-	8,4

Tabela 5.18 - Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, com estimativa do espectro da fonte e do perfil de velocidade de propagação. Gravação P3: distância entre 3000 e 4000 m. Profundidade local: 60 m. Profundidade do receptor: 42 m.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	2040	2480	32	17,3
Phi	2480	2480	17,3	17,3
SJ	2440	2720	18,6	9,3
MP	4240	4280	0,06	0,07

Tabela 5.19 - Erro e desvio padrão para estimativas de distância obtidas com os processadores Teta, Phi, Bartlett e MP, com estimativa do espectro da fonte e do perfil de velocidade de propagação. Gravação P4: distância entre 6000 e 7000 m. Profundidade local: 60 m. Profundidade do receptor: 42 m.

Processador	μ [m]	Σ [m]	Erro $_{\mu}$ [%]	Erro $_{\Sigma}$ [%]
Teta	Ambigüidade 4600, 7000 e 11240	ambigüidade	23,3	23,3
Phi	4640	6000	22,6	-
SJ	7080	7080	0,01	0,01
MP	7120	7180	0,02	0,02

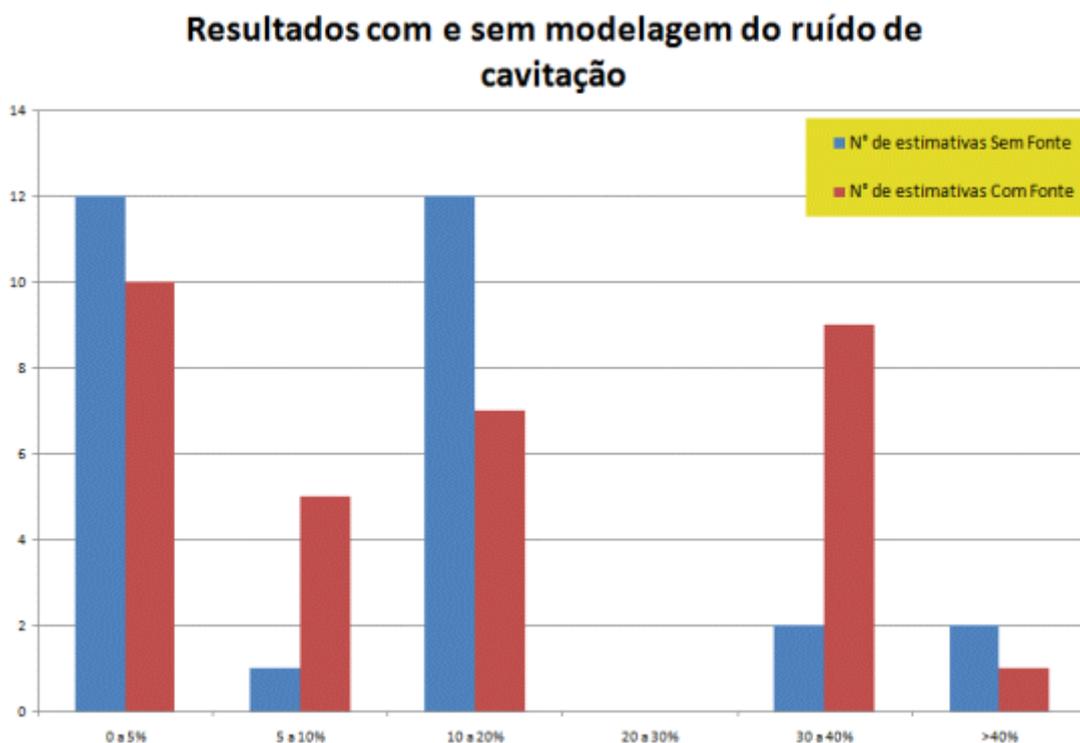


Figura 5.10 – Distribuição do erro percentual das estimativas de distância com e sem a inclusão da modelagem do ruído de cavitação.

Resultados de erro percentual por processador para média

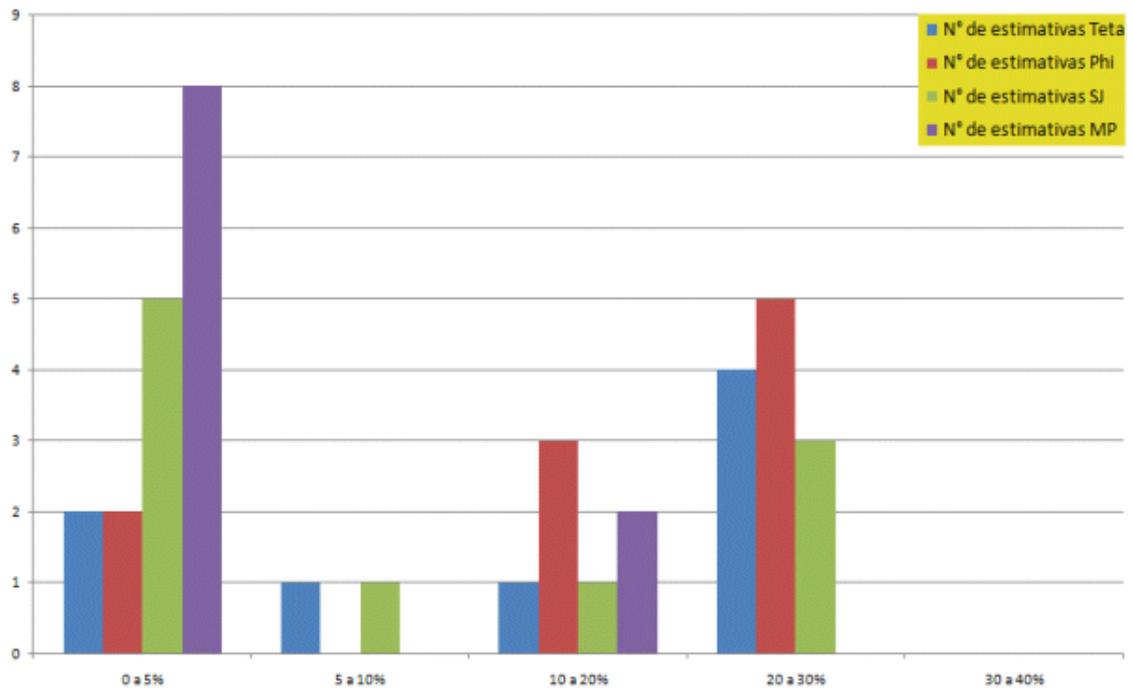


Figura 5.11 – Distribuição do erro percentual das estimativas de distância por processador para o valor médio das estimativas.

Resultados de erro percentual por processador para soma incoerente

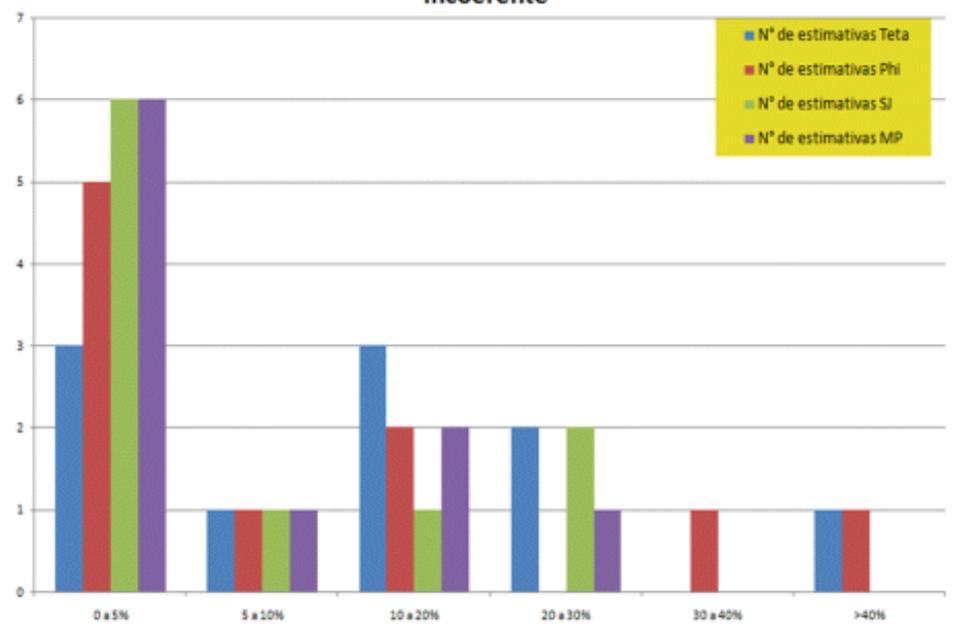


Figura 5.12 – Distribuição do erro percentual das estimativas de distância por processador para soma incoerente das figuras de ambiguidade.

As figuras 5.13 a 5.16 apresentam exemplos dos resultados por processadores incoerentes para os experimentos P, da comissão PASSEX.

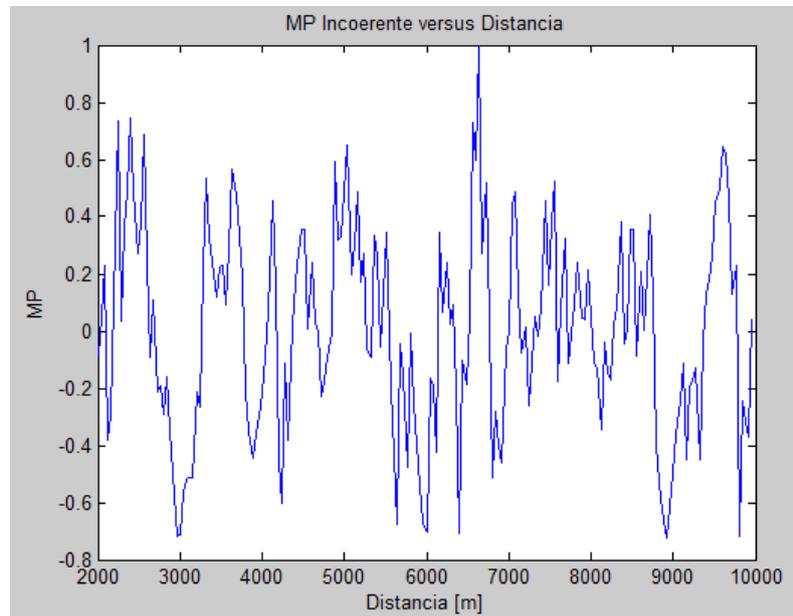


Figura 5.13 – Amostra de resultado do processador MP incoerente para a gravação 3P. O pico representa o ponto da melhor estimativa de distância desse processador.

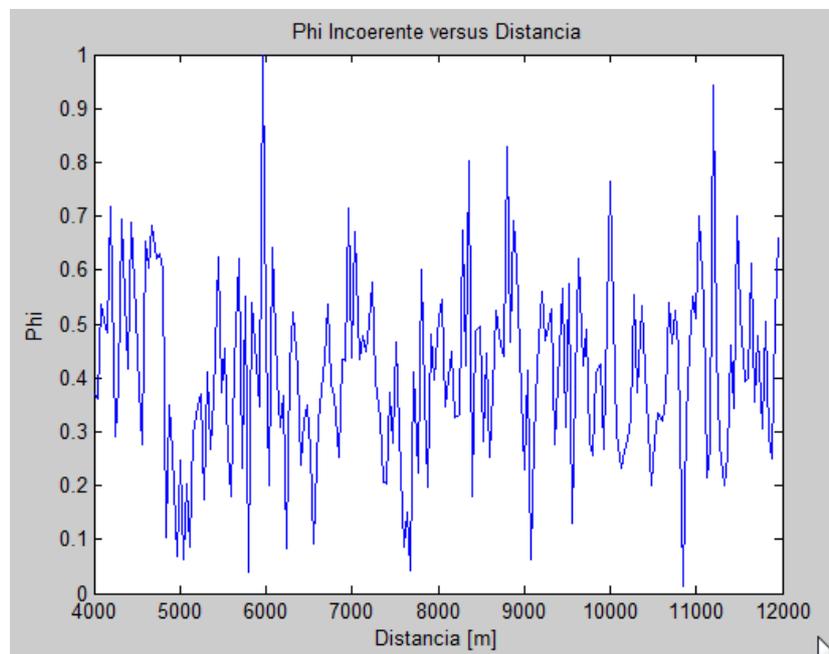


Figura 5.14 – Amostra de resultado do processador Phi incoerente para a gravação 4P. O pico representa o ponto da melhor estimativa de distância desse processador.

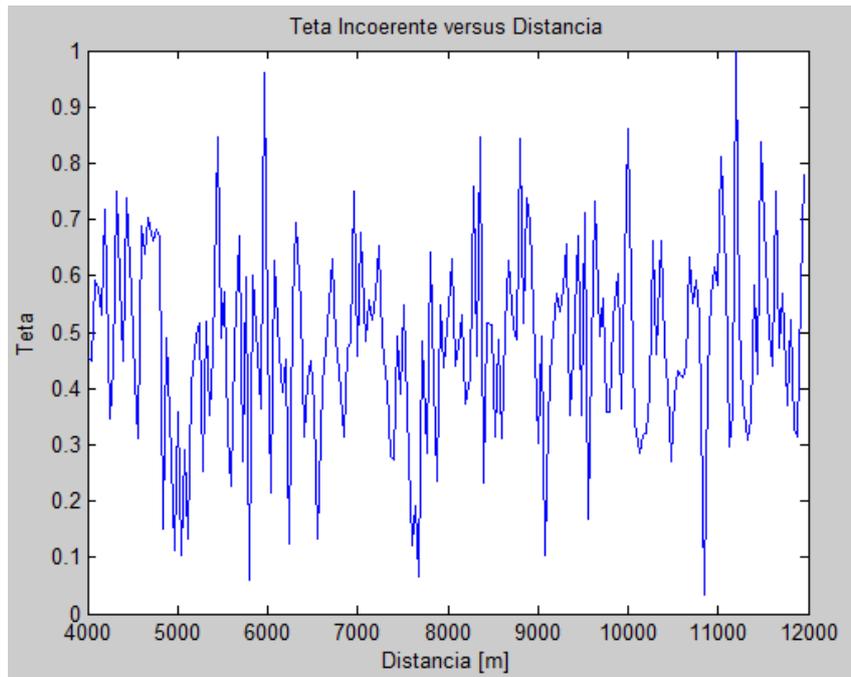


Figura 5.15 – Amostra de resultado do processador Teta incoerente para a gravação 4P. O pico representa o ponto da melhor estimativa de distância desse processador.

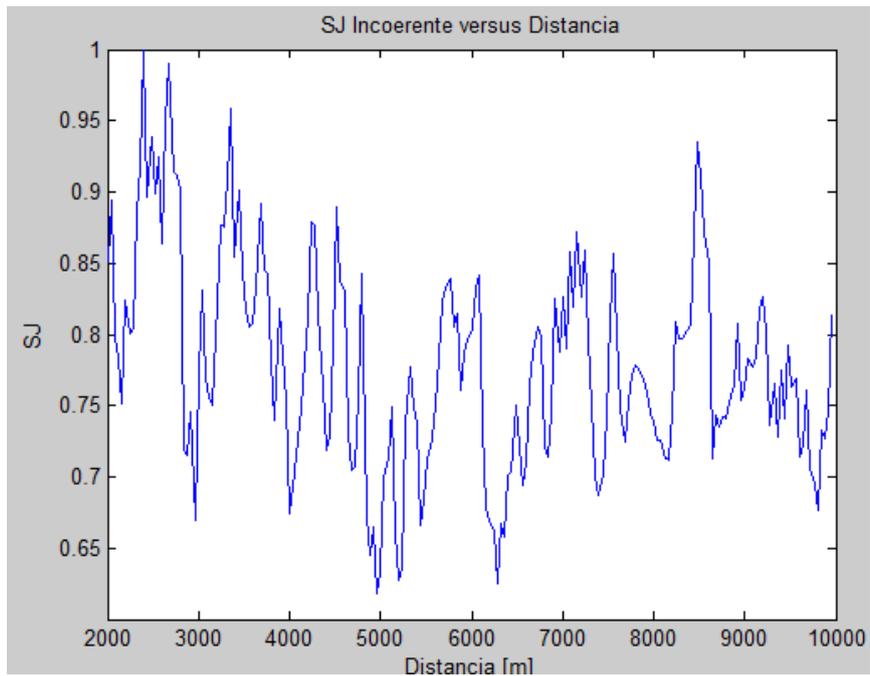


Figura 5.16 – Amostra de resultado do processador SJ incoerente para a gravação 2P. O ponto de mínimo representa o ponto da melhor estimativa de distância desse processador.

Capítulo 6

Discussão e Conclusão

6.1 Discussão

Os resultados apresentados na tabela 5.1, para fonte sonora conhecida e parada, denotam que todos os processadores obtiveram estimativas aceitáveis. Porém, o processador MP é o mais eficiente, visto que apresenta acurácia e precisão elevadas (2,4% e 0,5%, respectivamente). Trata-se do processador que agrega as características do processador Bartlett e é incoerente devido ao seu processamento de envoltórias e multifrequência. Nota-se, que o processador SJ, baseado no erro médio quadrático entre o sinal recebido e a réplica, foi o menos acurado, mesmo utilizando-se a envoltória dos sinais no tempo, e por isso também é considerado processamento incoerente. O processador Teta apresentou boa acurácia, mas grande dispersão dos seus valores estimados. Deve-se ressaltar que os processadores Phi e Teta, de FRAZER e PECHOLCS (1990), ainda não tinham sido avaliados experimentalmente e apresentados na literatura, e seu princípio básico é uma razão entre as energias contidas no espectro do sinal recebido e da réplica.

Na tabela 5.2, vislumbram-se os resultados sem a informação da forma da onda da fonte, e observa-se uma queda drástica na qualidade das estimativas. Na verdade, a ausência da informação da fonte ocasionou ambigüidade, o que não era esperado. Pela observação das figuras de ambigüidade de cada processador, o segundo pico seria o mais adequado. A justificativa reside no fato do espectro da fonte ser muito diferente do espectro gerado pelo modelo de propagação via síntese de Fourier. No caso, este é banda larga, sem ponderações (pesos). Esse fato é evidenciado também pela figura A.35, do anexo, onde se utiliza uma “chirp” linear para a forma de onda da fonte.

Os participantes do experimento citado informam, em suas publicações, erros da ordem de 50 m, com um espaço de busca de 4 a 8 km, e sempre empregando a forma de onda da fonte. Uma opção para melhorar a acurácia das medições é realizar o procedimento de buscas avançadas, como relatado no 1º experimento do submarino “TAMOIO”, alterando o passo e o espaço de busca, conforme se aumenta a frequência e a largura da banda. Esse experimento serviu para se começar a verificar as dificuldades

em se aplicar a técnica, e demonstram que para um único hidrofone, sem conhecimento da fonte, é fundamental trabalhar com o sinal de banda larga e ter conhecimento preciso das informações necessárias à modelagem correta do ambiente.

Os artigos de BATTLE *et al.* (2003) e KOCH e KNOBLES (2005) indicam que é possível realizar a MFP com ruído de cavitação como fonte sonora, para determinar parâmetros geoacústicos, apesar da baixa SNR existente. Nesses trabalhos, são empregados “arrays” de receptores e a distância entre fonte e receptor não ultrapassa 4 km. Nota-se que a utilização do processamento multi-frequência é fundamental para a viabilização da MFP. Os experimentos realizados com submarinos e navios mercantes de oportunidade denotam a viabilidade de localizar a fonte sonora através da MFP. Os problemas identificados são os mesmos, com o agravante de que o sensor do submarino é único.

Avaliando a tabela 5.4, observa-se que todos os processadores obtiveram resultados satisfatórios. O processador Bartlett subestimou a distância do alvo, mas mesmo assim, suas estimativas ainda permaneceram dentro do intervalo de confiança. A utilização do somatório incoerente das figuras de ambigüidade também resultou em resultados acurados e precisos. A tabela 5.5 mostra que mesmo que a profundidade do próprio submarino fosse desconhecida ou se seu valor fosse determinado com imprecisão, uma busca também desse parâmetro convergiria para a profundidade determinada no mapa de coleta de dados: 35m. Esses resultados mostram que ocorre a degradação dos resultados devido à variação desse parâmetro, e que o desconhecimento da forma de onda da fonte não afetou a qualidade das estimativas obtidas. A utilização de janelas temporais e a aplicação do valor médio do sinal mostrou-se um procedimento adequado à movimentação do alvo (linear e de baixa velocidade).

Os resultados do experimento com o submarino “TAMOIO” sem a informação de variação de distância e do perfil de velocidade de propagação do som no mar denotam que este não pode ser considerado como um experimento controlado. Somente os processadores Teta e Bartlett atingiram valores aceitáveis. É importante salientar que os sinais gravados estavam em meio a ruído ambiente, que não foi possível retirar mesmo com o uso de filtros. Seus resultados apontam claramente a necessidade de se conhecer previamente os parâmetros do ambiente de implementação da técnica.

Em todos os experimentos citados, o espaço de busca deste trabalho foi equivalente, ou bem superior que a maioria dos casos divulgados na literatura, entre 1000 e 5000 m (BARLEE *et al.*, 2005, PORTER *et al.*, 2000, DEBEVER *et al.*, 2007,

GERSTOFT *et al.*, 1996). O mesmo também se refere ao tamanho das bandas de frequência ou do número de tons, em geral, em torno de 30 frequências. Isso foi feito com o intuito de trazer mais informação ao processo para compensar a implementação com um único hidrofone. Apesar da carga computacional maior, isso não inviabilizou a sua aplicação em um sistema em tempo real.

A modelagem proposta por WALES e HEITMEYER (2003) para o ruído de cavitação foi implementada com o intuito de melhorar o desempenho do MFP. No entanto, os resultados apresentados nas tabelas 5.17 a 5.19 e destacados no gráfico 5.10 não são conclusivos. Não há como afirmar se a modelagem do ruído de cavitação escolhida é adequada, ou se a aplicação de qualquer modelo para a fonte “ruído de cavitação” interfere no desempenho do MFP.

6.2 Conclusão

A técnica de processamento de sinais, MFP, compara o sinal recebido por um ou mais receptores com uma réplica modelada, demonstrou-se ser muito robusta, porém sensível a erros de modelagem e/ou descasamentos de valores de parâmetros. A profundidade local e o perfil de velocidade de propagação são os parâmetros que mais influenciam o desempenho do MFP.

Os resultados comprovam a adequação do método da MFP ao ruído de cavitação propagado a uma distância de aproximadamente 20 km. O processador MP é o mais indicado à implementação em um sistema em tempo real, pois este pode ser aplicado de forma incoerente, com ou sem o conhecimento da fonte e foi comprovada a sua eficiência pelos experimentos realizados com fonte conhecida e estática e com fonte desconhecida e dinâmica.

Os resultados obtidos não definem se a modelagem do ruído de cavitação proposta por WALES e HEITMEYER (2003) é eficiente e se há melhoria do desempenho do MFP com a sua implementação.

Os resultados obtidos indicam a importância do conhecimento da forma de onda fonte, quando esta não tem um espectro banda larga “plano”.

A utilização de janelas temporais para alvo em movimento é eficiente e pode ser utilizada também para o acompanhamento do mesmo.

O método apresentado possui acurácia para ser aplicado à medição de distância de fontes sonoras no mar, com forma de onda conhecida ou não, desde que se tenha conhecimento prévio dos parâmetros geoacústicos, da profundidade local, do perfil de

velocidade de propagação do som no mar, e que se escolha o modelo de propagação mais adequado àquele ambiente.

6.3 Propostas de continuação do Tema

Devido aos resultados obtidos neste trabalho, é interessante que seja dada continuidade à pesquisa, investigando-se os seguintes tópicos:

- Implementação de um algoritmo de busca com Algoritmos Genéticos ou “Simulated Annealing”, para verificar a viabilidade da “focalização” e seus limites;
- Desenvolvimento de uma modelagem para o ruído de cavitação como fonte sonora; e
- Desenvolvimento de um protótipo automatizado para ser testado a bordo de submarinos.

6.4 Referências Bibliográficas

ABAWI, A.T., BOOTH, N.O, e SCHEY, P. “The effects of source motion on the performance of matched field processors,” *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 107, pp 2889–2890, 2000.

ARAVINDAN, S., RAMACHANDRAN, N. e NAIDU, P.S., “Fast Matched Field Processing”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 18, n. 1, pp. 1-5, 1993.

BAGGEROER, A.B., “Matched Field Processing: Status at 2000 and Where To Now?”, <http://ite.gmu.edu/sam2002/sam2000/Final%20Abstracts/Matched%20Field%20Processing.html>, em janeiro de 2008.

BAGGEROER, A.B., KUPERMAN, W.A. e MIKHALEVSKY, P.N., “An overview of matched fields methods in ocean acoustics”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 18, pp. 401–424 , 1993.

BARLEE, S., CHAPMAN, R. e WILMUT, M.J., “Geoacoustic model parameter estimation using a bottom-moored hydrophone array”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 30, n. 4, pp. 773-783, 2005.

BATTLE, D.J., GERSTOFT, P. e KUPERMAN, W.A. *et al.*, “Geoacoustic inversion of tow-ship noise via near-field-matched-field processing”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, n.3, pp. 454-467, 2003.

BAXLEY, P.A. e BOOTH, N.O., “Matched-field replica model optimization and bottom property inversion in shallow water”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 107, n. 3, pp. 1301–1323, 2000.

BOOTH, N. O., ABAWI, A. T., SCHEY, P. W. E HODGKISS, W. S., “Detectability of low-level broad-band signals using adaptive matched-field processing with vertical aperture arrays,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 25, pp. 296–313, 2000.

BOOTH, N.O., BAXLEY, P.A., RICE, J.A. *et al.*, “Source Localization with Broadband Matched Field Processing in Shallow Water”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 4, pp. 402-412, 1996.

BREKHOVSKIKH, L.M. , LYSANOV, Y.P., BREKHOVSKIKH, L.M. E LYSANOV, Y., *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer Verlag, 2003.

BUCKER, H.P., “Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 59, pp. 368–373, 1976.

BURDIC, W.S., *Underwater Acoustic System Analysis*, Prentice Hall, 2003.

CANDY, J.V. e SULLIVAN, E.J, “Broadband Model-Based Processing for Shallow Ocean Environments”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 1, pp. 275–287, 1998.

CAITI, A., JESUS, S. e KRISTENSEN, A., “Geoacoustic seafloor exploration with a towed array in shallow water area of the Strait of Sicily,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 4, pp. 355–366, 1996.

CAUWENBERGHS, G., STANACEVIC, M. e ZWEIG, G., “Blind Broadband Source Localization and Separation in Miniature Sensor Arrays”, In: *Proceedings IEEE International Conference Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2001)*, 2001.

CLAY H. e MEDWIN, C.S., *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, 1998.

CHOCHEYRAS, Y. e KOPP, L., “Limitations of joint space and time processing for moving source localization with a few sensors”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 18, n. 1, pp. 3559-3561, 1995.

COATES, R., *Advanced Underwater Acoustics*, Seiche, 2002.

COLLINS, M.D., KUPERMAN, W.A. E SCHMIDT, H. “Nonlinear inversion for ocean-bottom properties”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 92, pp. 2770–2783, 1992.

CZENSZAK, S.P. e KROLIK, J.L., “Robust wideband matched-field processing with a short vertical array”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 101, n. 2, pp. 749–759, 1997.

DALY, P., “Deep Water KRAKEN- RAM Comparison”, http://bcx.mit.edu/prop_codes/ram/kr3/kr3.pdf , 1999.

DAUGHERTY, J. R. E LYNCH, J. F. “Surface wave, internal wave, and source motion effects on matched field processing in a shallow water waveguide”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 87, pp. 2503–2526, 1990.

DEBEVER, C. E KUPERMAN, W.A., “Robust matched-field processing using a coherent broadband white noise constraint processor”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 122, n. 4, pp. 1979-1986, 2007.

DEL BALZO, D. R., FEUILLADE, C. e ROWE, M. M. ,“Effects of water-depth mismatch on matched-field localization in shallow water,” *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 83, pp. 2180–2185, 1988.

D’SPAIN, G. L., MURRAY, J. J. e HODGKISS, W. S. , “Mirages in shallow water matched field processing,” *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 105, pp. 3245–3265, 1999.

DOSSO, S.E., WILMUT, M.J. e LAPINSKI, L., “An Adaptive Hybrid Algorithm for Geoacoustic Inversion”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 26, pp. 324-336, 2001.

DOSSO, S.E. e NIELSEN, P.L., “Quantifying Uncertainty in Geoacoustic Inversion. II. Application to Broadband Shallow Water Data”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 111, pp. 143-159, 2002.

DOSSO, S.E., NIELSEN, P.L. e WILMUT, M.J., “Data Error Covariance in Matched Fields Geoacoustic Inversion”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 119, pp. 208-219, 2006.

DOSSO, S.E., “Environmental Uncertainty in Ocean Acoustic Inversion”, *Inverse Problems*, v. 19, pp. 419-431, 2003.

ETTER, P.C., *Underwater Acoustics Modelling and Simulation: Principles, Techniques and Applications*, 3rd Ed., Spon Press, 2003.

EVANS, R.B, “A coupled mode solution for acoustic propagation in a wave guide with stepwise depth variations of a penetrable bottom”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 74, n.1, pp. 188-195, 1983.

FRAZER, N.L. e PECHOLCS, P.I., “Single-hydrophone Localization”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 88, n. 2, pp. 995-1002, 1990.

FIALKOWSKI, L. T. , COLLINS, M. D., KUPERMAN, W. A. *et al.*, “Matched-field processing using measured replica fields”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 107, pp. 739–746, 2000.

FIALKOWSKI, L. T., LINGEVITCH, J. F., PERKINS, J. S. *et al.*, “Geoacoustic inversion using a rotated coordinate system and simulated annealing”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, pp. 370–379, 2003.

FIALKOWSKI, L. T., PERKINS, J. S., COLLINS, M. D. *et al.*, “Matched-field source tracking by ambiguity surface averaging”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 110, pp 739–746, 2001.

GERSTOFT, P., “Inversion of Seismoacoustic Data Using Genetic Algorithms and a Posteriori Probability Distributions”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 95, n. 2, pp 770-782, 1994.

GERSTOFT, P. E GINGRAS, D.F., “Parameter Estimation Using Multifrequency Range-Dependent Acoustic Data in Shallow Water”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 99, n. 5, pp 2839-2850, 1996.

GILLARD, C.A., THOMSON, D.J. e HEARD, G.J., “Estimating geoacoustic parameters using matched-field inversion methods”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, n. 3, pp. 394 – 413, 2003.

GINGRAS, D.F. E GERSTOFT, P. “Inversion for Geometric and Geoacoustic Parameter in Shallow Water: Experimental Results”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 97, n. 6, pp. 3589-3598, 1995.

HAMILTON, E. L., “Geoacoustic modeling of the seafloor,” *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 68, pp. 1313–1340, 1980.

HAMSON, E. e HEITMEYER, R., “Environmental and system effects on source localization in shallow water by the matched-field processing of a vertical array”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 86, n.5, pp. 1950–1959, 1989.

HARRISON, C.H. E SIMONS, D.G., “Geoacoustic Inversion of Ambient Noise: A Simple Method”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 112, n. 4, pp. 1377 – 1389, 2002.

HEANEY, K. D. e KUPERMAN, W.A., “Very long range source localization with a small vertical array” *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n.4, pp. 2149–2150, 1998.

HURSKY, P., PORTER, M.P. e SIDERIUS, M., “High-frequency (8–16 kHz) model-based source localization” *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 115, n.6, pp. 3021–3035, 2004.

JEFSERS, R., BREED, B. E GALLEMORE, B., “Passive Range Estimation and Rate Detection”, In: *Proceedings IEEE ICASSP 2000*, pp. 112-116, 2000.

JENSEN, F.B, KUPERMAN, W.A, PORTER, M.B. E SCHIMIDT, H., *Computational Ocean Acoustics (Modern Acoustics and Signal Processing)*, AIP Press, 1994.

JESUS, S.M., “Normal-Mode Matching localization in Shallow Water: Environmental and System Effects”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 90, n. 4, pp. 2034 – 2041, 1991.

JESUS, S.M., SOARES, C., COELHO, E. e PICCO, P., “BOAT Environment Inversion: An Experimental Demonstration of Blind Ocean Acoustic Tomography”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 119, n. 3, pp. 1420 – 1431, 2006.

JESUS, S.M., PORTER, M.B., STEPHAN, Y, COELHO e DÉMOULIN, X., “Broadband Source Localization with a Single Hydrophone”, In: *Proceedings OCEANS’98*, v. 2, pp. 1078-1082, 1998.

JESUS, S.M., PORTER, M.B., STEPHAN, Y., DEMOULIN, X., RODRIGUEZ, O.C. e COELHO, E.M.M.F., “Single hydrophone source localization”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 25, n. 3, pp. 337 – 346, 2000.

KNOBLES, D. P. E MITCHELL, S. K., “Broadband localization by matched field in range and bearing in shallow water,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 96, pp. 1813–1820, 1994.

KNOBLES, D. P., WESTWOOD, E. K. e LE-MOND, J. E. “Modal time-series structure in a shallow water environment,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 23, pp. 188–202, 1998.

KNOBLES, D. P. e KOCH, R. A., “A time series analysis of sound propagation in a strongly multipath shallow water environment with an adiabatic normal mode approach,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, pp. 1–13, 1996.

KNOBLES, D. P. e KOCH, R. A., “Numerical Study of Geoacoustic Inversion in Range-Dependent Ocean Environment”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, n.3, pp. 355–369, 2003.

KOCH, R. A. e KNOBLES, D. P., “Geoacoustic Inversion with Ships as Sources” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 117, n. 2, pp. 626–637, 2005.

KROLIK, J., LYNCH, J. e SWINGLER, D., "A Robust Matched Field Processor for Source Localization in Uncertain Multipath Fields", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 20, n. 1, pp. 2637-2640, 1989.

KUPERMAN, W.A., D’SPAIN, G.L. e HEANEY, K.D., “Long Range Source Localization from Single Hydrophone Spectrograms”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 109, n. 5, Pt. 1, pp. 1935-1943, 2001.

KUPERMAN , W.A. e LYNCH , J.F., “Shallow-Water Acoustics”, *Physics Today*, pp. 55-61, 2004.

LAPINSKI, A.-L. S. e DOSSO, S. E. "Bayesian geoacoustic inversion for the inversion techniques 2001 workshop," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, pp. 380–393, 2003.

LAPLANCHE, C., "A Bayesian method to estimate the depth and the range of phonating sperm whales using a single hydrophone", *Journal of Acoustical Society of America*, v. 121, n. 3, pp. 1519-1528, 2007.

LE GAC, J.C., ASCH, M. e STEPHAN, Y. "Geoacoustic inversion broadband acoustic data in shallow water on a single hydrophone", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, n.3, pp. 479-493, 2003.

LI, S. e SEJNOWSKI, T. "Adaptive Separation of Mixed Broadband Sound Sources with Delays by a Beamforming Herault-Jutten Network", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 20, n. 1, pp. 73-79, 1995.

LYNCH, J. F., RAJAN, S. D. e FRISK, G. V., "A comparison of broadband and narrow-band inversions for bottom geoacoustic properties at a site near Corpus Christi, Texas," *Journal of Acoustical Society of America*, v. 89, pp. 648, 1988.

MACKINNES, C.S., "Source localization using subspace estimation and spatial filtering", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 29, n.2, pp. 488-497, 2004.

MECKLENBRÄUKER, C. F. e GERSTOFT, P., "Objective functions for ocean acoustic inversions derived by likelihood methods," *Journal of Computational Acoustics*, v. 8, pp. 259–270, 2000.

MEDWIN, H. e CLAY, C.S., *Fundamentals of Acoustical Oceanography (Applications of Modern Acoustics)*, Academic Press, 1998.

MICHALOPOLOU, Z. e PORTER, M.B., "Matched Field Processing for Broadband Source Localization", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 4, pp. 384-392, 1996.

MICHALOPOLOU, Z., “Robust multi-tonal matched-field inversion: A coherent approach”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 104, n. 3, pp. 163–170, 1998.

MOURA, N. N., SEIXAS, J. M., SOARES FILHO, W., SOUSA, A. V. G., "Independent Component Analysis for Optimal Passive Sonar Signal Detection", In: *Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, ISDA 07, 2007.

NARASIRNHAN, S. e KROLIK, J.L., “Fundamental Limits on Acoustic Source Range Estimation Performance in Uncertain Ocean Channels”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 97, n. 1, pp. 215-226, 1995.

NICOLAS, B., MARS, J., LACOUME, J.L., “Geoacoustical parameters estimation with impulsive and boat noise sources”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, n.3, pp. 494-503, 2003.

NIELSEN, P.L., SIDERIUS, M. e GERSTOFT, P., “Range dependent geoacoustic inversion: results from the inversion techniques workshop”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, n.3, pp. 414-423, 2003.

NUTTALL, A.H. e WILSON, J.H., “Adaptive beamforming at very low frequencies in spatially coherent, cluttered noise environments with low signal-to-noise ratio and finite-averaging times”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 108, n. 5, Pt. 1, pp. 2256 – 2265, 2000.

ORRIS, G. J., NICHOLAS, M. e PERKINS, J. S., “The matched-phase coherent multi-frequency matched-field processor,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 107, n. 4, pp. 2563–2575, 2000.

PARK, C., SEONG, W. e GERSTOFT, P., “Geoacoustic inversion in time domain using ship of opportunity noise recorded on a horizontal towed array”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 117, n. 4, pp. 1933–1940, 2005.

PORTER, M.B., JESUS, S.M., STEPHAN, Y. *et al.*, “Tidal effects on source inversion”, <ftp://ftp.ualg.pt/users/siplab/intimate96/>, 2000. Acessado em janeiro de 2008.

RENDAS, M.J. e BIENVENU, G., “Tuning Genetic Algorithms for Underwater Acoustics Using a Priori Statistical Information”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 4, pp. 467-470, 1997.

ROSS, D., *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press, 1976.

RUBANO, L. A., “Acoustic propagation in shallow water over a low-velocity bottom”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 67, pp. 1608–1613, 1980.

RUTHERFORD, S. R. e HAWKER, K. E., “The effects of density gradients on bottom reflection loss for a class of marine sediments,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 63, pp. 750–757, 1978.

SEOL, H., SUHB, J. e LEEC, S. “Development of hybrid method for the prediction of underwater propeller noise”, *Journal of Sound and Vibration*, v. 288, pp. 345–360, 2005.

SHANG, E.C., WANG, Y.Y. E SUN, S., “Inversion in Shallow Water Using WKB Modal Condition”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 4, pp. 432-439, 1996.

SILVA, J.R.M, 2005, *Detecção e Localização Acústica em Águas Rasas Usando Transformada Wavelet Contínua e outras Técnicas Espectrais*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

SIDERIUS, M., NIELSEN, P. L., SELLSCHOPP, J. *et al.*, “Experimental study of geoacoustic inversion uncertainty due to ocean sound-speed fluctuations”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 110, pp. 769–781, 2001.

SIDERIUS, M., NIELSEN, P. L., GERSTOFT, P., “Performance comparison between vertical and horizontal arrays for geoacoustic inversion”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, n. 3, pp. 424-433, 2003.

SNELLEN, M., SIMONS, D.G., SIDERIUS, M. *et al.*, “An Evaluation of the Accuracy of Shallow Water Matched Field Inversion Results”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 109, pp. 514-527, 2001.

SOARES, C., SIDERIUS, M. e JESUS, S.M., “Source Localization in a Time-Varying Ocean Waveguide”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 112, n. 5, Pt. 1, Nov., pp. 1879-1889, 2002.

SOARES, C., WALDHORST, A. e JESUS, S.M., “Matched Field Processing: Environmental Focusing and Source Tracking with Application to the North Elba Data Set”, In: *Proceedings of IEEE OCEANS'97*, pp. 1598-1602, 1997.

SOARES, C. e JESUS, S.M., “Broadband matched-field processing: Coherent and incoherent approaches”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 113, n. 5, pp. 2589-2601, 2003.

SONG, H. , KUPERMAN, W. A. , HODGKISS, W. S., GERSTOFT, P. E KIM, J.S., “Null Broadening With Snapshot-Deficient Covariance Matrices in Passive Sonar”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 28, n. 2, pp. 250-261, 2003.

SOUSA, A.V.G, 2001, *Abordagem Teórica e Experimental de um Método Ultra-Sônico para Medir Espessura e Velocidade da Onda em Meios Estratificados*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

SOUSA, A.V.G e RIBEIRO, C.E.P, “Localização Passiva de Fontes Sonoras em Águas Rasas Através de Técnicas de Campo Casado”, In: *Anais do VII Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina*, Rio de Janeiro, novembro, 2007.

SOUZA, M.G, CICOGNA, T.R. e CHIQUITO, A.J., “Excitação dos modos normais de um sistema usando um motor desbalanceado”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-47442007000100003&lng=pt&nrm=iso, acessado no dia 23/10/2007.

STOTTS, S. A., KNOBLES, D. P., KELLER, J. A., PIPER, J. N. e THOMPSON, L. A, “Geoacoustic inversion of short range source data using a plane wave reflection coefficient approach”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 120, n. 6, pp. 3607-3626, 2006.

SUPPAPPOLA, S.B. e HARRISON, B.F., “Experimental Matched-Field Localization”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 29, n. 2, pp. 511-523, 2004.

TABRIKIAN, J., KROLIK, J.L. e MESSER, H., “Robust Maximum Likelihood Source Localization in an Uncertain Shallow Water Waveguide”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 101, n. 1, pp. 241-249, 1997.

TANTUM, S.L., NOLTE, L.W., KROLIK, J.L. e HARMANCI, K., “The Performance of Matched Field Track-Before-Detect Methods Using Shallow Water Pacific Data”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 112, n. 1, pp. 119-127, 2002.

TAROUDAKIS, M.I. e MAKRAKIS, G., *Inverse Problems in Underwater Acoustics*, Springer Ed., 2001.

THODE, A., “Tracking sperm whale using a towed passive acoustic array,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 116, pp. 245–253, 2004.

THODE, A., ZANOLIN, M., NAFTALI, E. *et al.*, “Necessary conditions for a maximum likelihood estimate to become asymptotically unbiased and attain the Cramer–Rao lower bound. II. Range and depth localization of a sound source in an ocean waveguide”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 112, n. 5, Pt. 1, p. 1890-1910, 2002.

THODE, A., GERSTOFT, P., BURGESS, W.C. *et al.*, “A portable matched-field processing system using passive acoustic time synchronization” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 31, n. 3, pp. 696-711, 2006.

TOLLEFSEN, D., CHAPMAN, N. R. e WILMUT, M. J. , “Estimates of geoacoustic model parameters from inversions of horizontal and vertical line array data,” In: *Proceedings IEEE/MTS Oceans*, San Diego, CA, pp. 592–597, 2003.

TOLSTOY, A., “*Matched Field processing for Underwater Acoustics*, World Scientific Publishing Co, 2nd Edition, 1998.

TOLSTOY, A., “Applications of Matched Field Processing to Inverse Problems in Underwater Acoustics”, *Inverse Problems*, v. 3, pp. 1655-1666, 2000.

TOLSTOY, A., “Sensitivity of Matched Field Processing to Sound Speed Profile Mismatch for Vertical Arrays in a Deep Water Pacific Environment”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 85, pp 2395-2404, 1989.

TORKKOLA, K. "Blind Separation of Delayed Sources Based on Information Maximization", In. *Proceedings IEEE International Conference Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'96)*, Atlanta GA, 1996.

TRACEY, B., LEE, N., ZURK, L. E WARD, J. “Array design and motion effects for matched Field processing,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 108, pp. 2645, 2000.

WAITE, A. D., “*Sonar for practicing Engineers*”, 3rd Ed., John Wiley & Sons, 2003.

WAGE, K.E., “Approximate Mode Filtering”, In. *Proceedings 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp 1436-1440, 2004.

WALES, S.C. e HEITMEYER, R.M., “An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise”, *Journal of Acoustical Society of America*, v. 111, n. 3, p. 1211-1231, 2002.

WESTWOOD, E. K., “Broadband matched-field source localization,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 91, pp. 2777–2789, 1992.

WONG, K.T. E ZOLTOWSKI, M.D., “Closed Form Underwater Acoustic Direction Finding with Arbitrarily Spaced Vector Hydrophones at Unknown Locations”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 22, n. 3, pp. 566-575, 1997.

XU, W., BAGGEROER, A.B. e SCHMIDT, H., “Performance Analysis for Matched-Field Source Localization: Simulations and Experimental Results”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 31, n. 2, pp. 325-343, 2006.

YANG, K., MA, Y., SUN, C., *et al.*, “Multi-step matched field inversion for broadband data from ASIAEX2001,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 29, pp. 964–972, 2004.

ZALA, C. A. e OZARD, J. M. “Matched-field processing for a moving source,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 92, pp. 403–417, 1992.

ZAKARAUSKAS, P., DOSSO, S. e FAWCETT, J. A. “Matched-field inversion for source localization and optimal equivalent bathymetry,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 100, pp. 1493–1500, 1996.

ZIOMEK, L., *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing*, 2nd Ed., CRC Press, 1995.

ZHANG, R., LI, Z., YAN, J., PENG, Z E LI, F., “Broad-band Matched-Field Source Localization in the East China Sea”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 29, n. 4, pp. 1049-1054, 2004.

ZURK, L. M., LEE, N., e WARD, J., “Source motion mitigation for adaptive matched field processing,” *Journal of Acoustical Society of America*, v. 113, pp. 2719–2731, 2003.

Anexo

1.Simulação

Para analisar o comportamento dos métodos de campo casado para a determinação da distância de forma passiva, inicialmente foram realizadas simulações com os modelos de propagação divulgados na literatura, utilizando o caso de teste de MEDWIN e CLAY (1998), que modela o fundo do guia de onda como um plano semi-infinito. De acordo com TOLSTOY (1998), é verificado o desempenho do MFP através do processador Bartlett, diante de ruído gaussiano, do descasamento da informação de profundidade do guia de onda, da indeterminação do perfil de velocidade de propagação sonora e dos parâmetros de fundo.

A tabela A.1 apresenta os parâmetros que caracterizam o problema.

Tabela A.1 – Dados de ambiente, da fonte para o caso teste de MEDWIN e CLAY (1998).

Parâmetros	Valores
Frequência	147,8 Hz
h (profundidade)	22,6 m
Zs (profundidade da fonte)	10 m
Zx (profundidade do receptor)	18,6 m
C0 (velocidade do som na água – perfil isovelocidade)	1508 m/s
C1 (velocidade no fundo)	1,12 x C0
Rho0 (densidade da água)	1024 kg/m ³
Rho1 (densidade do fundo)	2048 kg/m ³
Distância entre fonte e receptor	4000 m

Segundo a modelagem de modos normais, apresentada em MEDWIN e CLAY (1998), apresenta-se na figura A.1, a perda na propagação em dB (**20*log TL**, onde TL é a perda na propagação), utilizando os programas em Matlab® desenvolvidos por SILVA (2005).

As figuras A.2, A.3, A.4 e A.5 apresentam os resultados de perda na propagação obtidos com diferentes modelos de propagação baseados em princípios distintos, a fim de se visualizar as diferenças que a escolha do modelo podem ocasionar no campo casado. Tratam-se de modelos conhecidos na literatura e disponíveis na Internet:

- KRAKEN;
- RAMGEO;
- SCOOTER; e
- BELLHOP.

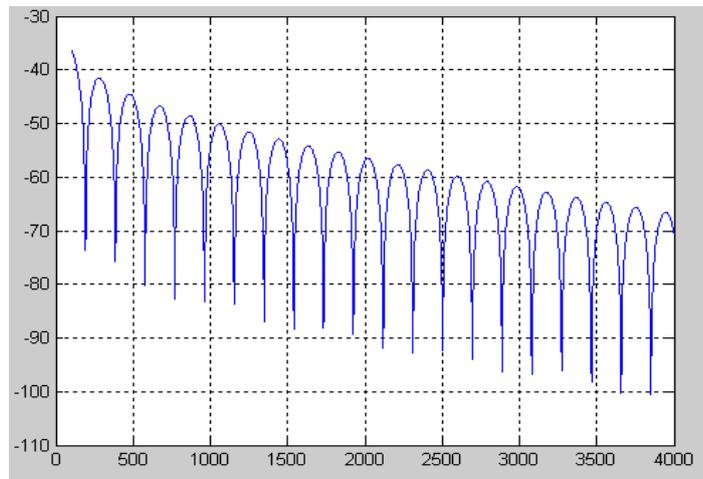


Figura A.1 – Perda na propagação (em dB) versus distância em metros.

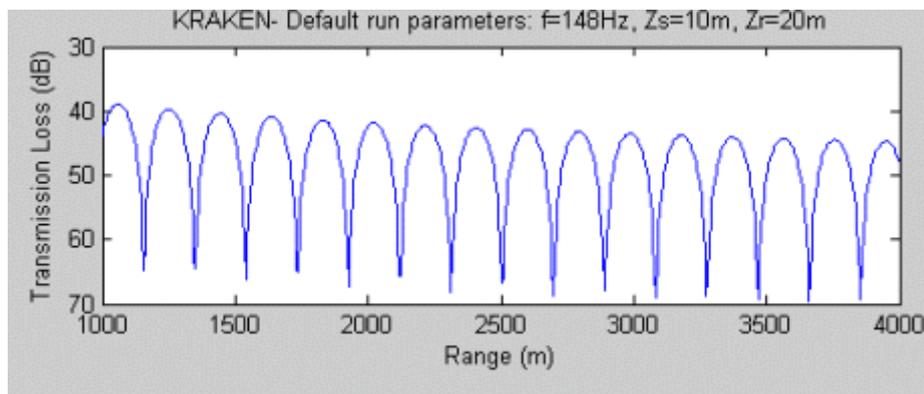


Figura A.2 – Perda na propagação versus distância usando o modelo de propagação KRAKEN, que baseia-se em modos normais e utiliza elementos finitos na discretização de camadas (água e fundo).

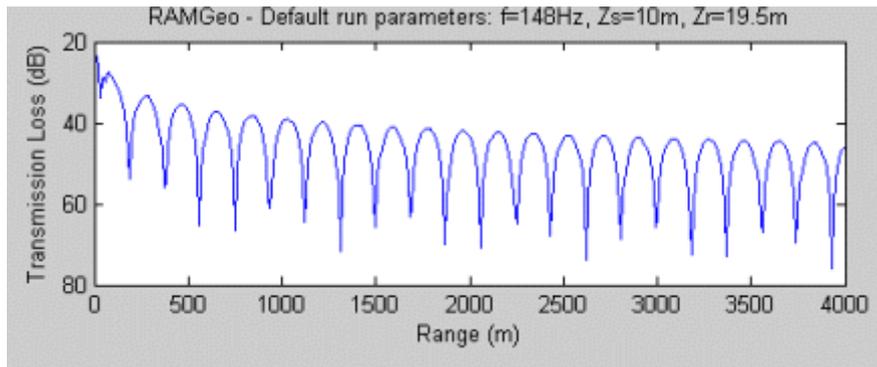


Figura A.3 - Perda na propagação versus distância usando o modelo de propagação RAMGEO, que baseia-se na resolução da equação parabólica (onda) e utiliza elementos finitos na discretização de camadas (água e fundo).

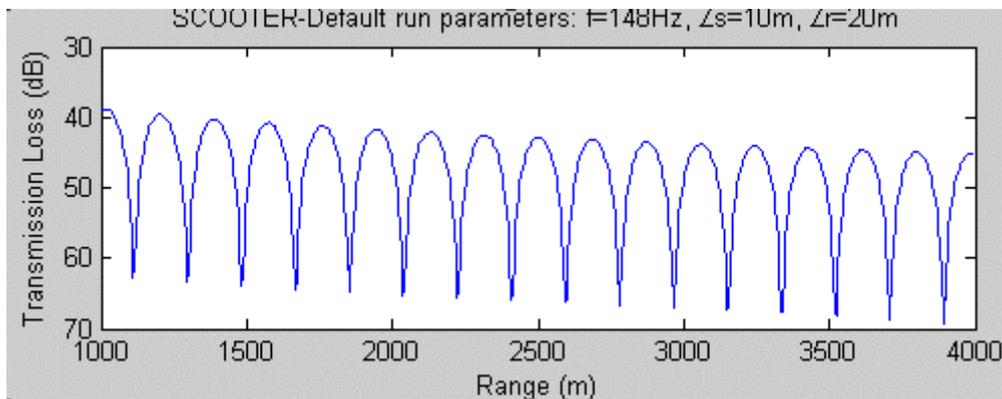


Figura A.4 - Perda na propagação versus distância usando o modelo de propagação SCOOTER, que baseia-se na função de Green.

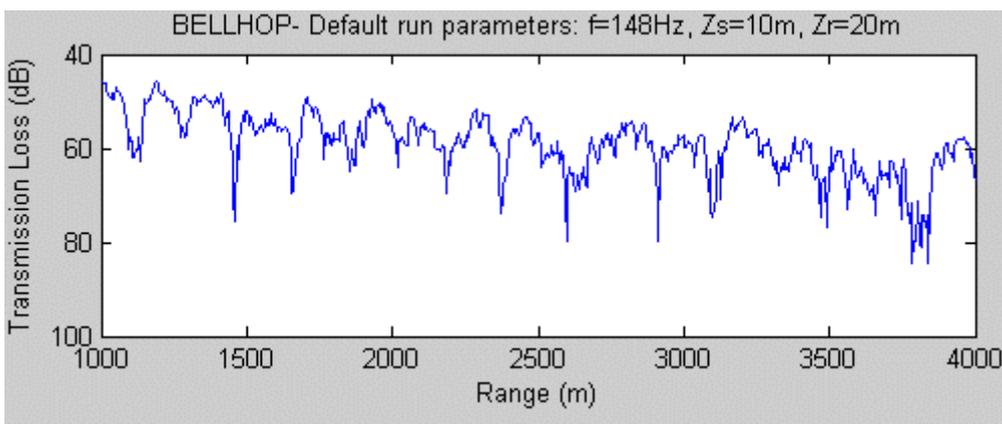


Figura A.5 - Perda na propagação versus distância usando o modelo de propagação BELLHOP, que baseia-se na resolução da equação de Helmholtz (onda) utilizando a teoria de raios.

Analisando as figuras A.2 a A.5, observa-se que os modelos de propagação apresentam a perda na propagação com decaimento e valores semelhantes, exceto o modelo RAMGEO, que utiliza a modelagem de equações parabólicas, e que em princípio, subestima as perdas na região próxima à fonte. A figura A.6 apresenta o gráfico de perdas na propagação em função da distância e da profundidade. Nota-se a repetição de padrões de interferência ao longo da distância.

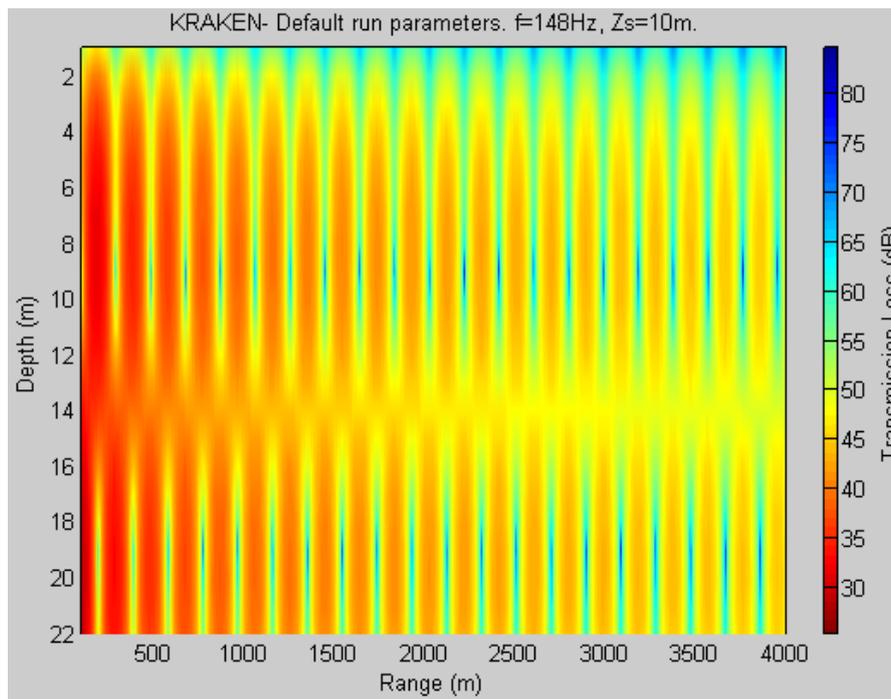


Figura A.6 – Gráfico de perda na propagação em função da profundidade e da distância. Discretização de $dr=5\text{m}$.

Esse fato interfere diretamente na capacidade de se realizar o MFP para localizar uma fonte sonora monotônica. A figura A.7 apresenta o resultado do processador Bartlett do método de campo casado para o caso teste com 4 receptores verticais, posicionados a 5, 10, 15 e 20 m de profundidade, considerando que o campo acústico estimado foi gerado pelo KRAKEN. Observa-se claramente que não é possível distinguir a distância correta entre fonte e receptor com discretização de 1 e 5 m. Em seguida, passou-se a discretizar com um passo em distância $dr=1\text{m}$ para verificar se haveria melhoria de desempenho. Na figura A.7, observa-se que isso não ocorre, pois neste ambiente, ou melhor, com a profundidade em torno de 20m, a frequência de 148 Hz e a distância de 4000 m, não há praticamente diferença na perda na propagação.

Assim, ocorre ambigüidade na seleção da distância. Ou seja, em águas muito rasas, com fonte monotônica e somente 4 elementos, não foi possível localizar a fonte. Seria necessário operar com uma fonte banda larga para agregar mais informações. Outro aspecto relevante, é que o receptor está muito próximo do fundo, e como a profundidade é muito pequena, há dificuldade em se distinguir o sinal que chega diretamente no hidrofone com aquele que reflete no fundo e depois o atinge (KNOBLES e KOCH, 1996; KNOBLES *et al.*, 1998).

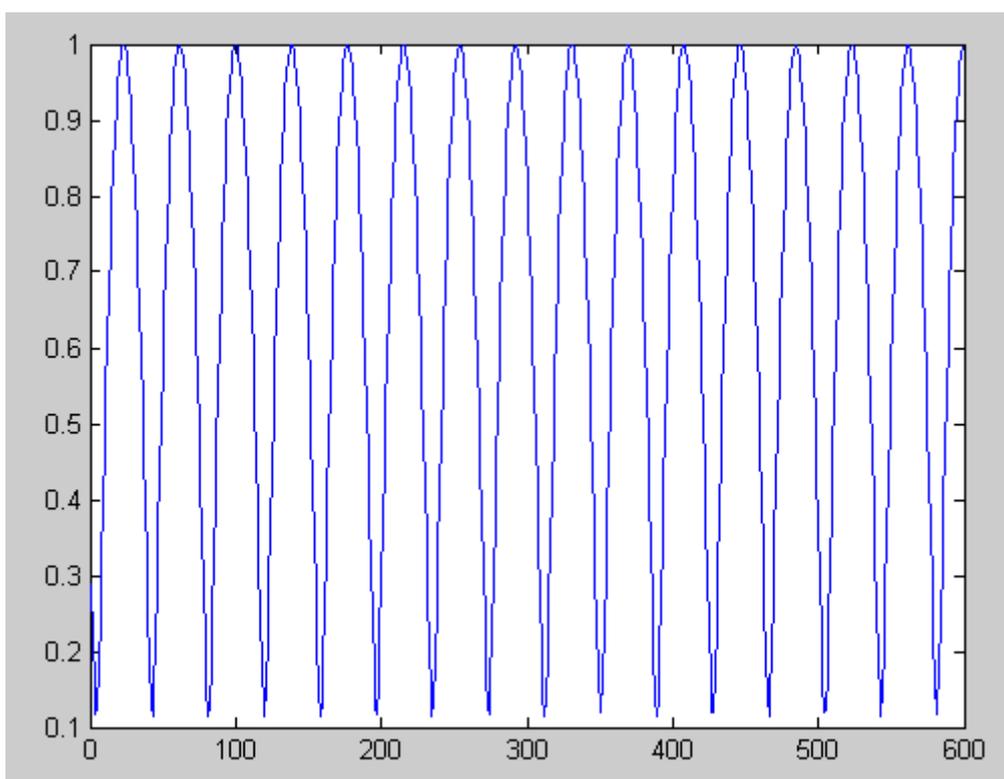


Figura A.7 – Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para determinar a distância entre fonte e receptor. No eixo horizontal são apresentados 600 pontos (discretização).

Optou-se por um caso teste com as mesmas características de MEDWIN e CLAY (1998), excetuando-se a profundidade, que passou a ser 150 m, e a distância entre receptor e fonte, que equivale a 10000 m. A figura A.8 ilustra a perda na propagação calculada por KRAKEN com estas novas condições de dados de entrada. Na figura A.9, pode-se visualizar que o maior valor de DF é dado à distância de 10000 m, sem ambigüidade, conforme esperado.

Para avaliar o comportamento do método sob a influência de ruído, acrescentou-se ruído gaussiano com SNR de 10 dB ao sinal original, e depois aplicou-se o processador Bartlett. O resultado é apresentado na figura A.10. Na figura A.11, apresentam-se os resultados para SNR de 4,5 dB. Nota-se que é mantida a capacidade de se distinguir que a distância correta é 10000 m, em relação aos demais pontos.

A figura A.12 ilustra a DF obtida variando-se a distância da fonte em 400 m. O método mantém a distinção entre os picos, apontando para a solução correta.

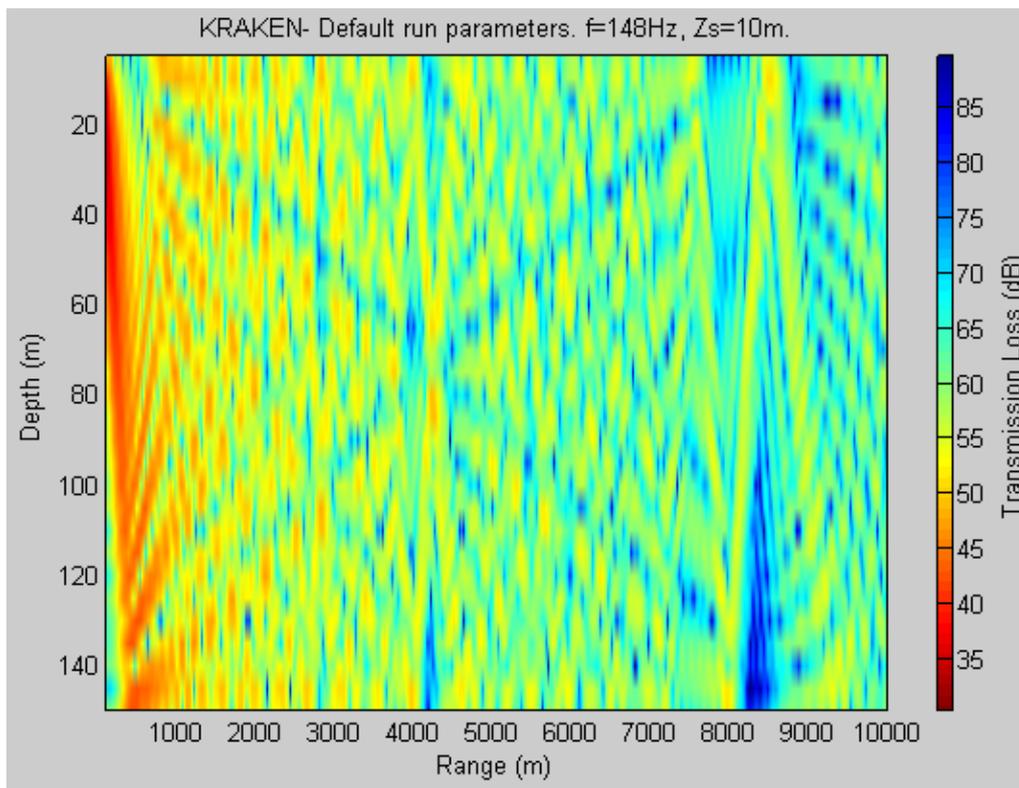


Figura A.8 - Gráfico de perda na propagação em profundidade e distância, para $h=150\text{m}$ e 10000m de distância entre fonte e receptor.

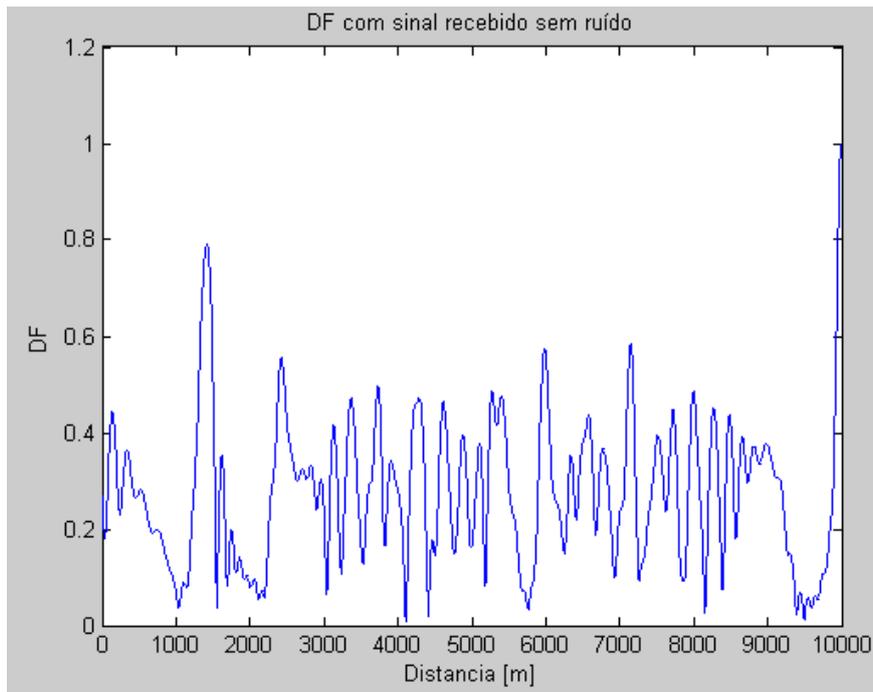


Figura A.9 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para determinar a distância entre fonte e receptor. O DF máximo ocorre na distância de 10000 m, conforme previsto.

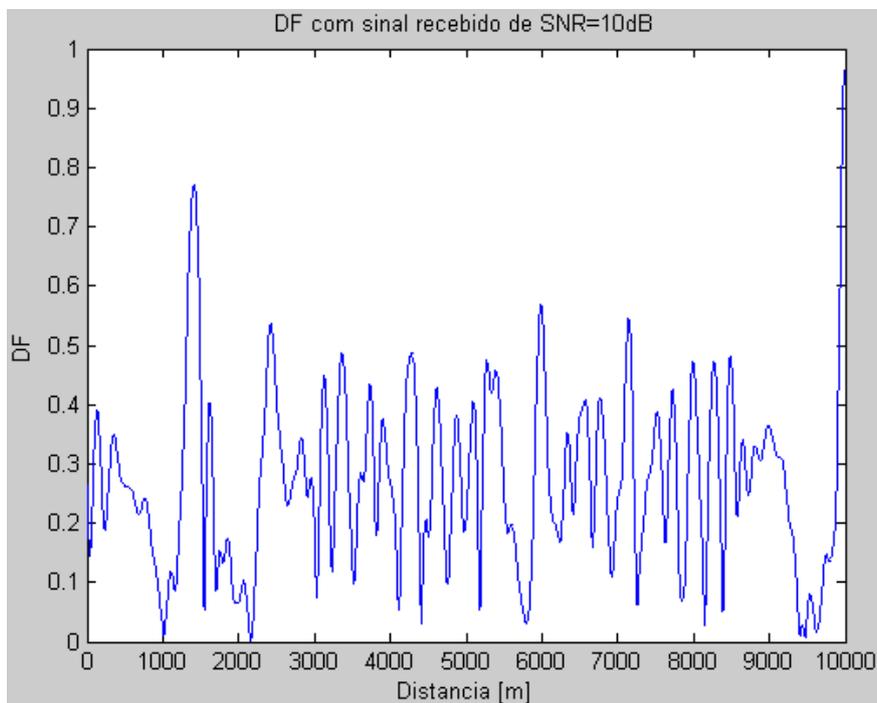


Figura A.10 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para determinar a distância entre fonte e receptor com ruído de 10 dB. O DF máximo ocorre na distância de 10000 m, apesar do nível de ruído.

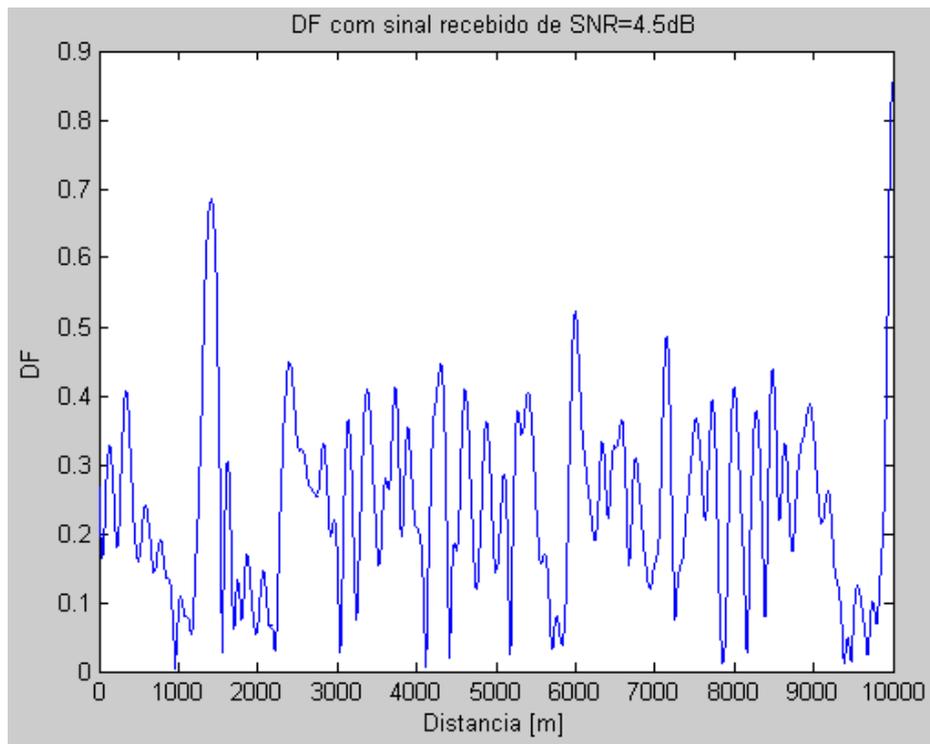


Figura A.11 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para determinar a distância entre fonte e receptor com ruído de 4,5 dB. O DF máximo ocorre na distância de 10000 m, apesar do nível de ruído.

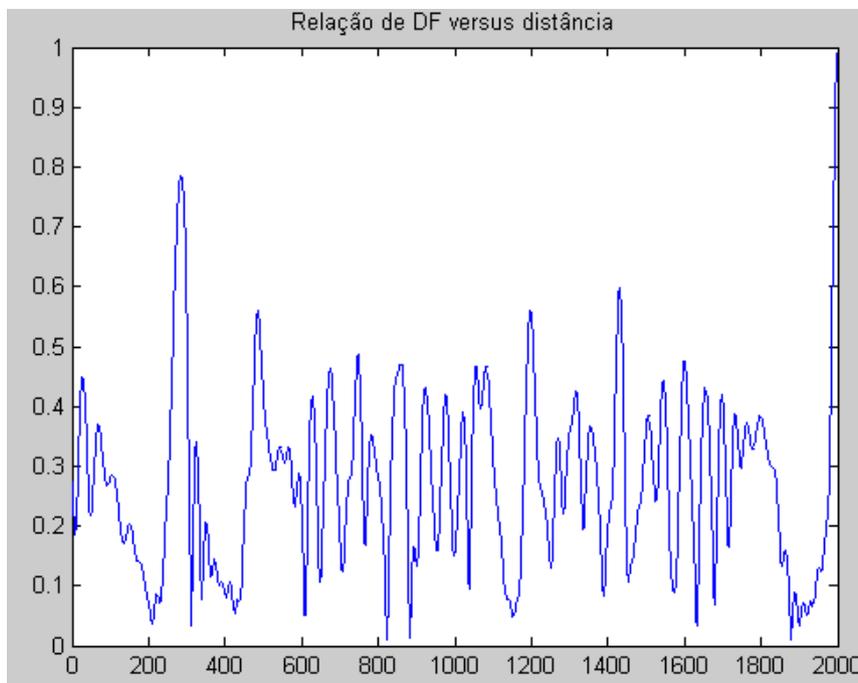


Figura A.12 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para determinar a distância entre fonte e receptor com variação na distância de

400m. O eixo horizontal contém 2000 pontos. O DF máximo ocorre na distância de 10000 m, apesar do nível de ruído.

Em seguida, é analisado o desempenho do processador variando-se a profundidade do guia de onda de 145 a 155m. As figuras A.13 a A.22 ilustram os gráficos de DF para as profundidades de 145m a 155m, com passo de 1m. Os resultados denotam que há maior sensibilidade do método às variações de profundidade que ao ruído. Verificou-se também a resposta de DF a variações de perfil de velocidade de propagação na água e no sedimento. A figura A.23 ilustra o gráfico de perdas na propagação obtidas com o KRAKEN para variação de perfil de velocidade na água de 1490 a 1515 m/s, e a figura A.24, apresenta o DF correspondente. As figuras A.25 e A.27 ilustram os resultados do KRAKEN e de DF ao variar a velocidade de propagação no sedimento de 1689 a 1789 m/s. É importante destacar que as faixas de variação simuladas para os diversos parâmetros foram retirados da literatura. As figuras A.28, 29 e 30 ilustram os resultados quando há variação de todos os parâmetros e há ruído gaussiano de SNR de 10 dB.

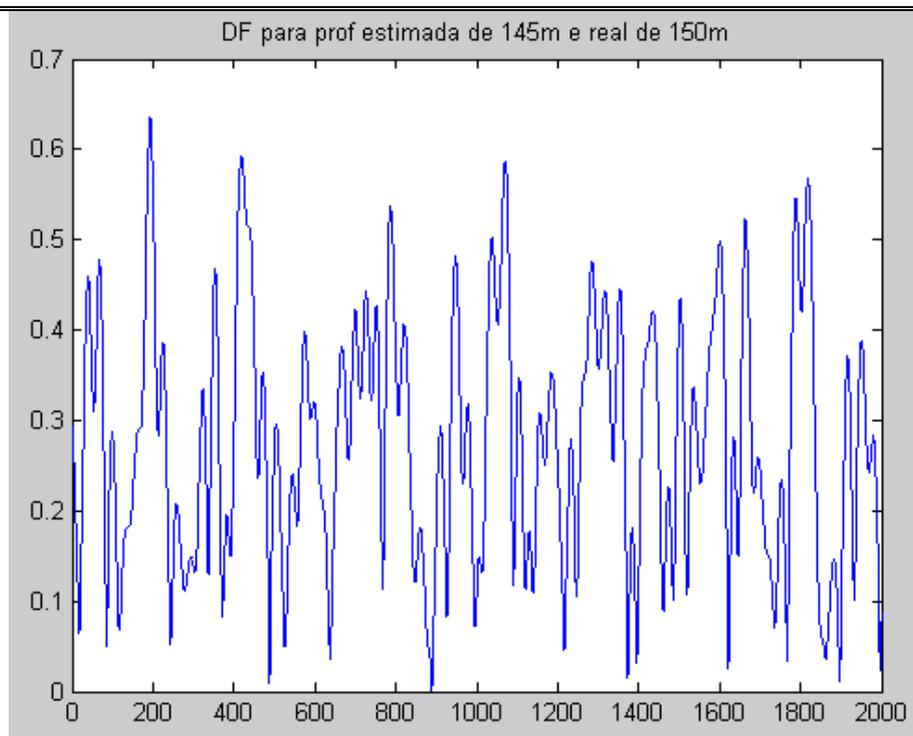


Figura A.13 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de -5m: $h=145m$. O DF máximo ocorre no ponto 250, que representa a distância 5250m. Assim, 5 m de diferença na profundidade são suficientes para inviabilizar o método.

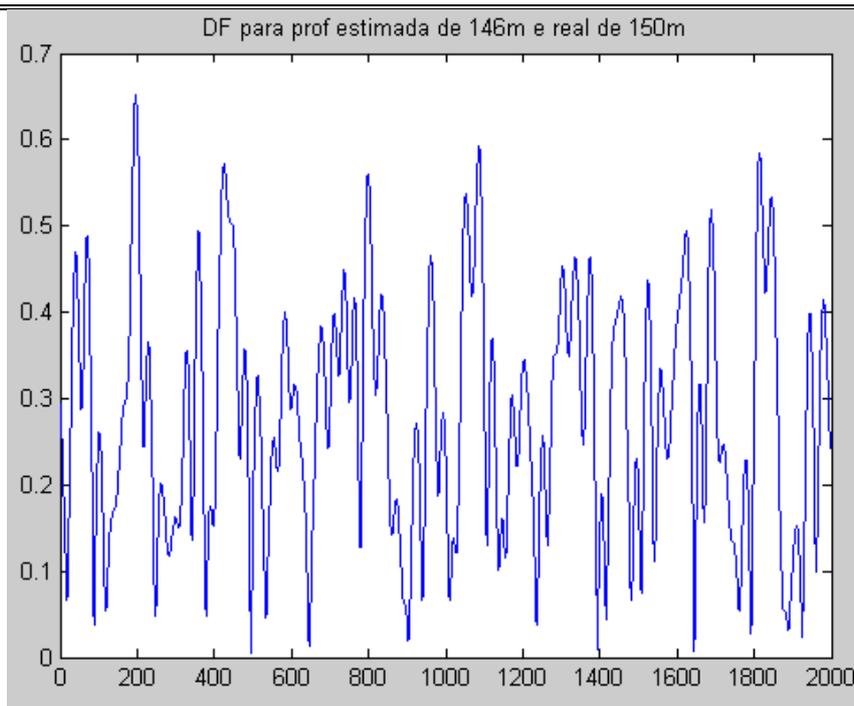


Figura A.14 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de -4m: $h=146m$.

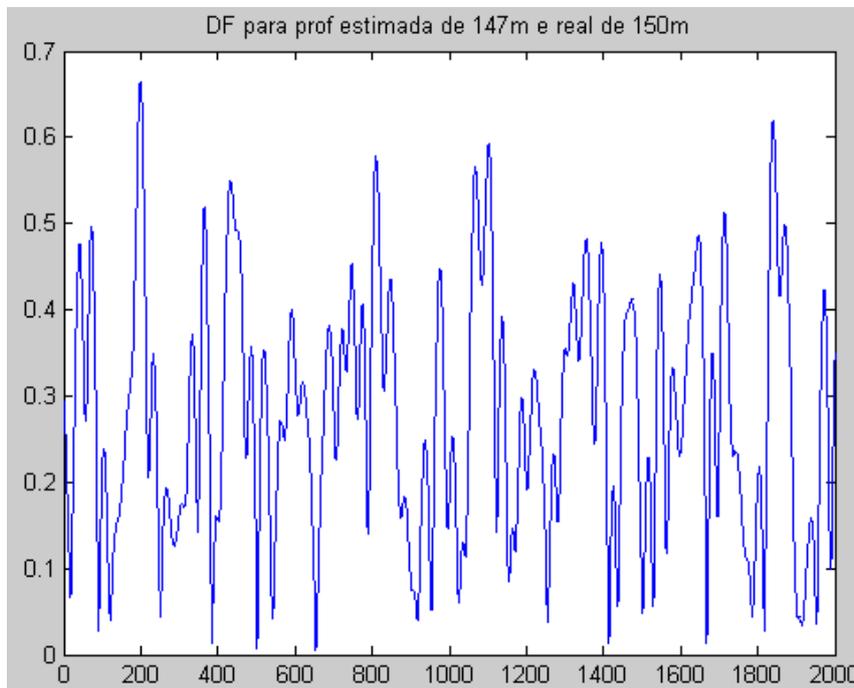


Figura A.15 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de -3m: $h=147m$.

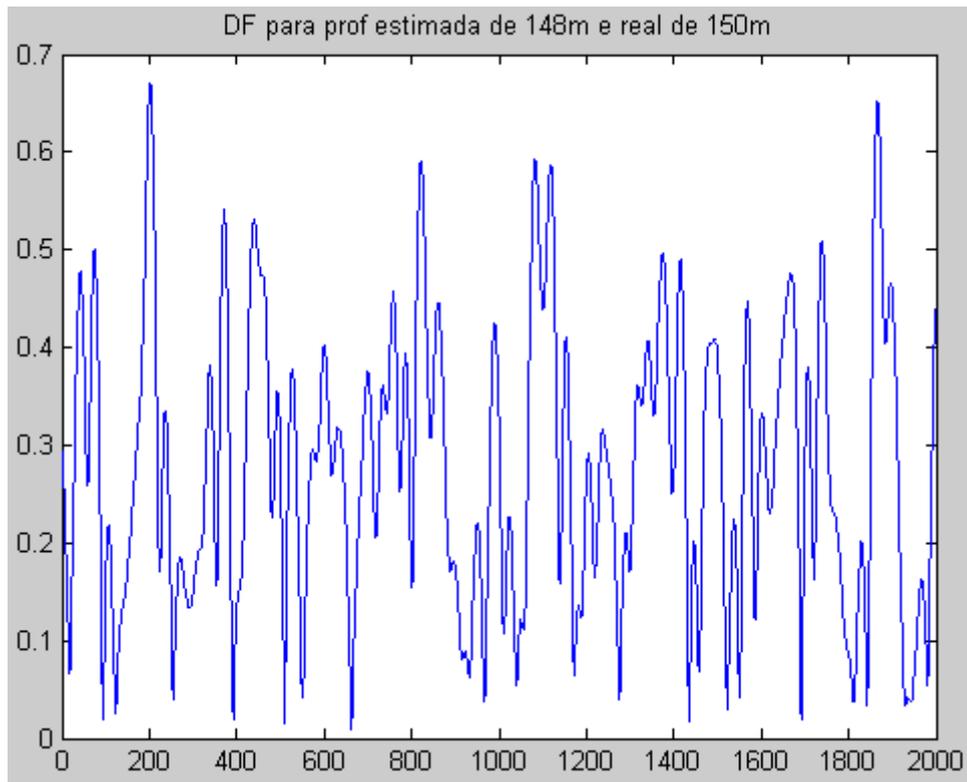


Figura A.16 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de -2m: $h=148\text{m}$.

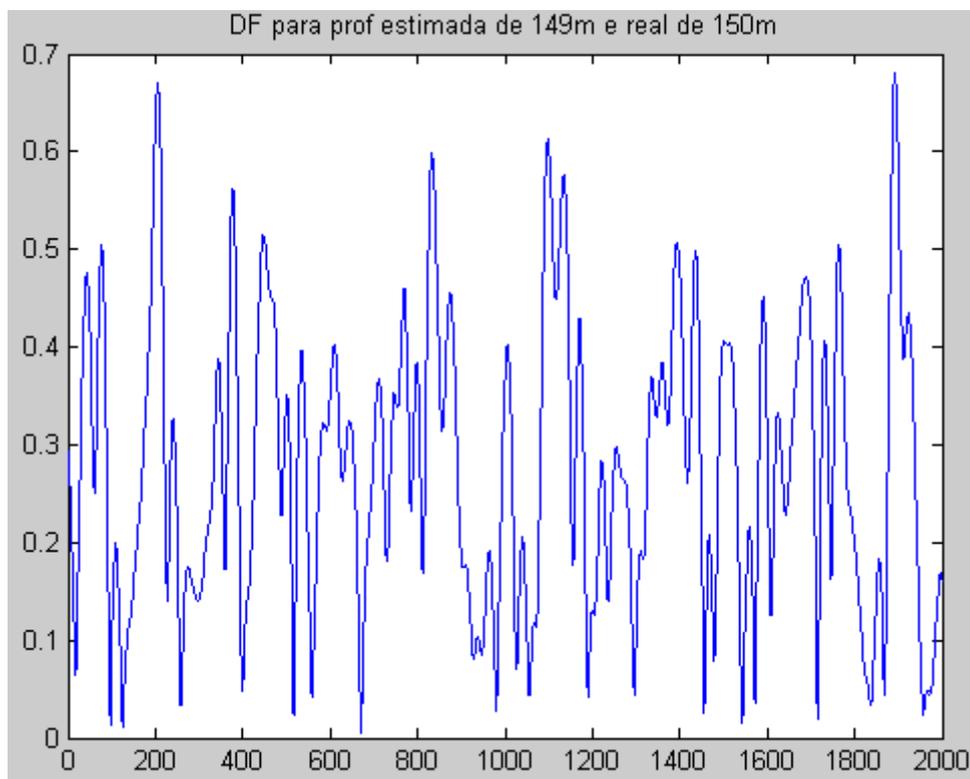


Figura A.17 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de -1m: $h=149\text{m}$.

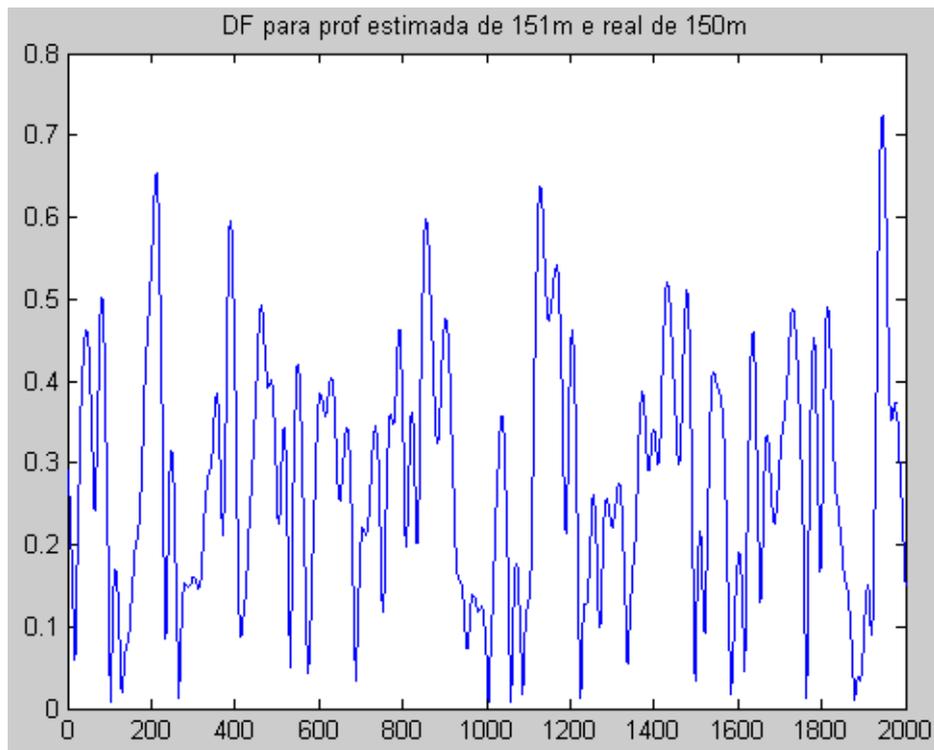


Figura A.18 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de +1m: $h=151m$.

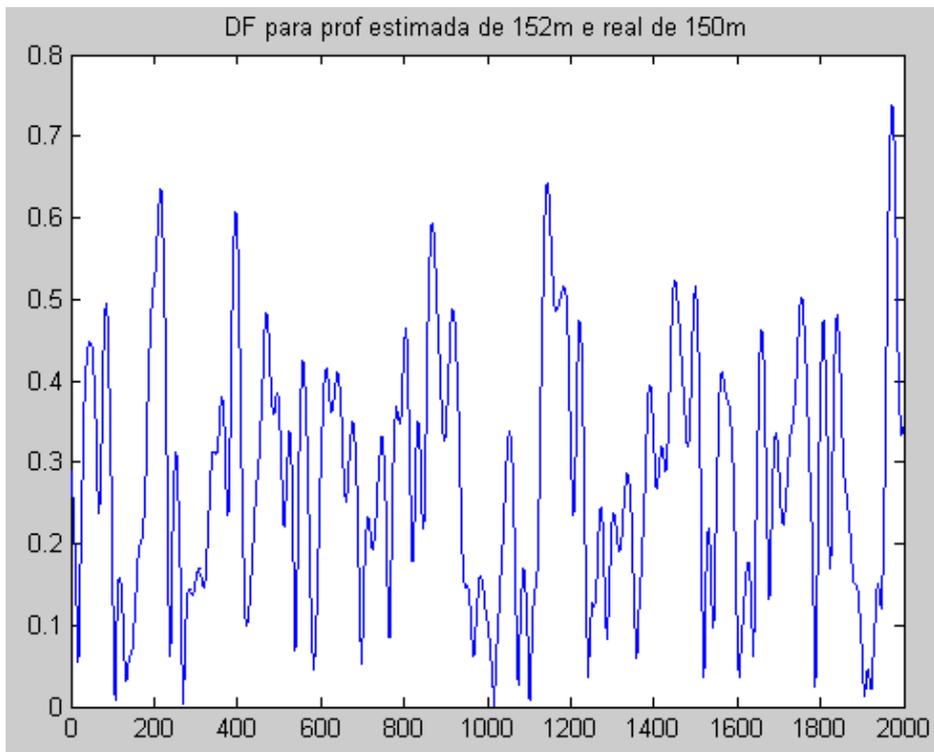


Figura A.19 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de +2m: $h=152m$.

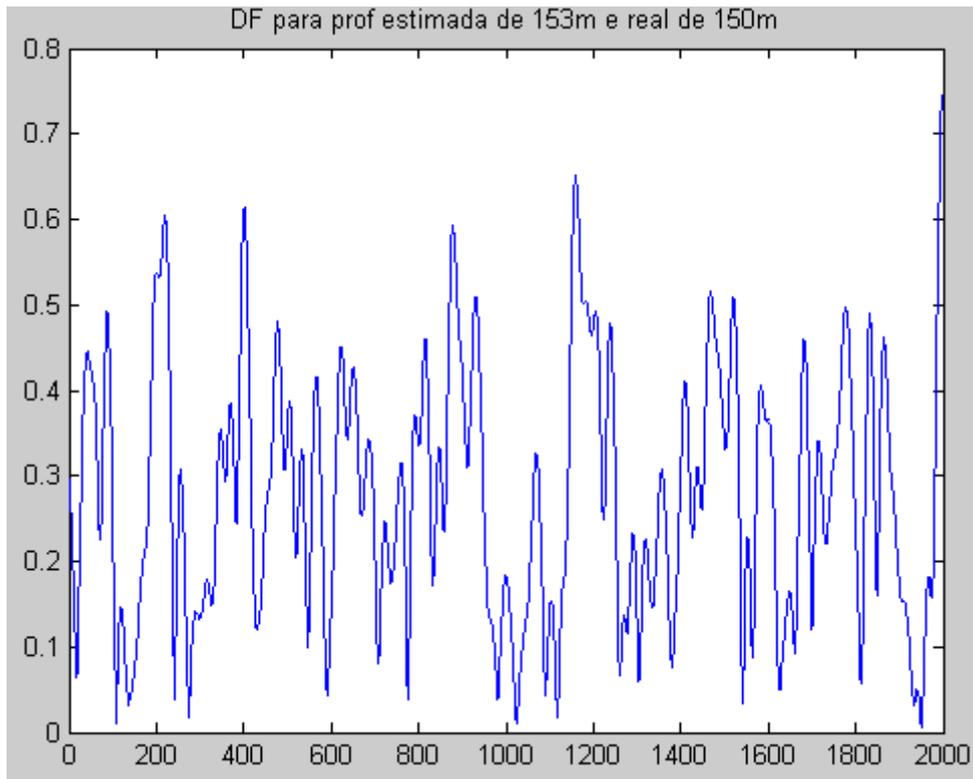


Figura A.20 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de +3m: $h=153\text{m}$.

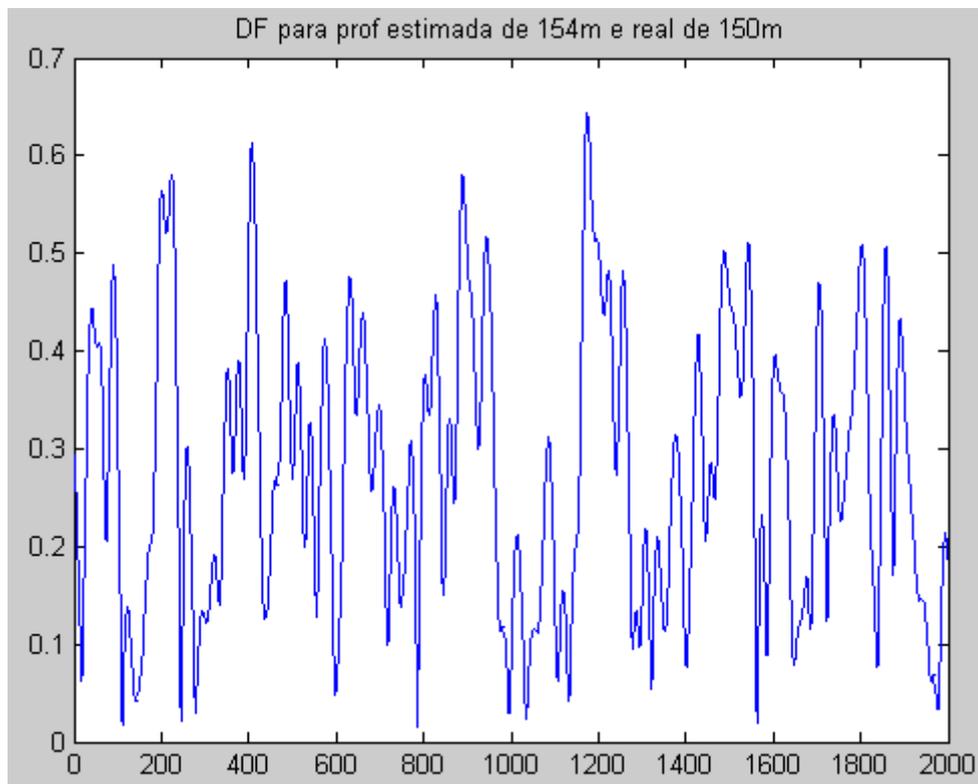


Figura A.21 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de +4m: $h=154\text{m}$.

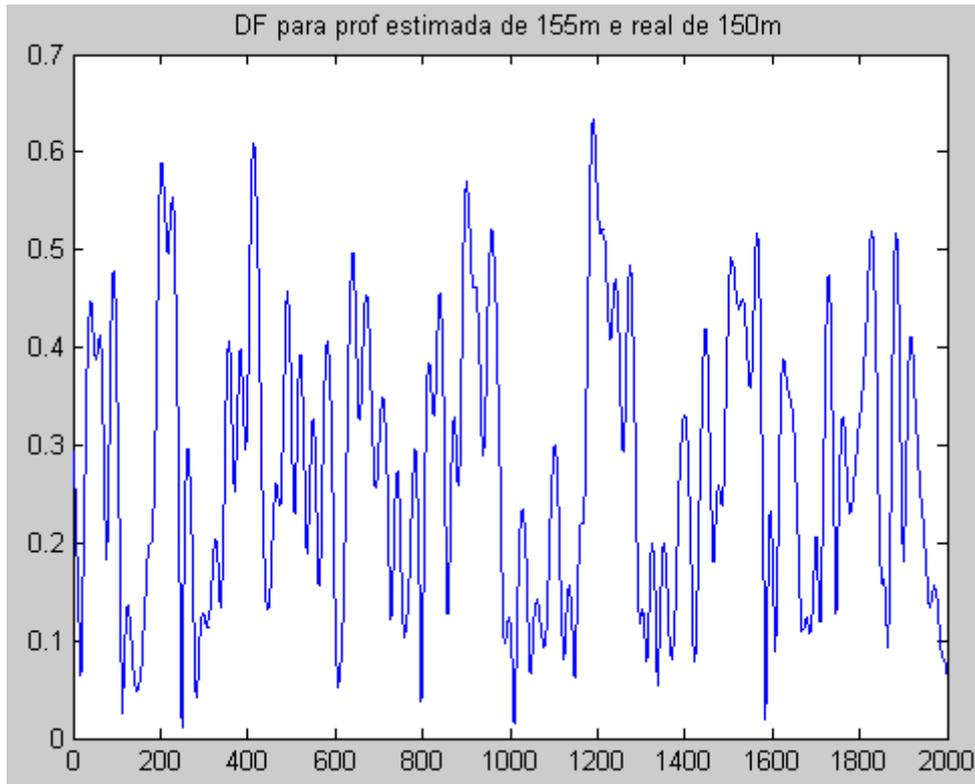


Figura A.22 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de profundidade de +5m: $h=155\text{m}$.

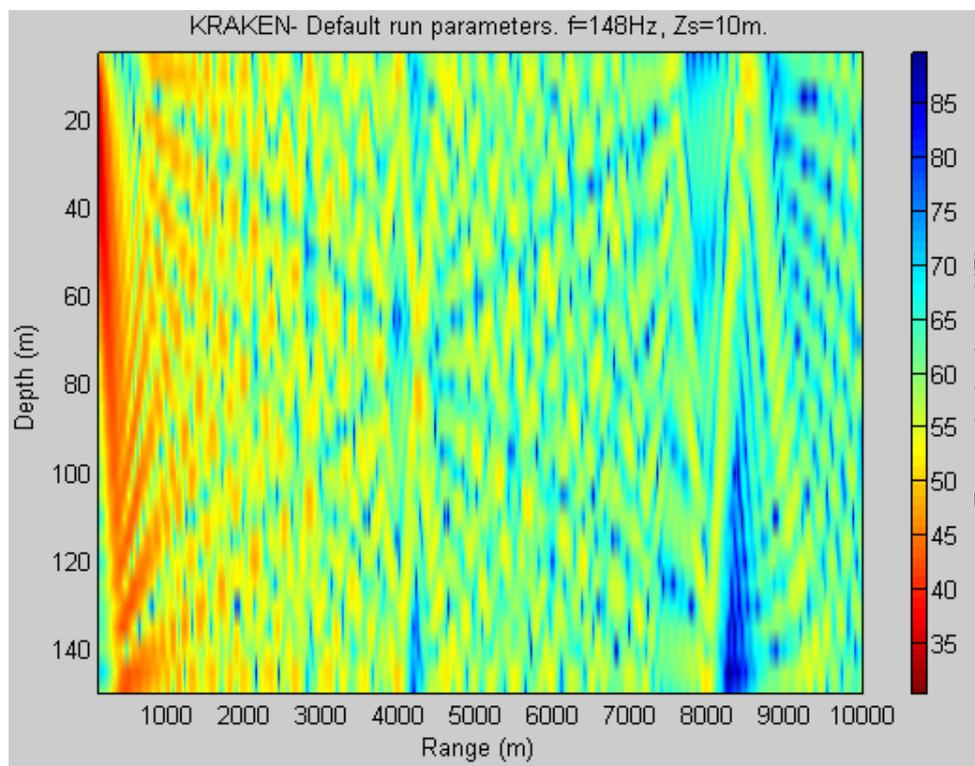


Figura A.23 - Gráfico de perda na propagação em profundidade e distância, para $h=150\text{m}$, 10000m de distância entre fonte e receptor, e perfil de velocidade entre 1490 a 1515 m/s.

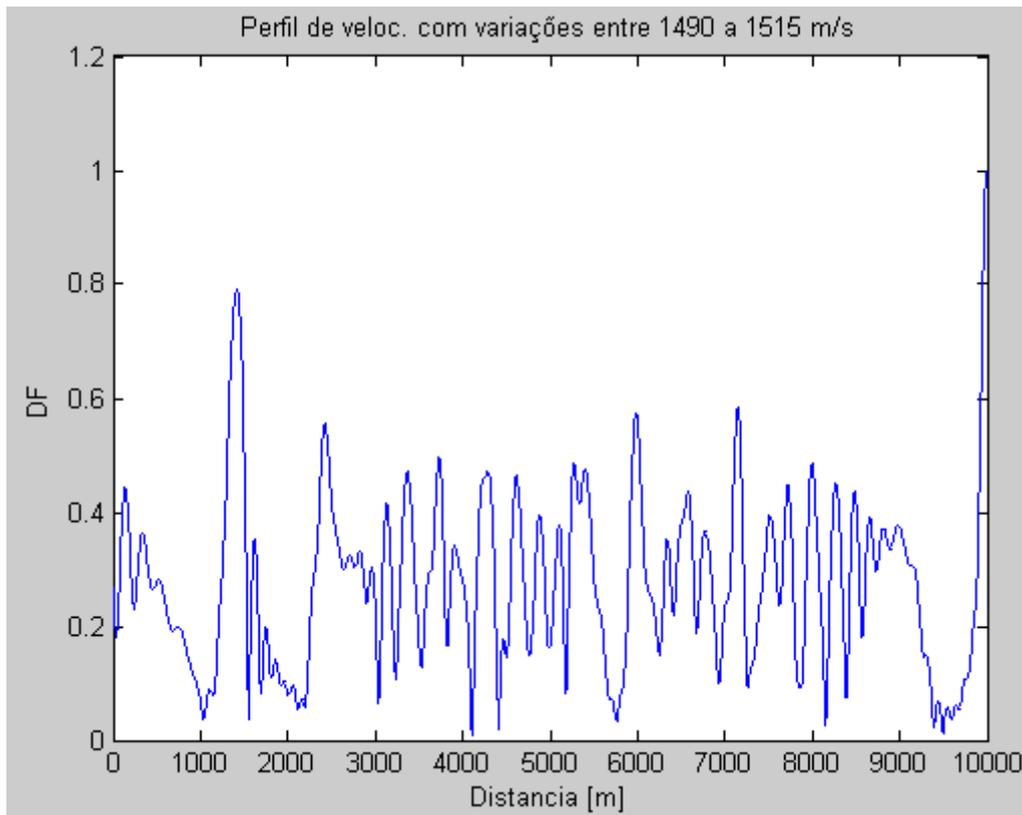


Figura A.24 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de perfil de velocidade na água entre 1490 a 1515 m/s.

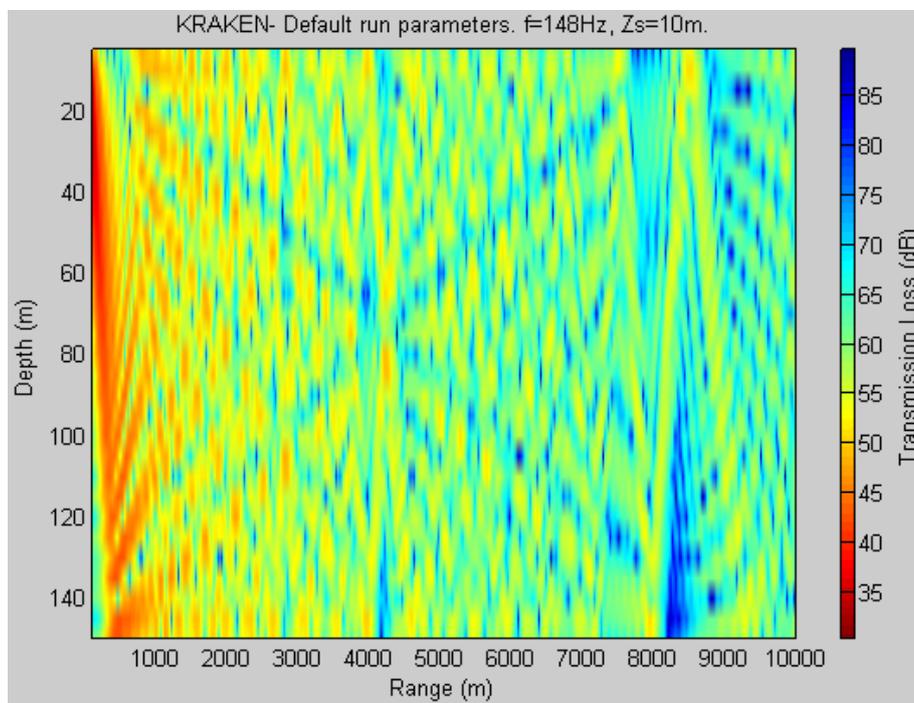


Figura A.25 - Gráfico de perda na propagação em profundidade e distância, para $h=150\text{m}$, 10000m de distância entre fonte e receptor, e velocidade de sedimento entre 1689 a 1789 m/s.

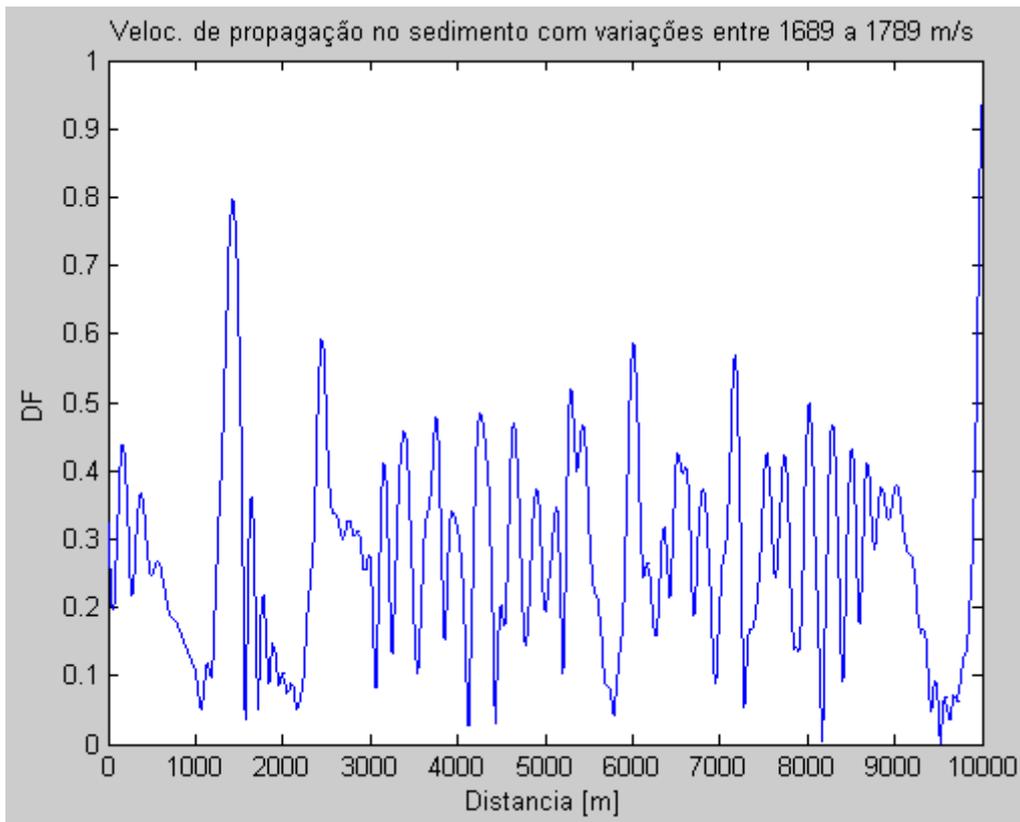


Figura A.26 - Figura de mérito (DF-“Detection Factor”) gerada pelo processador Bartlett para variação de velocidade no sedimento entre 1689 a 1789 m/s.

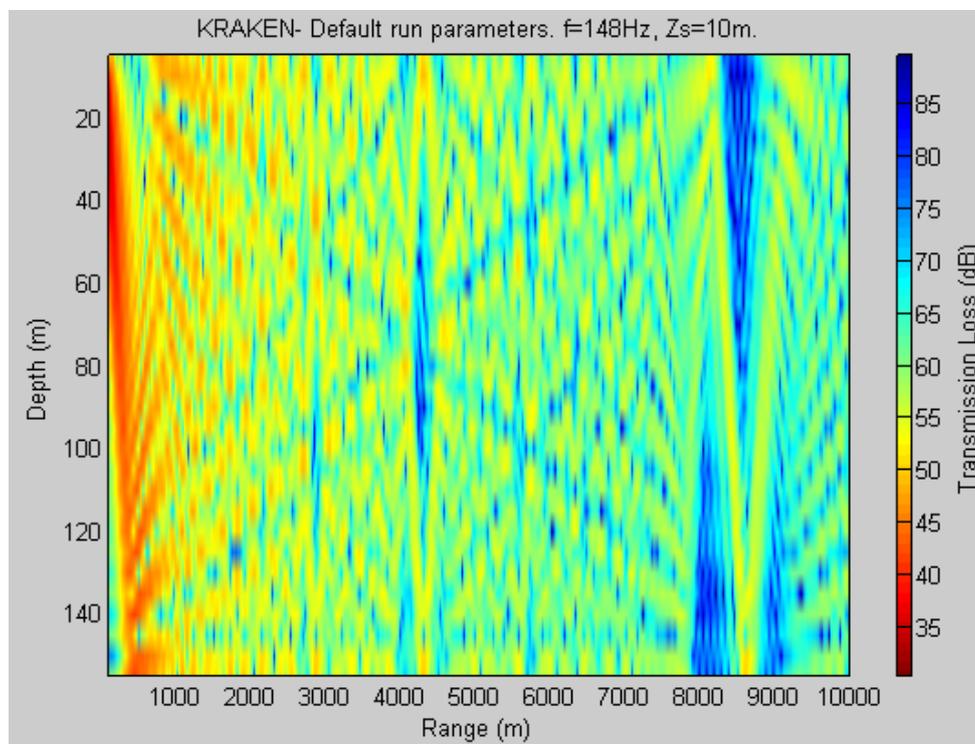


Figura A.27 - Gráfico de perda na propagação em profundidade e distância, para $h=155\text{m}$, 10000m de distância entre fonte e receptor, e velocidade de sedimento entre 1689 a 1789 m/s.

A avaliação das simulações mostra que o parâmetro mais sensível para o desempenho do MFP é a profundidade. Como esse parâmetro também é afetado pelo estado do mar, torna-se muito difícil estimá-lo. Uma abordagem interessante é considerar a “rugosidade” da superfície e do fundo.

Apesar dos resultados de simulação não demonstrarem que o perfil de velocidade de propagação influencia significativamente, a literatura o considera como sendo o segundo parâmetro de maior influência. Contudo, a sua determinação é feita de maneira rotineira, sem complicações para a metodologia com o emprego de XBT ou CTD's.

Quanto ao tipo de fundo, observa-se que variações entre 5 e 10% do valor da velocidade de propagação não alteram a eficiência do método. Este fato é confirmado pela literatura. Mas, deve ser feita uma avaliação da estrutura do fundo. Isto é, qual a sua composição, o número de camadas e as respectivas espessuras. Somente assim, pode-se prosseguir com a avaliação dos parâmetros do fundo. É importante determinar qualitativamente o quanto se erra ao considerar um fundo simples (com camada absorvedora única), quando na verdade, a sua composição é complexa, estratificada.

Então, para realizar uma simulação mais complexa, são apresentados resultados de simulação para um perfil real com gradiente negativo forte com trecho de isovelocidade, comparando-se com um perfil teórico, descrito somente pelo gradiente. Acrescenta-se, também, a avaliação de um fundo estimado igual ao anterior, com um fundo real estratificado.

A tabela A.2 apresenta o perfil de velocidade de propagação real e o estimado. O estimado possui uma isóclina até 30 m, diferentemente do real, que é de 40m. As tabelas A.3 e A.4 apresentam os dados utilizados para simulação com tipos de fundo real e simulado.

Tabela A.2 – Dados da simulação complementar do perfil de velocidade de propagação.

Profundidade Real [m]	Velocidade Real [m/s]	Profundidade Estimada [m]	Velocidade Estimada [m/s]
0	1525	0	1530
40	1525	30	1530
50	1520	50	1525
60	1518	60	1520

80	1517	80	1512
100	1515	100	1510
120	1510	120	1508
150	1508	150	1505

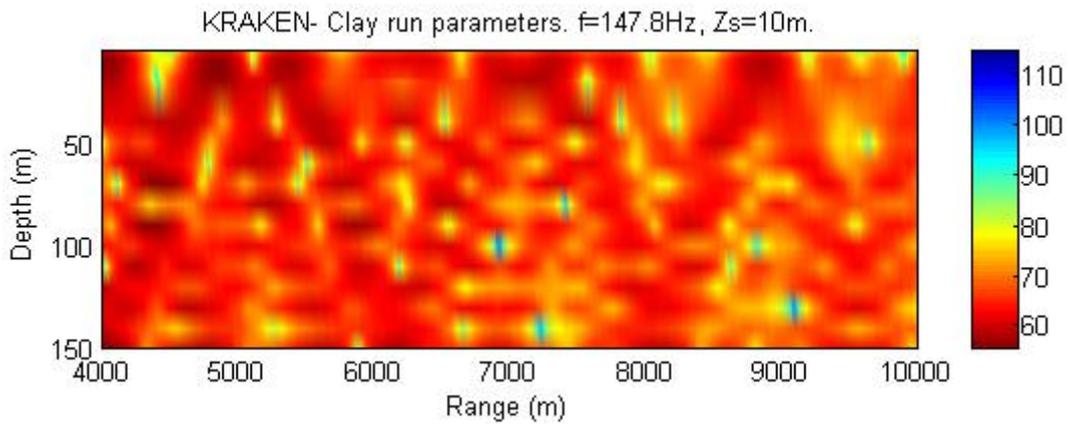


Figura A.28 - Gráfico de perda na propagação em profundidade e distância para o perfil real.

A figura A.30 reforça a importância da aquisição do perfil de velocidade de propagação na água durante a determinação da distância. A utilização de parâmetros de banco de dados implica em desempenho fraco do MFP.

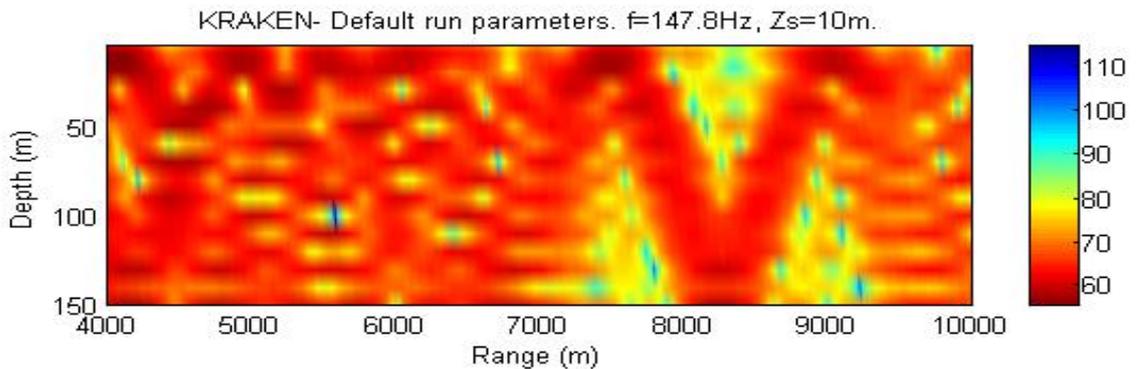


Figura A.29 - Gráfico de perda na propagação em profundidade e distância para o perfil estimado.

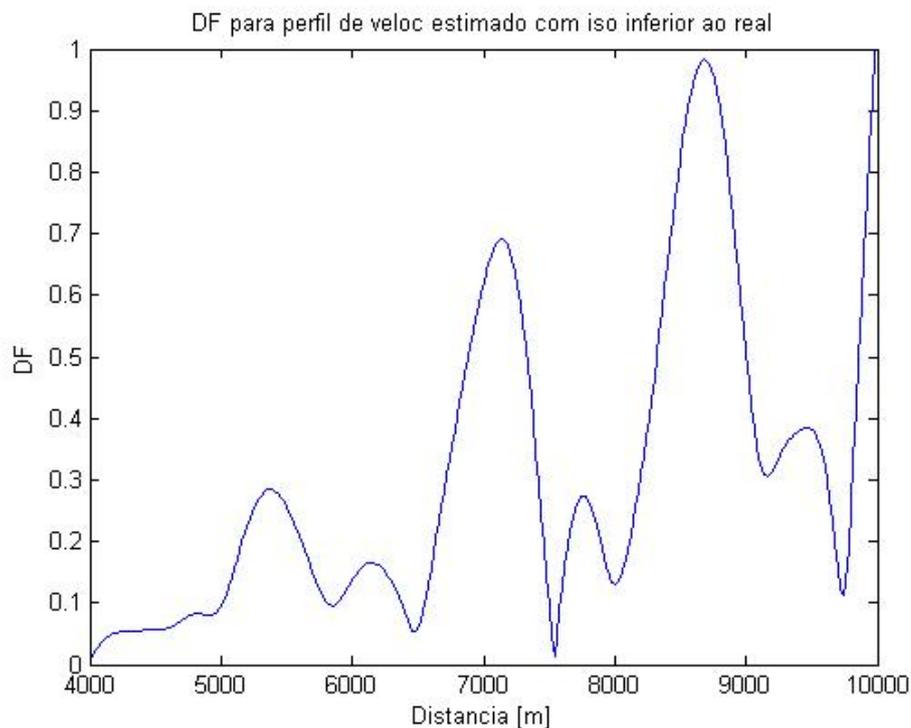


Figura A.30 – Resultado do processador Bartlett com perfil de velocidade com isóclina diferente da real. O pico máximo permanece na distância correta de 10000 m, mas em 8850 m aparece um outro pico que pode gerar ambigüidade na solução.

Tabela A.3 - Dados da simulação complementar do fundo real.

Profundidade [m]	Velocidade [m/s]	Densidade [g/cm³]	Atenuação [dB/λ]
Real	Real	Real	Real
0	1520	1,75	0,13
2,5	1600	1,75	0,13
∞	1580	1,8	0,15

Tabela A.4 - Dados da simulação complementar do fundo estimado (sem subfundo).

Profundidade [m]	Velocidade [m/s]	Densidade [g/cm³]	Atenuação [dB/λ]
Estimada	Estimada	Estimada	Estimada
0	1580	1,8	0,15

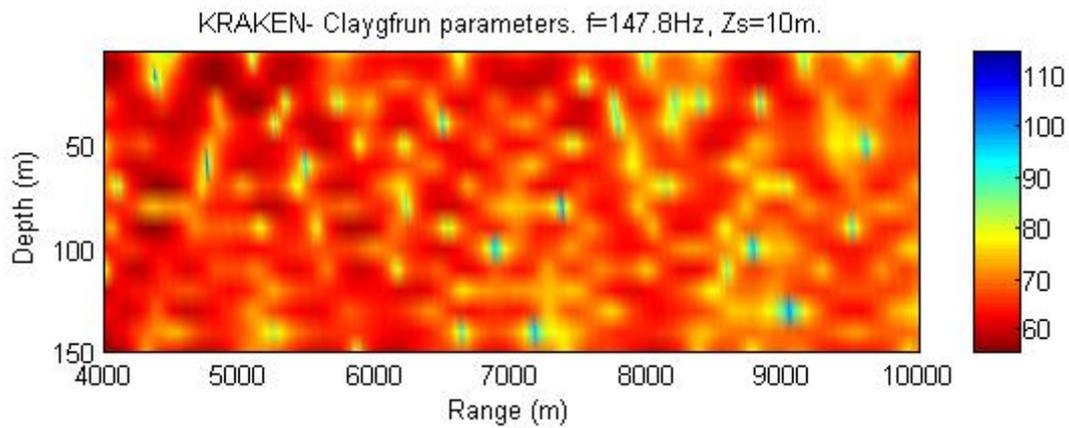


Figura A.31 - Gráfico de perda na propagação em profundidade e distância para o perfil do fundo estimado.

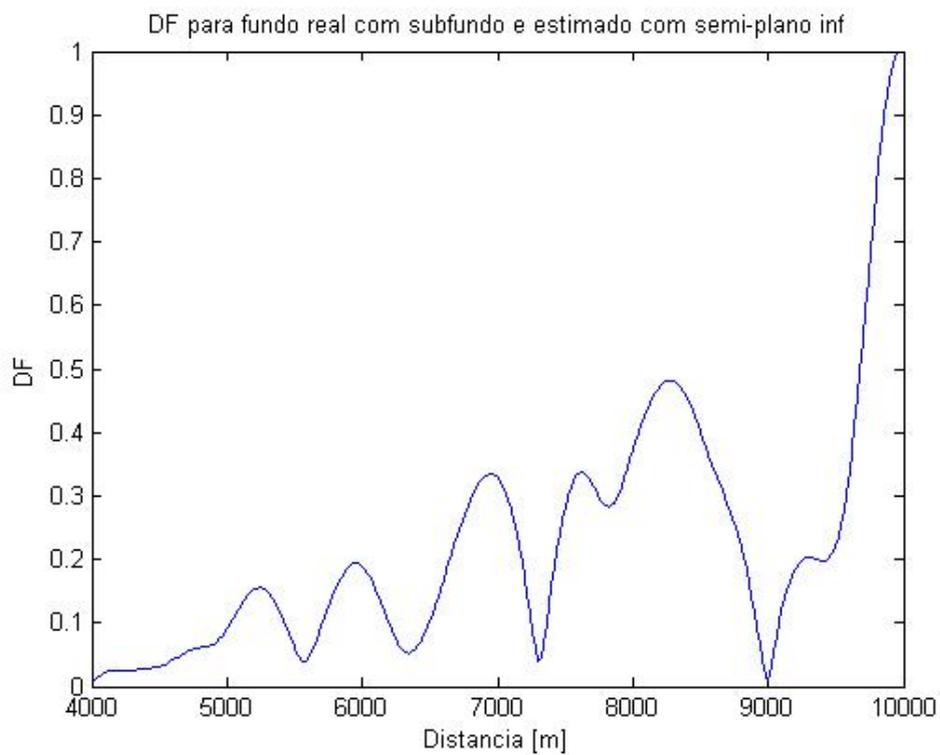


Figura A.32 – DF para fundo real constituído de subfundo, e estimado, por semi-plano infinito. O pico máximo permanece em 10000 m, sem alteração provocada por uma especificação maior do fundo.

2. Espectro da réplica do experimento INTIMATE'96

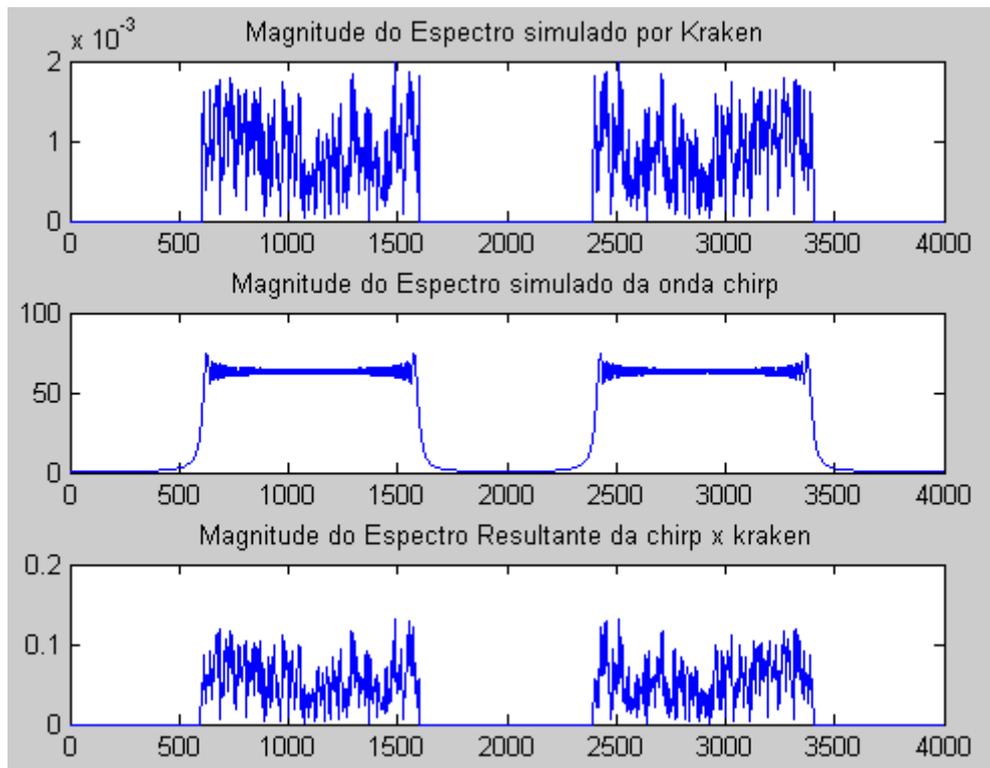


Figura A.35 – Espectro da réplica do experimento INTIMATE'96. (a) Espectro gerado pela síntese de Fourier. (b) Espectro de uma onda “chirp” linear. (c) Espectro resultante da composição da forma da onda “chirp” com a réplica.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)