



LOCALIZAÇÃO DE FONTES SONORAS EM ÁGUAS RASAS COM USO DE
UM ÚNICO ARRANJO DE HIDROFONES EM LINHA POR MEIO DE
MODELAGEM ACÚSTICA TRIDIMENSIONAL

Vicente Barroso Junior

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Marcos Nicolás Gallo
Orlando Camargo Rodríguez

Rio de Janeiro
Março de 2018

LOCALIZAÇÃO DE FONTES SONORAS EM ÁGUAS RASAS COM USO DE
UM ÚNICO ARRANJO DE HIDROFONES EM LINHA POR MEIO DE
MODELAGEM ACÚSTICA TRIDIMENSIONAL

Vicente Barroso Junior

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.

Prof. Orlando Camargo Rodríguez, Ph.D.

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.

Prof. Luiz Gallisa Guimarães, D.Sc.

Prof. William Soares Filho, D.Sc.

Prof. Arthur Ayres Neto, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Barroso Junior, Vicente

Localização de fontes sonoras em águas rasas com uso de um único arranjo de hidrofones em linha por meio de modelagem acústica tridimensional/Vicente Barroso Junior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XXI, 172 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Marcos Nicolás Gallo

Orlando Camargo Rodríguez

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 160 – 172.

1. localização de fontes sonoras. 2. modelagem acústica tridimensional. 3. processamento por campo casado. I. Gallo, Marcos Nicolás *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*Dedico este trabalho a minha
amada esposa Arleuda Barroso e
àqueles que sempre estiveram ao
meu lado me amparando em
todas as fases de minha vida
acadêmica e profissional: meus
queridos pais Vicente Barroso e
Vera Lucia e minha irmã Vera
Cecília Barroso.*

Agradecimentos

Inicialmente a Deus, por ter me concedido a saúde física e mental que permitisse levar a cabo esta tarefa.

A meus pais Vicente Barroso e Vera Lucia, por terem me tornado no que hoje sou, pelo amor e educação que me possibilitaram chegar até aqui.

A minha irmã Vera Cecília, pelo carinho, incentivo e pelo apoio incondicional prestado sempre que necessário.

A minha esposa Arleuda Barroso, pelo amor sempre recebido, amparo e compreensão por meus momentos de ausência em prol deste trabalho.

À Marinha do Brasil, por ter me concedido a oportunidade de realizar este doutorado e o desenvolvimento de parte de minhas pesquisas junto à UAlg, em Portugal.

Ao Prof. Orlando Rodríguez, da UAlg, pela honra concedida em ter sido meu orientador; e, assim, ter tornado possível a execução deste trabalho, e por ter feito despertar em mim a motivação pela investigação científica e pela modelagem acústica.

Ao Prof. Parente, pela forma amigável com que me orientou e conduziu meus passos desde minha chegada à COPPE até os dias de hoje.

Ao Prof. Luiz Gallisa, pelas valorosas sugestões e por ter me apresentado o embasamento teórico que me possibilitou compreender a modelagem acústica.

Ao Prof. Marcos Gallo, pela forma sempre cortês e atenciosa que me recebeu em todas as ocasiões.

Ao Comandante Marcus Simões, do IEAPM, pela confiança depositada desde antes de meu ingresso neste curso, pelas orientações e pelo convívio amigável.

Ao Prof. Natanael Nunes de Moura, pelos valorosos ensinamentos transmitidos, que marcaram meu contato inicial com a acústica submarina.

Ao Prof. Sérgio Jesus, da UAlg, por ter me recebido no SiPLAB em 2015 e ter permitido o livre acesso à toda a infraestrutura do laboratório, incluindo o acesso remoto aos computadores, mesmo após meu regresso ao Brasil.

Aos Prof. Paulo Felisberto, Paulo Santos e António Silva, da Universidade do Algarve, pelos valorosos ensinamentos e pelo agradável convívio durante o período que estive em Portugal.

À colega Ana Bela Santos, do SiPLAB, pela disponibilidade de sempre ajudar e por ter, pacientemente, ensinado muitas coisas sobre diversos assuntos.

Ao administrador de sistemas Fred Zabel, do SiPLAB, pelo importantíssimo apoio prestado na parte de informática.

Ao amigo de longa data Fernando Marin, pela sincera amizade, pela incansável ajuda recebida por ocasião de minha preparação para o período na Universidade do Algarve e pelo apoio na parte de informática, no contato inicial com o LaTeX e na primorosa revisão do texto da tese.

Ao amigo Hugo Chaves, pelas conversas camaradas e por ter me oferecido a vaga que originou minha pesquisa na Universidade do Algarve.

Ao amigo Lussac Prestes Maia, pela amizade, troca de conhecimentos e por toda ajuda recebida.

Ao amigo Rogério de Moraes Calazan, pelo companheirismo e pela grande ajuda recebida na preparação de meus computadores.

Ao amigo Fábio Contrera, do IEAPM, por ter me apresentado o primeiro contato com o modelo TRACEO.

Ao Comandante Edson Carlos Furtado Magno, ex-diretor do CHM, pela forma profissional, amigável e imparcial com que conduziu minha candidatura ao processo seletivo deste curso de doutorado.

À Sra. Janice Trotte Duhá, pelo reconhecimento da importância deste trabalho e pelo empenho em tentar concretizar um doutorado sanduíche na UAlg.

Às Comandantes Ana Cláudia e Lúcia Artusi, pelo apoio e pelo tratamento amigável e cordial sempre recebido nos assuntos relativos ao Programa Ciência sem Fronteiras.

Ao Comandante Benevides Xavier, pelo incentivo e interesse demonstrado neste trabalho.

Aos Cdr. Paolo Lusiani e Erik Biscotti do Instituto Hidrográfico da Marinha Italiana, pela disponibilização dos dados batimétricos do mar de Elba, fundamentais para realização deste trabalho.

Ao Dr. Leandro Calado, do IEAPM, pela ajuda na tentativa de concretização de um doutorado sanduíche na UAlg.

A todos do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIOc), da COPPE/UFRJ, em especial a Izabel Nogueira e Lilian Peixoto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento, via Programa Ciência sem Fronteiras, de parte de minhas pesquisas junto à Universidade do Algarve.

À equipe desenvolvedora do projeto CoppeTeX que, certamente, me poupou longas horas na normalização e formatação do texto desta tese.

A meus filhos Gabriela e Pedro Vicente, por todas as vezes que me receberam com carinho e com um sorriso confortante e alegre após cada dia de trabalho.

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

LOCALIZAÇÃO DE FONTES SONORAS EM ÁGUAS RASAS COM USO DE
UM ÚNICO ARRANJO DE HIDROFONES EM LINHA POR MEIO DE
MODELAGEM ACÚSTICA TRIDIMENSIONAL

Vicente Barroso Junior

Março/2018

Orientadores: Marcos Nicolás Gallo
Orlando Camargo Rodríguez

Programa: Engenharia Oceânica

A localização de fontes acústicas no mar, desde longa data, tem sido um dos principais temas motivadores das pesquisas na área de acústica submarina. O acelerado crescimento tecnológico alcançado nos dias de hoje, aliado ao notável aumento da capacidade computacional, tem permitido o desenvolvimento de novos métodos para solução de muitos dos clássicos problemas inversos em acústica submarina. Apresenta-se, nesta tese, uma metodologia para localização tridimensional de fontes em águas rasas, com emprego de recentes modelos acústicos tridimensionais, combinado com tradicionais técnicas de Processamento por Campo Casado. Propõe-se tirar proveito da quebra da simetria azimutal do ambiente, decorrente das variações batimétricas, a fim de se conhecer a terceira dimensão do problema - a direção da fonte. A *performance* da metodologia proposta é avaliada por meio de dados experimentais coletados sobre um único arranjo vertical de hidrofones, em uma região no mar ao norte da ilha de Elba, no litoral oeste da Itália. Os resultados obtidos indicam ser possível localizar uma fonte estática de banda estreita, em termos de distância, profundidade e marcação, dentro de uma margem de erro considerada plenamente aceitável, superando todos os resultados, disponíveis na literatura, sobre localizações pretéritas, realizadas por meio de modelos bidimensionais e com uso do mesmo conjunto de dados experimentais aqui empregados.

Palavras-chave: localização de fontes acústicas, modelagem acústica tridimensional, processamento por campo casado

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

ACOUSTIC SOURCE LOCALIZATION IN SHALLOW WATER USING A
SINGLE LINE ARRAY OF HYDROPHONES BY THREE-DIMENSIONAL
ACOUSTIC MODELING

Vicente Barroso Junior

March/2018

Advisors: Marcos Nicolás Gallo
Orlando Camargo Rodríguez

Department: Ocean Engineering

The source acoustic localization at sea, since a long time, has been one of the main motivating themes of research in underwater acoustics. Nowadays, the fast technological advancements achieved together with the remarkable increase in computational power have allowed the development of new methods for solving many of the classic inverse problems in underwater acoustics. In this thesis, we present a method for three-dimensional shallow water source localization, using recent three-dimensional acoustic models combined with traditional Matched-Field Processing techniques. The breaking of azimuthal symmetry due to variations in environmental bathymetry is proposed as a mean to determine the bearing of the acoustic source in three dimensions. The performance of the proposed methodology is evaluated with experimental data collected on a single vertical line array in North of the Elba island, off the Italian west coast. The obtained results show that it is possible to locate a stationary narrow-band source in terms of distance, depth and bearing within fully acceptable errors, overcoming all the previous results available in the literature regarding source localization with two-dimensional models and based on the acoustic data set here considered.

keywords: source acoustic localization, three-dimensional acoustic modeling, matched-field processing

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Símbolos	xviii
Lista de Abreviaturas	xx
1 Introdução	1
2 Revisão da Literatura	7
2.1 Localização de fontes	8
2.2 Evolução da Modelagem Acústica 3D	13
2.3 Alguns trabalhos desenvolvidos na COPPE	19
2.4 Estado da Arte	20
3 Metodologia	23
3.1 Experimento no Mar ao Norte de Elba	25
3.2 Modelagem da Propagação Acústica	30
3.3 Função de Ambiguidade	31
4 Modelagem Acústica	34
4.1 Teoria dos Modos Normais	37
4.1.1 Solução de Modos Normais	41
4.1.2 Cálculos <i>range-dependent</i>	44
4.1.3 Limitações e Potencialidades dos Modelos de Modos	46
4.1.4 KRAKEN3D	47
4.2 Teoria de Raios	51
4.2.1 Solução da Equação da Eikonal	54
4.2.2 Solução da Equação de Transporte	56
4.2.3 Limitações e Potencialidades dos Modelos de Raios	63
4.2.4 BELLHOP3D	65
4.2.5 TRACEO3D	69

4.3	Domínios de Aplicabilidade	75
5	Localização 3D Sintética	76
5.1	Localização Sintética com o KRAKEN3D	76
5.2	Localização Sintética com o BELLHOP3D	85
5.3	Localização Sintética com o TRACEO3D	95
5.3.1	Localização com <i>array</i> vertical	96
5.3.2	Localização com <i>array</i> horizontal	100
6	Resultados Experimentais e Discussão	105
6.1	Localização com o KRAKEN3D	107
6.1.1	Localização na Fatia Vertical	107
6.1.2	Localização Tridimensional	114
6.2	Localização com o BELLHOP3D	126
6.2.1	Localização na Fatia Vertical	127
6.2.2	Localização Tridimensional	132
6.3	Localização com o TRACEO3D	143
6.3.1	Localização na Fatia Vertical	143
6.3.2	Localização Tridimensional	148
7	Conclusão e Sugestões para Futuros Trabalhos	157
	Referências Bibliográficas	160

Lista de Figuras

2.1	3DMFP em um cenário de águas profundas: (a) volume de ambiguidade de Bartlett, com representação do <i>array</i> tripóde; e (b) corte horizontal na profundidade da fonte, $z_s = 300$ m. Fonte: JENSEN <i>et al.</i> [11], p. 750.	10
2.2	Diferentes configurações da geometria de <i>arrays</i> usados em experimentos: (a) <i>Tripod Array</i> ; (b) <i>Twin Vertical Array</i> ; e (c) <i>Inverted "T" Array</i>	11
2.3	Traçado de raios típico de um ambiente de águas rasas no litoral de Kaneohe, no Hawaii. Fonte: BUCKER [38], p. 2438.	17
3.1	Esquema do 3DMFP. Fonte: adaptado de KUPERMAN e LYNCH [5], p. 59.	24
3.2	Área do experimento no mar ao norte da ilha de Elba. O ponto "VA" indica a posição de lançamento do <i>array</i> vertical; a posição da fonte estática é representada por uma estrela. Fonte: adaptado de GINGRAS e GERSTOFT [63], p. 3590.	26
3.3	Dispositivo de fundeio do <i>array</i> utilizado no experimento no mar de Elba. Fonte: adaptado de GINGRAS e GERSTOFT [63], p. 3590.	27
3.4	Dispositivo de fundeio da fonte empregado no experimento no mar de Elba. Fonte: adaptado de GINGRAS [64], p. 8.	28
3.5	SSP e parâmetros geoacústicos médios característicos do mar de Elba. Fonte: adaptado de GINGRAS e GERSTOFT [63], p. 3592.	29
3.6	Espectro do sinal recebido no último hidrofone do <i>array</i> , a partir das transmissões da fonte estática (335 Hz). A linha tracejada indica a frequência mais energética (331 Hz).	30
4.1	Excitação periódica de um guia de ondas: (a) reflexão da frente da onda acústica na superfície; e (b) formação do padrão de interferências. Os círculos vermelhos representam as interferências construtivas da alta pressão e os círculos brancos, as de baixa pressão. Fonte: adaptado de COATES [76], p. 9.4.	38
4.2	Propagação em um guia de ondas teórico homogêneo. Cinza claro: espectro discreto ou campo de modos normais (energia de longo alcance); e cinza escuro: espectro contínuo ou de campo próximo. Fonte: adaptado de JENSEN <i>et al.</i> [11], p. 42.	39

4.3	Uso do KRAKEN3D no cenário da Corrente do Golfo: (a) radiais sobre a malha de triangulação. Fonte: JENSEN <i>et al.</i> [11], p. 424; e (b) campo horizontal de TL (obtido a partir da execução do <i>script</i> “runtests.m” do MATLAB, atinente ao caso do teste “3D Atlantic” [60]).	50
4.4	Componentes diferenciais da distância ds percorrida pela onda propagante no caso do problema bidimensional (plano rz) com simetria cilíndrica. Fonte: RODRÍGUEZ [81], p. 10	55
4.5	Coordenadas do raio nas proximidades da fonte pontual. Fonte: RODRÍGUEZ [81], p. 13.	56
4.6	Tubo de raios e destaque do Jacobiano associado à seção reta em diferentes posições do espaço. Fonte: adaptado de JENSEN <i>et al.</i> [11], p. 164.	57
4.7	Aproximação de Feixes Gaussianos: decaimento da amplitude do feixe na direção normal à trajetória do raio. Fonte: adaptado de RODRÍGUEZ [81], p. 15.	58
4.8	Aproximação de Feixes Gaussianos 3D: decaimento da amplitude do feixe no plano normal à trajetória do raio. As direções e_1 e e_2 indicam as direções normais ao eixo do raio.	60
4.9	Construção dos feixes geométricos <i>hat-shaped</i> ao longo dos raios. Fonte: adaptado de JENSEN <i>et al.</i> [11], p. 173.	62
4.10	Aproximação dos Feixes <i>hat-shaped</i> 3D: decaimento linear da amplitude do feixe no plano normal à trajetória do raio.	68
4.11	Vetores de polarização definidos no equacionamento da Aproximação de Feixes Gaussianos. Fonte: adaptado de RODRÍGUEZ [81], p. 15.	71
5.1	Batimetria considerada no domínio de modelagem no mar ao norte da ilha de Elba. Asterisco: posição de lançamento da fonte; e quadrado: posição de lançamento do <i>array</i> vertical.	78
5.2	Malha de triangulação considerada pelo KRAKEN3D na modelagem do mar ao norte da ilha de Elba. Asterisco: posição da fonte; quadrado: posição do <i>array</i> vertical; e circunferência verde: ponto de coleta do SSP.	79
5.3	Localização sintética com o KRAKEN3D na fatia vertical do campo de pressão na marcação 270° (ângulo em relação à posição da fonte).	80
5.4	Posições candidatas da fonte no plano horizontal consideradas na geração dos campos de réplicas pelo KRAKEN3D. Ao fundo: campo de pressão produzido pelo KRAKEN3D por uma fonte acústica posicionada na profundidade de 75 m e transmitindo na frequência de 331 Hz.	81
5.5	Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: volume de ambiguidade gerado com uso do estimador de Bartlett.	82

5.6	Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na marcação 90° , indicando a fonte localizada na distância de 5440 m e profundidade de 75 m.	83
5.7	Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na profundidade 75 m, indicando a fonte localizada na distância de 5440 m e azimute de 90°	83
5.8	Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: (a) corte do cilindro de ambiguidade na profundidade de 75 m; e (b) detalhamento da superfície do cilindro. A linha cheia indica a origem dos ângulos horizontais (0°) e a linha tracejada indica a marcação onde a fonte foi localizada (90°).	84
5.9	Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na distância de 5440 m, indicando a fonte localizada na profundidade de 75 m e marcação de 90°	85
5.10	Acima: fundo estratificado característico do ambiente do mar de Elba composto por duas camadas, tal como “visto” pelo modelo de modos KRAKEN3D. Abaixo: modelo equivalente de fundo composto por camada única, tal como “visto” pelos modelos de raios.	86
5.11	Localização sintética com o BELLHOP3D na fatia vertical de marcação 90° : (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. A seta indica a posição calculada da fonte.	88
5.12	Localização sintética com o BELLHOP3D na fatia vertical de marcação 90° com uso do perfil <i>isovelocity</i>	89
5.13	Localização sintética com o BELLHOP3D na fatia vertical de marcação 90° com uso do perfil <i>isovelocity</i> e 200 raios lançados.	90
5.14	Localização sintética com o BELLHOP3D na fatia vertical de marcação 90° com uso do perfil real de velocidade do som e 200 raios lançados. A seta indica a posição calculada da fonte.	91
5.15	Localização 3D sintética com o BELLHOP3D: corte no plano da distância 5440 m. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. A seta indica a posição calculada da fonte.	93
5.16	Localização 3D sintética com o BELLHOP3D: corte da plotagem polar no plano de profundidade igual a 75 m. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais (0°); e linha tracejada: direção calculada da fonte (90°).	94
5.17	Localização sintética com o TRACEO3D na fatia vertical do campo de pressão na marcação 90° com uso do <i>array</i> vertical: (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. A seta indica a posição calculada da fonte.	97
5.18	Localização 3D sintética com o TRACEO3D e uso do <i>array</i> vertical: corte no plano da distância 5440 m. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Setas: posição calculada da fonte.	99

5.19	Localização 3D sintética com o TRACEO3D e uso do <i>array</i> vertical: corte da plotagem polar no plano de profundidade igual a 75 m. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais (0°); e linha tracejada: direção calculada da fonte (90°).	100
5.20	Localização sintética com o TRACEO3D na fatia vertical na marcação 90° com uso do <i>array</i> horizontal. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte.	101
5.21	Localização 3D sintética com o TRACEO3D e uso do <i>array</i> horizontal: corte no plano da distância 5440 m. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. A seta indica a posição calculada da fonte.	102
5.22	Localização 3D sintética com o TRACEO3D e uso do <i>array</i> horizontal: corte da plotagem polar no plano de profundidade igual a 75 m. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais (0°); e linha tracejada: direção calculada da fonte (90°).	103
6.1	Localização 2D com o KRAKEN3D (sem calibração) e com uso de dados experimentais. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.	108
6.2	SSP's prescritos para o KRAKEN3D: (a) perfis 1 (proximidades da fonte) e 2 (proximidades do <i>array</i>); e (b) distribuição dos SSP's pelos nós da malha. Circunferências azuis: nós que receberam o SSP 1; circunferências pretas: nós que receberam o SSP 2; e circunferências com cruz: pontos de coleta dos SSP's. . . .	111
6.3	Localização 2D com o KRAKEN3D na fatia vertical. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição. . . .	113
6.4	Localização com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na marcação onde a fonte foi localizada (92°). (a) perspectiva 3D; e (b) visão plana. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.	120
6.5	Localização com o KRAKEN3D: corte do cilindro de ambiguidade na profundidade onde a fonte foi localizada (81 m). (a) perspectiva 3D; e (b) detalhamento da "tampa" do cilindro. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais; e linha tracejada: marcação onde a fonte foi localizada (92°).	121
6.6	Localização com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na distância onde a fonte foi localizada (5420 m). (a) perspectiva 3D; e (b) visão plana. Seta: posição calculada da fonte.	122

6.7	Batimetria considerada no domínio de modelagem com destaque de locais com gradientes batimétricos relativamente altos, ao longo da distância receptor-fonte de 5420 m. O quadrado preto indica o ponto de lançamento do <i>array</i>	123
6.8	Erro na localização calculada pelo BELLHOP3D em função de diferentes geometrias do feixe irradiado. Circunferências simples: localizações satisfatórias; circunferências duplas: localizações satisfatórias que apresentam menor erro; e seta: localização satisfatória que apresenta menor erro e maior Bartlett.	128
6.9	Localização 2D com o BELLHOPD na fatia vertical (sem equidistanciamento de pontos do SSP). Setas: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.	130
6.10	Localização 2D com o BELLHOPD na fatia vertical (com equidistanciamento de pontos do SSP). Setas: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.	131
6.11	Pontos de posicionamento de fontes selecionados para serem utilizados no cálculo do modelo equivalente do fundo por meio da otimização BELLHOP3D vs. KRAKEN3D. Ao fundo, é representado o campo horizontal de TL gerado pelo KRAKEN3D na profundidade de 80 m.	134
6.12	Volume de Bartlett gerado pela otimização BELLHOP3D vs. KRAKEN3D. O cubo está representado por meio dos cortes $\alpha_p = 0$, $\rho = 3,5 \text{ g/cm}^3$ e $c_p = 1555 \text{ m/s}$. A circunferência branca indica o ponto de melhor ajustamento.	135
6.13	Erro na localização calculada pelo BELLHOP3D em função de diferentes geometrias do feixe, com uso do modelo equivalente do fundo calculado por meio da otimização BELLHOP3D vs. KRAKEN3D. Circunferências simples: localizações satisfatórias; e circunferência dupla indicada pela seta: localização satisfatória que apresenta menor erro e maior Bartlett.	136
6.14	Localização com o BELLHOP3D: corte do volume de ambiguidade na marcação onde a fonte foi localizada (90°). (a) perspectiva 3D; e (b) visão plana. Setas: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.	138
6.15	Localização com o BELLHOP3D: corte do cilindro de ambiguidade na profundidade onde a fonte foi localizada (80 m). (a) perspectiva 3D; e (b) detalhamento da “tampa” do cilindro. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais; e linha tracejada: marcação onde a fonte foi localizada (90°).	139
6.16	Localização com o BELLHOP3D: corte do volume de ambiguidade na distância onde a fonte foi localizada (5400 m). (a) perspectiva 3D; e (b) visão plana. Setas: posição calculada da fonte.	140

6.17	Traçados de raios no mar de Elba com uso do BELLHOP3D.	142
6.18	Erro na localização calculada pelo TRACEO3D em função de diferentes geometrias do feixe irradiado. Circunferências simples: localizações satisfatórias; circunferências duplas: localizações que apresentam menor erro; seta: localização que apresenta menor erro e maior Bartlett.	144
6.19	Localização com o TRACEO3D na fatia vertical: (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.	146
6.20	Erro na localização calculada pelo TRACEO3D com uso da equivalência 2D TRACEO vs. KRAKEN [99], em função de diferentes geometrias do feixe irradiado. Circunferências simples: localizações satisfatórias; circunferências duplas: localizações que apresentam menor erro; e seta: localização que apresenta menor erro e maior Bartlett.	149
6.21	Localização com o TRACEO3D: corte no plano da marcação 90°. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.	151
6.22	Localização com o TRACEO3D: corte no plano da distância de 5440 m. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte.	152
6.23	Localização com o TRACEO3D: corte do cilindro de ambiguidade na profundidade onde a fonte foi localizada (80 m). Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais; e linha tracejada: marcação onde a fonte foi localizada (90°).	153
6.24	Traçados de raios no mar de Elba com uso do TRACEO3D	155

Lista de Tabelas

4.1	Domínios de aplicabilidade dos modelos de raios e modelos de modos normais. Fonte: adaptado de ETTER [6], p. 146.	75
6.1	Valores de referência e estimados por algoritmos genéticos dos parâmetros geométricos e ambientais característicos do cenário do mar de Elba	106
6.2	Parâmetros geométricos de referência para avaliação da localização 3D	107
6.3	Localização 2D com o KRAKEN3D, considerando diferentes condições de SSP	112
6.4	Comparação da localização 2D estimada pelo KRAKEN3D perante outros resul- tados pretéritos de localização 2D de fontes no mar de Elba	114
6.5	Localização com o KRAKEN3D considerando diferentes condições de rugosidade interfacial (rodada grosseira)	118
6.6	Localização com o KRAKEN3D considerando diferentes condições de rugosidade interfacial (rodada refinada)	124
6.7	Localização com o KRAKEN3D e uso da gravação de validação considerando diferentes condições de rugosidade interfacial (rodada grosseira)	125
6.8	Localização com o KRAKEN3D e uso da gravação de validação considerando diferentes condições de rugosidade interfacial (rodada refinada)	125
6.9	Geometrias do feixe irradiado no BELLHOP3D que resultaram no menor erro na localização 2D	129
6.10	Localização 2D com o BELLHOP3D considerando diferentes condições de SSP	132
6.11	Resultados das otimizações 3D (BELLHOP3D vs. KRAKEN3D) e 2D (TRACEO vs. KRAKEN) para cálculo do modelo equivalente do fundo no mar de Elba, segundo o critério de Bartlett	134
6.12	Localização com o BELLHOP3D (rodada grosseira)	141
6.13	Localização com o BELLHOP3D (rodada refinada)	141
6.14	Localização com o BELLHOP3D e uso da gravação de validação	142
6.15	Localização 2D com o TRACEO3D	147
6.16	Localização com o TRACEO3D (rodada grosseira)	153
6.17	Localização com o TRACEO3D (rodada refinada)	154
6.18	Localização com o TRACEO3D e uso da gravação de validação	155
6.19	Resumo dos resultados das localizações 3D calculada pelos três modelos	156

Lista de Símbolos

A	Amplitude da onda acústica, p. 52
D	Profundidade local (altura da coluna d'água), p. 8
J	Jacobiano, p. 56
L	Número de <i>snapshots</i> , p. 33
N_f	Número de frequências, p. 32
P	Pressão acústica, p. 36
P_{Δ}	Pressão acústica ao longo de um feixe triangular, p. 62
P_{Bart}	Processador de Bartlett, p. 32
S	Sinal transmitido pela fonte acústica, p. 36
W	Meia largura do feixe acústico, p. 62
Φ	Função <i>hat-shaped</i> , p. 62
α_p	Atenuação compressional da onda acústica, p. 29
α_s	Atenuação cisalhante da onda acústica, p. 95
δ	Delta de <i>Kronecker</i> , p. 42
κ	Número de onda, p. 36
κ_r	Número de onda horizontal ou, no caso de geometria cilíndrica, número de onda radial, p. 8
λ	Comprimento da onda acústica, p. 8
\mathbf{R}	Matriz de Correlação, p. 32
Θ	Vetor genérico de parâmetros, p. 32
\mathbf{d}_l	Vetor de observações do campo de pressão acústica, p. 33

\mathbf{e}	Vetor réplica do campo de pressão acústica, p. 32
\mathbf{e}_s	Vetor tangente ao raio sonoro, p. 71
\mathbf{n}	Vetor unitário normal ao raio sonoro, p. 71
\mathbf{r}	Vetor posição (x, y, z) , p. 36
∇	Operador Gradiente, p. 53
$\nabla \bullet$	Operador Divergente, p. 53
∇^2	Operador Laplaciano, p. 53
ω	Frequência angular da onda acústica, p. 32
ω_c	Frequência angular de corte, p. 40
ϕ	Ângulo horizontal da projeção do raio lançado sobre o plano horizontal xy em relação ao eixo x (azimute), p. 33
ρ	Densidade, p. 29
σ	Lentidão do som, p. 54
τ	Tempo de percurso gasto pela onda propagante, p. 52
θ	Ângulo vertical de lançamento do raio em relação ao plano horizontal xy (elevação), p. 55
θ_c	Ângulo crítico de reflexão do raio sonoro no fundo, p. 39
c	Velocidade de propagação do som na água do mar, p. 39
c_p	Velocidade compressional de propagação da onda, p. 29
c_s	Velocidade cisalhante de propagação da onda acústica, p. 95
c_b	Velocidade de propagação do som no fundo do mar, p. 39
f	Frequência linear, p. 53
m	Número de índice do modo normal, $m \in \mathbb{Z}_+^*$, p. 42
r	Distância horizontal, p. 33
s	Distância percorrida pela onda propagante (comprimento de arco ao longo do raio), p. 54
z	Coordenada vertical (profundidade), p. 33

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional, p. 3
3DMFP	Three-dimensional Matched-Field Processing, p. 6
3DPE	Three-dimensional Parabolic Equations, p. 13
3D	Tridimensional, p. 3
AUV	Autonomous Underwater Vehicle, p. 1
BB	Broadband, p. 11
CMRE	Centre for Maritime Research and Experimentation, p. 22
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, p. 19
CTD	Conductivity, Temperature and Depth, p. 28
CW	Continuous Wave, p. 10
ESP	Environmental Signal Processing, p. 6
GA	Genetic Algorithms, p. 77
GPS	Global Positioning System, p. 105
IIM	Istituto Idrografico della Marina, p. 77
MATLAB	Matrix Laboratory (Mathworks, Inc.), p. 22
MB	Marinha do Brasil, p. 5
MFI	Matched-Field Inversion, p. 9
MFP	Matched-Field Processing, p. 9
MFT	Matched-Field Tomography, p. 9
NB	Narrowband, p. 11

NMM	Normal Mode Models, p. 46
NURC	NATO Undersea Research Centre, p. 25
OAL	Ocean Acoustics Library, p. 22
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte, p. 22
PRN	Pseudorandom noise, p. 28
RD	Range-dependent, p. 34
RECMAS	Remote Controlled Moored Acoustic Source, p. 27
RI	Range-independent, p. 34
RTM	Ray Tracing Models, p. 63
SACLANTCEN	SACLANT Undersea Research Centre, p. 25
SACLANT	Supreme Allied Commander Atlantic, p. 25
SNAP	SACLANTCEN Normal Mode Propagation Loss Model, p. 106
SNR	Signal-to-Noise Ratio, p. 2
SONAR	Sound Navigation and Ranging, p. 13
SPIB	Signal Processing Information Base, p. 28
SSP	Sound Speed Profile, p. 4
SiPLAB	Signal Processing Laboratory, p. 69
TL	Transmission Loss, p. 31
UAlg	Universidade do Algarve, p. 20
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 19
VLA	Vertical Line Array, p. 12
WKB	Wentzel, Kramers, Brillouin, p. 36
WRAP	Wide-Area Rapid Acoustic Prediction, p. 48

Capítulo 1

Introdução

Há mais de quarenta anos, a localização de fontes no mar por métodos acústicos tem sido um dos principais temas motivadores de pesquisas na academia de acústica submarina. Embora o interesse no assunto venha de longa data, a eficaz localização de fontes sonoras permanece, até hoje, sendo considerado um assunto desafiador e intrigante, o qual se encontra longe de ser considerado um campo de tecnologia completamente dominada. O tema representa, atualmente, um dos principais alvos nas mais relevantes conferências e encontros internacionais na área de acústica, além de ser a questão central de inúmeros artigos publicados, todos os anos, que buscam, permanentemente, a melhor acurácia na localização.

Apesar do interesse militar na localização de alvos submarinos ter, inicialmente, guiado as pesquisas em acústica, outras importantes aplicações ganharam ênfase nos últimos tempos, tais como: nas pesquisas ligadas ao setor econômico da indústria da pesca, como na localização de cardumes; na bioacústica, com diversas aplicações na localização e monitoramento de cetáceos; na localização de objetos no fundo, tais como minas, artefatos arqueológicos, navios ou aeronaves naufragados; e nas mais modernas tecnologias de controle de veículos submarinos autônomos (*Autonomous Underwater Vehicle*, AUV). Outras aplicações da acústica moderna envolvem a sísmica e a geofísica, como na investigação de jazidas de petróleo; as comunicações submarinas; a tomografia acústica oceânica (TAO); o monitoramento remoto de fenômenos naturais; o mapeamento da topografia do fundo e de estruturas submarinas, etc.

Entretanto, o oceano ainda é considerado um meio complicado de ser modelado, em função da imensa variedade de suas propriedades físicas e oceanográficas que, normalmente, apresentam variações espaciais e temporais. Tal problema se mostra ainda mais agravado em ambientes de águas costeiras, normalmente caracterizados por um grande número de interferências de ruído ambiental. Além disso, as fontes de interesse são, em geral, extremamente silenciosas, acarretando uma relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) desfavorável [1]. Dentro deste enfoque, a

zona costeira, em virtude de sua atual importância econômica e estratégica, tem se mostrado o palco de grandes investimentos em pesquisas envolvendo a propagação da energia sonora.

No contexto nacional, a zona costeira concentra a maior parte das riquezas das águas, do leito e do subsolo, reúne, aproximadamente, um quarto da população do País, abriga boa parte das estruturas industriais, portuárias e ligadas à exploração petrolífera *off-shore* e de minerais. É também nessa área marítima que é desenvolvida grande parte das atividades pesqueiras e do comércio exterior, além de conter diversas áreas sensíveis e frágeis do ponto de vista ambiental. No enfoque científico, é a região onde são maiores as facilidades logísticas para o desenvolvimento de pesquisas e há maior volume de dados ambientais medidos. Embora a coleta e a disponibilização de dados oceanográficos e acústicos ainda sejam consideradas, de certa forma, carentes e esparsas, esforços vêm sendo envidados no sentido de ampliar os atuais bancos de dados, não apenas no Brasil, mas também em diversas outras partes do mundo.

O avanço tecnológico alcançado nos dias de hoje trouxe a evolução dos dispositivos de coleta de dados, dos métodos de posicionamento de instrumentos e das técnicas de processamento de sinais. Principalmente a partir do início da década de 70, os avanços tecnológicos na área de acústica submarina deram um verdadeiro salto. O rápido desenvolvimento de novas tecnologias em sistemas digitais, aliadas ao aumento da capacidade computacional, permitiram o desenvolvimento da formidável ferramenta dos modelos numéricos computacionais, trazendo um poder de cálculo que muito vem favorecendo a investigação científica.

A localização passiva de fontes acústicas no mar foi muito beneficiada, ultimamente, pela modelagem numérica computacional, por meio do desenvolvimento das técnicas de processamento de sinais acústicos, genericamente, conhecidas por *model-based*. Na busca por estratégias de cálculo cada vez mais acuradas, diferentes modelos de propagação têm sido desenvolvidos desde o início dos anos 70, com o objetivo fundamental de prever uma série de aspectos, tanto teóricos quanto práticos, do problema da propagação nos mais variados cenários e condições [2].

Segundo JESUS *et al.* [3], p. 76,

é de conhecimento geral que a propagação acústica em águas rasas, a distâncias superiores a algumas vezes a profundidade, é extremamente difícil de se modelar. Há vários fatores que contribuem para essa afirmação, entre os quais a variabilidade temporal da estratificação da coluna d'água, as propriedades geoacústicas do fundo marinho (frequentemente só parcialmente conhecidas), a reverberação e, dependendo da frequência, as rugosidades da superfície do oceano e do fundo.

Em uma visão mais ampla, qualquer modelagem (seja ela acústica, hidrodinâmica, atmosférica, etc.) representa uma idealização simplificada dos complexos sistemas existentes na natureza. Em determinadas situações, uma aproximação bidimensional (2D) de um ambiente natural tridimensional (3D) se mostra suficiente. Em outros casos, o uso de um modelo 2D, em um cenário onde suas propriedades variem significativamente nas três dimensões, pode conduzir a resultados não realistas. A máxima “todos os modelos são errados” vale como um alerta para a importância do conhecimento das restrições e potencialidades dos diferentes modelos e do processo que está por trás de seu equacionamento governante.

Os modelos 2D de propagação acústica disponíveis atualmente permitem modelar o meio com razoável exatidão; entretanto, geralmente assumem uma simetria cilíndrica do ambiente e, dessa forma, desconsideram os efeitos do meio que vão além do plano vertical, conhecidos, na literatura internacional, como *out-of-plane effects*. A interação desses fenômenos com a onda acústica se mostra mais importante quando o meio em questão apresenta propriedades com variações tridimensionais relevantes.

A rigor, o comportamento de qualquer corpo d'água natural será sempre tridimensional, apresentando variações em sua geometria, propriedades geoacústicas e oceanográficas nas três dimensões. Considerando que o conhecimento do ambiente é algo fundamental para o sucesso das atuais técnicas de localização de fontes (baseadas nas previsões geradas pelos modelos), entende-se que, naturalmente, quanto mais próximos da realidade forem os parâmetros ambientais fornecidos ao modelo, maiores serão as chances de sucesso na nobre tarefa da localização.

Por outro lado, o termo “localização”, em uma abordagem mais ampla, significa a determinação da posição de algo em determinado ponto ou local no espaço. Assim sendo, entende-se que uma localização que não seja capaz de fornecer as três grandezas que definem um ponto no espaço não pode ser considerada uma localização completa no sentido da palavra. Logicamente, o interesse maior da localização está em conhecer suas três grandezas envolvidas, fato que reforça a necessidade de emprego da modelagem acústica tridimensional.

Na conjuntura atual, em que se almeja a crescente acurácia e antecipação na localização de fontes, a distâncias cada vez maiores, os efeitos *out-of-plane*, somente considerados sob uma perspectiva 3D, podem, sim, ser determinantes para o sucesso ou fracasso de determinada técnica de localização.

Natural também é que o homem busque alcançar, plenamente, seus objetivos com o mínimo de esforço e gastos em termos de recursos humanos e materiais. Assim sendo, o uso de um único arranjo de hidrofones em linha (*line array*), para gravação dos sinais irradiados pela fonte a ser localizada, permite economia de sensores e simplificações em termos de lançamento do dispositivo no mar e processamento dos sinais.

Ressalta-se que as considerações até aqui apontadas visam situar o tema do presente trabalho no contexto dos quatro aspectos básicos que compõem seu título:

- A localização de fontes;
- O ambiente de águas rasas;
- O uso da modelagem acústica tridimensional; e
- O emprego de gravações acústicas realizadas sobre um único *array*.

Objetivo Geral

O objetivo desta tese é propor uma metodologia inovadora que seja capaz de localizar, em termos de distância, profundidade e marcação, fontes acústicas submarinas de baixa frequência e banda estreita, em ambientes de águas rasas que apresentem variações tridimensionais, a partir de dados acústicos gravados sobre um único *array* de hidrofones dispostos em linha, a fim de aprimorar as técnicas de solução do clássico problema inverso da localização de fontes.

Objetivos Específicos

- Avaliar a aplicabilidade, em tarefas de localização de fontes, de três recentes modelos acústicos 3D que se baseiam nas abordagens de modos normais e raios (KRAKEN3D, BELLHOP3D e TRACEO3D);
- Investigar, por meio de dados experimentais, se a quebra da simetria cilíndrica, imposta pelas variações tridimensionais de batimetria e/ou do perfil de velocidade do som (*Sound Speed Profile*, SSP), é suficiente para prover uma discriminação azimutal que permita a estimativa da terceira dimensão do problema - o ângulo horizontal de marcação da fonte; e
- Contribuir para validação dos modelos acústicos 3D empregados.

Motivação

A concepção da modelagem acústica tridimensional já ultrapassou sua terceira década; entretanto, durante muitas fases ao longo desse período, o interesse na modelagem 3D ficou, de certa forma, “adormecido”, parte em função das limitações impostas pelo recursos computacionais e, em outra parte, pela disponibilidade restrita de informações ambientais confiáveis.

Todavia, o momento atual se mostra promissor para a ampliação dos estudos envolvendo o uso da modelagem acústica 3D; principalmente, em função do avanço tecnológico reinante nos dias do hoje, que vem possibilitando o contínuo

aumento da capacidade computacional em termos de velocidade de processamento e espaço de armazenamento. Assim sendo, a localização de fontes, uma das principais aplicações dos métodos *model-based*, pode, agora, ser beneficiada pelos recentes avanços da modelagem 3D, entrando naquilo que podemos considerar uma nova era do conhecimento.

No âmbito nacional, considerando os atuais avanços da tecnologia acústica no ambiente submarino, somados aos que estão em via de desenvolvimento, mostra-se premente a necessidade de aperfeiçoamento da capacitação e ampliação do conhecimento nessa área, de modo a oferecer o devido embasamento científico frente às gigantescas empreitadas assumidas pelo Estado e pela Marinha do Brasil (MB). Na atual conjuntura, em que o País prioriza a construção de seu primeiro submarino nacional de propulsão nuclear, o profundo conhecimento dos potenciais do emprego da energia acústica no mar se mostra bastante oportuno.

Assim sendo, o trabalho em tela propõe a aplicação da modelagem acústica 3D no aprimoramento da localização de fontes no mar. Pretende-se, dessa forma, oferecer uma metodologia com potencial emprego em submarinos, meios de superfície e sistemas fixos e, paralelamente, contribuir para o embasamento técnico-científico dos projetos em desenvolvimento pela MB na área de acústica submarina, em especial projetos tais como: a Proteção Acústica Submarina (PROAS); Sistema de Monitoramento Acústico Submarino da Amazônia Azul¹ (SIMASAA); e a Vigilância Acústica Submarina da Amazônia Azul (VASAA).

Em suma, almeja-se que o trabalho venha a oferecer uma parcela de contribuição para o aprimoramento da capacitação nacional perante os novos desafios assumidos no ambiente submarino. O aperfeiçoamento e a ampliação do conhecimento na propagação da energia acústica em ambientes tridimensionais irão possibilitar o desenvolvimento de tecnologia autóctone, além de trazer benefícios, diretos ou indiretos, não apenas para o setor de defesa, mas também para a comunidade científica, o setor econômico, a segurança da navegação e a salvaguarda da vida humana no mar. No âmbito da Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I), mostra-se necessário o fomento à pesquisa e ao desenvolvimento de produtos e sistemas na área de acústica submarina, compatibilizando as atuais prioridades científico-tecnológicas com as necessidades fixadas na Estratégia Nacional de Defesa (END [4]).

¹Amazônia Azul é a denominação atribuída ao espaço marítimo nacional que poderá atingir, aproximadamente, 4,5 milhões de km² após ser aceito, pelas Nações Unidas, o pleito brasileiro pela extensão dos limites de sua plataforma continental em alguns pontos além das 200 milhas náuticas (<https://www.marinha.mil.br/content/amazonia-azul-1>).

Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos, sugere-se o uso da modelagem acústica tridimensional, em conjunto com técnicas de inversão de Processamento por Campo Casado 3D (*3D Matched-Field Processing*, 3DMFP) e técnicas de Processamento de Sinais Ambientais (*Environmental Signal Processing*, ESP).

No contexto do 3DMFP, a modelagem 3D será empregada na geração dos campos de réplicas, calculados considerando-se milhares, ou milhões, de possíveis posições candidatas para fonte no espaço. Os campos acústicos, calculados no domínio da frequência, serão comparados com os dados observados sobre um *array* de hidrofones, por meio de um algoritmo matemático robusto (processador). O produto final do 3DMFP será um volume de ambiguidade, onde a estimativa da posição da fonte será dada pelo ponto que ofereça o melhor ajustamento entre os prognósticos dos campos de pressão calculados pelo modelo e os dados observados.

No âmbito do ESP, considerando-se que os dados acústicos estão sendo gravados sobre um único arranjo unidimensional de sensores, pretende-se tirar proveito das heterogeneidades azimutais do ambiente, a fim de prover a discriminação em marcação da direção de chegada do sinal. O conceito, fundamentalmente, se apoia na ideia de que, devido às variações tridimensionais (batimétricas e oceanográficas) do ambiente, o sinal recebido em cada hidrofone, proveniente das emissões de fontes candidatas dispostas ao longo de uma circunferência (definida por uma dada combinação de distância/profundidade), será diferente em função dos diferentes acoplamentos de modos que irão se propagar ao longo das diversas marcações consideradas.

Maiores detalhes a respeito da metodologia proposta serão comentados, mais adiante, no Cap. 3, que também inclui informações atinentes ao experimento realizado no mar ao norte da ilha de Elba, litoral noroeste italiano. Esse capítulo é precedido por uma breve revisão bibliográfica sobre os temas da localização e da modelagem acústica 3D (Cap. 2). No Cap. 4, é descrito um apanhado sobre a teoria da modelagem, mais especificamente, sobre os *approaches* de modos normais e raios, com ênfase na modelagem 3D e nos três modelos empregados neste trabalho. No Cap. 5, é introduzida a localização 3D propriamente dita, mas com uso de dados sintéticos calculados pelos próprios modelos. Além de servir de insumo para localização 3D com dados experimentais e construção das rotinas, interessantes conclusões já poderão ser aqui obtidas, com uso de variações da geometria do *array* e alterações do perfil de velocidade do som e de parâmetros que definem o feixe de lançamento dos raios. O Cap. 6 é o cerne da tese e apresenta os ajustes de calibração introduzidos nos modelos e os resultados da localização 3D com dados experimentais e, finalmente, no Cap. 7, são formuladas as principais conclusões obtidas e algumas propostas de sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Desde os primórdios da investigação científica em acústica submarina, muito acelerada após o afundamento do navio de passageiros “Titanic” (1912) e o começo da Primeira Guerra Mundial (1914), os principais tópicos de pesquisa nessa área específica de conhecimento foram, primordialmente, guiados pela detecção de objetos no mar, localização de fontes acústicas e comunicações submarinas.

Durante as duas Guerras Mundiais, os cientistas estudaram tanto as águas rasas quanto as águas profundas. Durante o período da Guerra Fria, as pesquisas foram fortemente direcionadas para a região de águas profundas, principalmente em decorrência da ameaça dos mísseis balísticos submarinos. Após a Guerra Fria, com o início da ocorrência de conflitos regionais em países litorâneos, o foco da Oceanografia foi redirecionado novamente para o ambiente costeiro [5]. Atualmente, as Marinhas de muitos países apontam as águas rasas como sendo o principal cenário de operações navais, envolvendo ações de meios de superfície e de submarinos. Mas, deveras, o que são águas rasas?

ETTER [6] apresenta duas definições básicas para águas rasas: a hipsométrica e a acústica. A definição *hipsométrica* se baseia no fato de que a maioria dos continentes apresentam plataformas continentais limitadas pela isobatimétrica de 200 m, a partir da qual, geralmente, o gradiente de profundidade aumenta rapidamente. Portanto, águas rasas são, muitas vezes, adotadas como sendo aquelas localizadas aquém dos 200 m de profundidade, dentro da plataforma continental. *Acusticamente*, condições de águas rasas existirão sempre que a propagação for caracterizada por numerosas interações com o fundo e com a superfície. De acordo com essa definição, algumas áreas hipsometricamente rasas podem vir a ser consideradas acusticamente profundas.

Já TOLSTOY e CLAY [7], apontam que a distinção básica entre propagação em águas rasas e propagação em águas profundas depende, fundamentalmente, da escala do fenômeno de interesse. Assim sendo, a distinção entre ambos os conceitos depende, principalmente, das dimensões κ_r e D , sendo κ_r o número de onda acústica

horizontal e D a profundidade local. Valores pequenos a moderados do produto $\kappa_r D$ (e.g., $\kappa_r D \leq 10$) são normalmente encontrados em águas costeiras ou águas da plataforma continental. Valores de $\kappa_r D$ maiores são encontrados, habitualmente, em ambientes de águas profundas. Com base na mesma essência, KUPERMAN e LYNCH [5] apontam que, em águas rasas, a razão típica da profundidade pelo comprimento da onda acústica (D/λ) é de cerca de 10 a 100.

Ressalta-se que tais critérios matemáticos representam apenas valores genéricos de referência encontrados na literatura e não devem ser levados com rigor. Considera-se que o mais importante na caracterização de um ambiente como sendo de águas rasas está, de fato, diretamente associado às sucessivas interações da onda acústica com o fundo e a superfície e com o comprimento da onda acústica.

Ambientes de águas rasas são extremamente complexos, possuindo superfície e índices de refração apresentando dependência espacial e temporal [5, 8]. A presença das heterogeneidades características do oceano e do fundo, somada aos elevados níveis de ruído, perdas energéticas nas fronteiras e propagação por multicaminhos são algumas das peculiaridades típicas de um ambiente de águas rasas, onde a modelagem dos fenômenos acústicos se torna extremamente difícil, assim como, também, as aplicações dela decorrentes.

Uma das aplicações mais clássicas da modelagem acústica - a localização de fontes - é fortemente afetada pelo ambiente e pela geometria do meio de propagação, fato que tem motivado os cientistas a buscarem diversas alternativas para solução do antigo problema da localização.

2.1 Localização de fontes

Inicialmente, por localização de fontes acústicas no mar entendia-se o conhecimento, unicamente, de sua direção, i.e., a determinação do ângulo horizontal da direção de chegada da energia de um sinal, o que é tradicionalmente feito por um processo de filtragem espacial conhecido como conformação de feixes (*beamforming*).

A conformação de feixes, que teve seu desenvolvimento impulsionado pelo interesse militar, é o princípio básico de funcionamento dos atuais sonares passivos, e combina diferentes arranjos de sensores (*arrays* lineares, planares, cilíndricos, etc.) com diferentes técnicas de estimação da direção de chegada de sinais, que vão desde métodos convencionais até as mais recentes técnicas que envolvem estatística de ordem superior, tais como os métodos baseados na separação cega de fontes [9].

Até meados da década de 70, os métodos tradicionais de localização se baseavam na aproximação de ondas planas, com a popularização do *plane-wave beamformer*. Em uma fase posterior, iniciada há cerca de quatro décadas, o interesse da localização foi ampliado, a fim de extrair algo mais dos convencionais *arrays* de

hidrofonos além da estimação da direção de chegada dos sinais. Assim sendo, a técnica de *beamforming* foi sendo aperfeiçoada e combinada com outros métodos, tais como os que se apoiam na teoria de raios e técnicas baseadas no ajustamento entre campos acústicos medidos e calculados, o que veio, então, a possibilitar a localização de fontes em um espaço bidimensional, geralmente, o plano vertical xz . Com aplicação crescente nessas técnicas, uma fantástica ferramenta, que veio a possibilitar a estimação dos campos acústicos, é a modelagem numérica computacional.

JESUS *et al.* [3], p. 77, afirmam que

modelos numéricos de propagação podem calcular a pressão acústica capaz de acompanhar “em média” o sinal medido numa gama de frequências baixas, digamos, abaixo dos 2 kHz. Nessa gama de frequências, i.e., para comprimentos de onda $\lambda \geq 0,75$ m as flutuações do meio de propagação têm relativamente pouca influência. Esse fato proporcionou o desenvolvimento de uma série de técnicas, baseadas no ajustamento entre campos acústicos modelados e observados, normalmente conhecidas por técnicas *matched-based*.

Entre as técnicas *matched-based* encontram-se o Processamento por Campo Casado (*Matched-Field Processing*, MFP), a Inversão por Campo Casado (*Matched-Field Inversion*, MFI) e a Tomografia por Campo Casado (*Matched-Field Tomography*, MFT). A técnica MFP é, normalmente, utilizada em acústica submarina para localização de fontes, a MFI para estimação de parâmetros geoacústicos do fundo e a MFT para estimação das propriedades oceanográficas características da coluna d’água no espaço e/ou no tempo [3].

O MFP pode ser interpretado como uma generalização do conformador de feixes de onda plana convencional no caso de dimensão inferior [10, 11]. O interesse no uso do MPF está em realizar a localização da fonte em, pelo menos, uma dimensão a mais além daquela tradicionalmente determinada pelo *beamforming*. Além do MFP, outros métodos de processamento de sinais *model-based* incluem a acústica de tempo reverso, sonares de abertura sintética e correlação do ruído [5].

Originalmente introduzida na localização de fontes acústicas por HINICH [12] e BUCKER [13], em 1973 e 1976 respectivamente, a técnica MFP já é de uso consagrado na comunidade científica e tem sido amplamente utilizada para resolver o problema inverso da localização, i.e., para determinar a distância e profundidade de fontes acústicas em um ambiente oceânico onde o meio seja supostamente conhecido. No caso 3D, além da distância e da profundidade da fonte, será também determinada sua marcação (ou azimute¹), dando origem ao 3DMFP.

¹Embora o conceito de “azimute” esteja, originalmente, associado a um ângulo horizontal em relação à direção norte, o termo será aqui empregado como sinônimo de marcação, i.e., ângulo horizontal em relação a uma direção qualquer adotada como referência.

Ressalta-se que o MFP tem uso mais indicado em técnicas de inversão (não se trata de um método de detecção) e pode também ser usado em estudos de eletromagnetismo, tais como os que envolvem sinais de ondas de rádio; mas seu uso se tornou mais comum mesmo na área de acústica submarina, mais especificamente, em aplicações que envolvem o uso de ondas contínuas (*continuous wave*, CW) de baixas frequências (entre 10 e 500 Hz) [14].

Os métodos clássicos de MFP usam *arrays* de hidrofones verticais ou horizontais, com comprimentos suficientes para obter a discriminação espacial necessária para localização da fonte. A maioria das aplicações iniciais, com dados experimentais, foram executadas com uso de *arrays* verticais [1]; entretanto, o emprego do *array* em diferentes configurações também é possível, podendo ser encontrado em diversos exemplos na literatura.

JENSEN *et al.* [11] apresentam uma aplicação teórica do 3DMFP com uso de um *array* em formato de tripé, composto por 48 elementos em cada perna. As simulações foram realizadas em um cenário de águas profundas (5000 m), no Oceano Atlântico, por meio do uso da Teoria de Modos Adiabáticos. O volume de ambiguidade obtido, por meio do estimador de Bartlett, de dimensões 300 km \times 300 km \times 2 km, é apresentado na Fig. 2.1. A posição estimada da fonte é indicada pela seta, na profundidade de 300 m, a cerca de 220 km do centro do *array*.

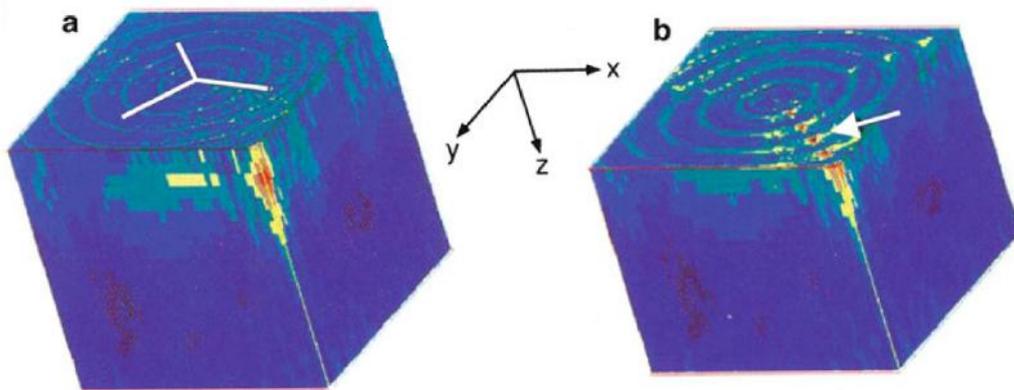


Figura 2.1: 3DMFP em um cenário de águas profundas: (a) volume de ambiguidade de Bartlett, com representação do *array* tripode; e (b) corte horizontal na profundidade da fonte, $z_s = 300$ m. Fonte: JENSEN *et al.* [11], p. 750.

Além do *array* tripode, outras variações de configuração do arranjo de sensores também podem ser empregadas em experimentos no mar, tais como o uso de *arrays* em formato de “T” invertido (*Inverted “T” Array*) ou dois *arrays* verticais posicionados um ao lado do outro (*Twin Vertical Array*) [15] (Fig. 2.2), ou o uso de redes de hidrofones [16].

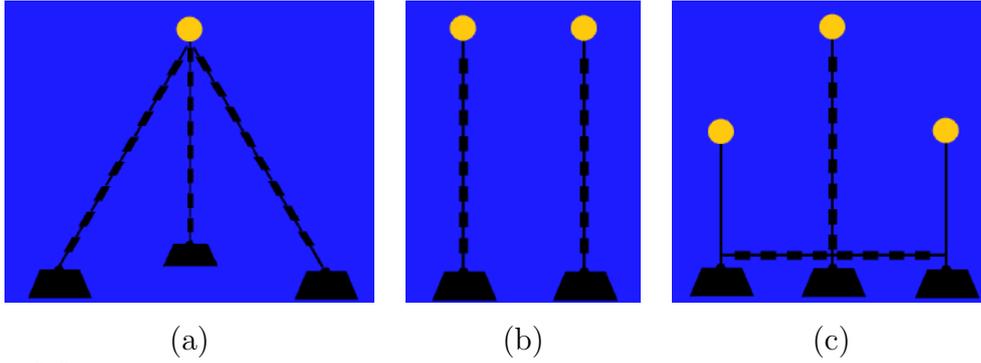


Figura 2.2: Diferentes configurações da geometria de *arrays* usados em experimentos: (a) *Tripod Array*; (b) *Twin Vertical Array*; e (c) *Inverted “T” Array*.

A partir do final da década de 80, surgiu uma tendência, de alguns pesquisadores, em desenvolverem algoritmos de MFP para sinais de banda larga (*broadband*, BB), a fim de explorar o efeito das variações das frequências do sinal. Um trabalho pioneiro nesse sentido foi apresentado por BAGGEROER *et al.* [17], em 1988, que localizou fontes por meio de um processamento incoerente em BB. A noção do processamento coerente já havia sido introduzida por CLAY [18], em 1987 [19]. Posteriormente, WESTWOOD [20] também aplicou o método com sucesso em um ambiente de águas profundas, usando dados experimentais gravados em diferentes quantidades de hidrofones.

Em comparação com sinais de banda estreita (*narrowband*, NB) ou tons, a principal vantagem dos algoritmos de BB é possibilitar a redução do número de elementos do *array* ou, até mesmo, utilizar um único hidrofone (cf. [21]). Pode-se apontar como desvantagens o aumento do custo computacional e da complexidade envolvida no processamento do sinal, devido ao fato de, no caso BB, tornar-se necessário a realização de uma síntese de Fourier para compor o espectro do sinal modelado.

Um procedimento comum para utilização do sinal BB é realizar o MFP para cada frequência discreta da banda, e em seguida, somar as superfícies de ambiguidade. Esse procedimento tende a reforçar os picos reais, e proporcionar a diminuição ou anulamento das ambiguidades. Dessa forma, a redução do número de sensores seria compensada pelas informações obtidas pelas diversas frequências. Não existe uma relação predefinida entre o número de frequências necessárias e a quantidade de elementos que compõem o *array*. Encontra-se, na literatura, casos de emprego de um sinal de banda larga composto por vinte frequências com uso de um único hidrofone [1]. A técnica de MFP será novamente abordada, com maiores detalhes, no Cap. 3.

Outros métodos mais tradicionais e menos sofisticados de localização 2D de fontes não envolvem o uso de modelos, tais como a triangulação. Tradicionalmente utilizada por submarinos, a triangulação requer o uso de múltiplos sensores devi-

damente distribuídos no espaço. A determinação da posição da fonte é feita com base na geometria da configuração fonte-receptores; assim sendo, a acurácia da medida é dependente do adequado conhecimento das marcações envolvidas. No caso da triangulação feita por submarinos, na ausência de outros sensores (como por exemplo um *array* rebocado), uma segunda alternativa é a realização de manobras do próprio submarino, de modo a adquirir o sinal do alvo em diferentes posições [1, 22]. Entretanto, esse procedimento compromete a capacidade de ocultação dos submarinos, demanda um tempo maior e traz prejuízos em termos de acurácia no posicionamento.

Outra técnica de localização passiva de fontes, de uso muito comum no ramo da bioacústica, é o posicionamento por marcações hiperbólicas [23]. Usado há mais de vinte anos na localização de cetáceos, o posicionamento hiperbólico se baseia no princípio de que a medição dos diferentes tempos de chegada do sinal acústico gerado por cetáceos, como baleias, gravado em múltiplos pares de hidrofones, produz linhas de marcação pelo cruzamento das hipérbolas. A interseção das linhas de marcação indica a posição estimada do animal sobre um plano horizontal xy [16].

Entretanto, para o devido funcionamento da técnica de posicionamento por marcações hiperbólicas, é necessário que os hidrofones estejam suficientemente afastados. Quando os pares de hidrofones estão muito próximos uns dos outros, tal como ocorre em típicos sistemas de *arrays* verticais em linha (*Vertical Line Array*, VLA), assim como em um *array* rebocado, a localização se torna impraticável.

Visando contornar esses inconvenientes, são também utilizadas técnicas de MFP capazes de localizar mamíferos marinhos em um plano horizontal. O trabalho apresentado por TIEMANN *et al.* [16] realizou a localização a partir de emissões gravadas na rede de hidrofones da base estadunidense *Pacific Missile Range Facility* (PMRF), localizada nas proximidades da ilha de Kauai, no Hawaii e destinada a testes de mísseis. O modelo acústico empregado foi o BELLHOP e as superfícies de ambiguidade foram geradas por meio de um estimador de verossimilhança [16, 24].

Porém, para o sucesso de qualquer técnica de localização por métodos acústicos, faz-se necessário que a SNR seja suficientemente alta e o ambiente de propagação seja adequadamente conhecido. Na localização por técnicas de MFP ou outras, quando as frequências envolvidas ou níveis de ruído são muito altos, quando o ambiente é de difícil previsão ou não é bem conhecido, o emprego da técnica tende a falhar [25]. O bom entendimento das propriedades oceanográficas da coluna d'água e da física das interações com fundo são essenciais para que as previsões geradas pelos modelos de propagação acústica sejam suficientemente acuradas. Em ambientes cujas propriedades oceanográficas e/ou geométricas apresentem variações tridimensionais significativas, onde os efeitos *out-of-plane* sejam importantes, mostra-se indicado lançar mão da modelagem da acústica tridimensional.

2.2 Evolução da Modelagem Acústica 3D

Os primeiros trabalhos encontrados na literatura que sugerem o uso de algoritmos capazes de considerar variações tridimensionais do ambiente foram motivados pelo interesse na pesquisa de desenvolvimento de sistemas que interagem com o fundo e análise da *performance* de sistemas de *arrays* [26]. O interesse nos efeitos das interações com o fundo foi impulsionado, no final dos anos 50, com o advento do sonar de reflexão no fundo, momento em que grandes investimentos em pesquisas foram realizados, com a finalidade de investigar questões como as perdas acústicas no fundo, em função das interações com as diversas camadas de sedimentos [27].

Até meados da década de 70, os modelos de propagação acústica eram, basicamente, restritos a duas dimensões, ou no plano vertical xz ou no plano horizontal xy . Soluções acuradas do problema do campo acústico tridimensional no oceano, com uma estrutura realista de velocidade do som, eram inviáveis na prática em função da reduzida capacidade computacional disponível naquela época, nomeadamente em virtude dos limitados poderes de velocidade de processamento e armazenamento daquela geração de computadores [28].

Posteriormente, no início dos anos 80, o interesse nas alterações na distribuição espacial da energia acústica, em função das variações 3D das propriedades oceanográficas do ambiente, passou também a impulsionar as pesquisas. Fotografias históricas, obtidas em 1984, pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a bordo do ônibus espacial *Challenger*, ilustraram a dinâmica dos oceanos e motivaram os cientistas a investigarem, mais profundamente, os efeitos 3D [29]. Na vanguarda dessa então recente área de pesquisa, encontram-se os estudos da propagação acústica através de vórtices oceânicos [28–30], cuja estrutura do campo de velocidades do som típico dessa feição oceânica caracteriza um clássico problema de fenômeno 3D, o qual não teria como ser adequadamente tratado sem que fossem considerados seus efeitos tridimensionais.

Os estudos apresentados por BAER [28] e PERKINS e BAER [30] são implementações numéricas pioneiras em meios fluidos da equação parabólica tridimensional (*Three-dimensional Parabolic Equations*, 3DPE), obtida anteriormente por TAPPERT [31]. A versão 2D da equação parabólica também é, muito comumente, utilizada na acústica submarina e conhecida como forma *standard* da equação parabólica 2D, que assume simetria azimutal² (desconsidera variações em azimute) e pode ser resolvida de diversas formas. A forma mais tradicional de solução adota a aproximação paraxial de ângulo estreito ($\sim 10^\circ$ a 15°) [11, 31]; embora, já existam adaptações para soluções que permitam o uso de ângulos maiores [32].

²Por simetria azimutal, considera-se que não existe dependência da variável angular ϕ em um sistema de coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z) .

O estudo apresentado por BAER [28] analisa os efeitos de um típico vórtice de mesoescala produzido pela Corrente do Golfo na propagação acústica em águas profundas (~ 5000 m) por meio do uso de um modelo computacional 3D baseado na aproximação parabólica da Equação da Onda reduzida. Foram considerados vários casos 3D de propagação sonora e avaliados seus efeitos na diretividade de um *array* sonar. A 3DPE foi resolvida numericamente como uma extensão do algoritmo divisor de passos de Fourier usado em cálculos 2D. Tal estudo indicou que o gradiente da refração horizontal (embora seja apenas uma pequena fração do gradiente da refração vertical) pode produzir desvios na marcação da fonte superiores a $0,5^\circ$. Em cenários de campo afastado (da ordem de 50 km), tal desvio resulta em um erro de posicionamento da fonte de centenas de metros, considerado fatal em um problema de localização. Adicionalmente, degradações da *performance* de um *array* foram constatadas em função dos desvios, ocasionando uma redução de cerca de 10% em seu poder de resolução.

Um algoritmo simplificado que combina os resultados de problemas de duas dimensões para gerar soluções 3D foi apresentado em seguida por PERKINS e BAER [30], em 1982. Tendo em vista o fato de combinar N problemas 2D, tal método foi denominado $N \times 2D$ (a.k.a. modelagem *quasi-3D* ou modelagem *2,5D*) e considerado uma boa aproximação dos algoritmos originais para ambientes oceânicos realistas, mesmo na presença de vórtices ou frentes oceânicas. Um dos principais objetivos do trabalho era reduzir o tempo computacional por meio da implementação de um método para solução do problema de propagação 3D com aproximação parabólica.

Essencialmente, a aproximação $N \times 2D$ considera que, em cada um dos N planos verticais que passam pela fonte pontual, é resolvido um problema 2D e seus resultados são, então, combinados para formar uma solução 3D aproximada. Dessa forma, um algoritmo divisor de passos, baseado na aproximação parabólica da equação da onda independente do tempo, foi utilizado para calcular o campo de pressão complexo em cada um dos N planos verticais.

No trabalho em questão, foram comparados dois modelos computacionais baseados nos algoritmos $N \times 2D$ e 3D, considerando-se diferentes cenários e sendo avaliadas a distribuição espacial da energia e a *performance* de um *array* horizontal hipotético. Em um cenário de um grande e intenso vórtice oceânico, o método $N \times 2D$ previu intensidades e parâmetros de *performance* do *array* que variaram em até 8% dos valores calculados pelo algoritmo 3D completo. Em um segundo cenário, de grande gradiente linear de índice de refração (na direção perpendicular ao eixo fonte-receptor), as soluções $N \times 2D$ e 3D foram, praticamente, idênticas até uma distância de 120 km [30].

O algoritmo de divisor de passos baseado na teoria da onda parabólica estendido para problemas 3D já havia sido empregado anteriormente [28, 33] em situações

limitadas de frequências muito baixas (~ 25 Hz). O método proposto demandava uma grande quantidade de memória computacional e um tempo de processamento demasiadamente longo. A aproximação $N \times 2D$ veio trazer não apenas uma redução significativa das exigências computacionais (redução de 40 a 50% do tempo de processamento e menor uso de memória), mas também possibilitar o uso de frequências mais altas (~ 500 Hz no caso em questão). As principais desvantagens do método $N \times 2D$ proposto por PERKINS e BAER [30] consistem em não considerar o redirecionamento azimutal da energia devido às interações com contornos, desprezar os efeitos da difração horizontal e ser útil apenas em ambientes onde as variações azimutais da velocidade do som sejam pequenas.

Aproximadamente nessa mesma época, foi introduzida, pela comunidade sísmológica, o conceito precursor do traçado de raios por feixes Gaussianos. ČERVENÝ *et al.* [34], em 1982, apresentaram um procedimento no qual a evolução do feixe Gaussiano era baseada em uma solução assintótica da Equação da Onda nas vizinhanças do raio, conduzindo a um conjunto de equações diferenciais ordinárias, facilmente integradas ao longo das equações padrões dos raios, fornecendo a curvatura e abertura do feixe em função do comprimento de arco do raio.

A ideia básica de um modelo de feixes Gaussianos simples foi também apresentada no trabalho inovador de BUCKER e PORTER [26], em 1986, onde foi demonstrado que o campo acústico recebido em um *array* de sensores, localizado próximo ao fundo, era fortemente afetado pela batimetria local e pelas propriedades físicas do fundo e subfundo oceânico. O trabalho despertou grande interesse da comunidade sísmológica daquela época, em especial por ter implementado o procedimento de obter a curvatura e abertura do feixe acústico, formalmente, a partir de equações diferenciais ordinárias, desenvolvidas em função do comprimento de arco ao longo de um raio central. Tal método superava os problemas decorrentes de cáusticas e zonas de sombra que assolavam os algoritmos padrões de traçado de raios.

Além disso, outra vantagem do uso de feixes Gaussianos, particularmente na modelagem 3D, consiste em não precisar resolver o problema³ do cálculo dos autoraios (*eigenrays*⁴) para previsão dos campos de pressão, uma vez que o lançamento dos feixes 3D em diferentes azimutes e elevações torna computacionalmente pesado o cálculo dos raios que atingem o receptor [35, 36].

³Tratando-se de modelagem 3D, o cálculo dos *eigenrays* envolve complicadores adicionais, pois o método de proximidade tende a ser ineficiente devido à propagação *out-of-plane*, que requer que a função de otimização que define a busca do raio seja desenvolvida não apenas sobre as elevações dos raios, mas também sobre seus azimutes.

⁴Raios que ligam a fonte ao receptor.

Aplicações mais concretas do uso dos feixes Gaussianos na acústica submarina foram apresentadas por PORTER e BUCKER [35], em 1989, considerando dois casos típicos: o primeiro de um problema acústico padrão de uma fonte pontual monocromática em um guia de ondas com geometria cilíndrica e o segundo, de um ambiente com variações tridimensionais na batimetria e no campo de velocidade do som. Nesse último caso, foram empregadas técnicas de modelagem 3D (completa) e $N \times 2D$, não apresentando diferenças significativas nos resultados obtidos por uma ou por outra. Os resultados de diferentes cenários oceânicos foram comparados com outras soluções por Equações Parabólicas, indicando uma boa concordância, além disso, mostraram evidências de que o efeito das variações batimétricas poderia induzir alterações importantes nas trajetórias dos raios.

COLLINS e CHIN-BING [37] introduziram, em 1990, uma aplicação da 3DPE em ambientes de águas rasas. O modelo 3DPE por eles apresentado era capaz de considerar ângulos grandes em profundidade, ângulos pequenos em azimute e contornos rugosos para a superfície e para o fundo. Uma condição de contorno homogênea foi prescrita para superfície do oceano de modo a representar o efeito do contorno rugoso em termos de coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência. Os resultados apresentados indicaram que o acoplamento horizontal pode ser importante em problemas de águas rasas (uma vez que não havia evidências conclusivas de que o acoplamento horizontal poderia vir a ser relevante até então).

Posteriormente, BUCKER [38], em 1994, ampliou o trabalho inicial de BUCKER e PORTER [26] apresentando um modelo simplificado de propagação de feixes gaussianos 3D para o cálculo de campos acústicos em ambientes de águas rasas, onde as variações batimétricas em distância e marcação apresentavam um efeito significativo na propagação. Aplicado em casos considerados complexos, com variação da batimetria em forma de cunha, os resultados obtidos indicaram uma razoável concordância na comparação com soluções consideradas exatas.

Destaca-se que o trabalho apresentado por BUCKER [38] foi um dos primeiros a demonstrar, por meio da modelagem 3D de raios, que a interação do campo acústico com o fundo de um canal de águas rasas afeta, fortemente, a direção dos raios sonoros em função das reflexões no fundo. Esse efeito foi retratado em uma figura, que se tornou famosa ao ilustrar o típico traçado de raios em um ambiente de águas rasas próximo a Kaneohe, no Hawaii (Fig. 2.3).

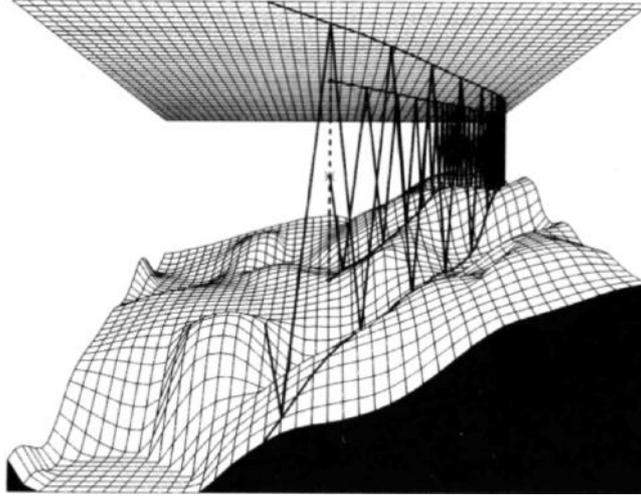


Figura 2.3: Traçado de raios típico de um ambiente de águas rasas no litoral de Kaneohe, no Hawaii. Fonte: BUCKER [38], p. 2438.

Implementações computacionais da modelagem 3D de raios não determinística foram apresentadas por IVANSSON [36], sendo proposto um modelo 3D de traçado de raios que inclui mudanças estocásticas na direção dos raios, possibilitando a propagação dentro de zonas de sombra e superando os clássicos problemas decorrentes do cálculo de *eigenrays*. As variantes estocásticas permitem representar também o efeito da propagação dos raios através dos sedimentos do leito oceânico e a reverberação na superfície e no fundo.

Outros modelos de traçado de raios surgiram para uso em diferentes tipos de ambiente, tais como os modelos atmosféricos. Com base no formalismo Hamiltoniano e no Princípio de Fermat⁵, o programa apresentado por JONES *et al.* [39] traçava o percurso 3D de raios acústicos que eram capazes de considerar as variações tridimensionais de vento e temperatura. Através de alterações na rotina, que definiam a relação de dispersão do meio, o usuário tinha a opção de adaptar o programa para uso em outros meios de propagação.

Visando buscar novas alternativas para solucionar o problema 3D, outros algoritmos foram sendo desenvolvidos. KUPERMAN *et al.* [40] apresentaram, no início dos anos 90, um método para o uso da Teoria dos Modos Normais combinada com a técnica $N \times 2D$. O trabalho intitulado *Rapid Computations of Acoustic Fields in Three-Dimensional Ocean Environments* representou uma inovação no sentido de que demonstrou ser possível o uso das teorias de modos acoplados e modos adiabáticos no cálculo de campos acústicos em ambientes complexos com variações 3D (tanto na batimetria como nas propriedades oceanográficas), fugindo, então, do inconveniente das redundâncias intrínsecas da solução por aproximação parabólica.

⁵Com aplicações também na óptica, o Princípio de *Fermat*, a.k.a. *Princípio da Menor Ação*, pode ser entendido como o fato do sentido de propagação da perturbação acústica ser tal que o tempo de percurso gasto, ao longo desse sentido, seja mínimo, ou, mais precisamente, seja estacionário em relação às possíveis variações de trajetória [2, 11].

Fundamentalmente, o método proposto por KUPERMAN *et al.* [40] procura tirar vantagem de grandezas que podem ser previamente calculadas na horizontal e na vertical. Na horizontal, o domínio de modelagem é repartido em uma malha. O posicionamento dos nós da malha é escolhido de modo que a quantidade de subambientes locais distintos seja a menor possível (e.g., considerando que os nós estejam sobre uma mesma isóbata e que não existam alterações significativas nas propriedades da coluna d'água de um nó para outro, nem no tipo de fundo). Assume-se que esses diferentes pontos são acusticamente idênticos; e, assim sendo, evita-se a redundância no cálculo dos modos locais.

Na vertical, o método tira vantagem da estabilidade do oceano em águas profundas, i.e., a parte estática do problema (que inclui uma boa parte da coluna d'água e do fundo). Tal parte estática é substituída por uma função de impedância previamente calculada. A refração horizontal, embora não tenha sido diretamente incluída, foi considerada na técnica $N \times 2D$ via acumulação de diferenças de fase ao longo das radiais individuais.

A principal vantagem do método consiste no fato de que, ao contrário do que ocorre com os algoritmos de marcha, o rápido cálculo adiabático para novas geometrias fonte-receptor é realizado com um mínimo esforço computacional, tendo em vista que é realizado a partir dos modos normais locais previamente calculados sobre cada nó.

Naturalmente, mais rápidos serão os cálculos quando não houver a necessidade de se considerar os modos acoplados e a refração horizontal. Além disso, não há obrigatoriedade de se calcular o campo acústico sobre todos os pontos de uma radial se o interesse estiver apenas em um ponto final, onde se encontra posicionado, por exemplo, um *array* de receptores.

No trabalho de KUPERMAN *et al.* [40], os resultados $N \times 2D$ de cálculos adiabáticos e por modos acoplados foram comparados com os resultados obtidos por meio da aproximação por equações parabólicas em um cenário realístico de larga escala na região da Corrente do Golfo, nas proximidades do litoral sudeste da costa estadunidense. As comparações apresentaram nível de concordância satisfatório [40].

Foi nessa altura também que surgiram os primeiros trabalhos divulgando a possibilidade do uso da complexidade do ambiente oceânico a fim de aperfeiçoar a acurácia dos modelos 3D. Tal técnica foi, inicialmente, denominada Processamento de Sinais Ambientais (*Environmental Signal Processing*, ESP).

Processamento de Sinais Ambientais

O conceito básico do ESP consiste em fazer o uso da complexidade do ambiente oceânico 3D a fim de aperfeiçoar o MFP, ao invés de degradar sua *performance* conforme era inicialmente imaginado. A técnica foi concebida como uma forma de

minimizar os inconvenientes decorrentes dos problemas de *mismatch* da modelagem, que acarretam dificuldades em produzir réplicas perfeitas. Mais uma vez, o sucesso da técnica está condicionado ao adequado conhecimento do ambiente, em especial as variações espaciais da batimetria e da velocidade do som [10, 41].

A primeira evidência de que a quebra da simetria ambiental cilíndrica poderia ser aplicada a favor de problemas de detecção submarina foi proposta por PERKINS *et al.* [42], em 1988. O trabalho apresentado demonstrou, por meio de simulações numéricas, ser possível obter direcionamento horizontal por meio de um único *array* vertical, desde que o próprio ambiente quebrasse a simetria azimutal. Na demonstração, foram empregadas técnicas de MFP em um ambiente oceânico de uma parte da Corrente do Golfo, na presença de um campo de ruído sintético anisotrópico. O mesmo modelo numérico foi empregado na geração dos sinais sintéticos e do ruído.

Posteriormente, PERKINS e KUPERMAN [10] ampliaram o trabalho inicial proposto por PERKINS *et al.* [42] demonstrando, por meio de simulações numéricas, a capacidade do ESP em localizar uma fonte em distância, profundidade e marcação no mesmo ambiente da Corrente do Golfo, onde a velocidade do som e a batimetria apresentavam variações tridimensionais. Adicionalmente, foi possível obter a discriminação entre dois pontos em diferentes posições horizontais, dentro de uma mesma profundidade e distância. Para tal, foram empregadas técnicas de modos normais em conjunto com esquemas de correlação linear (Bartlett) e não linear (máxima verossimilhança).

2.3 Alguns trabalhos desenvolvidos na COPPE

O Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), considerado o maior centro de ensino e pesquisa em engenharia da América Latina, tem investido em pesquisas ligadas à estimação da distância passiva por técnicas modais há mais de 30 anos, desde que PARENTE, C. E. realizou o primeiro registro de propagação por modos em águas rasas na Estação de Acústica Submarina da Marinha, em Arraial do Cabo, RJ [43].

O sinal registrado era característico de uma propagação por modos em banda larga, originados de ruído de cavitação de navio, onde se observavam estrias produzidas pelo padrão de interferências. Os primeiros resultados da análise do registro foram publicados por VIANNA e SOARES-FILHO [44], em 1986; desde então, diversos outros trabalhos se sucederam.

Em 1997, ROCHA [45] apresentou um trabalho baseado na teoria *matched-mode* para identificação de um sinal acústico monocromático em um meio de geometria cilíndrica, com determinação da posição e velocidade de uma fonte sonora de

baixa frequência em movimento retilíneo uniforme na direção de um hidrofone fixado próximo ao fundo. Embora problemas de estacionariedade do ambiente tivessem, de certo modo, comprometido a qualidade dos resultados, o trabalho representou uma das primeiras tentativas de empregar a inversão modal no cenário da raia acústica da Marinha do Brasil.

Cerca de dez anos depois, SOUSA [1] usou técnicas de MFP com sinais de banda larga na estimação de distâncias de fontes. O método empregou diferentes tipos de estimadores e foi testado, inicialmente, por meio de simulações com uso de dados experimentais, fornecidos pela Universidade do Algarve (UAlg), Portugal (oriundos do experimento INTIMATE'96), de uma fonte sonora conhecida; e, posteriormente, com uso do ruído de cavitação de navios de superfície (fonte sonora desconhecida). Os sinais foram gravados por submarinos da Marinha do Brasil e sobre um único hidrofone, em distâncias que variaram entre 6 a 20 km. O trabalho pôde confirmar que o uso de um único hidrofone compensa a falta de resolução espacial (abertura) com o processamento dos sinais no domínio do tempo, o que dá origem a uma espécie de MFP multifrequência, capaz de estimar a distância da fonte com certa acurácia.

Posteriormente, MAIA [46] usou técnicas de inversão geoacústica na localização passiva de fontes em águas rasas, com uso de MFP aplicado a sinais CW multitons e de técnicas *Model-Based Matched Filter* (MBMF), no domínio da frequência, aplicado a sinais *Linear Frequency Modulated* (LFM) densamente amostrados.

Mais recentemente, em 2013, PESSEK [22] apresentou um método acústico interferométrico para estimativa de distância passiva. O trabalho propôs a quantificação do padrão de interferência modal, em uma dada área de observação, por meio do invariante β do guia de ondas, um parâmetro adimensional que carrega uma espécie de assinatura da propagação do som característico daquele ambiente.

Dois anos depois, CHAVES [47] ampliou o trabalho inicial de PESSEK [22] e propôs o uso do comprimento de onda de interferência entre modos adjacentes de mais baixa ordem (observado em espectrogramas) para previsão das estrias e para a estimativa da distância e da velocidade da fonte acústica.

2.4 Estado da Arte

Uma questão que continua em permanente investigação é a da definição de soluções de referência (*benchmarking*) para os modelos 3D - assunto que tem sido alvo de amplos debates nas conferências sobre acústica submarina dos últimos anos [48]. Em geral, a avaliação da *performance* de modelos 3D vem sendo feita por meio da comparação com resultados de outros modelos ou com soluções analíticas, considerando-se diferentes condições e cenários de simulação. Dessa forma, pode-se

dizer que muitos dos modelos de propagação acústica 3D disponíveis atualmente ainda não concluíram, plenamente, sua etapa de validação.

A acurácia dos resultados dos modelos pode também ser avaliada por meio do MFP desde que existam dados disponíveis (soluções exatas) para referência. No caso dos ambientes RD e 3D, a carência de dados tende a ser maior, o que tem popularizado a realização de teste de *benchmarking* por meio da comparação entre modelos. Em cenários RD de águas rasas, modelos de modos normais acoplados e modelos de PE de ângulo aberto têm apresentado resultados confiáveis e acurados, representando boas opções para realização de testes [14].

Os últimos estudos realizados por RODRÍGUEZ *et al.* [49], em meados de 2017, revelaram que o modelo de modos normais KRAKEN [50] e os modelos de raios BELLHOP3D [51] e TRACEO3D [52] apresentaram resultados animadores em problemas de *benchmarking* em um ambiente de fundo inclinado tipo cunha. As previsões dos três modelos foram comparadas com soluções analíticas, resultados experimentais (medidos em um tanque de provas) e resultados calculados pelo modelo de equações parabólicas 3DWAVE [53]. O modelo KRAKEN foi capaz de gerar previsões suavizadas e acuradas para o caso adiabático; da mesma forma, os modelos BELLHOP3D e TRACEO3D também apresentaram resultados acurados, apesar da baixa frequência considerada em todos os casos. Os modelos KRAKEN, BELLHOP3D e TRACEO3D serão apresentados, com maiores detalhes, no Cap. 4.

Outras pesquisas vêm sendo desenvolvidas considerando complexos ambientes naturais 3D, assim como a modelagem de campos de ruído ou da paisagem acústica (*soundscape*) resultante da atividade de diferentes fontes, tais como o tráfego marítimo e ação dos ventos. Nesse contexto, as peculiaridades do campo de ruído natural são utilizadas de modo a produzir conhecimento sobre o ambiente. Assim sendo, trabalhos vêm sendo elaborados visando empregar o campo acústico do ruído produzido por navios na localização passiva de fontes [54] ou na estimação de propriedades oceanográficas do meio (e.g., velocidade do som), por meio do uso de técnicas de inversão [55].

Modernas alternativas para a solução do problema da localização 3D envolvem o uso de um *array* de sensores vetoriais (*Vector-Sensor Array*, VSA⁶). O trabalho proposto por FELISBERTO *et al.* [56], em 2013, representou o primeiro trabalho divulgado na literatura sobre a localização 3D de fontes em ambientes de águas rasas com o uso de um VSA. O método foi discutido com uso de dados simulados e dados experimentais e indicou ser possível estimar o azimute, elevação e distância de uma fonte de banda larga (8 - 14 kHz) em distâncias de até 500 m.

⁶Sensor que é capaz de medir propriedades vetoriais do campo acústico, tais como velocidade de partícula ou aceleração, além da pressão acústica (escalar).

Algoritmos de localização 3D também têm encontrado, nos últimos anos, vasto campo de aplicação na área de robótica, como na localização de AUV's (individualmente ou em grupo). Diferentes técnicas de processamento de sinais, tais como as que envolvem filtragem com recurso a filtros de Kalman e esquemas de Monte Carlo têm sido continuamente avaliadas, a fim de aprimorarem a localização dos veículos a partir de diferentes configurações de posicionamento dos navios que os operam [57].

Além das técnicas de localização de fontes por MFP, outros *approaches* consideram a localização de fontes por inferência Bayesiana, por meio da aplicação da regra de Bayes sobre um somatório de sinais e ruídos recebidos e uma função de densidade de probabilidade condicional do campo acústico recebido [58].

Uma das últimas tecnologias que se tem notícia sugere localizar fontes a partir de um único hidrofone omnidirecional equipado sobre um *glider*. O Centro de Investigação e Pesquisas Marítimas (*Centre for Maritime Research and Experimentation*, CMRE) da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) vem, desde 2012, realizando estudos no sentido de usar os dados oceanográficos coletados por um *glider*, em conjunto com as gravações realizadas pelo hidrofone, a fim de localizar uma fonte acústica, a partir das características da distribuição espacial do campo acústico e dos dados oceanográficos coletados ao longo de diferentes distâncias e profundidades. O método proposto envolve o cálculo da resposta impulsiva do canal acústico, expressa em termos de um filtro transversal. Os tempos de atraso do filtro são determinados, em função do SSP e da geometria do experimento, por meio de um modelo de traçado de raios. São também empregadas técnicas de MFP e de processamento de sinais de banda larga [59].

Hoje em dia, pode-se encontrar o estado da arte de muitas ferramentas computacionais utilizadas na acústica submarina na página da internet da *Ocean Acoustics Library* (OAL) [60], divulgada por meio da *Heat, Light & Sound Research, Inc.* (HLS) e mantida pelo *Office of Naval Research* (ONR), da Marinha dos EUA. A OAL é um repositório *on-line* de alguns dos principais modelos em uso pela comunidade científica, entre eles o modelo de modos normais KRAKEN (juntamente com o programa FIELD3D) e os modelos de raios BELLHOP (incluindo sua versão 3D), TRACEO e TRACEO3D. Como parte da OAL, temos a *Acoustics Toolbox*, que contém um conjunto de rotinas do *software Matrix Laboratory* (MATLAB⁷), distribuídas sob licença pública geral (*General Public License*, GNU) e desenvolvidas a fim de oferecer uma interface mais amigável ao usuário por ocasião da prescrição de dados de entrada para os modelos, processamento e apresentação dos resultados.

⁷O MATLAB é uma ferramenta proprietária, sem acesso ao código fonte, com custo considerado, razoavelmente, elevado. Há uma tendência atual de se lançar mão de alternativas de código aberto, tais como o Python, GNU Octave, etc.

Capítulo 3

Metodologia

Para consecução do trabalho em tela, é proposto o uso de técnicas de MFP, mais especificamente 3DMFP, para solução do problema inverso da localização de fontes. O problema é dito “inverso” no sentido de que são utilizados os resultados dos modelos para, a partir deles, obter-se uma estimativa da geometria do meio. Por “geometria do meio” entende-se o contorno físico do guia de ondas (superfície e fundo) e a configuração fonte-receptor. Partindo-se do princípio de que a batimetria é conhecida e de que a superfície é considerada como uma superfície plana, restará como incógnita do problema, unicamente, a configuração fonte-receptor. Assumindo-se também que a posição do receptor é bem conhecida, o problema estará solucionado com a estimação da posição da fonte em relação à posição do receptor, em termos de distância, profundidade e marcação.

O fundamento do 3DMFP é extremamente simples e consiste, basicamente, em coletar medições de um campo acústico por meio de um arranjo de hidrofones, rodar um modelo de propagação acústica considerando um conjunto de possíveis marcações, distâncias e profundidades candidatas da fonte e, finalmente, comparar os campos medidos e modelados (replicados) por meio de um algoritmo matemático (processador ou estimador) que realiza uma correlação cruzada e gera um volume de ambiguidade. O ponto de melhor ajustamento entre ambos os campos (maior valor alcançado pelo estimador) indica a posição estimada da fonte. Uma representação esquemática da técnica 3DMFP pode ser encontrada na Fig. 3.1.

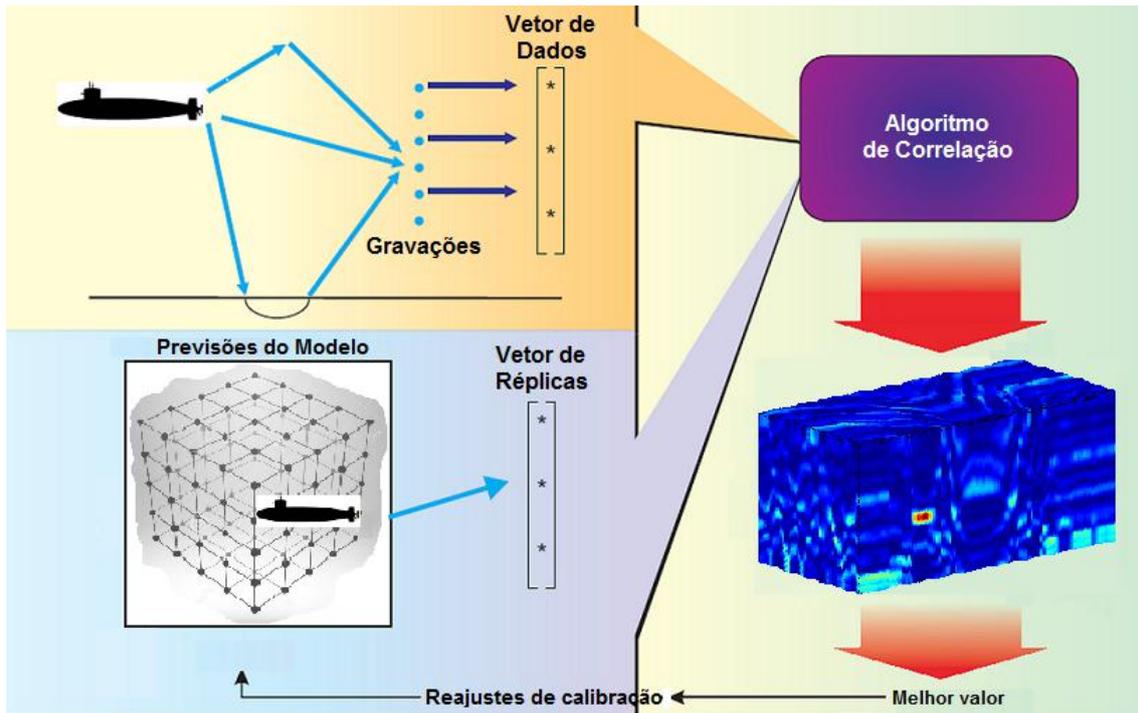


Figura 3.1: Esquema do 3DMFP. Fonte: adaptado de KUPERMAN e LYNCH [5], p. 59.

A Fig. 3.1 ilustra as três etapas básicas que compõem o 3DMFP: a gravação dos dados experimentais; a geração dos campos de réplicas a partir do modelo; e a comparação entre os campos previstos e observados por meio do algoritmo de correlação, gerando o volume de ambiguidade. O ponto em encarnado no volume indica a localização da melhor correlação, i.e., a localização estimada da fonte.

O sucesso do MFP na localização de fontes tem sido muito favorecido pelo crescente aumento da acurácia das previsões geradas pelos modelos de propagação. Entretanto, quando as frequências envolvidas são muito altas, quando os níveis de ruído são elevados ou quando o conhecimento ambiente é precário, o MFP pode vir a falhar [25]. Naturalmente, em qualquer trabalho envolvendo o uso da modelagem, considerando que o sucesso de uma etapa nunca supera o da etapa anterior, para um modelo de propagação acústica gerar réplicas acuradas, é necessário que os dados ambientais de entrada do modelo sejam prescritos com o devido rigor.

Nesse aspecto reside o maior problema para uso das técnicas MFP: os resultados da localização são fortemente degradados quando os dados de entrada do modelo são inexatos ou insuficientes. Nesse caso, o modelador está perante um clássico problema de desajuste do modelo (*model mismatch*). Problemas de *mismatch* podem ocorrer em situações como, por exemplo, quando não são bem conhecidas a velocidade do som, propriedades oceanográficas da coluna d'água ou propriedades geoacústicas do fundo, ou quando ocorrem incertezas na geometria, tais como na batimetria ou no posicionamento dos receptores e fontes [61].

Os requisitos de conhecimento do ambiente se mostram ainda mais rígidos em ambientes de águas rasas, onde as interações com contornos são mais importantes, são maiores as perdas energéticas por espalhamento (*scattering*) e a propagação ocorre por caminhos múltiplos (*multipath propagation*). Além disso, os níveis mais altos de ruído, geralmente encontrados em regiões costeiras, tendem a mascarar o sinal de interesse e dificultar a localização. Adicionalmente, em águas rasas, as interações do campo acústico com o fundo exigem um conhecimento mais detalhado de sua estrutura sedimentar, o que não é, normalmente, exigido em ambientes de águas profundas [62].

O ciclo de *feedback* representado na parte inferior da Fig. 3.1 sugere uma otimização do processo [5]. A otimização é basicamente implementada por meio dos ajustes de calibração do modelo e será realizada, quantas vezes for necessário, a fim de superar os problemas de *model mismatch* e refinar a acurácia das réplicas produzidas. Parâmetros ambientais típicos de calibragem são o perfil de velocidade do som e as condições de contorno.

As etapas que compõem o 3DMFP serão mais detalhadas nas seções que se seguem.

3.1 Experimento no Mar ao Norte de Elba

Os dados acústicos são provenientes de experimentos realizados, em 1993, em uma área de águas rasas no mar Mediterrâneo, mais especificamente no mar ao norte da ilha de Elba, a maior ilha do Arquipélago Toscano, a noroeste da Itália. O dados foram coletados pelo então Centro de Pesquisas Submarinas do *Supreme Allied Commander Atlantic*, SACLANTCEN¹. O objetivo principal do experimento era coletar dados acústicos em águas rasas para verificação da *performance* de métodos de inversão na estimação de parâmetros geométricos e geoacústicos. A Fig. 3.2 apresenta a área do experimento.

¹O SACLANT era um dos comandos supremos da OTAN, sendo o outro o *Supreme Allied Commander Europe* (SACEUR). Em 2003, a denominação do SACLANTCEN foi alterada para Centro de Pesquisas Submarinas da OTAN (*NATO Undersea Research Centre*, NURC) e, atualmente, se chama *Centre for Maritime Research and Experimentation* (CMRE), sediado em La Spezia, Itália (<http://www.cmre.nato.int/>).

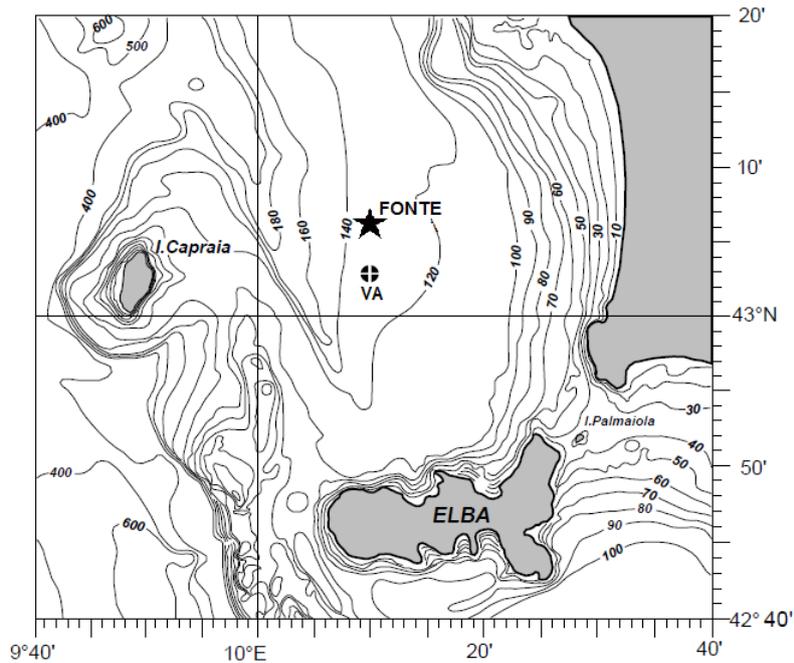


Figura 3.2: Área do experimento no mar ao norte da ilha de Elba. O ponto “VA” indica a posição de lançamento do *array* vertical; a posição da fonte estática é representada por uma estrela. Fonte: adaptado de GINGRAS e GERSTOFT [63], p. 3590.

Pode-se notar que o experimento foi conduzido em uma direção, aproximadamente, paralela às isóbatas. O local foi escolhido porque as condições ambientais eram bem conhecidas e já haviam sido utilizadas de forma bem-sucedida em trabalhos pregressos [63, 64].

As gravações acústicas foram realizadas sobre um longo *array* vertical, que compreendia cerca de 75 % da coluna d’água. As transmissões ocorreram a partir de uma fonte estática, nas frequências de 170 e 335 Hz, e outra fonte em movimento, na frequência de 170 Hz. Estima-se que o círculo de incerteza do ponto de lançamento do *array* tenha um raio de 100 m e o da fonte estacionária, de 200 m [64]. Na presente tese, foram utilizadas apenas as gravações da fonte estática de 335 Hz.

Os parâmetros geoacústicos das camadas do fundo eram conhecidos *a priori*, sendo o local, predominantemente, caracterizado por um fundo coberto por sedimentos de argila e areia [63, 65]. As condições de propagação eram, tipicamente, de um cenário de verão, com SSP apresentando tendência de refração descendente.

Array Vertical

No primeiro dia do experimento, um *array* vertical foi lançado em um ponto com profundidade local de 127 m. O *array* era composto por 48 hidrofones, regularmente espaçados de 2 m (comprimento total de 94 m). O hidrofone mais próximo da superfície (nr. 48) foi posicionado em uma profundidade de 18,7 m e o mais próximo do fundo (nr. 1) foi posicionado em uma profundidade de 112,7 m [63–65].

A Fig. 3.3 apresenta o dispositivo empregado nas gravações.

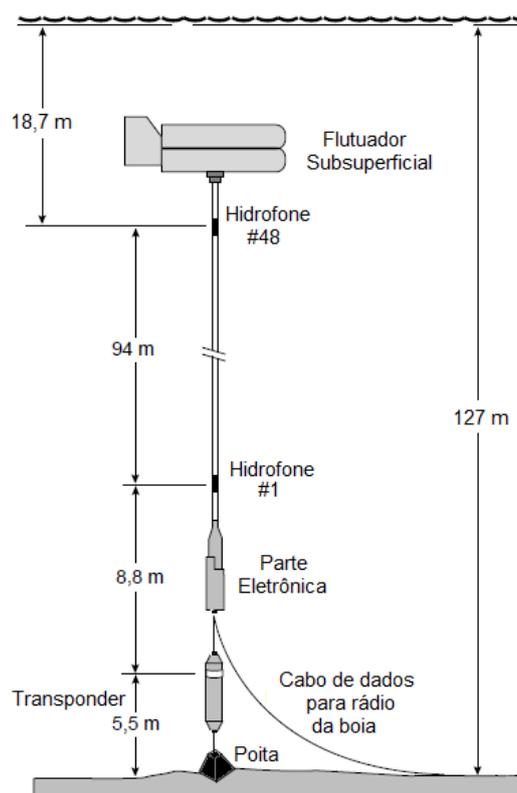


Figura 3.3: Dispositivo de fundeio do *array* utilizado no experimento no mar de Elba. Fonte: adaptado de GINGRAS e GERSTOFT [63], p. 3590.

Destaca-se que as profundidades dos hidrofones (apresentadas na Fig. 3.3) se referem a valores nominais. Naturalmente, as profundidades reais variam em função da inclinação do *array*, imprecisões na medição da profundidade local e penetração da poita nos sedimentos do fundo [64].

Fonte Acústica

Uma fonte estática controlada remotamente (*Remote Controlled Moored Acoustic Source*, RECMAS) foi lançada por meio de uma boia na qual um microprocessador gerador de sinais (programado remotamente via rádio) enviava diferentes códigos de sinais para um amplificador de potência que alimentava o transdutor [66]. O fundeio ocorreu em um ponto de profundidade local medida de cerca de 130 m, distando aproximadamente 5,6 km ao norte do ponto de lançamento do *array*.

A fonte, tipo HX-90G, foi arriada a uma profundidade de 80 m abaixo da superfície [63, 65]². O sinal irradiado consistia de transmissões contínuas de um

²Uma referência anterior [64] indica que a distância fonte-receptor era de aproximadamente 5,8 km, ao invés de 5,6 km, e a profundidade da fonte era de 79 m, ao invés de 80 m. Entretanto, foi adotado como sendo correto o valor apresentado nas referências mais recentes [63, 65], i.e., distância de 5,6 km e profundidade de 80 m.

pseudorandom noise (PRN) modulado sobre uma portadora na frequência central de 335 Hz com uma largura de banda de, aproximadamente, 30 Hz. A Fig. 3.4 apresenta o dispositivo empregado durante as transmissões dos sinais.

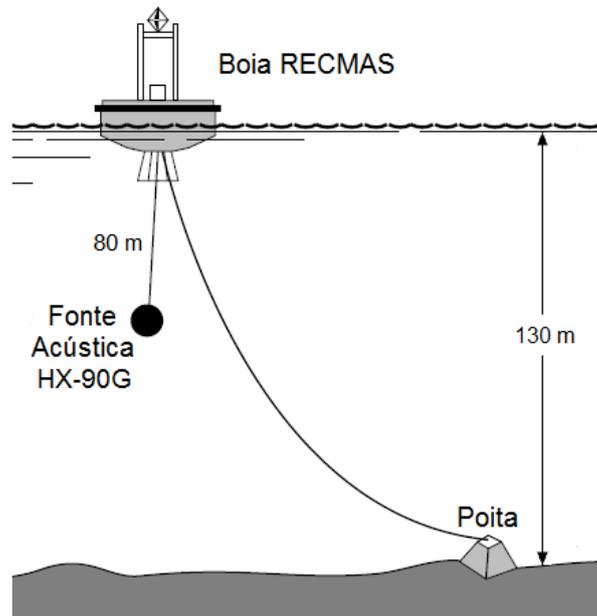


Figura 3.4: Dispositivo de fundeio da fonte empregado no experimento no mar de Elba. Fonte: adaptado de GINGRAS [64], p. 8.

Dados Oceanográficos e Geoacústicos

Durante o experimento, foram realizadas, pelo menos, vinte estações de *Conductivity, Temperature and Depth* (CTD). Entretanto, encontram-se disponíveis apenas os dados de cinco dessas estações, os quais foram utilizados para o cálculo de cinco perfis de velocidade do som. Apenas dois SSP's (localizados nas proximidades da fonte e do receptor) são atinentes a dados coletados no mesmo dia das gravações dos sinais da fonte estática, os outros três foram coletados no dia anterior³.

Essencialmente, os perfis indicam a existência de uma camada isotérmica até cerca de 60 m de profundidade, seguida por uma forte termoclina que se estende até cerca de 80 m; após essa termoclina, o perfil volta a apresentar um comportamento isotérmico ou com variações suaves até encontrar o fundo (Fig. 3.5).

Em relação aos parâmetros da coluna d'água e parâmetros geoacústicos do fundo, um modelo ambiental de três camadas foi estabelecido a partir de dados históricos oriundos de diferentes origens. O modelo ambiental foi constituído, basicamente, de uma coluna d'água sobrejacente a uma camada de sedimentos com 2,5 m de espessura, seguido por uma camada inferior de subfundo [65]. Todas as

³Os SSP's, dados das gravações e outras informações a respeito do experimento no mar ao norte de Elba encontram-se disponíveis no *Signal Processing Information Base* (SPIB), em <http://spib.linse.ufsc.br/sonar.html>. Acesso em 28 fev. 2018.

camadas foram caracterizadas em função de suas propriedades de velocidade compressional do som (c_p), densidade (ρ) e atenuação compressional da onda acústica (α_p). A representação dos parâmetros geoacústicos e de um dos SSP's observados no experimento são apresentados na Fig. 3.5 que se segue.

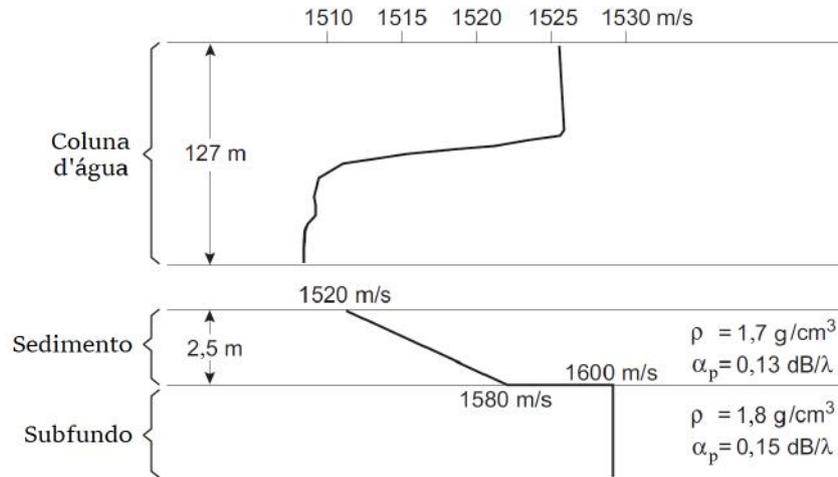


Figura 3.5: SSP e parâmetros geoacústicos médios característicos do mar de Elba. Fonte: adaptado de GINGRAS e GERSTOFT [63], p. 3592.

Aquisição dos Dados

Foram realizadas cinco gravações acústicas dos sinais transmitidos, em 335 Hz, pela fonte estática. As quatro primeiras possuem um tempo de gravação aproximado de 1 min e 5 s. A quinta gravação, de duração inferior, tem 39 s. Optou-se por utilizar, no presente trabalho, as quatro gravações mais longas.

As séries temporais foram convertidas para séries do MATLAB (arquivos *.mat), resultando em matrizes de dimensões 48×65.536 (com as 48 linhas correspondendo aos 48 hidrofones do *array* vertical). A taxa de amostragem dos dados acústicos foi de 1 kHz. A conversão dos dados para o domínio da frequência foi feita por meio de uma transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) de 512 pontos, valor próximo à metade da taxa de amostragem (critério de Nyquist).

Embora todas as gravações tenham sido realizadas sob a mesma configuração fonte-receptor e mesma frequência de transmissão, uma análise mais detalhada dos espectros dos sinais recebidos mostra que as frequências mais energéticas apresentam suave flutuação ao redor da frequência central de 335 Hz. Tal flutuação é decorrente da natural incapacidade do sistema eletrônico da fonte em transmitir, fielmente, o sinal PRN programado, o que faz com que determinada frequência seja mais favorecida do que outra dentro da banda do sinal. Dessa forma, as gravações 1 e 4 indicaram a frequência de 331 Hz como sendo a de maior energia do sinal; a gravação 2, indicou 335 Hz; e a gravação 3, 327 Hz. A título de exemplo, a Fig. 3.6 ilustra o espectro do sinal da gravação 1, recebido no último hidrofone do *array*.

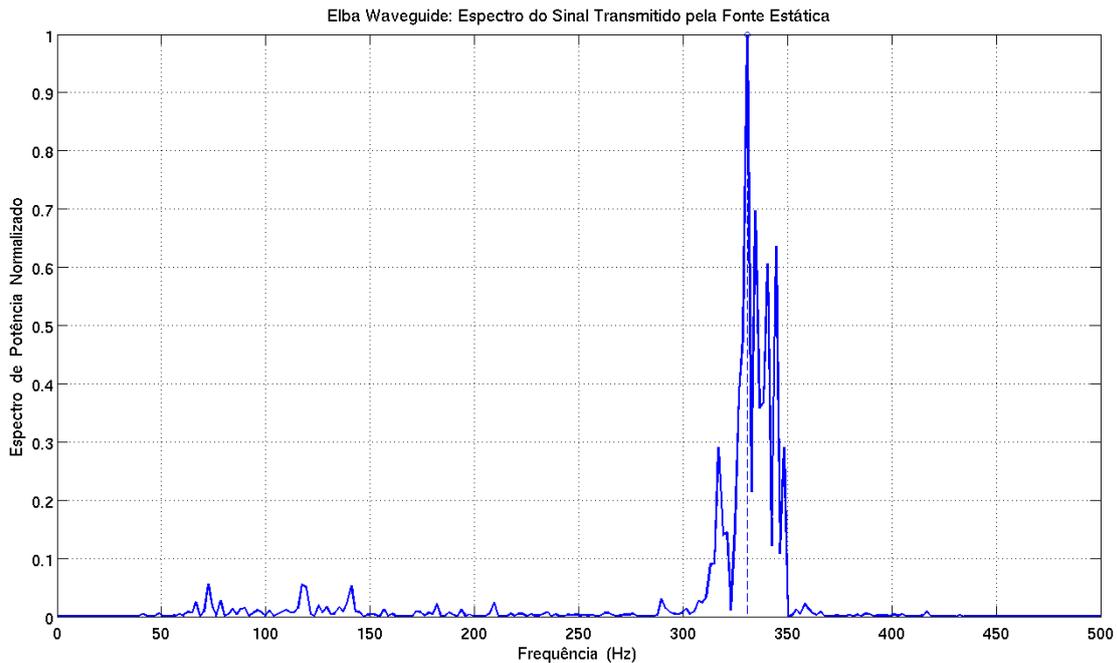


Figura 3.6: Espectro do sinal recebido no último hidrofone do *array*, a partir das transmissões da fonte estática (335 Hz). A linha tracejada indica a frequência mais energética (331 Hz).

3.2 Modelagem da Propagação Acústica

Para o sucesso de qualquer técnica de localização *model-based*, é fundamental o emprego de modelos que gerem previsões realistas e acuradas e que sejam capazes de considerar, apropriadamente, as variações ambientais. Igualmente importante é analisar, na escolha do modelo, seu devido domínio de aplicabilidade. Tais exigências se tornam ainda mais relevantes com uso da modelagem 3D.

Com inspiração na modelagem oceânica costeira [67], propõe-se adaptar para modelagem acústica um conceito clássico da modelagem hidrodinâmica ambiental de corpos d'água rasos que consiste na realização da calibração e validação do modelo em duas etapas, com uso de conjuntos distintos de dados em cada uma delas. Tratando-se de dados acústicos, o uso de diferentes conjuntos de dados se torna mais dificultado, em função da limitada disponibilidade normalmente encontrada.

Na etapa de calibração, serão feitos os ajustes de parâmetros de configuração do modelo de acordo com o ciclo de *feedback* anteriormente representado na Fig. 3.1 (p. 24). Tais ajustes serão, gradualmente, introduzidos de modo a melhorar a acurácia dos campos de réplicas produzidos e otimizar a localização. Ressalta-se que a calibração é realizada em relação ao ambiente de propagação e visa prevenir os inconvenientes dos problemas decorrentes de *model mismatch*, ocasionados pela impossibilidade do perfeito conhecimento do ambiente real, fato que muito afeta a *performance* do 3DMFP.

Posteriormente, na etapa de validação, utilizando os mesmos campos de réplicas gerados na etapa de calibração (sem que nenhuma outra alteração na configuração do modelo seja implementada), a gravação anteriormente utilizada será substituída por outra de igual duração e transmitida pela mesma fonte. Caso o cálculo da nova posição estimada para fonte concorde com a posição anterior (calculada na calibração), o modelo será considerado calibrado e validado; caso contrário, uma nova calibração se fará necessária. Considerações adicionais sobre o processo de calibração e validação dos modelos serão apresentadas no Cap. 6.

Para o cálculo dos campos 3D de réplicas, existem diversas estratégias de solução da conhecida Equação da Onda, que são basicamente agrupadas em duas categorias: modelos de raios e modelos ondulatórios (modos normais, *fast field* e equações parabólicas) [68].

O presente trabalho propõe o uso de três recentes modelos 3D de propagação acústica: o modelo de modos normais KRAKEN3D e os modelos de traçado de raios BELLHOP3D e TRACEO3D. A descrição da teoria da modelagem, com ênfase nesses três modelos, será apresentada no Cap. 4.

3.3 Função de Ambiguidade

O MFP pode ser realizado por meio do cálculo de funções de ambiguidade no domínio da frequência. Existem, na literatura, diversos algoritmos matemáticos (a.k.a. estimadores ou processadores) capazes de avaliar o ajustamento entre campos de pressão acústica medidos e modelados (replicados), com a finalidade de estimar a localização de uma fonte sobre uma superfície (ou volume) de ambiguidade.

Tal comparação consiste, essencialmente, em um típico problema de otimização que maximiza uma função objetiva [61]. Na prática, são comparados campos de perda na transmissão (*Transmission Loss*, TL), i.e., a magnitude do campo de pressão em dB.

A forma mais popular de se realizar essa comparação é por meio do estimador de Bartlett [69]. Outros estimadores de uso comum em localização de fontes por MFP são o estimador de Mínima Variância, também chamado de Máxima Verossimilhança, e o Ajustamento de Múltiplas Restrições (*Multiple Constrains Matching*, MCM), além do uso de diversos outros métodos combinados [11].

Tendo em vista a boa *performance* do estimador de Bartlett em estudos pretéritos envolvendo a localização 2D de fontes no cenário do mar de Elba [63, 65, 70], propõe-se manter o uso desse mesmo estimador para comparação dos campos de pressão acústica modelados e observados.

Também conhecido por processador multifrequências incoerente ou esquema convencional, o estimador de Bartlett consiste em um processo linear de correlação, robusto, de baixa resolução com ampla aplicação em diversos trabalhos envolvendo *matched-field*. Em sua forma mais genérica, pode ser definido como [61]

$$P_{Bart}(\Theta) = \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} \mathbf{e}^H(\Theta, \omega_n) \widehat{\mathbf{R}}(\omega_n) \mathbf{e}(\Theta, \omega_n) \quad , \quad (3.1)$$

onde:

- $P_{Bart}(\Theta)$ é o processador (estimador) de Bartlett, função de Θ ;
- Θ é o vetor de parâmetros que otimiza (maximiza) a função objetiva $P_{Bart}(\Theta)$;
- N_f é o número de frequências;
- $\mathbf{e}(\Theta, \omega_n)$ é o vetor réplica calculado pelo modelo, que será ajustado com o campo acústico medido;
- $\mathbf{e}^H(\Theta, \omega_n)$ é o transposto Hermitiano (ou conjugado transposto) do vetor réplica $\mathbf{e}(\Theta, \omega_n)$;
- $\widehat{\mathbf{R}}(\omega_n)$ é uma estimativa da Matriz de Correlação obtida para o campo acústico observado na frequência ω_n ; e
- ω_n é a frequência angular.

No caso do presente trabalho, de uma única frequência simples ($N_f = 1$), a Eq. (3.1) se reduz a

$$P_{Bart}(\Theta) = \mathbf{e}^H(\Theta, \omega) \widehat{\mathbf{R}}(\omega) \mathbf{e}(\Theta, \omega) \quad . \quad (3.2)$$

A estimativa da Matriz de Correlação $\widehat{\mathbf{R}}(\omega)$ pode ser calculada por [69, 71]

$$\widehat{\mathbf{R}}(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{d}_l(\Theta, \omega) \mathbf{d}_l^H(\Theta, \omega) \quad , \quad (3.3)$$

onde:

- L é o número total de vezes que o conjunto de dados foi observado sobre um dado intervalo de tempo, no qual o meio ambiente possa ser considerado estacionário (número de *snapshots*);
- $\mathbf{d}_l(\Theta, \omega)$ são as observações do campo acústico (dados medidos), vetor complexo que representa o campo observado ao longo do intervalo, durante o qual foram coletadas as L observações; e
- $\mathbf{d}_l^H(\Theta, \omega)$ é transposto Hermitiano de $\mathbf{d}_l(\Theta, \omega)$.

Considerando-se os parâmetros de otimização do vetor Θ como sendo, no caso da localização 3D, a distância r , o ângulo de azimute ϕ e a profundidade z , chegaremos na expressão [69, 71]

$$P_{Bart}(r, \phi, z) = \mathbf{e}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{e} \quad . \quad (3.4)$$

Ressalta-se que os campos de pressão calculados pelo modelo (vetor \mathbf{e}) e medidos (embutidos na matriz $\hat{\mathbf{R}}$) devem ambos estarem normalizados, de modo que, na expressão 3.4, todos os termos tenham norma unitária, sendo o valor máximo que o estimador P_{Bart} pode alcançar também igual a 1, fato que ocorreria somente em uma situação teórica idealizada. Na prática, valores do estimador de Bartlett maiores que 0,6 já podem ser considerados satisfatórios na localização de fontes em um experimento realista.

Os fatores que mais contribuem para a ampla popularização do uso do estimador de Bartlett são sua simplicidade e facilidade de implementação, além de apresentarem bons resultados na localização de fontes, embora existam trabalhos na literatura reportando dificuldades em resolver duas ou mais fontes distintas e tendência a apresentarem maiores ambiguidades, quando comparados a outros estimadores. Alguns consideram que o estimador de Bartlett é um estimador demasiadamente “largo”; nesse caso, uma alternativa seria utilizar o estimador de Bartlett elevado ao quadrado ou, se ainda não for suficiente, elevado ao cubo. Por outro lado, por ser grosseiro, sua *performance* não é tão afetada por problemas de *model mismatch* e pela curvatura da frente de onda de uma fonte pontual [11].

Como último estágio do 3DMFP, a variação espacial dos valores encontrados para o estimador são plotados, na forma de uma nuvem de pontos, em um sistema de coordenadas cartesianas (ou polares), segundo uma palheta de gradação da cores, dando origem ao ilustre volume de ambiguidade. No interior do volume, o ponto onde o valor do estimador for mais alto indicará a posição estimada da fonte no espaço 3D.

Antes da aplicação do 3DMFP com uso de dados experimentais, sugere-se a realização de testes preliminares com uso de dados sintéticos calculados pelos próprios modelos 3D, conforme será apresentado, em detalhes, no Cap. 5.

Por fim, almeja-se que a metodologia aqui proposta permita a localização da fonte acústica no espaço 3D, com uma acurácia considerada satisfatória, em face da ordem de grandeza dos erros introduzidos em função das incertezas das medições, das aproximações e simplificações consideradas na modelagem.

Capítulo 4

Modelagem Acústica

A modelagem acústica traduz a compreensão física do som no mar em modelos matemáticos, os quais são capazes de simular a *performance* de sistemas acústicos no ambiente submarino [6]. O termo **modelagem** será aqui empregado para se referir à modelagem numérica computacional da propagação acústica. A modelagem numérica pode ser entendida como a tradução do modelo matemático adaptado para diferentes métodos de cálculo numérico e a modelagem computacional, como a tradução de um modelo numérico para uma linguagem computacional, que possa ser compilada e executada por um usuário experiente [72].

Em geral, todos os modelos acústicos permitem que o ambiente oceânico varie com a profundidade. Em ambientes caracterizados por forte estratificação horizontal, assumir que parâmetros ambientais (tais como o perfil de velocidade do som, batimetria e propriedades geoacústicas do fundo) são invariantes com a distância tendem a representar uma boa aproximação do ambiente acústico oceânico real. Um modelo que despreze as variações horizontais do ambiente é chamado de **independente da distância** (*range-independent*, RI) [11].

Logicamente, sempre existirá algum grau de variabilidade longitudinal no meio oceânico. Considerar um ambiente RI representa uma aproximação que, naturalmente, irá satisfazer determinados domínios específicos de aplicabilidade. Existem muitas situações onde a variabilidade ao longo do percurso de propagação e/ou a variabilidade lateral acarretam forte influência no padrão do campo acústico [11]. Casos típicos ocorrem na presença de frentes oceânicas, correntes marítimas, ambientes com variações batimétricas relevantes e campos heterogêneos de velocidade do som. Um modelo que seja capaz de considerar as variações horizontais do ambiente ao longo do percurso de propagação é chamado de **dependente da distância** (*range-dependent*, RD).

Modelos bidimensionais RD, normalmente, assumem ambientes com simetria azimutal, onde são consideradas informações ambientais ao longo de uma linha de marcação entre a fonte e o receptor. A hipótese da simetria azimutal é violada

em cenários que apresentem variações destacadas das propriedades ambientais e/ou geométricas ao longo de diferentes marcações. Nesses casos, uma abordagem tridimensional seria mais indicada.

De fato, a natureza oceânica é tridimensional, apresentando variações ambientais ao longo das profundidades, distâncias e azimutes. As variações espaciais do ambiente estão, principalmente, associadas a dois aspectos: fundo oceânico e propriedades oceanográficas. Trabalhos que demandem prognósticos mais realistas dos campos de pressão irão exigir o uso de modelos acústicos capazes de considerar as variações do meio de propagação nas três dimensões. Um modelo com tal capacidade é chamado de **tridimensional** (3D).

O termo “tridimensional” é geralmente utilizado em referência aos efeitos que não podem ser representados simplesmente sobre um plano vertical (*out-of-plane effects*), e.g., refração horizontal, interação com tipos de fundo heterogêneos¹ e reflexões em interfaces que apresentem variações 3D.

Qualquer modelo 2D *range-dependent* permite que uma extensão direta produza campos de pressão 3D, simplesmente, por meio de repetidas rodadas do modelo 2D ao longo dos diferentes ângulos de marcação e posterior justaposição das fatias (planos de distância vs. profundidade em diferentes radiais); entretanto, tais modelos, normalmente, não consideram os efeitos da refração e reflexão além do já calculado em cada fatia sobre o plano vertical [60]. Tal técnica de modelagem representa um cálculo conhecido como $N \times 2D$ (já mencionado na seção 2.2), sendo N o número de radiais consideradas. Ressalta-se, mais uma vez, que ao empregar tal estratégia de cálculo, os efeitos *out-of-plane* são ignorados [11].

Naturalmente, quanto maiores forem os gradientes horizontais das propriedades e das características geométricas do ambiente em questão, mais relevantes serão os efeitos *out-of-plane*. Montanhas submarinas, cânions e fiordes são exemplos de feições naturais que apresentam fortes gradientes batimétricos. Ondas internas não lineares, com escalas espaciais relativamente pequenas (na ordem de 1 km), podem também produzir fortes gradientes horizontais das propriedades oceanográficas do meio. Os efeitos refrativos tendem a se acumularem com o aumento das distâncias envolvidas; assim sendo, esses efeitos podem não ser relevantes no campo próximo (em distâncias de alguns quilômetros) mas podem vir a ser extremamente importantes em problemas envolvendo distâncias maiores [60].

¹Nesse aspecto reside uma das características complicantes no estudo da propagação em águas rasas; uma vez que, uma grande variedade de tipos de fundo são encontrados, tais como lama, areia, pedra, cascalhos, etc. Tais tipos de fundo são comumente encontrados no leito oceânico costeiro e, algumas vezes, situados muito próximos uns dos outros [73].

Seja a modelagem 2D ou 3D, a base teórica de todos os modelos matemáticos de propagação acústica é a bem conhecida Equação da Onda, obtida a partir das equações fundamentais: Equação da Continuidade (balanço de massa), Conservação da Quantidade de Movimento (Segunda Lei de Newton ou Equação de Euler) e Equação de Estado adiabática (equação da energia). A Equação da Onda, em sua forma independente do tempo (*time-independent*) ou, preferivelmente, no domínio da frequência, nos conduz à célebre **Equação de Helmholtz**, dada por [11]

$$\nabla^2 P(\mathbf{r}, \omega) + \kappa^2(\mathbf{r}) P(\mathbf{r}, \omega) = S(\mathbf{r}, \omega) \quad , \quad (4.1)$$

onde:

- \mathbf{r} é o vetor posição (x, y, z) ;
- $P(\mathbf{r}, \omega)$ é a pressão acústica no domínio frequência-espço;
- $\kappa(\mathbf{r}) = \omega/c(\mathbf{r})$ é o vetor número de onda na frequência angular ω e velocidade do som $c(\mathbf{r})$; e
- $S(\mathbf{r}, \omega)$ é o sinal transmitido pela fonte acústica no domínio frequência-espço.

A solução completa dependente do tempo (*time-dependent*) pode ser obtida por meio da solução da Equação de Helmholtz em diferentes frequências e posterior síntese de Fourier.

RODRÍGUEZ [2], p. 13, afirma que:

Denomina-se, formalmente, por modelo de propagação toda solução da Equação de Helmholtz, tomada em conjunto com as condições físicas apropriadas, que permita fazer previsões a respeito do regime de propagação numa variedade significativa de casos.

Diversas estratégias de solução (*approaches*) da Equação de Helmholtz podem ser empregadas em função das hipóteses simplificadoras adotadas e do aspecto escolhido para sua solução (normalmente, o campo de pressão acústica), somado a fatores particulares de implementação. Em geral, as técnicas de solução adotadas na modelagem da propagação acústica envolvem a Teoria de Raios; Teoria dos Modos Normais; aproximações WKB (Wentzel, Kramers, Brillouin), ou WKBJ (Wentzel, Kramers, Brillouin, Jeffreys) ou Aproximação de Liouville-Green ou, ainda, Expansão em Caminhos Múltiplos; *Fast Field* (a.k.a. Integração de Número de Onda [11]); e técnicas de Equações Parabólicas (PE) [6], além da solução da equação da onda completa pelos métodos de diferenças finitas ou de elementos finitos.

O presente trabalho propõe o uso de modelos que adotam as abordagens de modos normais e de raios, as quais serão apresentadas, mais detalhadamente, a seguir.

4.1 Teoria dos Modos Normais

Modos Normais, também chamados de modos naturais, podem ser entendidos, em uma visão mais ampla, como as frequências harmônicas nas quais um sistema oscilará ao ser perturbado. Em termos acústicos, o sistema a ser perturbado será o meio de propagação da energia sonora e a perturbação será ocasionada pela flutuação de pressão decorrente da passagem da onda acústica, uma onda mecânica longitudinal.

Os métodos de modos normais vêm sendo utilizados há muitos anos em acústica submarina. Uma das primeiras referências, até hoje amplamente citada, se deve a PEKERIS [74] que, em 1948, desenvolveu a teoria para um modelo simples de duas camadas do oceano. Aproximadamente na mesma época, IDE *et al.* [75] usaram os modos normais para interpretar a propagação no rio *Potomac*, que banha a cidade de Washington, D.C., e na baía de *Chesapeake*, costa oriental dos EUA [11]. Desde então, notáveis progressos ocorreram no uso dos modos normais em diferentes áreas do conhecimento, encontrando aplicações em problemas que envolvem a teoria ondulatória, sistemas vibratórios, óptica e mecânica quântica.

A propagação por modos normais tem analogia com a teoria da corda vibrante com extremidades fixas, que sofre um deslocamento transversal, pois envolve a solução de uma equação (no caso unidimensional) bem semelhante àquela da corda vibrante. Nessa analogia, a superfície da água e a interface água-fundo seriam as extremidades da corda, as frequências de vibração forneceriam os números de onda horizontais associados com a propagação modal e a espessura variável da corda corresponderia à variação do perfil de velocidade do som com a profundidade. A posição onde a corda é deslocada corresponderia à profundidade da fonte. Dessa forma, a excitação dos modos depende da profundidade da fonte assim como o balanço harmônico de uma nota depende da posição onde a corda é deslocada [11, 50].

COATES [76] apresenta uma interessante abordagem geométrica do problema da propagação por modos normais considerando que, em um meio ensonificado continuamente por ondas periódicas, haverá a formação de um campo sonoro resultante das interferências construtivas e destrutivas entre as frentes de onda. Na Fig. 4.1 (a), a frente de onda de alta pressão (em encarnado) incide na superfície livre, é refletida e inverte sua fase, retornando ao meio como uma frente de onda de baixa pressão (verde), sua direção de propagação (em amarelo) é normal à frente de onda. Na Fig. 4.1 (b), as regiões de pressão máxima surgem no cruzamento das frentes de alta pressão (círculos encarnados), e as de pressão mínima surgem no cruzamento de frentes de baixa pressão (círculos brancos). O cruzamento de uma linha de alta pressão com uma de baixa pressão ocasiona uma interferência destrutiva, i.e., regiões de pressão, teoricamente, nula.

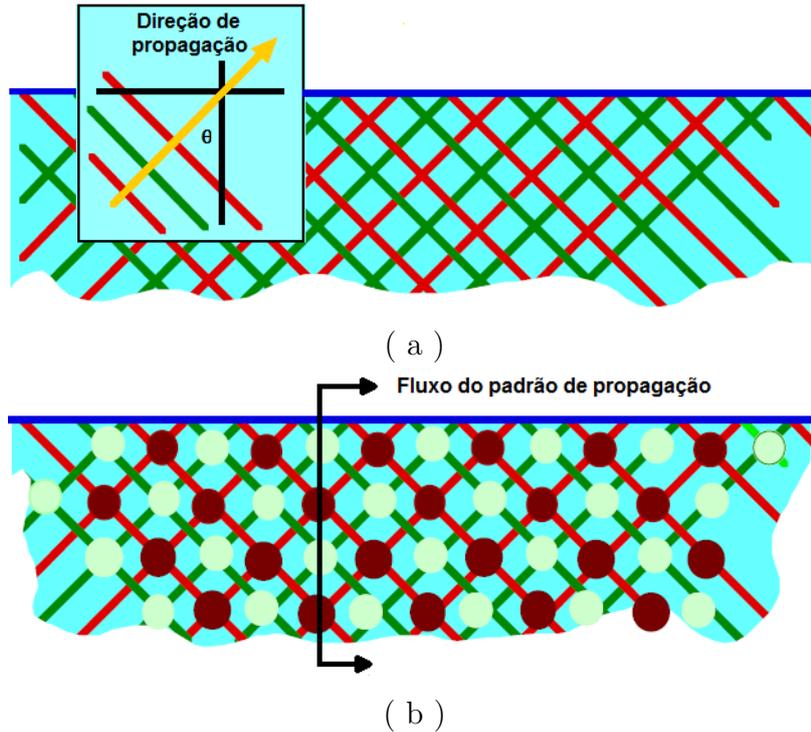


Figura 4.1: Excitação periódica de um guia de ondas: (a) reflexão da frente da onda acústica na superfície; e (b) formação do padrão de interferências. Os círculos vermelhos representam as interferências construtivas da alta pressão e os círculos brancos, as de baixa pressão. Fonte: adaptado de COATES [76], p. 9.4.

Assim sendo, o campo de energia sonora é aprisionado entre a superfície e o fundo (considerado inicialmente rígido). O padrão de interferências evolui ao longo da propagação. Os parâmetros que influenciam essa evolução são a mudança da geometria (profundidade e distância), as propriedades do fundo (parâmetros geoacústicos) e do meio (propriedades oceanográficas e SSP). Os principais fenômenos físicos envolvidos são a refração, reflexão nas fronteiras, atenuação e outros decorrentes das interações com o fundo e a superfície e sua natureza [43].

O fenômeno da propagação por modos normais ocorre em condições em que a relação entre a profundidade da coluna d'água e a frequência de excitação da fonte propicie condições adequadas de reflexão para os raios emitidos com ângulos de incidência específicos [1]. Em situações em que a velocidade do som no fundo seja maior do que a velocidade do som na água (o que normalmente ocorre de fato na natureza), existirá um **ângulo crítico de reflexão** (θ_c , *critical grazing angle*²) abaixo do qual ocorrerá uma reflexão perfeita do raio sonoro no fundo. O conceito do ângulo crítico é extremamente importante para o correto entendimento da natureza da propagação acústica em um guia de ondas, especialmente em ambientes de águas rasas e é dado pela expressão [11]

²Entende-se por *grazing angle* o ângulo formado entre o raio e a superfície da interface (no caso, entre o raio e o fundo). É o complemento do ângulo de incidência, formado entre o raio e a direção normal à superfície.

$$\theta_c = \arccos \left(\frac{c}{c_b} \right) , \quad (4.2)$$

onde c representa a velocidade de propagação do som na coluna d'água (considerada homogênea) e c_b representa a velocidade de propagação do som no fundo (considerado um fluido homogêneo), sendo $c_b > c$. Valores típicos para θ_c variam entre 10° e 30° para sedimentos na plataforma continental [11].

A importância do ângulo crítico de reflexão está relacionada com as perdas energéticas nas interações com o fundo dentro de um guia de ondas. Raios que forem emitidos dentro de um setor de abertura inferior a $\sim 2\theta_c$ irão sofrer menos com perdas no fundo e, assim sendo, se propagarão a distâncias maiores. A energia emitida fora desse setor (com ângulos maiores) é parcialmente transmitida para o fundo, acarretando um forte decaimento em distância [11].

A energia que se propaga dentro de um feixe acústico irradiado em direção próxima à horizontal (dentro de um setor de abertura $\sim 2\theta_c$) é, geralmente, conhecida como *campo de modos normais* ou *espectro discreto*, tendo em vista o fato de que apenas um conjunto discreto de ângulos corresponderão aos percursos dos raios que irão interferir construtivamente, criando a propagação por modos normais, sobretudo em ambientes de águas rasas. Os modos são discretos no sentido de que a reflexão perfeita (ou quase perfeita) no fundo permite a ocorrência de um conjunto de ondas verticais estacionárias [11].

A energia correspondente aos ângulos de lançamento mais abertos (fora do setor de abertura $\sim 2\theta_c$) é conhecida como *campo próximo* ou *espectro contínuo* e tende a ser rapidamente perdida nas sucessivas interações com o fundo [11]. O espectro contínuo da solução perde a sua importância na medida em que o sinal acústico se afasta da fonte. A Fig. 4.2 ilustra o aqui exposto.

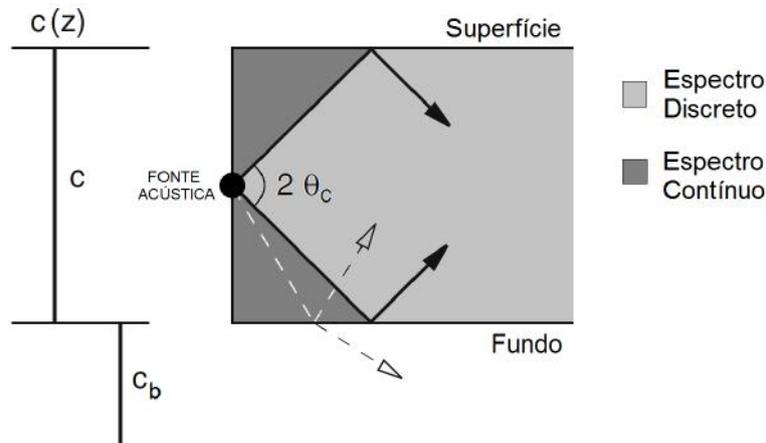


Figura 4.2: Propagação em um guia de ondas teórico homogêneo. Cinza claro: espectro discreto ou campo de modos normais (energia de longo alcance); e cinza escuro: espectro contínuo ou de campo próximo. Fonte: adaptado de JENSEN *et al.* [11], p. 42.

O número de modos propagantes em um guia de ondas é dependente da frequência. Quanto maior for a frequência, maior será o número de modos. Por outro lado, abaixo de uma **frequência de corte** dada, teoricamente, por

$$\omega_c = \frac{\pi c}{D} \quad ,$$

sendo D a profundidade do duto, não existirão modos propagantes (fenômeno de *cutoff*). Adicionalmente, o número de onda modal se relaciona com a frequência de forma não linear, com o guia de ondas apresentando características de propagação fortemente dependentes da frequência. A dependência da frequência também é chamada de *dispersão modal* [11].

Diferentemente das soluções de raios, a solução de modos normais (e outras soluções de modelos ondulatórios em geral) considera os efeitos da dispersão. A dispersão, mais relevante em ambientes de águas rasas, é a condição pela qual a velocidade de fase é função da frequência acústica. A velocidade de fase corresponde à velocidade com que as superfícies de fase constante se propagam. Os efeitos da dispersão são mais importantes em baixas frequências. Em guias de ondas, a dispersão depende de suas propriedades físicas e de sua geometria, sendo também conhecida como *dispersão geométrica* [6, 73].

Em suma, componentes de diferentes frequências do sinal se propagam com velocidades diferentes. A dispersão geométrica é responsável pela deformação do sinal se propagando. Nos casos em que a velocidade de fase for muito diferente da velocidade de grupo, a dispersão será mais intensa e a “envoltória” do sinal irá se deformar. Em regiões de forte dispersão, os resultados de modelos de modos e raios tendem a dar resultados discrepantes entre si. Em regiões de pequena dispersão, modelos de modos e raios tendem a dar resultados mais próximos.

O campo de modos normais pode ser interpretado como o somatório de contribuições individuais de cada um dos modos ponderados de acordo com a profundidade da fonte [11]. A solução de modos normais é dividida em duas partes: a primeira descreve a parte de onda estacionária da solução, por meio da equação em profundidade (coordenada vertical, z), conduzindo à chamada *Equação dos Modos Normais*; a segunda descreve a porção de onda propagante, por meio da equação em distância (coordenada horizontal, r). Assim sendo, cada modo normal pode ser interpretado como uma onda propagante na direção horizontal e uma onda estacionária na direção vertical [6].

A solução de modos normais se encontra, em geral, bem documentada na literatura ([6, 11, 50, 73]) e será apresentada a seguir uma breve descrição matemática, considerando-se o caso clássico de uma fonte pontual isotrópica monocromática em um meio acústico estratificado com simetria cilíndrica.

4.1.1 Solução de Modos Normais

Os modos normais são derivados da Equação de Helmholtz que, no caso de um ambiente 2D RI e na ausência de fontes, pode ser expressa por [11, 50]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(z)} P = 0 \quad , \quad (4.3)$$

onde $c(z)$ e $\rho(z)$ são a velocidade do som e a densidade do meio, consideradas dependentes apenas da profundidade z .

Considerando que o som se propaga como uma soma de ondas estacionárias individuais no oceano, que não interagem umas com as outras, cada modo tem uma única velocidade de grupo e ângulo de propagação correspondente, podendo ser decomposto como o produto de uma função em distância por uma função em profundidade. Dessa forma, usando a técnica de **separação de variáveis**, buscaremos a solução da Equação de Helmholtz homogênea na forma [50]

$$P(r, z) = R(r) Z(z) \quad , \quad (4.4)$$

onde:

- $P(r, z)$ é pressão acústica (função potencial solução da Eq. de Helmholtz), dependente da distância r e da profundidade z ;
- $R(r)$ é a componente horizontal da solução, função da distância r ; e
- $Z(z)$ é a componente vertical da solução, função da profundidade z .

Substituindo, assim, a expressão de $P(r, z)$ na Equação de Helmholtz (4.3) e tomando apenas sua componente vertical, chegaremos na denominada **equação modal**, dada por [11, 50]

$$\rho(z) \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{dZ(z)}{dz} \right) + \left(\frac{\omega^2}{c^2(z)} - \kappa_r^2 \right) Z(z) = 0 \quad , \quad (4.5)$$

onde κ_r é a constante de propagação horizontal, constante de separação das equações diferenciais para $Z(z)$ e $R(r)$.

São impostas as seguintes condições de contorno ao problema:

– Condição liberadora de pressão (*pressure release*) na superfície: é uma condição em que a pressão na interface ar-água será teoricamente nula, tal que

$$Z(0) = 0 \quad . \quad (4.6)$$

Conseqüentemente, a amplitude da onda refletida na superfície será, teoricamente, igual à da onda incidente e ocorrerá uma mudança de fase de 180° [6].

– Condição de fundo perfeitamente rígido: é uma condição pela qual a pressão acústica na interface água-fundo ($z = D$) passará por um ponto de máximo. Pontos de máximo (e mínimo) possuem derivada nula, tal como

$$\frac{dZ}{dz}(D) = 0 \quad . \quad (4.7)$$

A equação modal (4.5) em conjunto com as condições de contorno impostas (Eq. 4.6 e 4.7) nos conduzem a um conhecido problema clássico de *Sturm-Liouville* [77], onde a função $Z(z)$ é uma autofunção e a constante κ_r (ou κ_r^2) é um autovalor [11]. No caso geral, essa equação diferencial apresentará um número infinito de soluções (os modos), caracterizados pela função de forma do modo $Z_m(z)$ e terá m zeros no intervalo $z \in [0, D]$. Assim sendo, o m -ésimo modo terá m zeros e os correspondentes autovalores κ_{rm}^2 serão números reais e organizados de tal forma que $\kappa_{r1}^2 > \kappa_{r2}^2 > \kappa_{r3}^2 > \dots$.

Pode-se demonstrar também que os autovalores κ_{rm} serão sempre menores do que ω/c_{min} , onde c_{min} é o menor valor encontrado para velocidade do som $c(z)$. Adicionalmente, os modos formam uma base de funções ortonormais, tal que [11, 50]

$$\int_0^D \frac{Z_m(z) Z_n(z)}{\rho(z)} dz = \delta_{mn} \quad , \quad (4.8)$$

onde o termo δ_{mn} é o delta de *Kronecker*, representativo de uma função impulsiva, i.e.,

$$\int_0^D \frac{Z_m(z) Z_n(z)}{\rho(z)} dz = 0 \quad , \quad \text{com } m \neq n \quad .$$

Visando simplificar os cálculos, é assumido que os modos são normalizados [11, 50], i.e.,

$$\int_0^D \frac{Z_m^2(z)}{\rho(z)} dz = 1 \quad . \quad (4.9)$$

Dessa forma, os modos formam um conjunto ortonormal dito completo, o que significa que podemos representar uma função arbitrária como uma soma de modos normais. Assim sendo, a pressão acústica pode ser expressa por [50]

$$P(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} R_m(r) Z_m(z) \quad , \quad (4.10)$$

onde o termo $R_m(r)$ representa a amplitude modal. Substituindo $P(r, z)$ (4.10) na Eq. de Helmholtz (4.3) em sua forma não homogênea e simplificando a expressão com uso da Eq. modal (4.5), chegaremos, após certo algebrismo, a

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR_m(r)}{dr} \right) Z_m(z) + \kappa_{rm}^2 R_m(r) Z_m(z) \right] = -\frac{\delta(r) \delta(z - z_s)}{2\pi r} \quad . \quad (4.11)$$

Aplica-se, em ambos os lados da Eq. (4.11), o operador

$$\int_0^D (\bullet) \frac{Z_l(z)}{\rho(z)} dz \quad , \quad (4.12)$$

que representa integrar em z e multiplicar por $\frac{Z_l(z)}{\rho(z)}$, sendo o ponto (\bullet) indicador de um produto interno entre funções.

Levando em conta a propriedade da ortonormalidade (Eq. 4.8), apenas o n -ésimo termo do somatório ($m = n$) irá restar, levando a

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR_l(r)}{dr} \right) + \kappa_{rl}^2 R_l(r) = -\frac{\delta(r) Z_l(z_s)}{2\pi r \rho(z_s)} \quad . \quad (4.13)$$

A Eq. (4.13) constitui uma equação padronizada conhecida, cuja solução é dada em termos da função de Hankel como

$$R_l(r) = \frac{1}{4 \rho(z_s)} Z_l(z_s) H_0^{(1)}(\kappa_{rl} r) \quad , \quad (4.14)$$

onde $H_0^{(1)}$ é a função de Hankel de primeira espécie e ordem zero. Destaca-se que, na Eq. (4.14), foi também aplicada a *condição de radiação* [11], que pode ser entendida como a premissa de que não existem ondas acústicas oriundas do infinito adentrando ao guia de ondas, i.e., [2]

$$P(z, r \rightarrow \infty) \sim e^{-ikr} \quad . \quad (4.15)$$

O sentido físico da condição de radiação é intuitivo por si próprio, mas é interessante destacar um aspecto particular: em um meio em que a profundidade z diminua com a distância r , poderá existir reflexão da onda acústica em sentido contrário ao sentido original de propagação. Tal reflexão não é considerada na condição de radiação [2].

Substituindo, na Eq. (4.10), o termo $R_l(r)$ obtido na Eq. (4.14), chegaremos na expressão da pressão acústica, dada por [11, 50]

$$P(r, z) = \frac{i}{4 \rho(z_s)} \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z_s) Z_m(z) H_0^{(1)}(\kappa_{rm} r) \quad . \quad (4.16)$$

Finalmente, usando a aproximação assintótica da função de Hankel, chegaremos a [11, 50]

$$P(r, z) \cong \frac{i}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} e^{-\frac{i\pi}{4}} \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z_s) Z_m(z) \frac{e^{i\kappa_{rm}r}}{\sqrt{\kappa_{rm}}} . \quad (4.17)$$

Destaca-se que podemos dividir os modos de propagação em três categorias:

- modos prisioneiros (*trapped modes*) ou propagantes, com κ_{rm} reais, que ficam confinados entre as fronteiras do guia de ondas e, assim, tendem a se propagar a grandes distâncias. No campo afastado, são os responsáveis pela propagação do sinal;
- modos evanescentes (*evanescent modes*), com κ_{rm} imaginários, cuja amplitude decai exponencialmente com a distância r ; e os
- modos fugitivos (*leaky modes*) ou virtuais, com κ_{rm} complexo, cuja amplitude também decai com distância r , em função das perdas energéticas da onda irradiada para o fundo, porém com decaimento bem mais suave do que os modos evanescentes.

Modelos de modos normais são originalmente apropriados para problemas *range-independent*, porém podem ser facilmente estendidos para executarem cálculos *range-dependent*. A dependência da distância pode ocorrer por variações de batimetria (devido a montes submarinos, quebra da plataforma continental) e por variações das propriedades ambientais (devido a feições oceanográficas tais como vórtices ou alteração do tipo de fundo).

Conforme já mencionado, campos acústicos 3D podem ser, simplificadaamente, computados por meio da modelagem $N \times 2D$, com cálculos *range-dependent* ao longo das diversas radiais. Os cálculos RD podem ser feitos, basicamente, por duas estratégias, as quais serão explicadas a seguir.

4.1.2 Cálculos *range-dependent*

Existem duas maneiras de se implementar a extensão para cálculos RD: a primeira é dividir o eixo das distâncias em um grande número de segmentos *range-independent* e depois agrupar essas soluções, dando origem à **solução por modos acoplados**; e a segunda considera simplificações adicionais a fim de otimizar o tempo de execução dos modelos, originando a **aproximação adiabática** [11], que consiste basicamente em uma espécie de acoplamento modo a modo abreviado.

Essencialmente, a solução por modos acoplados considera que a energia espalhada por determinado modo interfira nos demais; por outro lado, a aproximação adiabática assume que toda a energia de determinado modo é transferida para o

mesmo modo correspondente em um novo ambiente (considerando-se que as variações ambientais ao longo da distância são graduais) [6].

Solução por Modos Acoplados

Um meio fracamente dependente da distância pode ser aproximado por uma sequência de intervalos, cada um com profundidade considerada constante [2]. Resolvendo a Equação de Helmholtz em cada intervalo e acoplando as soluções nas fronteiras, podemos obter os denominados modos acoplados.

A solução por modos acoplados é um método direto, porém de maior custo computacional. O ponto de partida da solução é dividir o problema axissimétrico em um determinado número de segmentos. A solução completa será uma combinação do campo de pressão de cada segmento individual, calculado por meio da solução padrão de modos normais, onde são desprezadas as contribuições dos modos de ordem superior (espectro contínuo). O acoplamento das soluções individuais é feito por meio das condições de contorno interfaciais (continuidade de pressão e da velocidade radial de partícula) [11].

Para obter a convergência numérica nos casos de variações contínuas das propriedades ambientais (fundos inclinados, frentes oceânicas), a extensão de cada segmento deve ser menor do que um comprimento de onda, o que acarreta um demorado tempo computacional [11]. Outra alternativa, de razoável compromisso entre o tempo computacional e a acurácia, pode ser obtida por meio da aproximação adiabática.

Aproximação Adiabática

A aproximação adiabática ignora o acoplamento entre modos de ordens distintas nas interfaces entre segmentos, i.e., são desprezados os termos de acoplamento cruzado que permitem que a energia seja transferida entre um determinado modo e os demais modos de ordem superior ou inferior. Ou seja, é assumido que, ao ir de um segmento de distância para o seguinte, os modos são acoplados adiabaticamente, na ausência de qualquer troca energética entre modos de ordens diferentes [11].

Em geral, a aproximação adiabática fornece prognósticos acurados quando a dependência da distância é suficientemente fraca. A qualificação de uma dependência da distância como sendo fraca ou forte ainda é uma questão considerada controversa e será função principalmente da geometria e do comportamento do perfil de velocidade do som.

4.1.3 Limitações e Potencialidades dos Modelos de Modos

Um requisito essencial para o apropriado emprego de qualquer modelo numérico computacional é o pleno conhecimento de suas limitações e potencialidades, além, naturalmente, das aproximações nele embutidas. Dessa forma, são abaixo elencadas algumas das principais características dos modelos de modos normais (*Normal Mode Models*, NMM):

Limitações dos NMM

Algumas limitações dos modelos de modos normais são:

- Demandam maior esforço computacional em regimes de altas frequências, por isso, tendem a ser mais indicados para frequências inferiores a ~ 500 Hz [6];
- Não são indicados para cálculos de campo próximo, sobretudo em ambientes fortemente dependentes da distância;
- Necessitam de rotinas adicionais para que, a partir dos modos calculados pelo modelo, sejam capazes de apresentar outras formas de saída dos resultados (e.g., campos de TL);
- São originalmente modelos RI. Embora possam ser facilmente estendidos para efetuarem cálculos RD, exigem artifícios complementares para isso;
- Sob certas condições de fronteiras reais complexas, podem apresentar dificuldades de cálculo computacional [43];
- Geralmente, não são modelos de compreensão muito simples, sendo recomendados para usuários mais experientes; e
- Requerem conhecimento mais detalhado da estrutura do fundo, com maior rigor na prescrição de seus parâmetros geoacústicos. A qualidade dos dados (densidade, propriedades, compressionais e laminares, da velocidade do som e atenuação) interfere, consubstancialmente, na acurácia dos resultados. Em geral, existe uma carência na coleta e/ou disponibilidade de tais dados.

Ainda em relação a este item, destaca-se que a importância da acurácia das propriedades geoacústicas do fundo depende de fatores como a frequência do sinal, distância fonte-receptor e profundidade do guia de ondas. A interação com o fundo tende a ser menos relevante em problemas envolvendo grandes escalas, altas frequências e grandes profundidades, de acordo com a tendência da refração em desviar os raios sonoros de volta para cima (em direção às menores velocidades de propagação). Por outro lado, o rigor no correto tratamento do fundo como um meio

estratificado é fundamental para pequenas distâncias envolvidas, baixas frequências e propagação em águas rasas [6, 11].

Potencialidades dos NMM

As principais vantagens dos modelos de modos normais são:

- Geralmente apresentam boa acurácia, robustez e eficiência;
- Habilidade em lidar com ambientes multicamadas e camadas elásticas estratificadas [50];
- Possibilidade de considerar rugosidades interfaciais;
- Desde que o problema de autovalor tenha solução, admitem qualquer configuração fonte-receptor (diferentes profundidades de fontes e receptores) em uma única execução do modelo [6, 78];
- Consideram efeitos dispersivos (tal como os demais modelos ondulatórios); e
- Boa parte deles admite extensões para modelagem 3D.

Um inventário de boa parte modelos acústicos pode ser encontrado em ETTER [6]. Entre os NMM 3D atualmente disponíveis, o trabalho em tela propõe o uso do modelo KRAKEN3D [50], distribuído como parte da *Acoustics Toolbox*, disponibilizado por meio da biblioteca *on-line* da OAL [60].

4.1.4 KRAKEN3D

O KRAKEN3D representa uma extensão do NMM KRAKEN para ambientes que apresentam variações 3D. Foi originalmente desenvolvido, por volta de 1986, pelo Laboratório de Pesquisa da Marinha dos EUA (*U.S. Naval Research Laboratory, NRL*) em apoio ao programa *Wide-Area Acoustic Propagation*.

De fato, embora essa extensão seja aqui denominada 3D, mais precisamente, trata-se de uma técnica $N \times 2D$, onde o algoritmo numérico funciona sobre uma malha triangular que reparte a área do domínio de modelagem, tal como uma malha de elementos finitos. Assim como no caso do problema 2D, na modelagem $N \times 2D$, mostra-se conveniente efetuar os cálculos sobre uma malha grosseira e; posteriormente, calcular os valores intermediários por meio de interpolação.

Distribuindo-se os nós da malha ao longo das isobatimétricas, o esforço computacional será menor; pois, caso as propriedades da coluna d'água e do fundo não variem, teremos pontos “acusticamente” idênticos [40] e, assim sendo, uma quantidade bem menor de arquivos de informações ambientais a serem criados. Entretanto, a prática mostra que o uso de grades regulares facilita a construção da malha, mostrando-se mais vantajoso em muitas situações.

A partir dos modos calculados em diferentes ambientes correspondentes aos nós da malha, os campos acústicos 3D são computados por meio de um programa específico, chamado FIELD3D. O programa FIELD3D foi originalmente concebido para formar o cerne do sistema *Wide-Area Rapid Acoustic Prediction* (WRAP) [40]. O sistema WRAP, concebido por volta de 1990, inclui opções de modelagem de ruído para inclusão na previsão da *performance* de *arrays* em ambientes 3D complexos, por meio do uso de diferentes técnicas de processamento de sinais [50, 79].

O propósito básico do sistema era gerar prognósticos rápidos do campo acústico para diferentes novas posições de fontes e receptores, em substituição aos algoritmos de marcha que vinham sendo, até então, empregados (nomeadamente, algoritmos de Equações Parabólicas [30, 32, 37]). Os algoritmos tradicionais de marcha exigem que sejam recalculadas novas soluções completas das equações acústicas da onda a cada nova configuração fonte-receptor, além disso se mostravam, de certo modo, redundantes por não tirarem proveito das partes estacionárias do problema [40].

A estratégia básica de cálculo empregada pelo KRAKEN3D é a mesma originalmente adotada no sistema WRAP, que consiste em, de antemão, calcular localmente os modos normais e os autovalores em diferentes ambiente oceânicos 3D complexos [6, 40] para, posteriormente, usar os modos calculados como dados de entrada para o programa FIELD3D, que calcula o campo de pressão nas três dimensões como uma sequência de fatias verticais 2D do campo acústico [50].

Para cálculo dos modos, é empregado o KRAKEN (2D) configurado para cálculos *range-dependent* com uso de modos adiabáticos. A Aproximação de Modos Adiabáticos (já comentada na subseção 4.1.2) é aqui empregada a fim de prover maior agilidade nos cálculos³. Tendo em vista o fato dos cálculos adiabáticos serem realizados para um conjunto de valores discretos de distâncias, o cálculo dos modos em pontos intermediários, tais como os nós que compõem a malha triangular, é feito por meio de interpolação bilinear.

Uma vez que os modos são calculados por um modelo 2D, conclui-se que a contabilização dos efeitos *out-of-plane*, característicos da modelagem 3D, é, unicamente, realizada por meio do programa FIELD3D. O programa possui como parâmetros de entrada os arquivos binários de modos **.mod*, calculados pelo KRAKEN (2D), e o arquivo de parâmetros do campo **.flp* (escrito pelo usuário). Como *output*, o programa possui o arquivo binário tipo “sombreamento” **.shd*, que contém o campo de pressão 3D calculado.

³No caso do KRAKEN (2D), o tempo computacional é independente do número de fontes ou receptores considerados, entretanto o espaço de armazenamento aumenta, sobretudo em regimes de altas frequências [50]. Já no caso do programa FIELD3D, o tempo e o espaço se ampliam em função do aumento do número de fontes e receptores.

Constam do arquivo de parâmetros do campo *.flp informações tais como:

- Profundidade (z_s) e coordenadas da fonte (x_s, y_s);
- Profundidades e distâncias dos receptores;
- Informações para definição das radiais e feixe de raios lançados;
- Atribuição dos arquivos de modos para cada um dos nós da malha; e
- Conectividade nodal entre os elementos triangulares.

O programa oferece opção de considerar ou não os efeitos da refração horizontal, apresentando opções de tipo de cálculo [50]:

- STD (*standard*): Para rodada N×2D desprezando a refração horizontal; e
- GBT (*Gaussian Beam Trace*): Para rodada considerando a refração horizontal com feixes Gaussianos (também chamada de rodada 3D)⁴.

A refração horizontal é calculada via acumulação de fase ao longo das diferentes radiais [40] e seu equacionamento parte da Equação de Helmholtz em três dimensões, que pode ser escrita como [50]

$$\rho \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) + \frac{\omega^2}{c^2(x, y, z)} P = -\delta(x) \delta(y) \delta(z - z_s) \quad , \quad (4.18)$$

onde é buscada uma solução na forma [50]

$$P(x, y, z) = \sum_m \varphi_m(x, y) Z_m(x, y, z) \quad , \quad (4.19)$$

onde $\varphi_m(x, y)$ é uma função que depende unicamente das coordenadas horizontais x e y e $Z_m(x, y, z)$ são os modos locais.

Substituindo a expressão de $P(x, y, z)$ na Equação de Helmholtz e aplicando o operador

$$\int (\bullet) \frac{Z_l(x, y, z)}{\rho} dz \quad , \quad (4.20)$$

após certo algebrismo e desprezando-se as contribuições dos modos acoplados, chegamos à equação da refração horizontal, dada por [50]

$$\frac{\partial^2 \varphi_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_l}{\partial y^2} + k_l^2(x, y) \varphi_l = -Z_l(z_s) \delta(x) \delta(y) \quad . \quad (4.21)$$

⁴Nas simulações realizadas no Cap. 6, referente à localização da fonte com o KRAKEN3D, tentou-se, sem sucesso, por diversas vezes, utilizar a opção GBT considerando-se, simultaneamente, várias profundidades de fontes e receptores. Mesmo após um profundo estudo do código do programa, não foi possível chegar a nada conclusivo. Ao que tudo indica, essa opção só funciona satisfatoriamente quando é utilizada apenas uma única fonte e um único receptor (situação que não tem interesse para uso em 3DMFP). Assim sendo, optou-se por abandonar o uso da opção GBT nesta tese.

Pode-se perceber que, no equacionamento da refração horizontal, a dimensão z é eliminada do problema e é obtida uma nova equação de Helmholtz, mas agora nas coordenadas laterais x e y , onde o índice de refração efetivo é dado pelo número de onda horizontal $k_l(x, y)$. Essa nova equação de Helmholtz pode ser resolvida por diferentes métodos. No KRAKEN3D, as equações são resolvidas usando feixes Gaussianos que são refratados no plano horizontal [50].

O caso “3D Atlantic”

Um exemplo básico, que serve como ponto de partida para o entendimento da sequência de cálculo adotada pelo KRAKEN3D, encontra-se ilustrado no teste “3D Atlantic”, disponível na *Acoustics Toolbox* da OAL [60], onde foi utilizado o cenário de um trecho da Corrente do Golfo, no Oceano Atlântico Norte [11, 50].

O domínio de modelagem é amostrado por meio de uma malha triangular sobre o plano xy (Fig. 4.3a), mais refinada nas áreas de passagem da Corrente do Golfo e nos vórtices por ela desprendidos. Ressalta-se que não foi aqui empregada uma malha regular porque, embora fosse mais fácil de ser construída, exigiria uma quantidade muito grande de nós a fim de atender à adequada amostragem espacial capaz de capturar os detalhes da corrente e dos vórtices.

Para os cálculos dos campos 3D de pressão acústica, foram prescritas 181 radiais (representadas em encarnado na Fig. 4.3a) com espaçamento angular de 2° entre elas. A fonte acústica, posicionada no centro da malha, e os receptores estão mergulhados na mesma profundidade de 400 m. Uma plotagem polar da superfície de TL gerada, na profundidade de 400 m, sobre o plano horizontal xy é apresentada na Fig. 4.3b, aqui denominada “pizza de TL”.

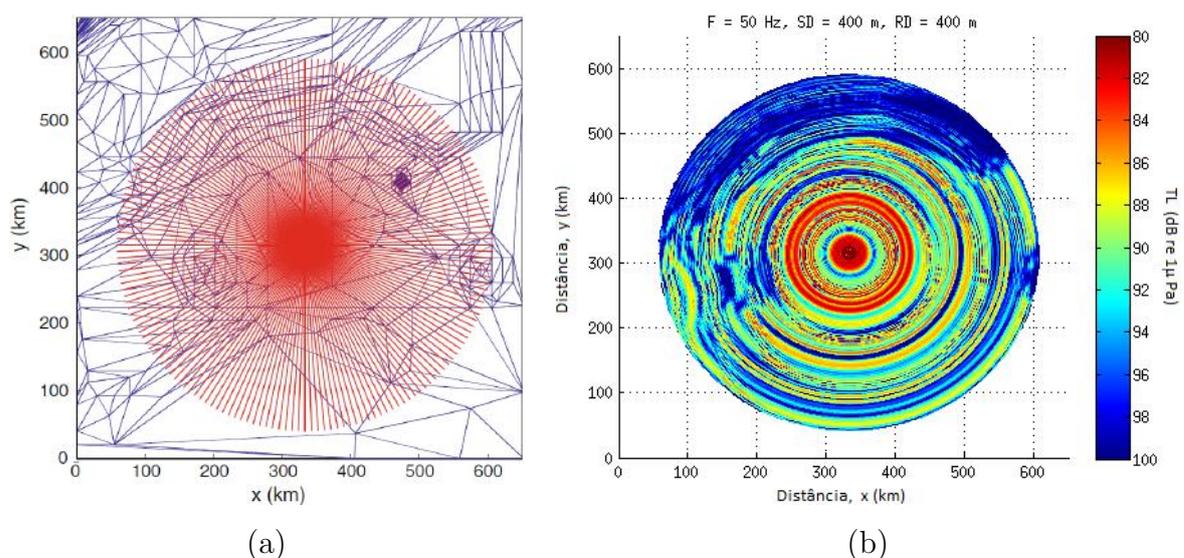


Figura 4.3: Uso do KRAKEN3D no cenário da Corrente do Golfo: (a) radiais sobre a malha de triangulação. Fonte: JENSEN *et al.* [11], p. 424; e (b) campo horizontal de TL (obtido a partir da execução do *script* “runtests.m” do MATLAB, atinente ao caso do teste “3D Atlantic” [60]).

Pode-se notar, na Fig. 4.3 (b), como a presença da Corrente do Golfo gera uma espécie de sombra acústica (de fato, a energia é apenas redirecionada para outras profundidades). Percebe-se também, nitidamente, a ocorrência de perturbações no campo de TL em virtude da presença dos vórtices.

No contexto da presente tese, o fato mais interessante que se pode obter do caso “3D Atlantic” é percepção de como as variações tridimensionais do ambiente, geradas em função das alterações do SSP e da batimetria, surtiram efeito na quebra da simetria cilíndrica do campo de pressão, uma vez que os anéis que compõem a “pizza de TL” apresentam aspecto irregular e heterogêneo.

Embora a concepção do KRAKEN3D já esteja perto de alcançar sua terceira década, sua documentação ainda é um tanto carente e esparsa, o que dificulta a perfeita compreensão do equacionamento envolvido. Embora não exista, até a presente data, um manual específico para o KRAKEN3D, algumas considerações sobre o modelo e o programa FIELD3D encontram-se disponíveis no próprio manual do KRAKEN (2D) [50]. Atualmente, casos de testes do KRAKEN3D têm sido desenvolvidos e comparados com soluções analíticas e resultados de outros modelos (3DPE, BELLHOP3D e TRACEO3D) [48].

Além do emprego de modelos que adotam o *approach* de modos normais, o presente trabalho propõe o uso de modelos que se apoiam na Teoria de Raios.

4.2 Teoria de Raios

A Teoria de Raios tem suas raízes na óptica, onde era usada para o entendimento da propagação da luz, antes mesmo do conhecimento de suas equações fundamentais. No ramo da acústica submarina, a Teoria de Raios vem sendo empregada desde o início do século XX, quando foi publicado por LICHTÉ [80], em 1919, um dos primeiros artigos inéditos sobre o uso do traçado de raios em ambientes de águas rasas [11].

No início dos anos 60, o uso da Teoria de Raios na modelagem acústica foi bastante ampliado, chegando a se tornar a técnica de modelagem mais popular na comunidade científica daquela época. Nas últimas décadas, a Teoria de Raios vem sofrendo forte concorrência de outros *approaches* tais como modos normais e equações parabólicas. O uso inerente da aproximação de alta frequência adotado pela Teoria de Raios fez com que a mesma se tornasse, *a priori*, contraindicada para regimes de baixas frequências ou em situações onde o comprimento de onda não fosse muitas vezes menor que a profundidade local.

Entretanto, nos dias de hoje, a Teoria de Raios volta a ter seu uso alastrado, não só na acústica e na óptica, mas também por diversas outras áreas do conhecimento, tais como no eletromagnetismo, na sísmica, na indústria petrolífera e em

áreas de interesse militar (nomeadamente em modelos de previsão de alcance sonar para navios de superfície e submarinos).

Empregando, fundamentalmente, os mesmos princípios de reflexão e refração (Lei de Snell) que governam a propagação da luz (devidamente adaptados para o meio submarino) foi elaborado o desenvolvimento matemático da Teoria de Raios em termos acústicos, cujo ponto de partida é a Equação de Helmholtz (Eq. 4.1), a qual, após o devido tratamento, nos conduz à equação da *Eikonal* para o cálculo da fase da onda propagante e à equação de transporte para o cálculo das amplitudes.

Assumindo a aproximação de onda plana, a expressão da pressão acústica pode ser escrita como produto de função da amplitude por uma função da fase (exponencial) [81], tal como

$$P(\mathbf{r}, \omega) = A(\mathbf{r}) e^{i\omega\tau(\mathbf{r})} \quad , \quad (4.22)$$

onde:

- \mathbf{r} é o vetor posição (x, y, z) ;
- $\tau(\mathbf{r})$ é tempo de percurso (atraso de fase) gasto pela onda na propagação ao longo da distância r ;
- $\omega\tau(\mathbf{r})$ é a função *fase*, que varia rapidamente e é conhecida como *Eikonal* (palavra grega que significa “imagem”); e
- $A(\mathbf{r})$ é a função *amplitude*, que varia lentamente e incorpora os efeitos do espalhamento geométrico e vários mecanismos de perda [81].

As superfícies de fase constante ($\omega\tau(\mathbf{r}) = \text{cte}$) são as *frentes de onda*. As trajetórias dos raios são ortogonais às frentes de onda e indicam a direção de propagação da energia. A aproximação da acústica geométrica assume que a amplitude varia com a posição mais lentamente de que a fase [6]. As funções $\tau(\mathbf{r})$ e $A(\mathbf{r})$ estão associadas, respectivamente, às equações da *Eikonal* e de transporte, cujas soluções constituem a base da Teoria de Raios.

A fim de resolver a Equação de Helmholtz e chegar nas chamadas **equações dos raios**, buscamos obter uma solução para o campo de pressão que tenha o mesmo aspecto da Eq. 4.22, que pode ser reescrita, na forma mais completa, como um somatório de infinitos termos de amplitudes A_j , compondo as chamadas *séries de raios* [11]

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \left(\sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(\mathbf{r})}{(i\omega)^j} \right) e^{i\omega\tau(\mathbf{r})} \quad . \quad (4.23)$$

Ressalta-se que a série de raios (4.23) nada mais é do que a própria Eq. (4.22) onde foram desprezados todos os termos do somatório exceto o primeiro (termo em $j = 0$). Ou seja, foram negligenciados os termos de ordem $1/\omega$, $1/\omega^2$, $1/\omega^3$, etc. Tal

simplificação introduz uma das peculiaridades intrínsecas mais marcantes da Teoria de Raios - a **aproximação de alta frequência**, que pode ser expressa por [6, 81]

$$\frac{\nabla^2 A}{A} \ll \kappa^2 \quad . \quad (4.24)$$

Não há, na literatura, um conceito rígido para definição de alta frequência, pois tal ideia é, essencialmente, função da geometria do meio de propagação. ETTER [6] apresenta uma orientação para a definição de alta frequência dada por

$$f > 10 \frac{c}{D} \quad \text{onde} \quad f = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (4.25)$$

sendo D é a profundidade local do guia de ondas. Dessa forma, uma determinada frequência poderá ser considerada alta em um dado ambiente de águas profundas e baixa em outro de águas mais rasas. Destaca-se que tal orientação (4.25) serve apenas como uma estimativa genérica e não deve ser levada com muito rigor.

Normalmente, as séries de raios no domínio da frequência (4.23) são divergentes; mas, em determinados casos, pode-se esperar que uma aproximação assintótica conduza a uma solução exata com ω tendendo ao infinito [82]. Tal afirmação está alinhada com o conceito da aproximação de alta frequência acima mencionado.

Aplicando as derivadas da Eq. 4.23 em relação a r e calculando o operador laplaciano ∇^2 , chegamos a [11]

$$\nabla^2 P = e^{i\omega\tau} \left\{ [-\omega^2 |\nabla\tau|^2 + i\omega\nabla^2\tau] \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{(i\omega)^j} + 2i\omega\nabla\tau \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\nabla A_j}{(i\omega)^j} + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\nabla^2 A_j}{(i\omega)^j} \right\} . \quad (4.26)$$

Substituindo o resultado acima (4.26) na Equação de Helmholtz (4.1) e igualando os termos de mesma ordem em ω , obtemos a sequência infinita de equações abaixo para as funções $\tau(\mathbf{r})$ e $A_j(\mathbf{r})$, dadas por [11]:

$$O(\omega^2) \quad : \quad |\nabla\tau|^2 = c^{-2}(\mathbf{r}) , \quad (4.27)$$

$$O(\omega) \quad : \quad 2\nabla\tau \bullet \nabla A_0 + (\nabla^2\tau)A_0 = 0 , \quad (4.28)$$

$$O(\omega^{1-j}) \quad : \quad 2\nabla\tau \bullet \nabla A_j + (\nabla^2\tau)A_j = -\nabla^2 A_{j-1} , \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (4.29)$$

A equação diferencial parcial não linear (4.27) (correspondente aos termos de ordem ω^2) é a equação da *Eikonal*, usada para o cálculo da fase da onda propagante e assim definir a geometria dos raios; pode ser interpretada como a parte real da Equação de Helmholtz. As equações diferenciais parciais lineares (4.28) e (4.29), correspondentes aos termos de ordem ω e ω^{1-j} , são as (infinitas) séries das equações de transporte, que definem as amplitudes da onda propagante e podem ser interpretadas como a parte imaginária da Equação de Helmholtz [6, 11]. Veremos a seguir a estratégia de solução adotada para resolver as equações da Eikonal e de transporte.

4.2.1 Solução da Equação da Eikonal

A equação da *Eikonal* (4.27) pode ser escrita na forma [81]

$$|\nabla\tau| = \frac{1}{c} \quad , \quad (4.30)$$

podendo ser simplificada como

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{1}{c} \quad \Rightarrow \quad d\tau = \frac{ds}{c} \quad , \quad (4.31)$$

onde:

- ds é o diferencial da distância percorrida pela onda propagante (comprimento de arco ao longo do raio); e
- $d\tau$ é o tempo de percurso gasto pela da onda na propagação pela distância ds .

Para propagação entre dois pontos A e B , o tempo total de percurso total corresponde a

$$\tau = \int_A^B \frac{ds}{c} = \int_A^B \frac{1}{c} ds = \int_A^B \sigma ds \quad , \quad (4.32)$$

onde

$$\sigma = \frac{1}{c} \quad (4.33)$$

é uma grandeza própria, definida como o inverso da velocidade do som, utilizada para simplificar as equações. σ pode ser entendido como uma representação da “lentidão” ou “vagarosidade” do som.

No contexto do princípio de *Fermat* e do formalismo Lagrangeano, a teoria das perturbações [83] estabelece que, na óptica geométrica, um raio é definido como uma curva ao longo da qual o tempo de percurso é considerado estacionário. A equação *Euler-Lagrange* que correspondente a esse problema variacional é a chamada equação cinemática do traçado de raios, dada por

$$\frac{d}{ds} \left(\sigma \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \nabla\sigma \quad . \quad (4.34)$$

Assim sendo, é possível concluir que a solução da equação da *Eikonal* requer a solução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left(\sigma \frac{dx}{ds} \right) &= \frac{\partial\sigma}{\partial x} \quad , \\ \frac{d}{ds} \left(\sigma \frac{dy}{ds} \right) &= \frac{\partial\sigma}{\partial y} \quad , \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\frac{d}{ds} \left(\sigma \frac{dz}{ds} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial z}.$$

Considerando-se um problema com simetria cilíndrica, no caso 2D, e decompondo o vetor σ em função de suas componentes nas direções horizontal e vertical,

$$\sigma(s) = [\sigma_r(s) \ \sigma_z(s)] \quad ,$$

o sistema de equações (4.35) pode ser simplificado como [11, 81]

$$\begin{aligned} \frac{dr}{ds} &= c \sigma_r(s) , & \frac{d\sigma_r}{ds} &= -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial r} , \\ \frac{dz}{ds} &= c \sigma_z(s) , & \frac{d\sigma_z}{ds} &= -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial z} , \end{aligned} \quad (4.36)$$

onde:

- $dr = ds \cos \theta$ é o diferencial horizontal da distância percorrida pela onda propagante, sendo θ o ângulo vertical de lançamento do raio (elevação); e
- $dz = ds \sin \theta$ é o diferencial vertical da distância percorrida pela onda propagante (cf. Fig. 4.4).

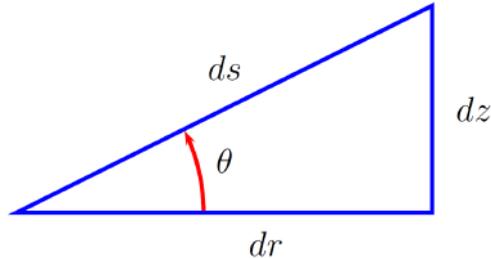


Figura 4.4: Componentes diferenciais da distância ds percorrida pela onda propagante no caso do problema bidimensional (plano rz) com simetria cilíndrica. Fonte: RODRÍGUEZ [81], p. 10

As equações (4.36) são popularmente conhecidas como **equações do raio** em coordenadas cilíndricas e formam um conjunto de equações diferenciais ordinárias que são resolvidas numericamente. Para concluir a especificação dos raios e determinar suas trajetórias ao longo do guia de ondas, precisamos definir as condições iniciais do problema, dadas por [11, 81]:

$$r(0) = r_s \quad , \quad z(0) = z_s \quad , \quad \sigma_r(0) = \frac{\cos(\theta_0)}{c_0} \quad , \quad \sigma_z(0) = \frac{\sin(\theta_0)}{c_0} \quad , \quad (4.37)$$

onde:

- θ_0 é o ângulo vertical inicial de lançamento do raio (elevação);
- (r_s, z_s) são as coordenadas cilíndricas da posição da fonte; e
- $c_0 = c(0, 0)$ é a velocidade do som na posição da fonte (r_s, z_s) .

Considerando-se assim concluído o cálculo da fase da onda propagante e da geometria dos raios. A próxima etapa consiste em determinar as amplitudes dos raios, o que é feito por meio da solução da equação de transporte.

4.2.2 Solução da Equação de Transporte

No contexto da aproximação de alta frequência (Eq. 4.24, p. 53), serão desprezadas todas as equações de transporte de ordem ω^{1-j} com $j = 1, 2, 3, \dots$, restando apenas a equação de ordem ω (4.28), abaixo transcrita

$$2 (\nabla A \bullet \nabla \tau) + A \nabla^2 \tau = 0 \quad .$$

Apesar de sua aparente complexidade, a equação de transporte pode ser resolvida analiticamente [71]. Sua solução clássica envolve a solução da equação da *Eikonal* (subseção 4.2.1) e o uso de um sistema de coordenadas do raio referenciadas a um sistema de coordenadas esféricas (s, θ, ϕ) , centrado na posição da fonte pontual [81], onde θ é o ângulo vertical de lançamento do raio em relação ao plano horizontal xy (elevação) e ϕ é o ângulo horizontal da projeção do raio lançado sobre o plano horizontal xy em relação ao eixo x (azimute) (ver Fig. 4.5).

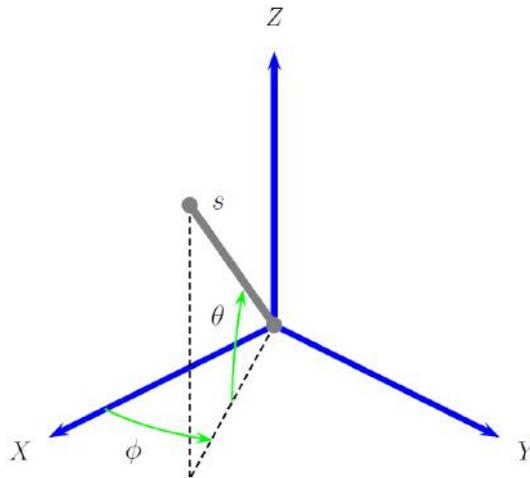


Figura 4.5: Coordenadas do raio nas proximidades da fonte pontual. Fonte: RODRÍGUEZ [81], p. 13.

A solução clássica para a pressão acústica ao longo do raio pode ser escrita como [84]

$$P(s, \omega) = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{c(s)}{c_0} \frac{\cos(\theta_0)}{J}} e^{-i\omega\tau(s)} \quad . \quad (4.38)$$

Destaca-se o surgimento do termo J no denominador do radicando da Eq. (4.38). J é o Jacobiano da transformação entre as coordenadas do raio e as coordenadas cilíndricas e representa a seção reta do tubo de raios que liga a fonte ao receptor [71] (Fig. 4.6).

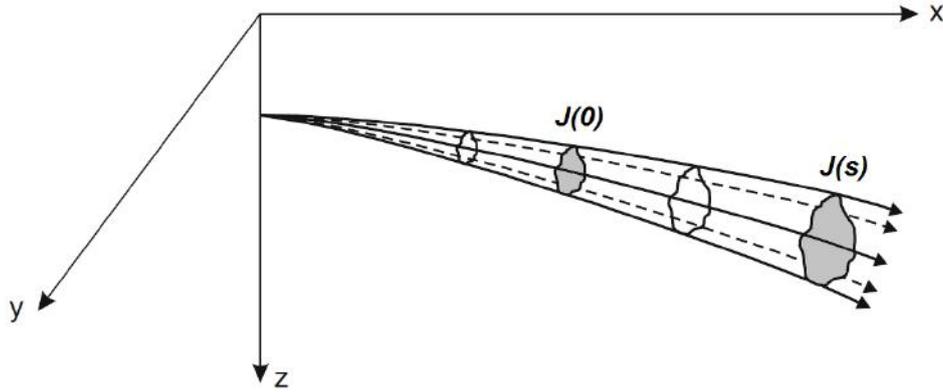


Figura 4.6: Tubo de raios e destaque do Jacobiano associado à seção reta em diferentes posições do espaço. Fonte: adaptado de JENSEN *et al.* [11], p. 164.

Os pontos onde $J = 0$ definem, matematicamente, as *cáusticas* do campo de pressão acústica. Fisicamente, as cáusticas podem ser entendidas como regiões onde ocorre um cruzamento simultâneo dos raios; dessa forma, a área da seção reta da frente de onda (ilustrada na Fig. 4.6) tende a ser nula, as trajetórias dos raios formam um ponto focal e a amplitude da pressão acústica tende ao infinito [73].

Um dos artefatos intrínsecos da Teoria de Raios é o colapso da solução na vizinhança de pontos focais e cáusticas, pontos do guia de ondas onde o campo de pressão é singular [71]. Ou seja, a solução clássica falha na vizinhança de cáusticas, pois prevê um nível de pressão sonora infinita.

Além dos problemas decorrentes da formação de cáusticas e zonas de convergência, outra peculiaridade da Teoria de Raios está no fato dela prever, em determinados casos, uma região de nível zero de pressão sonora (zona de sombra). Esse comportamento reflete a incapacidade do *approach* de raios em modelar o processo de difração, que permite o som escapar para regiões que parecem inacessíveis de acordo com a Lei de Snell [78].

A fim de oferecer uma transição mais suave nas regiões de cáusticas, alternativas adotadas pela Teoria dos Raios envolvem o uso de soluções baseadas na Aproximação de Feixes Gaussianos [34, 85, 86] ou, alternativamente, o uso simplificado de feixes triangulares, a.k.a. feixes em formato de chapéu (*hat-shaped beams* [87]), os quais serão brevemente discutidos a seguir.

Aproximação de Feixes Gaussianos

O comportamento individual dos raios é um clássico problema da física da propagação de ondas sonoras [86]. No intuito de dirimir essa questão, encontramos, na literatura, variadas soluções que representam leques limitados de feixes ao invés de conjuntos individuais de raios.

Com relevantes aplicações nas áreas de acústica submarina e geofísica⁵, o método de feixes Gaussianos, como uma nova abordagem para o cálculo de campos de ondas acústicas com aproximação de alta frequência, foi inicialmente proposto por POPOV [85], trazendo como principal inovação o fato de superar os indesejáveis problemas decorrentes das cáusticas [82].

A Aproximação de Feixes Gaussianos permite ultrapassar as singularidades introduzidas pela Eq. (4.38), ao substituir os raios da aproximação clássica por feixes, cujas amplitudes decrescem segundo uma curva gaussiana na direção normal ao eixo de propagação [81]. Dessa forma, o raio, propriamente dito, se torna o eixo central de um feixe de decaimento gaussiano. A Fig 4.7 ilustra, geometricamente, o conceito básico da aproximação.

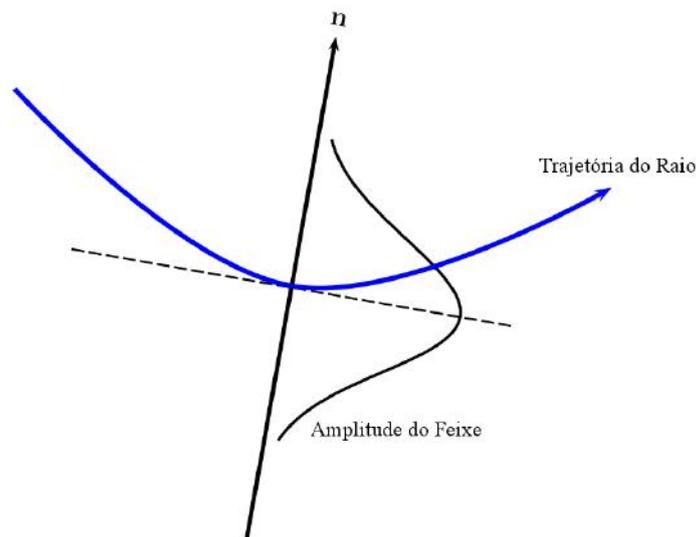


Figura 4.7: Aproximação de Feixes Gaussianos: decaimento da amplitude do feixe na direção normal à trajetória do raio. Fonte: adaptado de RODRÍGUEZ [81], p. 15.

Em comparação com a técnica original de traçado de raios, o método dos feixes Gaussianos tem a vantagem de dispensar o cômputo dos autorraios (*eigenrays*) no cálculo dos campos de pressão [86]. Além de evitar infinitos níveis de energia nas regiões de formação de cáusticas, o método também funciona para prevenir os problemas decorrentes da ocorrência de zonas de sombras perfeitas. Outrossim, a técnica se mostra atraente para aplicações RD que envolvem o uso de altas frequências, nas quais as soluções clássicas da Teoria de Ondas não sejam uma alternativa prática [6, 86].

Um exemplo da aplicação da Teoria de Raios em um ambiente RD, tradicionalmente caracterizado pela formação de extensas zonas de sombras, pode ser

⁵Mais especificamente, o método de feixes Gaussianos possui importante aplicação no processamento dos dados de reflexão sísmica, essenciais para atividades tais como o levantamento da plataforma continental e a investigação de jazidas de petróleo [82].

encontrado em FERREIRA *et al.* [88], onde é demonstrado o uso do modelo de traçado de raios TRACEO [81] na geração de prognósticos do campo acústico em um ambiente de água modal subtropical no Atlântico Sul, localizado nas proximidades da Elevação do Rio Grande (adjacente ao litoral sul do Brasil) e caracterizado pela presença de forte gradiente batimétrico e notável homogeneidade termohalina.

Para calcular o campo de feixes Gaussianos na vizinhança do raio central, um par de equações diferenciais auxiliares, que governam a largura do feixe e sua curvatura em função do comprimento de arco do raio, são integradas ao longo das equações originais dos raios [6]. Adaptando o método para o clássico problema de uma fonte pontual em um guia de ondas com simetria cilíndrica (caso 2D), a pressão acústica ao longo do raio pode ser definida como [86]

$$P(s, n) = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{c(s)}{c_0} \frac{\cos(\theta_0)}{r q(s)}} \exp \left\{ -i\omega \left[\tau(s) + \frac{1}{2} \frac{p(s)}{q(s)} n^2 \right] \right\} , \quad (4.39)$$

onde:

- n é a distância normal ao eixo central do feixe gaussiano; e
- $p(s)$ e $q(s)$ são funções complexas auxiliares que governam a evolução do feixe em função do comprimento de arco s . A parte real do quociente $p(s)/q(s)$ está relacionada com a curvatura do feixe e a parte imaginária, com sua largura [11]. A função $q(s)$ é também proporcional ao Jacobiano J [84].

Pode-se notar que a técnica de feixes Gaussianos assume também uma solução composta pelo produto de uma função da trajetória do raio (amplitude) por uma função de fase (exponencial). As funções $p(s)$ e $q(s)$ são relacionadas através das chamadas *equações dinâmicas dos raios*, dadas por [11, 81, 86, 87]

$$\frac{dq}{ds} = c(s) p(s) \quad \text{e} \quad \frac{dp}{ds} = -\frac{c_{nn}}{c^2(s)} q(s) , \quad (4.40)$$

onde c_{nn} é a curvatura da velocidade do som na direção normal à trajetória do raio.

Embora a Eq. (4.39) resolva a questão das singularidades das cáusticas, ela introduz outros artefatos que limitam sua aplicação em problemas que envolvem retroespalhamento (*backscattering*). No caso de raios que se propaguem em sentido contrário ao original (de volta para fonte), o termo r no denominador irá tender para zero e a amplitude irá aumentar; assim sendo, raios que sejam refletidos de volta para fonte irão corresponder a uma focalização de ondas ao invés de uma reflexão, o que não tem sentido físico. Uma alternativa para solução desse problema é o uso da Aproximação de Feixes Gaussianos em coordenadas cartesianas, tal como [84]

$$P(s, n) = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{c(s)}{c_0} \frac{\cos(\theta_0)}{q_{\perp}(s) q(s)}} \exp \left\{ -i\omega \left[\tau(s) + \frac{1}{2} \frac{p(s)}{q(s)} n^2 \right] \right\} , \quad (4.41)$$

onde apenas o termo $q_{\perp}(s)$ na Eq. (4.41) foi incluído em substituição à coordenada radial r da Eq. (4.39). $q_{\perp}(s)$ é uma função auxiliar adicional associada a largura do feixe em função do comprimento de arco s . A vantagem dessa solução é que ela não apresenta mais o termo r no denominador e, com isso, quando os raios são refletidos de volta para a fonte, a amplitude continua decrescendo como, naturalmente, era de se esperar no caso real.

Aproximação de Feixes Gaussianos 3D

A extensão tridimensional para Aproximação de Feixes Gaussianos, inicialmente descrita por BABICH e POPOV [89] *apud* [51, 86], foi elaborada de modo a exigir poucas modificações no algoritmo da aproximação 2D. Basicamente, a curva gaussiana na direção normal ao eixo de propagação do raio, antes empregada no caso bidimensional, será, agora, substituída por uma superfície gaussiana no plano normal ao eixo de propagação (Fig. 4.8).

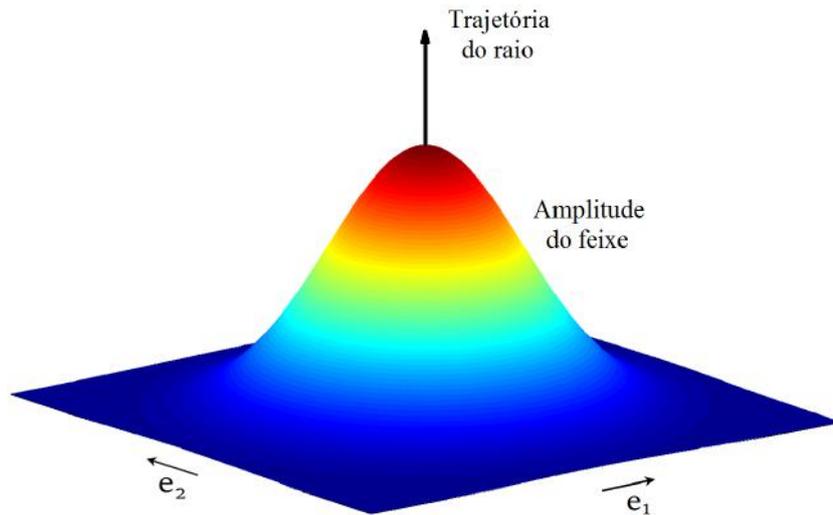


Figura 4.8: Aproximação de Feixes Gaussianos 3D: decaimento da amplitude do feixe no plano normal à trajetória do raio. As direções e_1 e e_2 indicam as direções normais ao eixo do raio.

Para construção da solução, o ponto de partida são as equações dos raios (Eq. 4.36, p. 55), estendidas para o espaço 3D e transformadas em coordenadas cartesianas, dando origem ao seguinte conjunto de equações [35, 51, 52]:

$$\frac{dx}{ds} = c(s) \sigma_x, \quad \frac{dy}{ds} = c(s) \sigma_y, \quad \frac{dz}{ds} = c(s) \sigma_z, \quad (4.42)$$

$$\frac{d\sigma_x}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial x}, \quad \frac{d\sigma_y}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial y}, \quad \frac{d\sigma_z}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (4.43)$$

As equações (4.42) são deduzidas a partir da versão 3D da equação da Eikonal (4.30, p. 54) e as equações (4.43) representam as derivadas em relação a s das componentes do vetor lentidão do som σ , as quais podem ser escritas, em uma

forma vetorial mais compacta, como [11]

$$\frac{d\sigma}{ds} = -\frac{1}{c^2} \nabla c \quad . \quad (4.44)$$

As equações (4.42) e (4.43) compõem um sistema de primeira ordem de equações diferenciais ordinárias que representam as *equações tridimensionais dos raios*. Essas equações são complementadas por equações diferenciais adicionais que governam a evolução da abertura do feixe e sua curvatura em função do comprimento de arco s [35].

As equações 3D dos raios podem ser resolvidas numericamente, recorrendo, por exemplo, a métodos de *Runge-Kutta* (entre outros), sendo as condições iniciais dadas por [35, 51]

$$\begin{aligned} x(0) &= x_s, & \sigma_x &= \frac{1}{c(0)} \cos \theta \cos \phi, \\ y(0) &= y_s, & \sigma_y &= \frac{1}{c(0)} \cos \theta \sin \phi, \\ z(0) &= z_s, & \sigma_z &= \frac{1}{c(0)} \sin \theta, \end{aligned} \quad (4.45)$$

onde:

- (x_s, y_s, z_s) são as coordenadas cartesianas da posição da fonte;
- σ_x, σ_y e σ_z são as componentes do vetor lentidão do som (Eq. 4.33, p. 54), $\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$; e
- $c(0) = c(0, 0, 0)$ é a velocidade do som na posição da fonte (x_s, y_s, z_s) .

A pressão complexa resultante pode ser calculada por meio de um somatório de todos os feixes individuais, ponderados por seus respectivos pesos. Outras considerações sobre as condições iniciais do problema e a expressão final para o cálculo do campo de pressão dado pela Aproximação 3D de Feixes Gaussianos serão apresentadas, mais adiante, na descrição dos modelos 3D de raios em uso neste trabalho.

Desde sua concepção, o traçado de feixes Gaussianos vem sendo empregado como uma alternativa em substituição ao original traçado de raios. Contudo que a largura e a curvatura do feixe acústico considerado sejam apropriadamente escolhidas, o método tende a apresentar resultados acurados. PORTER e LIU [87] apontam como um dos principais inconvenientes do *approach* dos feixes Gaussianos a dificuldade em escolher, apropriadamente, os parâmetros do feixe. De fato, além desse problema, o método demanda um tempo computacional relativamente grande, tendo em vista que são calculadas as influências dos vários raios adjacentes sobre o eixo central de simetria da Gaussiana. De modo a dirimir essas questões, foram

introduzidas modificações simplificadoras na construção dos feixes Gaussianos, tais como a aproximação de feixes triangulares.

Aproximação de Feixes Triangulares

Em analogia ao método de elementos finitos, foi desenvolvido um algoritmo que emprega uma aproximação triangular (ou em formato de chapéu) para o feixe acústico, ao invés de uma Gaussiana. Tal método foi, inicialmente, denominado Traçado de Raios por Elementos Finitos (*Finite-Element Ray Tracing* (FER) [87]), mas ficou, posteriormente, mais popularizado como aproximação de feixes em formato de chapéu (*hat-shaped beams*).

A construção dos feixes geométricos *hat-shaped* considera um decaimento linear a partir da amplitude inicial do raio, $A_0(s)$, até zero. A meia largura do feixe acústico, $W(s)$, é definida como a distância entre o raio central e o ponto de seu desvanecimento total [11]. A Fig. 4.9 ilustra essa geometria.

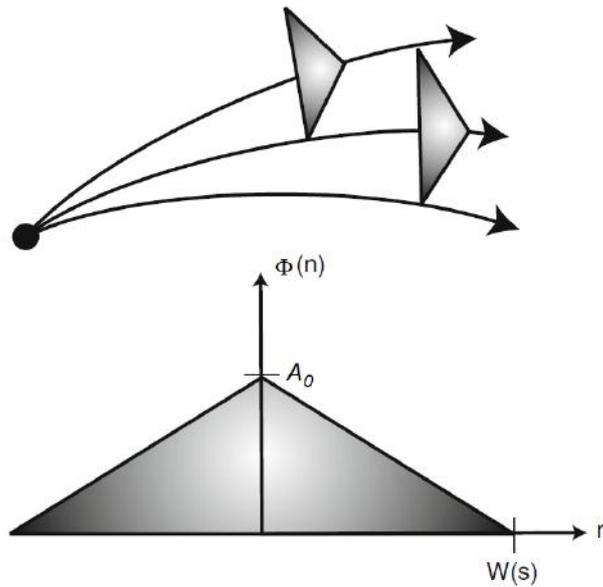


Figura 4.9: Construção dos feixes geométricos *hat-shaped* ao longo dos raios. Fonte: adaptado de JENSEN *et al.* [11], p. 173.

A meia largura do feixe é precisamente escolhida de modo que o mesmo desvanença ao encontrar o raio vizinho e, naturalmente, dependerá do adensamento escolhido para os raios do leque de lançamento. A pressão acústica ao longo do feixe triangular é dada por [11]

$$P_{\Delta}(s, n) = A(s) \Phi(s, n) e^{i\omega\tau(s)} \quad , \quad (4.46)$$

onde $\Phi(s, n)$ é a função *hat-shaped* linear, definida por partes tal como

$$\Phi(s, n) = \begin{cases} \frac{W(s)-n}{W(s)} & \text{para } n \leq W(s) \\ 0 & \text{para } n > W(s) \end{cases}, \quad (4.47)$$

onde a meia largura do feixe, $W(s)$, é dada por

$$W(s) = |q(s) \Delta\Theta_0|, \quad (4.48)$$

onde $\Delta\Theta_0$ é o espaçamento angular entre raios adjacentes e $q(s)$ é o termo de espalhamento das equações dinâmicas do raios (Eq. 4.40).

Tendo em vista que o comportamento do feixe é determinado pela geometria do campo de raios, o método é referido como um *traçado geométrico de feixes*. Quando corretamente implementado, é capaz de reproduzir precisamente os resultados teóricos de raios. Porém, pequenos erros em sua implementação podem acarretar grandes problemas, uma vez que é necessário utilizar a correta largura do feixe de modo a preencher exatamente o espaçamento entre feixes adjacentes [11] e, assim, evitar a formação de intervalos indesejáveis.

4.2.3 Limitações e Potencialidades dos Modelos de Raios

São abaixo elencadas algumas das principais características dos modelos de traçado de raios (*Ray Tracing Models*, RTM).

Limitações dos RTM

As principais limitações dos modelos de traçado de raios são:

- Em virtude da aproximação de alta frequência, os RTM não são indicados para regimes de frequências baixas. O comprimento de onda deve ser bem menor do que qualquer comprimento característico do meio em questão (profundidade, outras dimensões ou irregularidades do ambiente) [2];
- Conforme já mencionado, sob certas condições, prevê um nível de pressão sonora infinito, como na ocorrência cáusticas e zonas de convergência ou um nível de pressão nula na ocorrência de zonas de sombra;
- Normalmente, consideram o fundo marinho como uma superfície perfeitamente refletora, ignorando a existência do raio transmitido para o fundo e suas sucessivas reflexões e refrações. Essa suposição elimina a possibilidade de considerar propriedades importantes do fundo, tais como suas características porosas ou dispersivas [2]. O uso do conceito de deslocamento do feixe refletido [6, 11] é uma alternativa que visa minimizar os problemas decorrentes do cálculo da reflexão real no fundo;

- Cada alteração na profundidade da fonte fornecida pelo usuário exige, geralmente, que se realize uma nova execução do modelo; e
- Não lidam com a difração.

Potencialidades dos RTM

Algumas vantagens dos RTM são:

- Como o próprio nome diz, permitir a intuitiva visualização da trajetória dos raios, de fácil interpretação pelo usuário;
- Efetua cálculos originalmente RD, em função do comportamento das propriedades do meio, da batimetria e do perfil (ou campo) de velocidade do som. Dessa forma, os modelos permitem incorporar, facilmente, os efeitos das variações do ambiente e das interfaces ao longo da distância. Por essa razão, podem ser mais facilmente estendidos para cálculos 3D quando comparados a modelos primordialmente RI;
- Habilidade em lidar eficientemente com problemas de banda larga (BB), tendo em vista que muitas partes dos cálculos são independentes da frequência (e.g., as trajetórias dos raios e tempos de percurso), ao contrário dos modelos ondulatórios, onde a cada nova frequência, normalmente, uma nova rodada do modelo é exigida [87];
- São capazes de prever tempos de percurso com acurácia suficiente para emprego na maioria das aplicações da modelagem acústica, tais como a tomografia acústica oceânica [78];
- Por serem indicados para cenários RD, com fontes BB de alta frequência, possuem também ampla aplicação na área de modelagem sonar ativa [87];
- Podem apresentar diversas opções de apresentação da saída dos resultados, sem a necessidade da implementação de nenhuma rotina adicional. Opções de saída mais comuns são coordenadas dos raios, tempos de percurso, amplitudes, *eigenrays*, pressão acústica, TL (coerente, incoerente e semi-incoerente) e velocidade de partícula;
- É um método rápido, de reduzido custo computacional quando comparado a modelos ondulatórios, sobretudo em regimes de alta frequência, onde estes tendem a ser mais demorados; e
- Os RTM de uso mais popular são, normalmente, modelos de código aberto e facilmente disponíveis ao usuário.

Entre os RTM atualmente disponíveis na literatura, esta tese propõe o uso dos modelos BELLHOP3D [51] e TRACEO3D [81]. Ambos são disponibilizados por meio da OAL [60]. O primeiro é distribuído como parte da *Acoustics Toolbox*.

4.2.4 BELLHOP3D

O BELLHOP3D é um RTM que consiste em uma extensão tridimensional do, bem conhecido, modelo BELLHOP, incluindo a capacidade de contemplar os efeitos *out-of-plane*, característicos de um ambiente que apresente variações 3D. Além de incluir virtualmente todas as capacidades do BELLHOP, o modelo permite considerar alterações espaciais das propriedades oceanográficas e geoacústicas do meio [90].

Uma versão de pesquisa bem preliminar do BELLHOP3D, chamada Beam3D, foi escrita em 1985, em FORTRAN, porém não possibilitava o uso de batimetria variável e as informações ambientais dos perfis de velocidade do som não eram prescritas a partir dos arquivos de entrada, tendo que ser fornecidas a partir de uma função analítica definida pelo usuário em função da posição e da profundidade [51].

A mudança da versão original de pesquisa para plataforma MATLAB ocorreu em 2004, trazendo um ganho em termos de facilidade de desenvolvimento, porém com grande aumento do tempo computacional. Por essa razão, o BELLHOP3D manteve seus códigos em FORTRAN [51], ficando o uso do MATLAB destinado a prover uma interface mais amigável com o usuário na prescrição dos dados de entrada e na apresentação dos resultados de saída.

Basicamente, o BELLHOP3D emprega os mesmos códigos do BELLHOP, incorporando a habilidade de lidar com as variações tridimensionais das propriedades do meio, tais como velocidade do som, batimetria, diversos tipos de fundo, etc. Diferentes padrões de radiação da fonte, atenuação de volume e coeficientes de reflexão podem também ser prescritos.

O modelo foi desenvolvido de modo a aproveitar o mesmo formato dos arquivos de entrada do tradicional BELLHOP, a menos dos *inputs* adicionais necessários para especificar as linhas de marcação dos receptores e definir o leque de feixes irradiados [91]. As possíveis opções de saída dos resultados incluem cálculo de TL, *eigenrays* e séries temporais.

Existem diferentes algoritmos de traçado dos feixes acústicos, desenvolvidos em consonância com as leis do espalhamento geométrico e físico, variando entre feixes Gaussianos e feixes em forma de chapéu (*hat-shaped beams* [87]). Uma peculiaridade introduzida no BELLHOP3D é que os feixes Gaussianos podem ser implementados de duas maneiras: pelas chamadas *soluções fundamentais* ou pela, menos conhecida, *formulação de matriz composta* (a.k.a. *formulação de matriz delta*) [51].

As soluções fundamentais resolvem o espalhamento do feixe duas vezes: a primeira, no plano vertical e a segunda, no plano horizontal. Essa é a forma mais tradicional de solução e a mais conhecida na literatura. A formulação de matriz composta, ao invés de resolver as equações diferenciais para obter as soluções fundamentais, resolve um novo conjunto de equações diferenciais para obter os determinantes das soluções fundamentais. A vantagem do segundo método é possibilitar o uso de um algoritmo simplificado e mais rápido, com o campo de pressão sendo calculado na forma de um somatório, tal como [35, 51]

$$P = \sum_{i=1}^{N_\phi} \sum_{j=1}^{N_\theta} \Delta\phi \Delta\theta \frac{\sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2}}{2\pi \sqrt{c(0)}^3} p_{ij} \quad , \quad (4.49)$$

onde:

- $\Delta\theta$ é o intervalo angular entre elevações dos feixes individuais;
- $\Delta\phi$ é o intervalo angular entre azimutes dos feixes individuais;
- ϵ_1 e ϵ_2 são constantes complexas do feixe que caracterizam sua largura e a curvatura nas direções normais ao feixe e ortogonais entre si; e
- p_{ij} é a pressão acústica dos feixes individuais.

As opções de tipos de feixe disponíveis pelo BELLHOP3D⁶ são [51]:

- Feixes de Cerveny [34];
- Feixes Geométricos em forma de chapéu (*hat-shaped beams* [87]);
- Feixes Gaussianos Geométricos; e
- Feixes Geométricos em forma de chapéu em coordenadas cartesianas.

Os algoritmos matemáticos empregados em cada tipo de feixe são diferentes entre si. Na prática, em determinadas situações, os resultados produzidos com uso dos diferentes tipos de feixe não são muito distintos, entretanto o tempo de cálculo sempre varia de um para outro. A diversidade de opções de feixes disponíveis no BELLHOP3D deve ser apropriadamente compreendida e empregada pelo usuário, de modo a se tornar, de fato, uma vantagem do modelo, ao invés de um complicador adicional.

A descrição minuciosa do método de cálculo empregado por cada algoritmo de feixe, descrita em [51], está além do propósito principal do trabalho em tela, e será apresentada, a seguir, uma breve descrição genérica dos tipos de feixe de uso mais comum.

⁶Embora o manual do BELLHOP3P (PORTER [51]) mencione apenas quatro opções de tipo de feixe, uma consulta ao código do modelo, escrito em FORTRAN, permite notar que existem, de fato, seis opções disponíveis. As duas opções extras envolvem o uso de feixes Gaussianos chamados *simples* e feixes de Cerveny nas coordenadas dos raios.

Feixes Gaussianos Simples

O feixe Gaussiano é construído ao redor de um raio central (Fig. 4.8, p. 60) definido em termos de coordenadas centradas no raio. Tais coordenadas são definidas como (s, d_1, d_2) , sendo s o comprimento de arco ao longo do raio, e d_1 e d_2 , as distâncias normais entre um determinado ponto no campo acústico e o raio na direção de um par de vetores ortogonais entre si e normais ao raio.

Partindo da integração das equações tridimensionais dos raios (4.42) e (4.43), p. 60, após o devido tratamento algébrico (descrito em [51]), obtém-se a expressão da pressão acústica ao longo do raio, com Aproximação 3D dos Feixes Gaussianos, dada por

$$P(s, d_1, d_2) = \frac{1}{\sqrt{\det \mathbf{Q}(s)}} \exp \left\{ i\omega \left[\tau(s) + \frac{1}{2} \mathbf{n}^t \mathbf{\Gamma}(s) \mathbf{n} \right] \right\}, \quad \text{com} \quad (4.50)$$

$$\mathbf{\Gamma}(s) = \mathbf{P} \mathbf{Q}^{-1},$$

onde:

- $\mathbf{P}(s)$ e $\mathbf{Q}(s)$ são matrizes auxiliares quadradas, de dimensões 2×2 , que representam grandezas relacionadas ao grau de perturbação dos raios (em função das alterações no ângulo do raio e do deslocamento da fonte);
- \mathbf{n} é o vetor das direções normais ao raio (Eq. 4.53, p. 71); e
- \mathbf{n}^t é o transposto do vetor \mathbf{n} .

Conforme já mencionado, além do tipo de feixe Gaussiano simples descrito por meio da Eq. (4.50), o modelo oferece opções de *feixes geométricos*, os quais, em geral, devem ser considerados como a opção de uso padrão do BELLHOP3D [51].

Feixes Geométricos em Forma de Chapéu

Os feixes geométricos em forma de chapéu (*Geometric Hat-Beams*, cf. subseção 4.2.2), mais confiáveis do que os feixes de Cervený utilizados nas versões iniciais do BELLHOP3D e também originalmente no BELLHOP, têm sua base na clássica Teoria de Raios, com as vantagens de evitar muitos dos tradicionais problemas dos modelos de raios e utilizar um algoritmo de traçado de feixes simplificado, adequado para realização de testes no modelo, uma vez que, eventuais erros são mais fáceis de serem percebidos.

Os *hat-shaped beams* não possuem um sentido físico muito realista, uma vez que consideram um triângulo, ou, no caso 3D, um tetraedro (Fig. 4.10) para cálculo das influências dos feixes adjacentes.

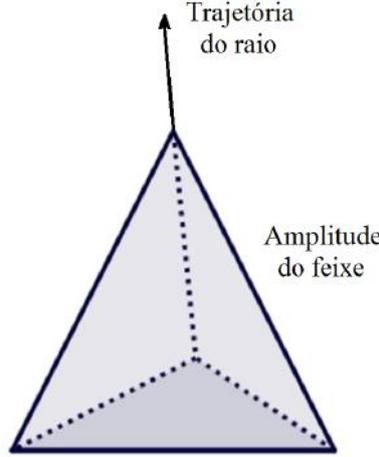


Figura 4.10: Aproximação dos Feixes *hat-shaped* 3D: decaimento linear da amplitude do feixe no plano normal à trajetória do raio.

Podendo ser interpretada com uma versão simplificada da expressão (4.50), a expressão da pressão acústica do feixe *hat-shaped* 3D é dada por [51]

$$P(s, d_1, d_2) = \frac{1}{\sqrt{\det \mathbf{Q}(s)}} \frac{|L_1(s) - d_2| |L_2(s) - d_1|}{L_1(s) L_2(s)} e^{i\omega\tau(s)}, \quad \text{para} \quad (4.51)$$

$$|d_2| < L_1 \quad \text{e} \quad |d_1| < L_2 \quad ,$$

onde L_1 e L_2 são as larguras do tubo de raios nas direções normais e as condições $|d_2| < L_1$ e $|d_1| < L_2$ fazem com que o feixe desvaneça fora do tetraedro de influência dos raios.

Por ocasião da implementação dos feixes *hat-shaped*, cuidados adicionais devem ser tomados para evitar que sejam prescritos feixes muito estreitos e que ofereçam poucos raios para cálculo das influências, o que poderá gerar descontinuidades ou intervalos nas plotagens dos campos de pressão.

Feixes Geométricos Gaussianos

Uma melhor acurácia no uso de feixes geométricos pode ser obtida por meio do uso dos feixes geométricos Gaussianos (*Geometric Gaussian-Beams*) que, ao invés de considerarem linearmente as influências de apenas dois conjuntos de raios (tal como é feito na aproximação *hat-shaped*), consideram as contribuições de muitos conjuntos de raios nas proximidades. A integração de muitos feixes suaviza as cáusticas e favorece a entrada da energia nas zonas de sombra; por outro lado, o tempo computacional também é maior. A expressão da pressão acústica do feixe geométrico Gaussiano é dada por [51]

$$P(s, d_1, d_2) = \frac{1}{\sqrt{\det \mathbf{Q}(s)}} \exp \left\{ \frac{-\frac{1}{2} \left(\frac{d_2}{L_1(s)} \right)^2 \left(\frac{d_1}{L_2(s)} \right)^2}{L_1(s) L_2(s)} \right\} e^{i\omega\tau(s)} \quad . \quad (4.52)$$

Atualmente, de maneira semelhante ao que ocorre com os demais modelos de propagação 3D, contínuas pesquisas têm sido desenvolvidas, a fim de se estabelecer um padrão de referência de comparação para o BELLHOP3D, o que é feito, geralmente, por meio da comparação com dados experimentais, outras soluções numéricas de modelos ou soluções analíticas. Os resultados do BELLHOP3D vêm sendo avaliados em diferentes cenários que vão desde casos canônicos mais simples, como perfil de Munk, até casos mais complexos, que incluem fundos do tipo cunha penetrável, montes submarinos, etc. Alguns desses testes têm demonstrado boa concordância com o BELLHOP (2D) e/ou outros modelos de modos normais e equações parabólicas (3DPE); outros casos, tais como os que envolvem montes submarinos e fundos curvos, ainda não apresentaram resultados plenamente satisfatórios [92].

Outro modelo de traçado de raios que possui o mesmo princípio básico do BELLHOP3D, embora as estratégias de cálculo numérico da solução difiram substancialmente, é o TRACEO3D.

4.2.5 TRACEO3D

Atualmente em fase final de validação, o TRACEO3D é um modelo de feixes Gaussianos que representa a extensão tridimensional do, já consagrado, modelo de traçado de raios TRACEO [81], desenvolvido pelo renomado Laboratório de Processamento de Sinais (*Signal Processing Laboratory*, SiPLAB) [68], da Universidade do Algarve (UAlg), Portugal.

O TRACEO3D foi concebido a fim de gerar previsões de pressões acústicas e velocidades de partícula⁷ em ambientes dotados de complexos contornos do guia de ondas (superiores e inferiores). Tais contornos podem ser detalhadamente caracterizados, admitindo-se a prescrição de propriedades RD compressionais (na direção de propagação) e cisalhantes (ortogonais à direção de propagação) [52].

Além do traçado de raios propriamente dito, o modelo é capaz de gerar *eigenrays*, amplitudes e tempos de percurso. O cálculo dos *eigenrays* pode ser realizado mesmo quando os raios são refletidos de volta para fonte, em sentido contrário ao da propagação original [52]. Em função dos tradicionais complicadores existentes para o cálculo 3D de *eigenrays*, um método alternativo para busca 3D de *eigenrays*, baseado em otimização *simplex*, pode ser encontrado em CALAZAN e RODRÍGUEZ [93].

⁷Previsões de velocidade de partícula têm importante aplicação nas recentes tecnologias de *arrays* de sensores vetoriais (VSA). Avançados estudos envolvendo o uso de VSA em trabalhos de inversão geoaústica com sinais de alta frequência têm sido desenvolvidos, nos últimos anos, no âmbito do SiPLAB/UAlg [52].

Tal como ocorre com o TRACEO, o TRACEO3D também terá a capacidade de incluir um ou mais objetos no interior do guia de ondas (a ser implementado) [52]. O objeto poderá ser caracterizado por suas dimensões, densidade e posição dentro do guia de ondas. Adicionalmente, poderão ser prescritos diferentes tipos de natureza de superfície do objeto, tais como superfície absorvente, elástica, rígida ou simplesmente vácuo. Ressalta-se que, na atualidade, o TRACEO é o único modelo acústico, que se tem conhecimento, capaz de considerar objetos introduzidos ao longo do meio de propagação. Tal capacidade tem utilidade em importantes aplicações da acústica moderna, tais como barreiras acústicas submarinas (*Underwater Acoustic Barriers*, UAB) [71, 94].

De modo geral, o TRACEO3D, assim como o BELLHOP3D (subseção 4.2.4), calcula o campo de pressão em duas etapas: na primeira, a equação da Eikonal (4.30) é resolvida para fornecer as trajetórias dos raios e; na segunda, as trajetórias dos raios são consideradas o eixo central de um arranjo de feixes Gaussianos, e o campo de pressão acústica é calculado por meio de uma superposição coerente das influências dos feixes.

1ª Etapa: Cálculo das Trajetórias dos Raios

O ponto de partida para o desenvolvimento do traçado tridimensional de raios consiste na solução da equação da Eikonal nas três dimensões, que pode ser escrita sob diversas formas e resolvida por diferentes métodos. No TRACEO3D [52], a equação da Eikonal é escrita na forma antes apresentada na Eq. (4.42), a qual será abaixo transcrita:

$$\frac{dx}{ds} = c(s) \sigma_x, \quad \frac{dy}{ds} = c(s) \sigma_y, \quad \frac{dz}{ds} = c(s) \sigma_z$$

onde:

- $\frac{dx}{ds}$, $\frac{dy}{ds}$ e $\frac{dz}{ds}$ são as derivadas que definem o vetor unitário e_s tangente ao raio;
- $c(s)$ é a velocidade de propagação do som ao longo da trajetória do raio de comprimento de arco s ; e
- σ_x , σ_y e σ_z são as componentes cartesianas do vetor lentidão do som (Eq. 4.33), $\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$.

O plano perpendicular ao vetor unitário e_s define o plano normal ao raio (cf. Fig. 4.11). Sobre esse plano normal, é definido um par de vetores unitários ortogonais e_1 e e_2 , conhecidos como *vetores de polarização* [82]. O uso dos vetores de polarização, tal como aqui definidos, se mostra mais conveniente porque eles podem rodar em relação à normal e binormal ao raio ao longo da trajetória de propagação, o que é vantajoso em determinadas partes do cálculo, tais como na descrição de ondas cisalhantes [82].

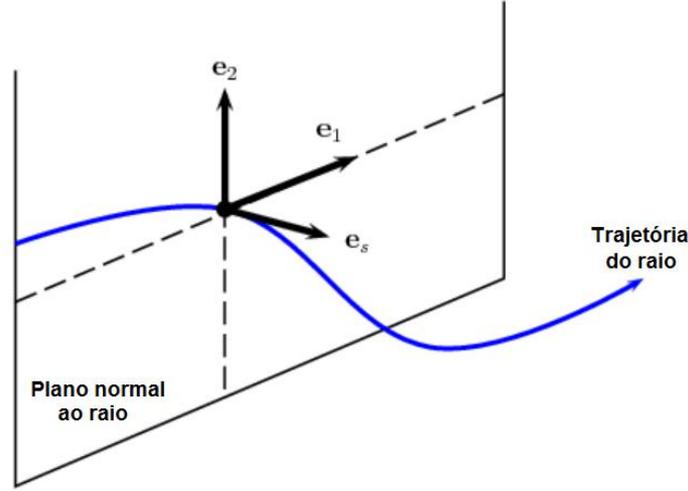


Figura 4.11: Vetores de polarização definidos no equacionamento da Aproximação de Feixes Gaussianos. Fonte: adaptado de RODRÍGUEZ [81], p. 15.

Com base no conceito dos vetores de polarização, o vetor unitário normal ao raio \mathbf{n} é definido como

$$\mathbf{n} = n_1 \mathbf{e}_1 + n_2 \mathbf{e}_2 \quad , \quad (4.53)$$

onde n_1 e n_2 são grandezas escalares que definem o comprimento da projeção de \mathbf{n} sobre as direções de \mathbf{e}_1 e \mathbf{e}_2 .

Em termos gerais, os vetores de polarização \mathbf{e}_1 e \mathbf{e}_2 são relacionados ao vetor \mathbf{e}_s (tangente ao raio) por meio grandezas que representam a torção e curvatura do raio. Dessa forma, seu cálculo numérico pode vir a se tornar um tanto complicado. Uma aproximação simplificada (com simetria cilíndrica) consiste em calcular os vetores de polarização por meio das expressões [52]

$$\mathbf{e}_1(s) = \begin{bmatrix} -\text{sen } \theta(s) \cos \phi(s) \\ -\text{sen } \theta(s) \text{sen } \phi(s) \\ \cos \theta(s) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{e}_2(s) = \begin{bmatrix} -\text{sen } \phi(s) \\ \cos \phi(s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad . \quad (4.54)$$

A integração do sistema de equações 3D dos raios (Eq. 4.42 e 4.43, p. 60) requer o conhecimento da posição inicial da fonte $(x_s(0), y_s(0), z_s(0))$ e da direção inicial de propagação, que é dada por

$$\mathbf{e}_s(0) = \begin{bmatrix} \cos \theta(0) \cos \phi(0) \\ \cos \theta(0) \text{sen } \phi(0) \\ \text{sen } \theta(0) \end{bmatrix} \quad , \quad (4.55)$$

onde:

- $\theta(s)$ é ângulo vertical de lançamento do raio em relação ao plano horizontal xy (elevação); e

- $\phi(s)$ é ângulo horizontal da projeção do raio sobre o plano horizontal xy em relação ao eixo x (azimute) (cf. Fig. 4.5, p. 56).

Para integração das equações pelo método de *Runge-Kutta-Fehlberg*, mostra-se mais conveniente escrever a equação da Eikonal usando a notação vetorial [52]

$$\frac{d\mathbf{y}}{ds} = \mathbf{f}, \quad \text{onde } \mathbf{y} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \sigma_x/\sigma \\ \sigma_y/\sigma \\ \sigma_z/\sigma \\ \partial\sigma/\partial x \\ \partial\sigma/\partial y \\ \partial\sigma/\partial z \end{bmatrix}. \quad (4.56)$$

A fim de garantir maior consistência nos cálculos, a cada passo da integração, o método provê duas soluções. Se as soluções diferirem entre si além de um determinado limite estabelecido, o passo do raio é dividido pela metade, e a integração é refeita [52].

Além do cálculo das trajetórias dos raios, faz-se necessário o cálculo do campo de pressão.

2ª Etapa: Cálculo da Pressão

No TRACEO3D, o cálculo do campo de pressão no plano perpendicular ao raio é feito com base na Aproximação de Feixes Gaussianos (Eq. 4.41, p. 59).

Para efetuar o cálculo da influência do campo de pressão do feixe no plano perpendicular ao raio é utilizada *a priori* a expressão 4.41 da Aproximação Gaussiana 2D em coordenadas cartesianas estendida para terceira dimensão. Ressalta-se que, nessa expressão, a Aproximação Gaussiana 3D é resolvida no plano xz (em coordenadas cartesianas), ao invés do plano rz (em coordenadas cilíndricas) com simetria cilíndrica, tal fato permite dirimir os problemas decorrentes do *backscattering* [84]. O TRACEO3D considera a Aproximação de Feixes Gaussianos 3D dada por [95]

$$P(s, \mathbf{n}) = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{c(s) \cos \theta(0)}{c(0) \det \mathbf{Q}}} e^{-i\omega [\tau(s) + \frac{1}{2}(\mathbf{M}\mathbf{n} \bullet \mathbf{n})]}, \quad (4.57)$$

onde:

- $\tau(s)$ é o tempo de percurso gasto na propagação da onda acústica, calculado por meio das equações da Eikonal (4.42) e Eq. (4.43); e
- \mathbf{Q} e \mathbf{M} são matrizes complexas de dimensões 2×2 que serão apresentadas a seguir.

Para explicar as matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{M} , a Aproximação 3D de Feixes Gaussianos envolve duas matrizes adicionais 2×2 , geralmente representadas por \mathbf{P} e \mathbf{C} . As quatro matrizes estão relacionadas segundo as expressões [82]:

$$\mathbf{M} = \mathbf{P} \mathbf{Q}^{-1}, \quad (4.58)$$

$$\frac{d}{ds} \mathbf{Q} = c(s) \mathbf{P} \quad \text{e} \quad \frac{d}{ds} \mathbf{P} = -\frac{1}{c^2(s)} \mathbf{C} \mathbf{Q} \quad (4.59)$$

onde [96]:

- \mathbf{P} é a matriz que descreve a lentidão do feixe no plano perpendicular ao vetor unitário \mathbf{e}_s tangente ao raio;
- \mathbf{Q} é a matriz que descreve o espalhamento do feixe⁸; e
- \mathbf{C} é a matriz composta pelos elementos C_{ij} que correspondem às derivadas de segunda ordem da velocidade do som ao longo dos vetores de polarização \mathbf{e}_1 e \mathbf{e}_2 , dados por

$$C_{ij} = \frac{\partial^2 c}{\partial n_i \partial n_j}. \quad (4.60)$$

A parte imaginária do produto interno $\mathbf{M} \mathbf{n} \bullet \mathbf{n}$ gera um decaimento gaussiano da amplitude do feixe ao longo do vetor unitário normal ao raio \mathbf{n} e a parte real introduz correções de fase ao tempo de percurso. Contanto que o determinante da matriz complexa \mathbf{Q} não seja nulo, a solução do campo de pressão não apresentará as indesejáveis singularidades.

As equações (4.59) correspondem às *equações dinâmicas* da formulação completa de feixes Gaussianos [96] e podem ser interpretadas como uma extensão tridimensional do par de equações (4.40), p. 59. As equações dinâmicas podem ser integradas e resolvidas por meio de um simples método de Euler, o que facilita a codificação do modelo sem comprometimento da acurácia no cálculo das trajetórias dos raios [52, 81].

Para solucionar a Eq. 4.57, faz-se necessário estabelecer as condições iniciais do problema. Para tal, é considerado o caso de um campo próximo gerado por uma fonte pontual emitindo ondas esféricas. As condições iniciais são das por [82, 95]

$$\mathbf{P}(0) = \begin{bmatrix} 1/c(0) & 0 \\ 0 & \cos \theta_0/c(0) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{Q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.61)$$

onde:

- $c(0) = c(0, 0, 0)$ é a velocidade do som na posição da fonte (x_s, y_s, z_s); e
- θ_0 é o ângulo vertical de lançamento do raio (elevação).

⁸A questão da atualização das matrizes \mathbf{P} e \mathbf{Q} em função das reflexões é detalhadamente discutida em ČERVENÝ e PŠENČÍK [97].

No TRACEO3D, ao invés do uso da Eq. (4.57) para cálculo da influências dos feixes Gaussianos, uma alternativa mais rápida e igualmente acurada é dada por [52]

$$P(s, n_1, n_2) = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{c(s) \cos \theta(0)}{c(0) \det \mathbf{Q}}} \Psi_{11} \Psi_{12} \Psi_{21} \Psi_{22} e^{-i\omega\tau(s)} \quad , \quad (4.62)$$

sendo os coeficientes Ψ_{ij} dados por

$$\Psi_{ij} = \exp \left[- \left(\frac{\sqrt{\pi |n_i n_j|}}{\Delta\theta} Q_{ij}^{-1} \right)^2 \right] \quad ,$$

onde:

- $\Delta\theta$ é o passo do ângulo de elevação entre raios sucessivos;
- Q_{ij}^{-1} são os elementos que compõem o inverso da matriz quadrada \mathbf{Q} ; e
- n_i e n_j são calculados por meio da projeção dos vetores \mathbf{e}_1 e \mathbf{e}_2 na direção do vetor \mathbf{n} , normal ao raio.

Cálculo da Velocidade de Partícula

Fundamentalmente, o TRACEO3D se baseia na mesma estratégia de cálculo da velocidade de partícula adotada pelo TRACEO [96], estendida para a caso 3D.

Partindo-se da expressão da velocidade de partícula, v , em relação à pressão acústica, P , no domínio da frequência [98]

$$v = - \frac{i}{\omega \rho} \nabla P \quad , \quad (4.63)$$

nota-se que seu cálculo está relacionado ao gradiente do campo de pressão, o qual, considerando-se um único raio, pode ser escrito, em coordenadas do raio, como [52]

$$\nabla P = \frac{\partial P}{\partial s} \mathbf{e}_s + \frac{\partial P}{\partial n_1} \mathbf{e}_1 + \frac{\partial P}{\partial n_2} \mathbf{e}_2 \quad . \quad (4.64)$$

As derivadas parciais em coordenadas cartesianas podem ser obtidas pelas expressões [52]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \nabla P \bullet \mathbf{e}_x \quad , \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \nabla P \bullet \mathbf{e}_y \quad , \quad \frac{\partial P}{\partial z} = \nabla P \bullet \mathbf{e}_z \quad . \quad (4.65)$$

Dessa forma, substituindo-se a expressão do gradiente de pressão na Eq. (4.63), obtém-se o cálculo da velocidade de partícula tal como considerada pelo TRACEO3D.

4.3 Domínios de Aplicabilidade

Conforme pôde ser observado, diferentes estratégias de modelagem apresentam diferentes potenciais e limitações intrínsecas de aplicabilidade, o que é natural em qualquer tipo de modelo. ETTER [62] denomina tais limitações e potenciais de **domínios de aplicabilidade**.

A Tab. 4.1 abaixo apresenta um quadro comparativo dos modelos de raios e modos normais. Os modelos são discriminados de acordo com aplicações em águas rasas (consideradas < 200 m) e águas profundas, baixa frequência (considerada < 500 Hz) ou alta frequência e ambientes RI ou RD (considerando apenas variações na velocidade do som e na batimetria). O quadro apresentado, embora não possa ser interpretado rigidamente (uma vez que adaptações podem ser implementadas), propõe um guia de referência de grande utilidade.

Tabela 4.1: Domínios de aplicabilidade dos modelos de raios e modelos de modos normais. Fonte: adaptado de ETTER [6], p. 146.

Modelo	Aplicações							
	Águas rasas				Águas profundas			
	Baixa freq.		Alta freq.		Baixa freq.		Alta freq.	
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Teoria de Raios	○	○	◐	●	◐	◐	●	●
Modos Normais	●	◐	●	◐	●	◐	◐	○

● Aplicável fisicamente e computacionalmente
 ◐ Aplicável com limitações em acurácia ou em velocidade de execução
 ○ Não aplicável (nem fisicamente nem computacionalmente)

Analisando o conteúdo da Tab. 4.1, percebe-se que, de modo geral, em ambientes de águas rasas, sobretudo em regimes de baixas frequências, o uso de modos normais é mais indicado do que o uso de raios. Uma característica que contribui para esse melhor desempenho é o fato dos modelos de modos, normalmente, serem capazes de considerar ambientes multicamadas, facilmente encontrados em regiões costeiras. Por outro lado, em ambientes de águas profundas com altas frequências, o uso de raios é mais indicado do que o uso de modos, muito em função do aumento do custo computacional demandado pelos modelos de modos nesse tipo de ambiente. Em geral, a Teoria de Raios é mais indicada para cenários acústicos onde não ocorra uma interação significativa com o fundo (águas profundas) ou quando o comprimento da onda acústica seja muitas vezes menor que a profundidade.

A despeito da orientação proposta por ETTER [62], estudos recentes [49, 99] indicam alternativas para minimizar os problemas decorrentes do uso de modelos de raios em ambientes de águas rasas com uso de frequências moderadas a baixas. Tais alternativas serão novamente abordadas nos capítulos que se seguem.

Capítulo 5

Localização 3D Sintética

Tendo em vista o fato da localização 3D de fontes por modelagem acústica ser algo extremamente novo no meio acadêmico, adotou-se a estratégia de abordar o problema seguindo uma trajetória crescente de escala de complexidade, i.e., partindo-se de uma situação teórica idealizada com dados sintéticos até um cenário realista com uso de dados experimentais. Tal estratégia visa, fundamentalmente, a otimização gradual do processo, de acordo com o ciclo de *feedback* apresentado anteriormente na Fig. 3.1 (p. 24).

A localização 3D com dados sintéticos tem por objetivo principal a elaboração dos códigos, escritos em MATLAB, e a verificação da coerência dos resultados teóricos, antes da implementação da localização com dados experimentais. Nesta fase, serão também implementadas adaptações nos modelos acústicos a fim de adequá-los às necessidades do presente trabalho.

O cenário empregado nas simulações foi o correspondente ao experimento executado pelo SACLANTCEN, no mar ao norte da ilha de Elba (seção 3.1). Assim sendo, características geométricas e dados ambientais (tais como batimetria, posição dos receptores, perfil de velocidade do som e propriedades geoacústicas do fundo) foram prescritos para os modelos na geração das “observações” sintéticas e dos diversos campos de réplicas. Os modelos acústicos empregados foram o KRAKEN3D, o BELLHOP3D e o TRACEO3D.

5.1 Localização Sintética com o KRAKEN3D

Antes de se passar para a localização 3D propriamente dita, optou-se por introduzir uma etapa anterior, que consiste, basicamente, em realizar a localização 2D com uso do KRAKEN3D, em um ambiente que apresenta variações tridimensionais de batimetria, sobre uma única fatia vertical (plano xz) do campo de pressão.

De acordo com a geometria da área de modelagem (Fig. 3.2, p. 26), foi escolhida a radial de ângulo 270° (ângulo de sentido anti-horário, em relação ao eixo

E-W, centrado no ponto de fundeio da fonte), ou seja, a radial de sentido N→S. A frequência de transmissão considerada nas simulações foi de 331 Hz. A posição da fonte adotada para geração das “observações” sintéticas foi obtida das estimativas por algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms*, GA) propostas por GINGRAS e GERSTOFT [63]: 5440 m de distância fonte-receptor (aproximada na dezena) e profundidade de 75 m (aproximada no inteiro).

Ressalta-se que, no caso mais simples de um ambiente 2D *range-independent*, ocorre a simetria do campo acústico calculado pelo modelo para diferentes posições relativas fonte-receptor, fato que acarreta uma possibilidade de simplificação nos cálculos, uma vez que, por ocasião da geração dos campos de réplicas, tanto faz estabelecer uma posição fixa para o *array* e mover a fonte por suas diferentes distâncias candidatas ou estabelecer uma posição fixa para a fonte e mover o *array* pelas diferentes distâncias da fonte. Naturalmente, tal simplificação não poderá ser aplicada no presente caso, nem mesmo em ambientes 2D *range-dependent*, muito menos em ambientes que apresentam variações tridimensionais.

Tendo em vista que apenas um único SSP (medido no ponto localizado mais próximo da fonte) foi prescrito para todos os pontos do domínio de modelagem, não estão sendo aqui considerados os efeitos da refração horizontal, sendo portanto utilizado o tipo de cálculo de campo padrão (opção *standard*, STD) no programa FIELD3D. Assim sendo, o único efeito *out-of-plane* que está sendo considerado é o desvio dos raios em função das reflexões no fundo (que apresenta variações tridimensionais de batimetria).

Inicialmente, foi construída uma malha de elementos triangulares sobre uma área de modelagem quadrangular com 16 km de lado e com o *array* posicionado no centro do quadrado. As coordenadas *xy* dos nós que compõem a malha são as coordenadas dos pontos de batimetria conhecida.

Os dados batimétricos, apresentados na Fig. 5.1, foram adquiridos junto ao Instituto Hidrográfico da Marinha Italiana (*Istituto Idrografico della Marina*, IIM), sobre uma grade regular de espaçamento aproximado de 500 m entre pontos. Além desses dados batimétricos, foram acrescentados sete outros pontos oriundos de medições de profundidade local realizadas na ocasião do experimento de Elba, são eles:

- ponto de lançamento da poita do *array* vertical, com profundidade medida de, aproximadamente, 127 m [63, 64];
- ponto de lançamento da poita da fonte, com profundidade medida de 130 m [63–65];
- ponto de lançamento do CTD7, com profundidade de 127 m;

- ponto de lançamento do CTD8 (atinente ao SSP utilizado nas simulações), com profundidade de 130 m;
- ponto de lançamento do CTD13, com profundidade de 126 m;
- ponto de lançamento do CTD19, com profundidade de 139 m; e
- ponto de lançamento do CTD20, com profundidade de 140 m.

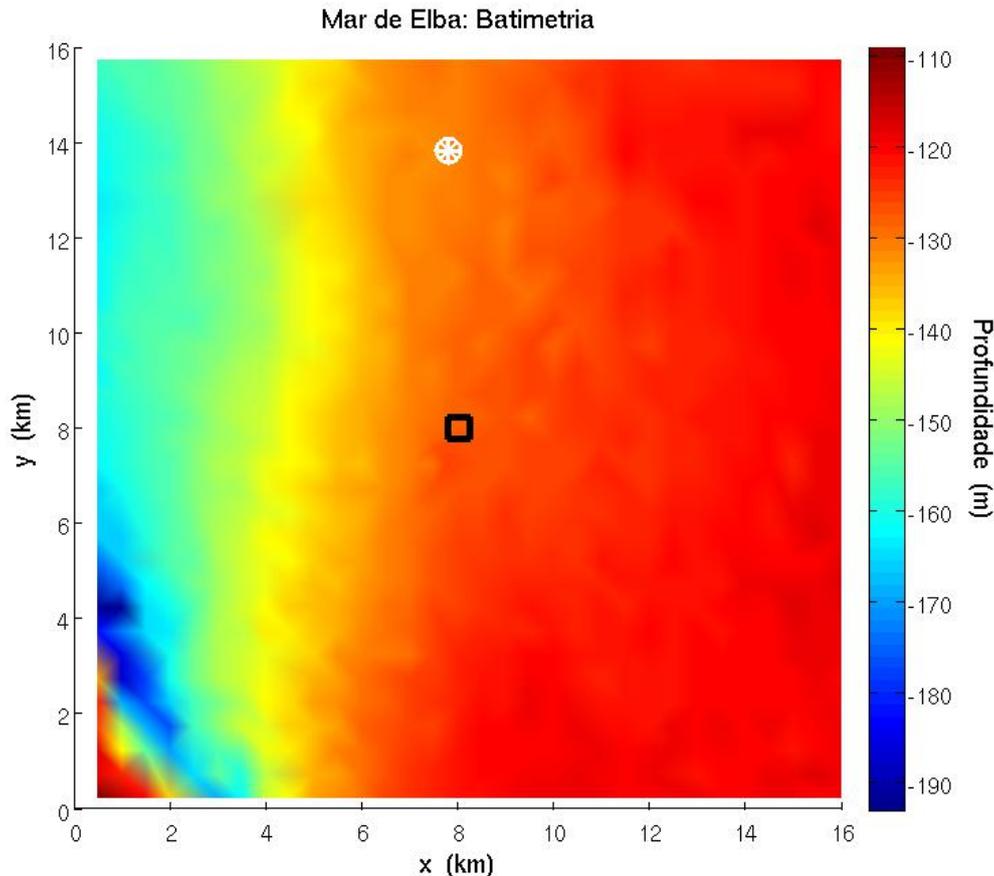


Figura 5.1: Batimetria considerada no domínio de modelagem no mar ao norte da ilha de Elba. Asterisco: posição de lançamento da fonte; e quadrado: posição de lançamento do *array* vertical.

Os elementos triangulares da malha foram construídos segundo o critério da triangulação de Delaunay. A triangulação de Delaunay, para um conjunto de pontos em um plano, é elaborada de modo que nenhum ponto do conjunto esteja contido no interior de uma circunferência que passe pelos pontos do vértice de um triângulo qualquer. Assim sendo, a triangulação de Delaunay evita a formação de triângulos com ângulos muito agudos.

A malha de triangulação, composta por um total de 697 nós e 1303 elementos, pode ser visualizada na Fig. 5.2 que se segue, onde também se encontra representado, além da fonte (circunferência com asterisco encarnado) e do *array* (quadrado preto), o ponto de coleta do SSP utilizado nas simulações (circunferência verde).

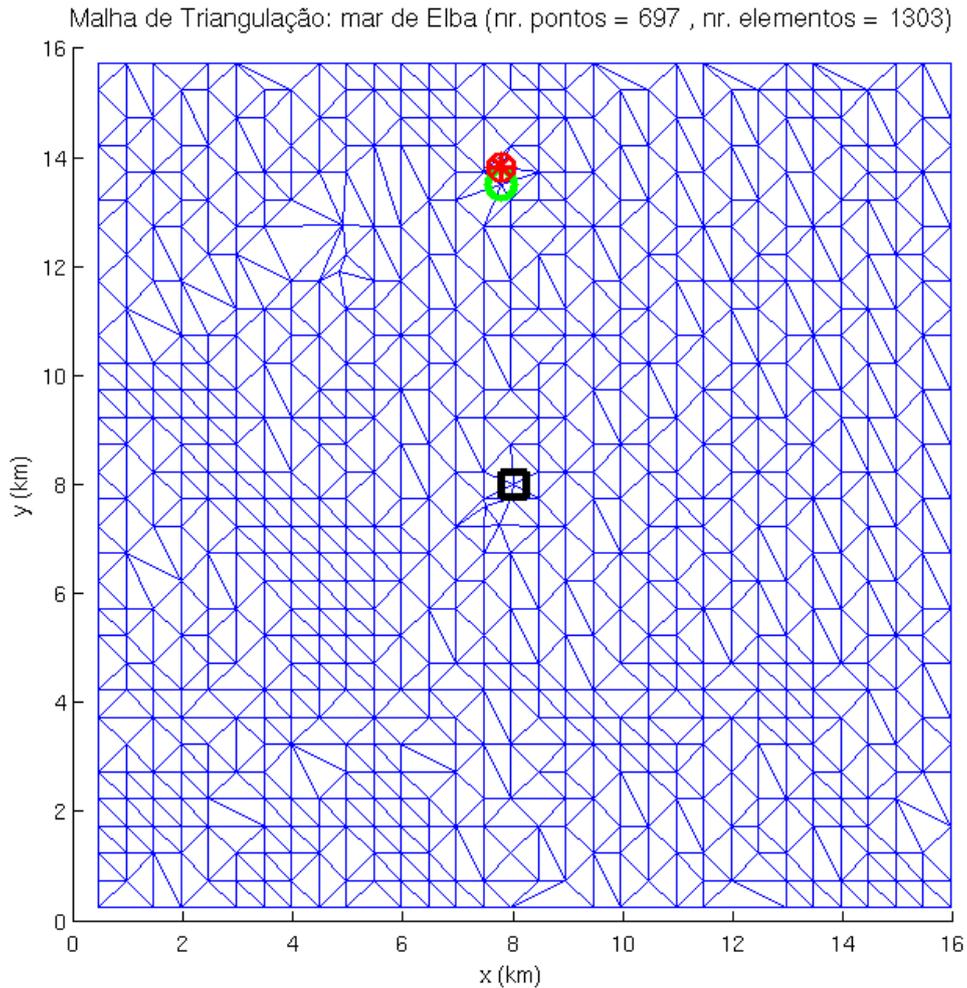


Figura 5.2: Malha de triangulação considerada pelo KRAKEN3D na modelagem do mar ao norte da ilha de Elba. Asterisco: posição da fonte; quadrado: posição do *array* vertical; e circunferência verde: ponto de coleta do SSP.

Com base nos valores de batimetria, foram gerados 304 arquivos **.env* com informações ambientais, onde o único parâmetro que difere de um arquivo para o outro é a profundidade máxima do guia de ondas (ou a profundidade do último ponto do SSP) em décimos de metro. Dessa forma, os 304 arquivos **.env* foram distribuídos pelos 697 nós da malha de triangulação. Para cada arquivo de informações ambientais, uma rodada do KRAKEN (2D) foi executada e os respectivos modos calculados, dando origem a 304 arquivos binários **.mod* com os respectivos conjuntos de modos.

As simulações para geração dos campos de réplicas consideram 1001 distâncias candidatas da fonte, igualmente espaçadas de 3 m entre 4000 e 7000 m a partir do *array* de receptores e 131 profundidades, igualmente espaçadas de 1 m entre 1 e 131 m, totalizando 131.131 (1001×131) posições candidatas da fonte. Dessa forma, foi suficiente realizar 1001 rodadas do FIELD3D (correspondentes a 1001 distâncias receptor-fonte), uma vez que o modelo permite considerar a existência

de várias profundidades de fontes em uma única rodada. O tempo computacional¹ demandado para geração do presente campo de réplicas foi de 57,9 min e o espaço de armazenamento de 57,4 MB.

A superfície de ambiguidade gerada pelo MFP, com uso do estimador de Bartlett, pode ser visualizada na Fig. 5.3, indicando uma fonte perfeitamente localizada na distância de 5440 m e profundidade de 75 m, com erro nulo e o estimador atingindo seu máximo valor de 1. Evidentemente, o aspecto da superfície apresentada (praticamente sem ambiguidades) e o estimador de Bartlett alcançando o valor unitário são particularidades de uma situação teórica idealizada onde as “observações” sintéticas e o campo de réplicas foram gerados pelo mesmo modelo, com mesma configuração, e na ausência de qualquer tipo de ruído.

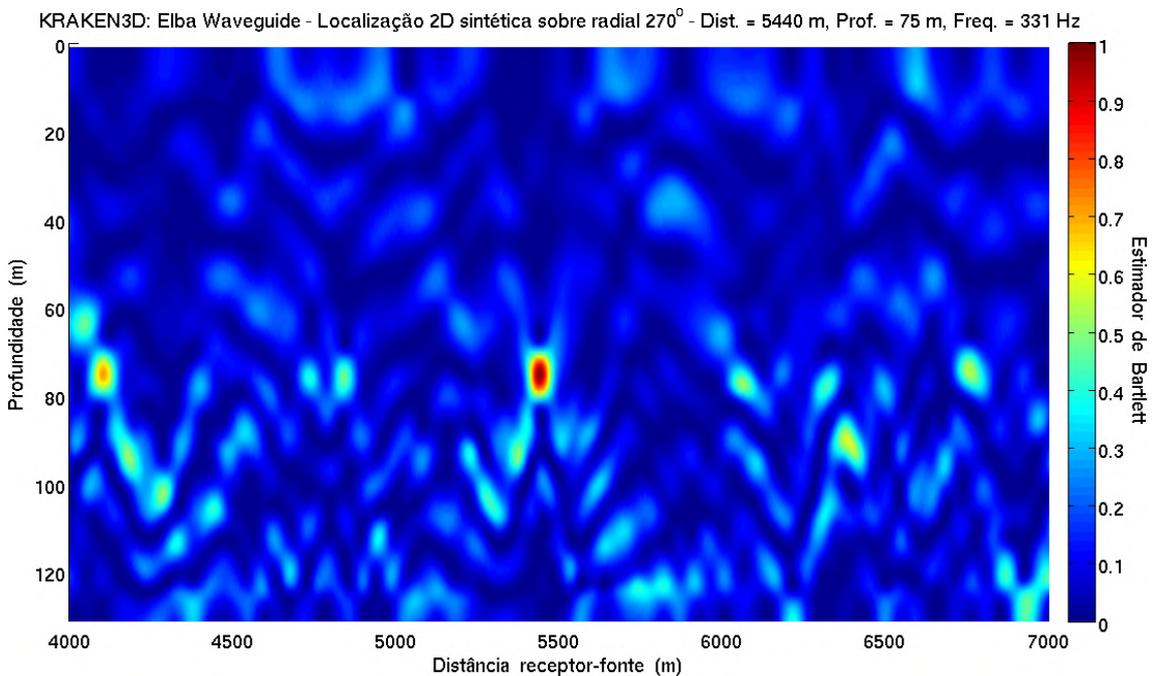


Figura 5.3: Localização sintética com o KRAKEN3D na fatia vertical do campo de pressão na marcação 270° (ângulo em relação à posição da fonte).

Visando verificar a economia de tempo computacional, foi realizada uma segunda localização 2D, sobre a radial 270°, adotando uma batimetria com valores de profundidade aproximados ao metro ao invés do décimo de metro. Assim sendo, foram gerados apenas 63 arquivos de informações ambientais *.env para serem distribuídos pelos nós da malha - uma quantidade cerca de cinco vezes menor do que os 304 arquivos *.env gerados inicialmente. O ganho de tempo computacional na geração dos campos de réplicas foi de 70,8 %, demandando apenas 16,9 min; entretanto, paga-se um “preço” em termos de perda no detalhamento na batimetria. Destaca-se aqui a grande influência da definição da batimetria do domínio de modelagem sobre o tempo computacional demandado.

¹Utilizado um computador tipo *notebook*, com CPU Intel CORE i7 2,40 GHz × 4.

A fase subsequente da localização sintética com uso do KRAKEN3D consiste em localizar a fonte no espaço 3D propriamente dito, i.e., em distância, profundidade e marcação. Para tal, o KRAKEN3D foi empregado para geração das réplicas em 181 direções, com espaçamento angular de 2° entre 0 e 360° .

A menos do número de distâncias candidatas da fonte, foram mantidos todos os demais parâmetros geométricos e dados ambientais anteriormente empregados na localização 2D sobre o azimute de 270° (em relação à posição da fonte); sendo que, a partir desse ponto, todos os ângulos horizontais de marcação passarão a ser **referenciados à posição do *array*** e não mais à posição da fonte, uma vez que, *a priori*, a posição da fonte é a incógnita do problema inverso.

Visando economia do custo computacional na geração dos campos de réplicas, o número de distâncias candidatas da fonte foi reduzido de 1001 para 301, ou seja, 301 distâncias receptor-fonte, igualmente espaçadas de 10 m entre 4000 e 7000 m, 131 profundidades candidatas, igualmente espaçadas de 1 m entre 1 e 131 m e 181 direções, totalizando 7.137.011 ($181 \times 301 \times 131$) posições candidatas da fonte nos 360° . Dessa forma, 54.481 (181×301) posições candidatas foram consideradas sobre o plano horizontal xy , as quais podem ser visualizadas na Fig. 5.4.

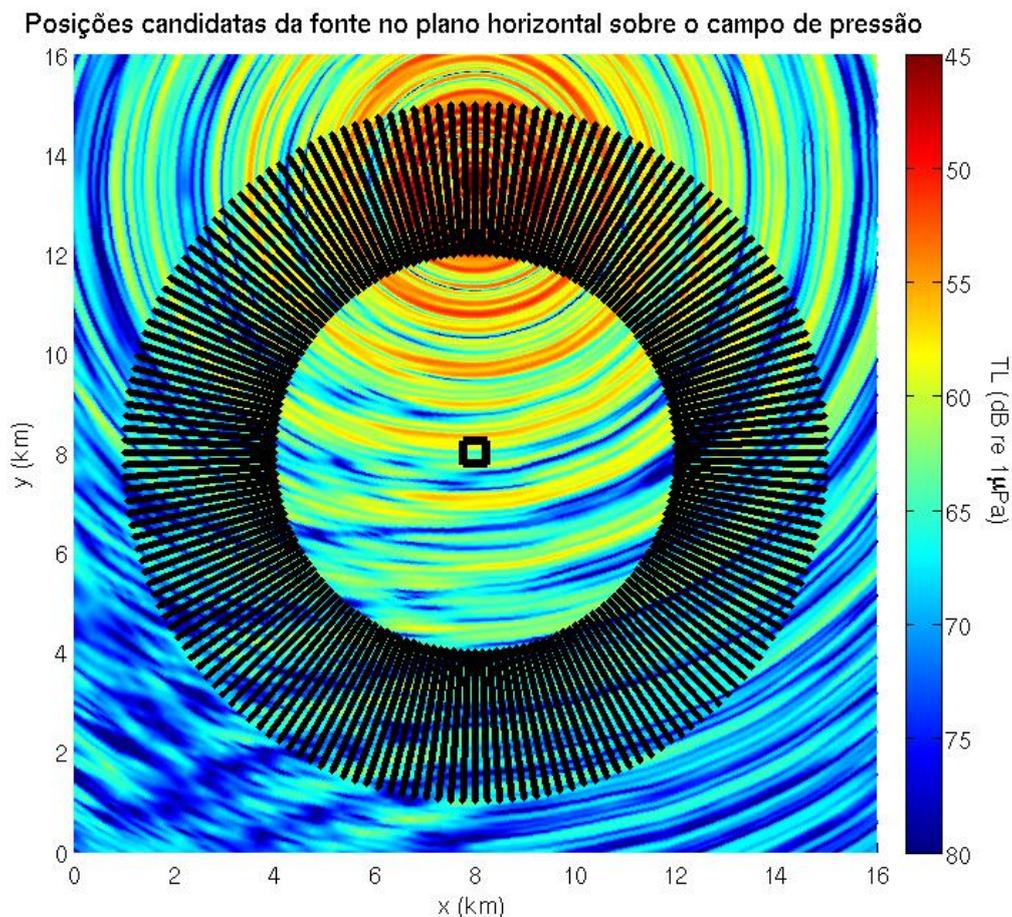


Figura 5.4: Posições candidatas da fonte no plano horizontal consideradas na geração dos campos de réplicas pelo KRAKEN3D. Ao fundo: campo de pressão produzido pelo KRAKEN3D por uma fonte acústica posicionada na profundidade de 75 m e transmitindo na frequência de 331 Hz.

Tendo em vista que todos os códigos sobre modelagem 3D disponíveis atualmente na *Acoustics Toolbox* da OAL [60] consideram as marcações em relação à fonte, foram necessárias modificações nos códigos, a fim de que o ponto do *array* de receptores passasse a ser a referência para os ângulos horizontais, ao invés da posição da fonte.

Para geração dos campos tridimensionais de réplicas, foram realizadas 54.481 rodadas do FIELD3D. O tempo computacional demandado foi de 51,7 h e o espaço de armazenamento de 3,1 GB. Ressalta-se o grande aumento do custo computacional, em termos de tempo e espaço de armazenamento ao se considerar o espaço 3D. No caso do emprego da batimetria com valores de profundidade aproximados ao metro, o tempo computacional foi reduzido para 14,6 h.

A questão do custo computacional sempre será uma tônica ao se tratar da modelagem 3D, envolvendo uma permanente situação de compromisso entre a discretização espacial almejada no posicionamento das fontes candidatas e o “preço” que se dispõe a pagar em termos de custo computacional.

Com uso do estimador de Bartlett, teremos agora um volume de ambiguidade gerado pelo 3DMFP ao invés da tradicional superfície de ambiguidade do 2DMFP. O volume gerado pode ser visualizado na Fig. 5.5. Embora não esteja visível nessa figura, no interior do volume, foi perfeitamente localizada uma fonte acústica na distância de 5440 m, profundidade de 75 m e marcação de 90° , com erro nulo e, novamente, o estimador atingindo seu máximo valor teórico de 1.

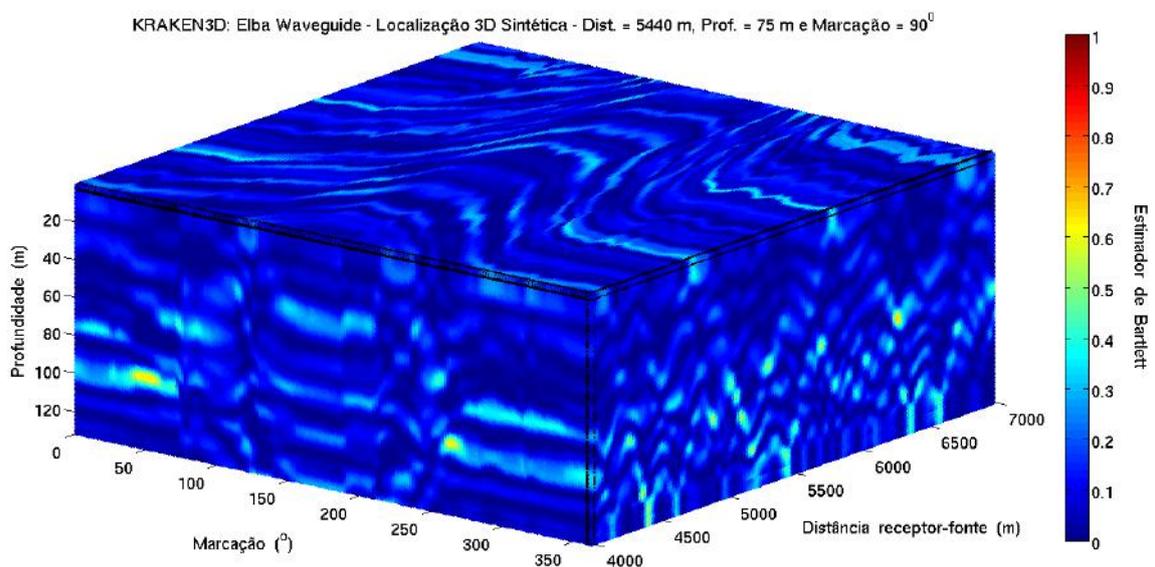


Figura 5.5: Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: volume de ambiguidade gerado com uso do estimador de Bartlett.

Tendo em vista que não há transparência na plotagem do volume de ambiguidade, mostra-se mais conveniente analisar o volume por meio de cortes nos planos correspondentes à posição em que a fonte foi localizada. Tal como apresentado nas Fig. 5.6 a 5.9 que se seguem.

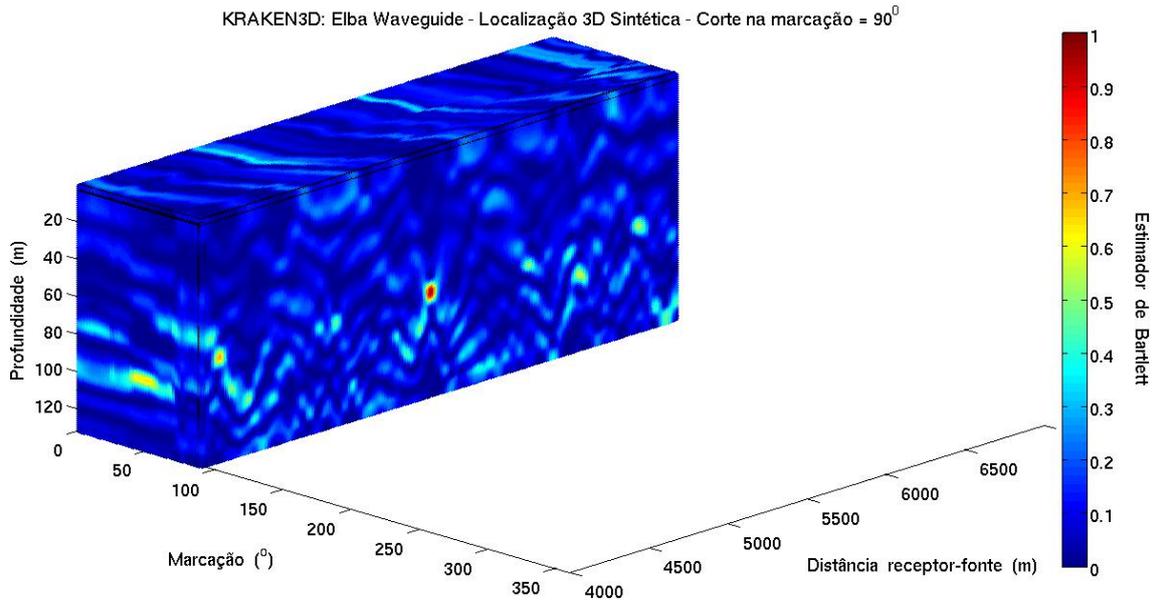


Figura 5.6: Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na marcação 90° , indicando a fonte localizada na distância de 5440 m e profundidade de 75 m.

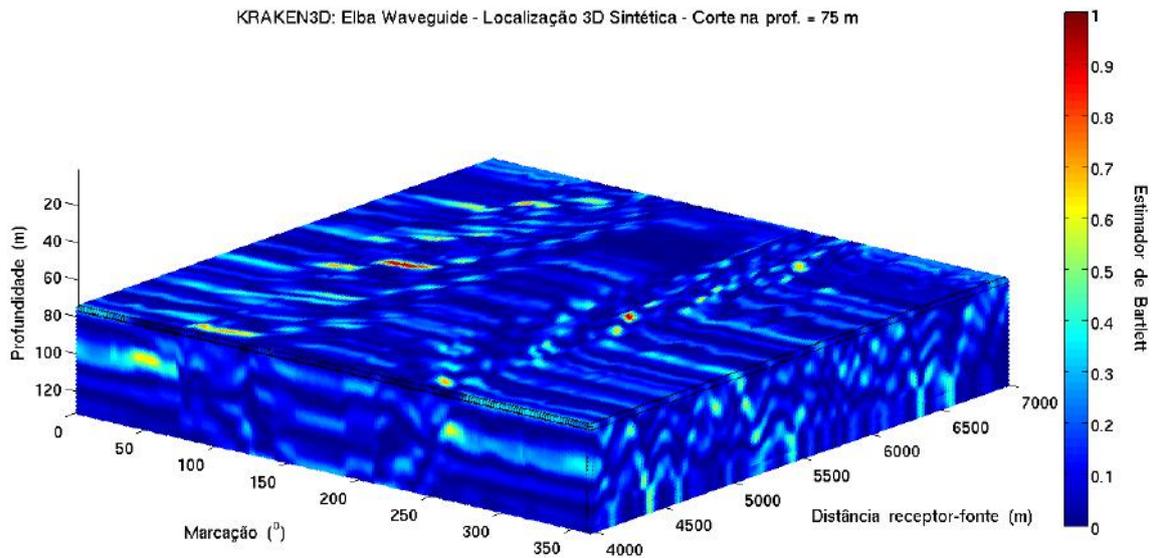


Figura 5.7: Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na profundidade 75 m, indicando a fonte localizada na distância de 5440 m e azimute de 90° .

Na Fig. 5.7 acima, é possível observar a existência de apenas uma ambiguidade “concorrente” mais destacada no azimute de $\sim 250^{\circ}$ (marcação próxima da antípoda da marcação correta) e distância de 5450 m. Não são observadas outras ambiguidades relevantes no corte do volume em profundidade, fato que contribui para atestar a suposição inicial de que as variações batimétricas induzem uma quebra da simetria capaz de prover a discriminação em azimute na localização 3D da fonte.

Por outro lado, o alto valor atingido pelo Bartlett na ambiguidade concorrente (0,9832) representa uma região de redundância, i.e., estão sendo geradas

réplicas muito parecidas do campo de pressão para diferentes parâmetros geométricos prescritos para o modelo, fato que poderá vir a se tornar um problema para localização envolvendo dados reais.

Visando melhor explorar o corte do volume no plano horizontal da profundidade da fonte e facilitar a identificação dos azimutes, mostra-se mais conveniente plotar o volume em uma representação polar, dando origem a um cilindro de ambiguidade, conforme apresentado na Fig. 5.8 (a) e (b).

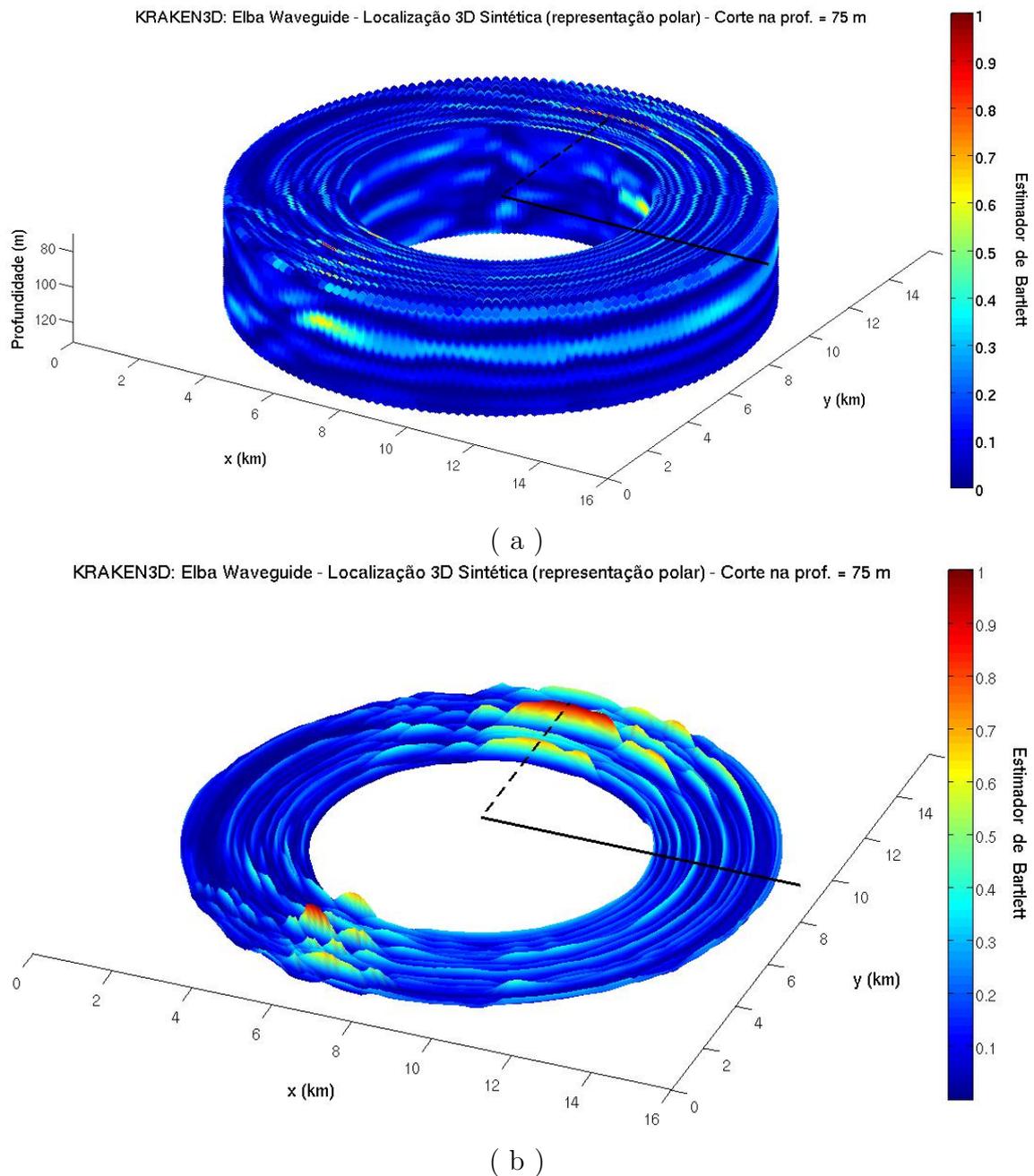


Figura 5.8: Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: (a) corte do cilindro de ambiguidade na profundidade de 75 m; e (b) detalhamento da superfície do cilindro. A linha cheia indica a origem dos ângulos horizontais (0°) e a linha tracejada indica a marcação onde a fonte foi localizada (90°).

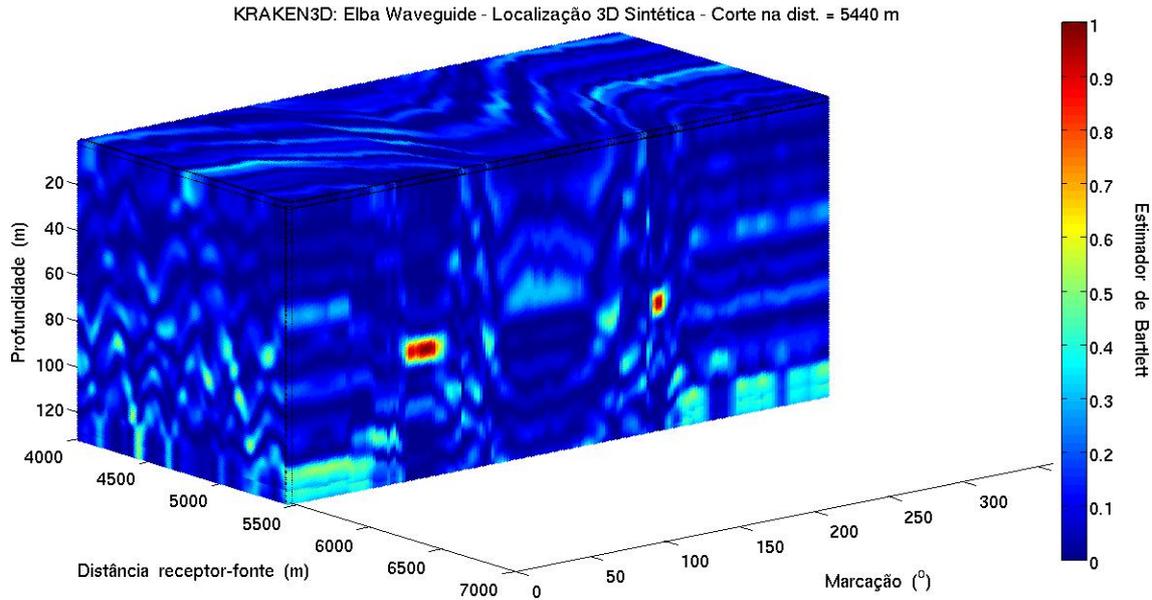


Figura 5.9: Localização 3D sintética com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na distância de 5440 m, indicando a fonte localizada na profundidade de 75 m e marcação de 90°.

Observa-se, na Fig. 5.9, a ocorrência da mesma ambiguidade “concorrente” no azimute $\sim 250^\circ$. Como não existem outras ambiguidades relevantes, fica demonstrado, também nesse corte em distância, que as variações batimétricas são, teoricamente, capazes de prover a quebra de simetria para localização 3D da fonte.

Diante do acima exposto, podemos considerar concluída a localização 3D sintética com uso do modelo de modos normais KRAKEN3D. Passaremos então para etapa seguinte da localização 3D sintética, que consiste, basicamente, em fazer o mesmo com uso dos modelos de traçado de raios BELLHOP3D e TRACEO3D; primeiramente, com o BELLHOP3D.

5.2 Localização Sintética com o BELLHOP3D

Analogamente ao que foi realizado com o KRAKEN3D, na seção 5.1 acima, será aqui realizada a localização com BELLHOP3D; inicialmente, sobre uma única fatia vertical do campo de pressão e, posteriormente, sobre o espaço 3D completo.

Existe uma série de diferenças intrínsecas na localização com uso de modelos de modos normais ou de raios. É de senso comum na literatura [6, 25] que os modelos de modos normais têm preferência em tarefas de localização de fontes em ambientes de águas rasas por MFP, principalmente ao tratar-se de baixas frequências. Uma das vantagens do uso do *approach* de modos normais em relação à Teoria de Raios consiste no fato dos modelos de modos, em geral, serem capazes de considerar ambientes multicamadas [11, 50], o que pode ser determinante em cenários de águas rasas em função da proximidade do fundo, geralmente estratificado.

Visando suprir essa lacuna da Teoria de Raios, os últimos trabalhos [70, 99] envolvendo a localização 2D de fontes no mar de Elba sugeriram a criação de um modelo equivalente do fundo, composto por uma camada única de propriedades geoacústicas homogêneas, o qual fosse capaz de reproduzir, por meio de modelos de raios, uma resposta acústica equivalente àquela gerada pelo modelo de modos KRAKEN, tal como representado esquematicamente na Fig. 5.10. Fundamentalmente, a técnica se apoia em um conceito de grande importância no contexto da focalização e da estimação multiparâmetros, conhecido como **sistema equivalente**, i.e., podemos obter um sistema de propagação que, embora tenha características diferentes, apresente uma resposta acústica semelhante [61].

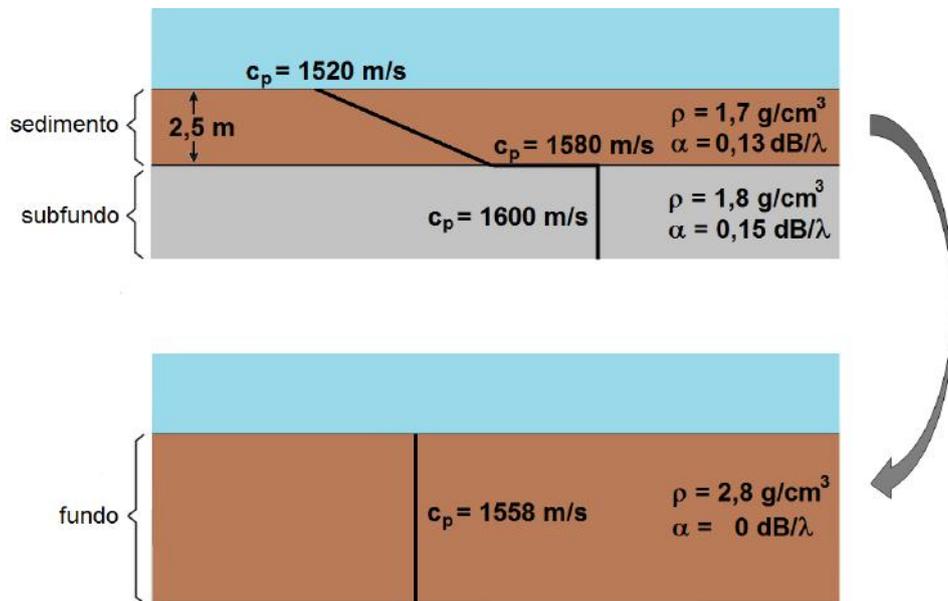


Figura 5.10: Acima: fundo estratificado característico do ambiente do mar de Elba composto por duas camadas, tal como “visto” pelo modelo de modos KRAKEN3D. Abaixo: modelo equivalente de fundo composto por camada única, tal como “visto” pelos modelos de raios.

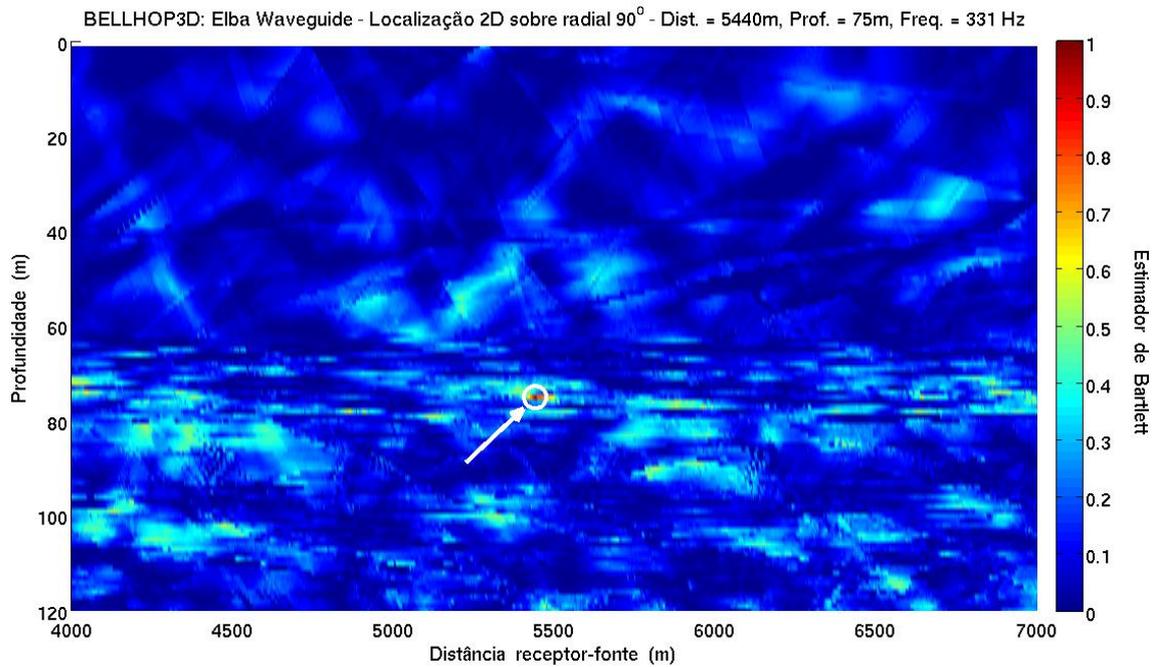
Com uso do modelo equivalente proposto para o fundo de camada única [70, 99], foi demonstrado ser possível obter uma localização 2D de fontes por meio do modelo de raios TRACEO, embora com acurácia inferior à originalmente obtida com uso do KRAKEN, mas ainda considerada satisfatória. Na busca das propriedades geoacústicas que oferecessem uma melhor concordância entre os campos acústicos produzidos pelo TRACEO e pelo KRAKEN, foram obtidos valores de velocidade compressional da onda acústica ($c_p = 1558 \text{ m/s}$), densidade ($\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3$) e atenuação compressional no fundo ($\alpha_p = 0 \text{ dB}/\lambda$) que maximizavam uma função objetiva definida pelo estimador de Bartlett. Tais valores serão, igualmente, adotados na localização com o BELLHOP3D e, posteriormente, também com o TRACEO3D.

De modo a reproduzir o cenário do experimento do mar ao norte da ilha de Elba, foi gerado um campo de “observações” sintéticas (no domínio da frequência), por meio do BELLHOP3D, considerando um *array* vertical composto por 48 hidrofones, igualmente espaçados de 2 m, e uma fonte acústica pontual, irradiando na frequência de 331 Hz, mergulhada na profundidade de 75 m e distando 5440 m ao norte do ponto de fundeio do *array* (cf. Fig 5.1). Dessa forma, a fatia vertical considerada foi a de direção N-S, i.e., marcação 90° (ângulo de sentido anti-horário, em relação ao eixo E-W, centrado no ponto de fundeio do *array*).

Para geração do campo 2D de réplicas, foi utilizado um espaçamento horizontal de 3 m entre distâncias receptor-fonte candidatas, variando de 4000 a 7000 m (1001 distâncias) e um espaçamento vertical de 1 m entre profundidades candidatas de fonte, variando de 1 a 120 m (120 profundidades), o que totalizou 120.120 (1001×120) posições candidatas de fonte no plano xz . Tal como ocorre com o KRAKEN3D, o BELLHOP3D permite que sejam prescritas várias profundidades de fontes em uma única rodada, resultando em apenas 1001 rodadas do modelo.

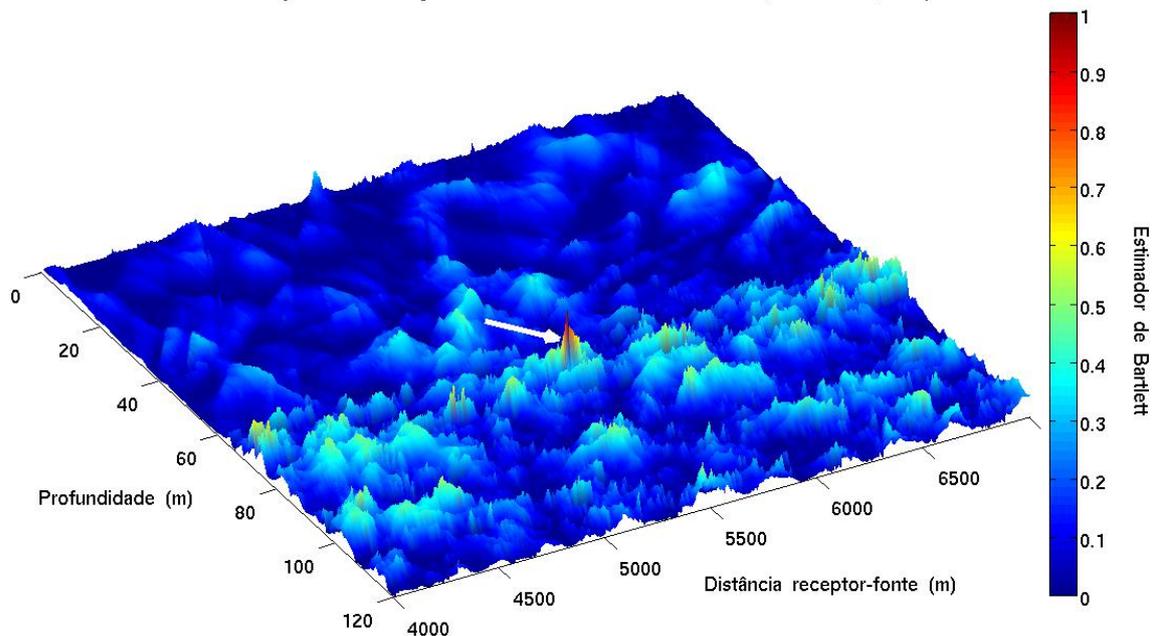
O conjunto de réplicas foi gerado mantendo-se, rigorosamente, a mesma configuração do modelo antes empregada na geração das “observações” sintéticas; se assim não fosse, o estimador de Bartlett no MFP não atingiria o valor máximo teórico de 1 na posição calculada da fonte. O tempo computacional demandado foi de 18h 54min 45s e o espaço de armazenamento de 53,1 MB.

A superfície de ambiguidade produzida é apresentada na Fig. 5.11 (a) que se segue, indicando uma fonte perfeitamente localizada na distância de 5440 m e profundidade de 75 m (mesmos valores prescritos na geração das “observações” sintéticas). Conforme já esperado, foi encontrado o máximo valor unitário para o estimador de Bartlett. Visando melhor evidenciar as flutuações da superfície, é apresentada uma perspectiva tridimensional da plotagem na Fig. 5.11 (b).



(a)

BELLHOP3D: Elba Waveguide - Localização 2D sobre radial 90° - Dist. = 5440m, Prof. = 75m, Freq. = 331 Hz



(b)

Figura 5.11: Localização sintética com o BELLHOP3D na fatia vertical de marcação 90° : (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. A seta indica a posição calculada da fonte.

Na Fig. 5.11 (a), nota-se a ocorrência de descontinuidades de aspecto aproximadamente triangular na superfície de ambiguidade (mais evidentes na primeira metade da coluna d'água). A ocorrência dessas irregularidades se deve à opção do tipo de aproximação de feixes gaussianos selecionada na configuração de BELLHOP3D - a aproximação em forma de chapéu (*hat-shaped* [87]). Tal aproximação torna nula a influência de raios adjacentes que se afastem determinada distância de um eixo considerado como sendo o eixo central de propagação do raio.

Analisando-se a Fig. 5.11 (a) em comparação com a correspondente figura gerada pelo KRAKEN3D (Fig. 5.3) é possível perceber que a superfície gerada pelo BELLHOP3D, de modo geral, é bem mais irregular e acidentada. As maiores irregularidades ocorrem, principalmente, na profundidade da termoclina, entre 60 e 80 m. Tal fato é um indicador da grande sensibilidade do resultado da localização em função do comportamento do perfil de velocidade do som, provocando variações no aspecto da superfície, sobretudo nas regiões onde ocorrem as variações mais bruscas do SSP.

Outrossim, destaca-se que, no experimento do mar de Elba, a fonte foi posicionada, justamente, na profundidade da base da termoclina (80 m), fato que, certamente, contribui para a ocorrência das irregularidades e poderá vir a se tornar um complicador adicional para realização da localização com dados reais e com uso da Teoria de Raios.

Visando melhor esclarecer as questões das descontinuidades triangulares e das irregularidades da superfície, optou-se por realizar uma nova localização sintética com o BELLHOP3D, na qual foram mantidos todos os dados de entrada e parâmetros do modelo, a menos do perfil de velocidade do som que, ao invés do perfil real medido, passou a considerar um perfil teórico *isovelocity*, igual a 1520 m/s (ao longo de toda coluna d'água). O mesmo perfil *isovelocity* foi utilizado tanto na geração das “observações” sintéticas como das réplicas. A nova superfície de ambiguidade produzida é apresentada na Fig. 5.12 que se segue.

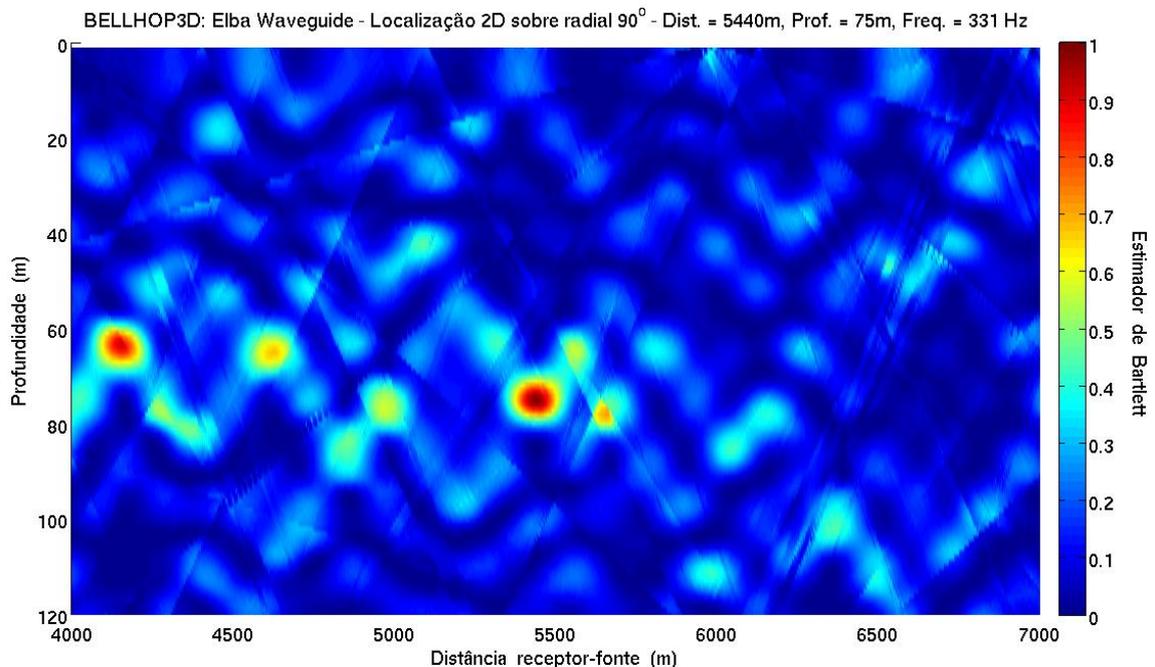


Figura 5.12: Localização sintética com o BELLHOP3D na fatia vertical de marcação 90° com uso do perfil *isovelocity*.

Observa-se na Fig. 5.12, que o uso do perfil *isovelocity*, praticamente, eliminou o problema do aspecto irregular e acidentado da superfície de ambiguidade, confirmando a ideia de que, de fato, as irregularidades anteriormente observadas na Fig. 5.11 (gerada com uso do perfil real) são decorrentes das irregularidades existentes no SSP. Assim sendo, pode-se concluir que, na localização 3D, a estratégia de cálculo dos raios adotada pelo BELLHOP3D faz com que ocorra uma superfície de ambiguidade de aspecto irregular na presença de perfis que apresentem variações bruscas.

Por outro lado, o problema das irregularidades triangulares ainda permanece, mostrando que o mesmo não possui relação com o comportamento do SSP. Na tentativa de minimizar esse problema, optou-se por aumentar o número de raios a serem considerados no cálculo das influências definidas pela aproximação *hat-shaped* dos feixes gaussianos. Dessa forma, um novo conjunto 2D de réplicas foi gerado, onde, além do uso do perfil *isovelocity*, o número de raios lançados prescritos para o feixe acústico foi dobrado, passando de 50 para 100 raios.

A superfície de ambiguidade assim gerada já apresentou uma melhora significativa, mas ainda eram observadas algumas descontinuidades triangulares de aspecto mais suaves ao longo de toda a coluna d'água, optou-se então por dobrar mais uma vez o número de raios lançados, agora prescrevendo-se 200 raios. O tempo computacional demandado para geração do conjunto de réplicas, naturalmente, também aumentou quase proporcionalmente, passando de 11h 34min 13s (com uso de 50 raios) para 41h 43min 33s (com uso de 200 raios). A superfície gerada é apresentada na Fig. 5.13 que se segue.

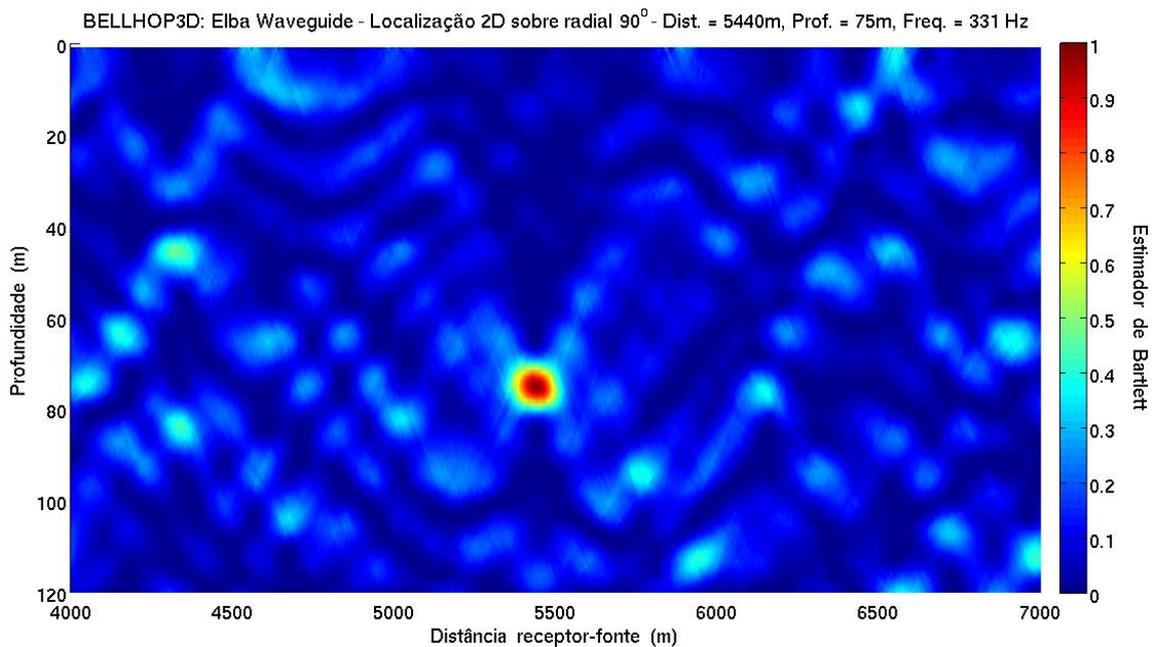


Figura 5.13: Localização sintética com o BELLHOP3D na fatia vertical de marcação 90° com uso do perfil *isovelocity* e 200 raios lançados.

Observa-se na Fig. 5.13 uma superfície suave, sem descontinuidades e sem ambiguidades relevantes, com uma definição bem clara da posição calculada para fonte, demonstrando que as alterações implementadas no SSP e no número de raios lançados foram capazes de melhorar o aspecto da superfície de ambiguidade produzida pelo BELLHOP3D.

Mantendo-se a quantidade de 200 raios lançados, retornamos ao cálculo do conjunto de réplicas considerando o perfil real. A correspondente superfície de ambiguidade é apresentada na Fig. 5.14, que volta a apresentar irregularidades (sobretudo abaixo da termoclina), mas não apresenta mais as descontinuidades triangulares.

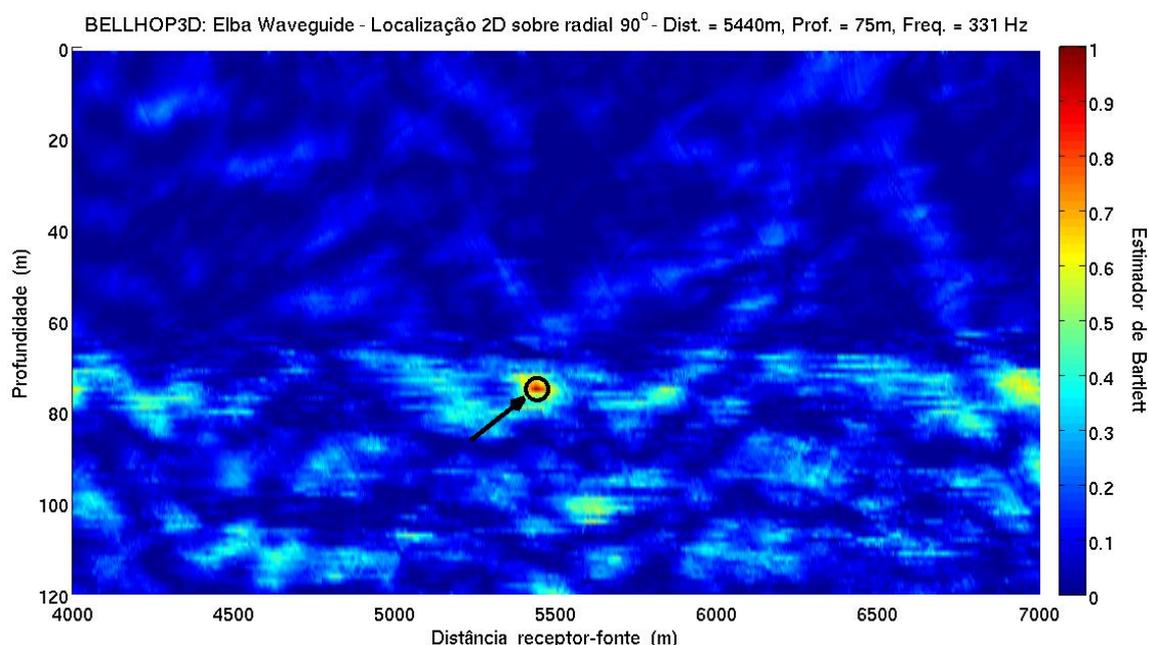


Figura 5.14: Localização sintética com o BELLHOP3D na fatia vertical de marcação 90° com uso do perfil real de velocidade do som e 200 raios lançados. A seta indica a posição calculada da fonte.

Ao se considerar satisfatória a localização 2D sintética, realizada pelo modelo BELLHOP3D, sobre a fatia vertical do campo de pressão; iremos, agora, estender para as demais direções do espaço a metodologia empregada na direção N-S, de modo a realizar a localização 3D plena.

Assim sendo, foi gerado um conjunto 3D de réplicas composto por 181 marcações, igualmente espaçadas de 2° entre 0 e 360° , 151 distâncias receptor-fonte, igualmente espaçadas de 20 m entre 4000 e 7000 m, e 120 profundidades de fonte, igualmente espaçadas de 1 m entre 1 e 120 m, dando origem a um total de 3.279.720 ($181 \times 151 \times 120$) posições candidatas de fonte.

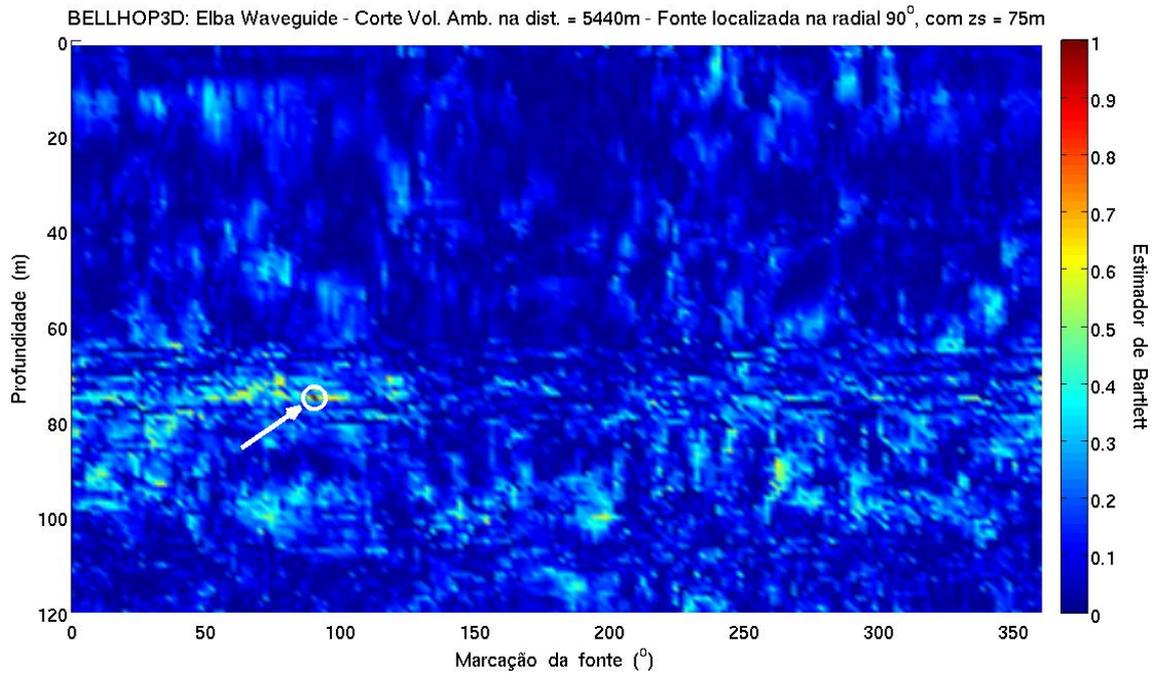
Ressalta-se que o espaçamento horizontal entre fontes candidatas foi ampliado de 3 para 20 m por razões de economia de custo computacional. Foram mantidos todos os demais dados ambientais, parâmetros e configurações do modelo antes empregados na localização sintética sobre a fatia vertical com 50 raios lançados. As “observações” sintéticas utilizadas na localização 3D foram também as mesmas geradas para o caso 2D.

A partir desta etapa do trabalho, mostrou-se fundamental o uso de mais computadores, o que ocorreu por meio do acesso remoto, via internet, de quatro computadores de alto desempenho², gentilmente disponibilizados pelo SiPLAB da Universidade do Algarve. As rotinas passaram, então, a ser, remotamente, executadas através da versão console do MATLAB R2017a.

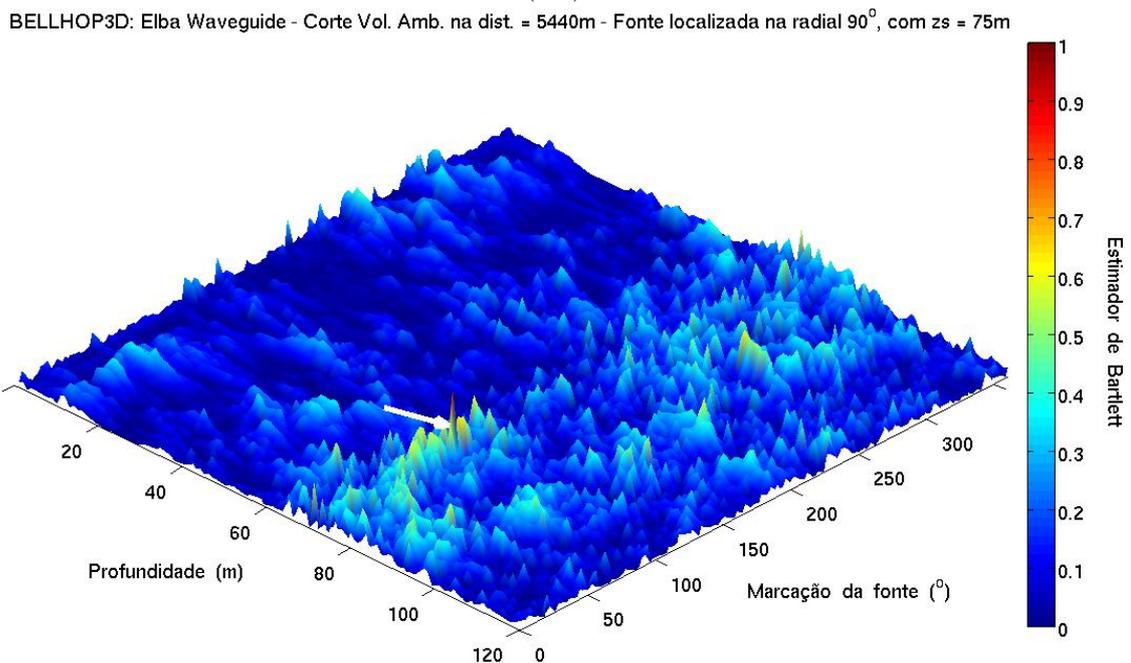
Assim sendo, com uso desses quatro computadores, a geração do presente conjunto 3D de réplicas pelo BELLHOP3D demandou um tempo computacional de $4 \times 65,4$ h e um espaço de armazenamento de 1,4 GB.

A fonte acústica foi localizada em conformidade com os valores esperados, marcação = 90° , distância = 5440 m e profundidade = 75 m. O volume de ambiguidade gerado encontra-se representado por meio dos cortes no plano da distância de 5440 m (em coordenadas cartesianas, Fig. 5.15 (a) e (b)) e no plano da profundidade de 75 m (em coordenadas polares, Fig. 5.16). Optou-se por não apresentar o corte do volume no plano da marcação de 90° a fim de se evitar redundância, pois o mesmo ficaria muito semelhante à Fig. 5.11 já apresentada, tendo em vista o fato de que ambas diferem apenas no intervalo do espaçamento horizontal entre distâncias receptor-fonte candidatas.

²Dos quatro computadores do SiPLAB/UAlg, os dois mais novos possuem processador dual Quad-Core AMD Opteron(tm) 2352 - 2.1 GHz com 20 GB de memória RAM e os outros dois, mais antigos, possuem processador dual AMD Opteron(tm) 248 - 2.2 GHz com 4 GB de memória RAM.



(a)



(b)

Figura 5.15: Localização 3D sintética com o BELLHOP3D: corte no plano da distância 5440 m. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. A seta indica a posição calculada da fonte.

O corte do volume de ambiguidade da Fig. 5.15 (a) nos mostra, novamente, uma superfície de aspecto bastante irregular e acidentado, mas apresentando poucas ambiguidades. Na vista em perspectiva, Fig. 5.15 (b), nota-se que, na posição da fonte, existe um pico bastante proeminente em relação aos demais pontos da vizinhança e um gradiente acentuado na transição para o ponto máximo do estimador. Tal comportamento da superfície indica que o resultado da localização 3D é bastante sensível a ambas as grandezas dos eixos: marcação e profundidade da fonte.

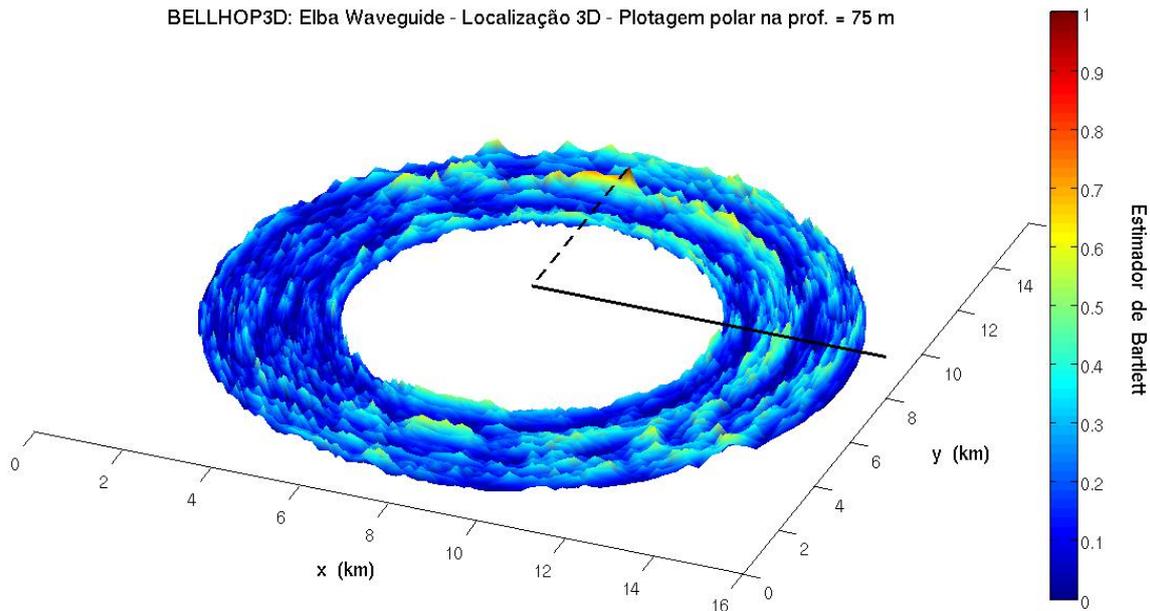


Figura 5.16: Localização 3D sintética com o BELLHOP3D: corte da plotagem polar no plano de profundidade igual a 75 m. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais (0°); e linha tracejada: direção calculada da fonte (90°).

Pela análise do anel de ambiguidade apresentado na Fig. 5.16, calculado pelo BELLHOP3D, em comparação com o anel da Fig. 5.8 (anteriormente calculado pelo KRAKEN3D), é possível perceber uma melhor resolução azimutal na definição da direção da fonte e que, embora ocorram diversas ambiguidades azimutais ao longo dos 360° , nenhuma delas chega a concorrer com o ponto de máximo, situado na marcação 90° .

Embora as superfícies e volumes de ambiguidade gerados pelo BELLHOP3D tenham, de modo geral, apresentado um comportamento irregular, os valores calculados da posição da fonte, assim como o valor unitário atingido pelo estimador de Bartlett, encontram-se dentro do resultado esperado, indicando que, teoricamente, a metodologia e os códigos até aqui empregados são coerentes. Assim sendo, passaremos, então, para etapa seguinte do trabalho que consiste em fazer a localização 3D sintética com o TRACEO3D.

5.3 Localização Sintética com o TRACEO3D

O mesmo procedimento, acima adotado com uso do BELLHOP3D, foi implementado com uso do TRACEO3D. Em uma primeira etapa, foi realizada a localização sobre uma única fatia xz do plano vertical na marcação 90° e, em uma etapa posterior, foi realizada a localização considerando os 360° do espaço.

Todas as informações ambientais, geometria e parâmetros prescritos para TRACEO3D foram os mesmos (ou tão próximos quanto possível) dos, anteriormente, utilizados com o BELLHOP3D, incluindo as propriedades geoacústicas do fundo oriundas da equivalência proposta por BARROSO *et al.* [99]. Cabe aqui ressaltar algumas diferenças entre ambos os modelos em relação aos parâmetros de entrada a serem fornecidos:

- Propriedades geoacústicas do fundo: além da velocidade compressional (c_p) e da atenuação compressional (α_p) da onda acústica no fundo, o TRACEO3D, diferentemente do BELLHOP3D, admite a prescrição da velocidade de cisalhamento (c_s) e da atenuação de cisalhamento no fundo (α_s);
- Aproximação dos feixes gaussianos: conforme já mencionado (subseção 4.2.4), o BELLHOP3D admite a utilização de seis diferentes tipos de feixes gaussianos. Na configuração do BELLHOP3D, foi escolhida a aproximação em forma de chapéu ou *hat-shaped* [87], sendo a gaussiana aproximada por um triângulo isósceles. Já o TRACEO3D considera, unicamente, uma gaussiana perfeita, o que permite um cálculo mais realista das influências dos raios adjacentes, embora isso traga certo prejuízo em termos de custo computacional; e
- Geometria do feixe de lançamento dos raios: o BELLHOP3D exige a prescrição de três parâmetros: ângulo vertical (elevação) e horizontal (azimute) na definição da geometria dos feixes acústicos, e radiais, definidas pelo usuário, sobre as quais serão feitos os cálculos (*bearing*). Já o TRACEO3D exige a prescrição de apenas dois parâmetros: elevação e azimute do feixe, sendo o *bearing* automaticamente calculado em função da configuração do *array*, linear ou retangular, definido pelo usuário. Dessa forma, em ambos os modelos, a geometria do feixe de lançamento dos raios apresenta um formato piramidal, com a fonte pontual posicionada em seu vértice superior.

Outra diferença no uso do TRACEO3D na localização 3D em relação aos dois outros modelos aqui empregados consiste no fato de não permitir a prescrição de mais de uma fonte por rodada. Ou seja, para cada profundidade candidata de fonte (z_s) por cada distância candidata (r_s) será necessária a realização de uma nova rodada do TRACEO3D, totalizando $z_s \times r_s$ rodadas em cada uma das radiais desejadas. Na mesma situação, o KRAKEN3D e o BELLHOP3D, por possibilitarem a prescrição

de várias fontes em uma única rodada, demandariam apenas $1 \times r_s$ rodadas em cada radial, acarretando um tempo computacional consideravelmente menor.

Uma das facilidades que o TRACEO3D oferece em relação ao KRAKEN3D e ao BELLHOP3D é a grande flexibilidade na definição de diferentes geometrias para o arranjo de hidrofones. No TRACEO3D, a posição de cada sensor pode ser definida no próprio sistema de coordenadas cartesianas, especificando-se seus valores de coordenadas x e y e profundidade. No KRAKEN3D, assim como no BELLHOP3D, a definição da posição do *array* de hidrofones é feita em termos de marcação e distância em relação à posição da fonte (e não em relação à origem do sistema de coordenadas), o que se torna um complicador quando estamos considerando fontes que sempre mudam de posição no espaço e, portanto, não se encontram fixas no centro da área de modelagem.

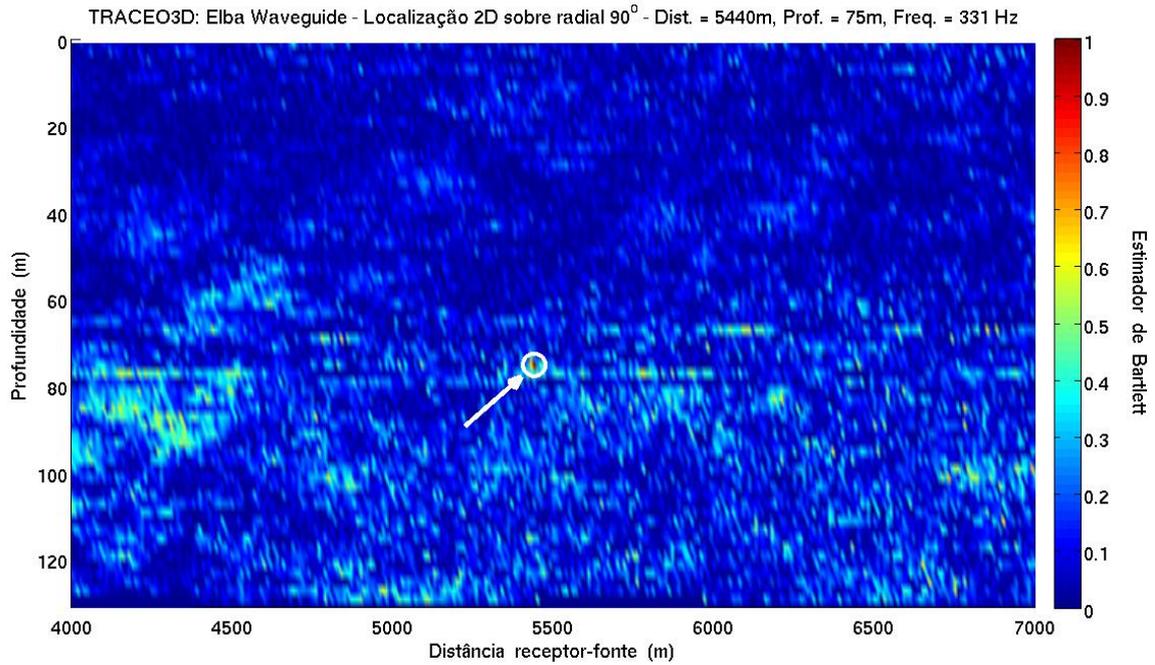
Assim sendo, optou-se por realizar, com o TRACEO3D, duas localizações sintéticas: a primeira considerando um *array* vertical; e a segunda, considerando um *array* horizontal. O uso de *arrays* horizontais na localização 3D se adequa a plataformas nas quais a dimensão horizontal seja bem maior do que a dimensão vertical. Exemplos clássicos desse tipo de plataformas são os submarinos, amplamente empregados nas Marinhas de vários países, ou um *array* rebocado (*towed-array*).

5.3.1 Localização com *array* vertical

O *array* vertical considerado nas simulações com o TRACEO3D foi exatamente o mesmo anteriormente empregado com o KRAKEN3D e o BELLHOP3D, i.e., 48 hidrofones igualmente espaçados de 2 m entre 18,7 e 112,7 m de profundidade, correspondendo a um comprimento total de 94 m (cf. Fig. 3.3).

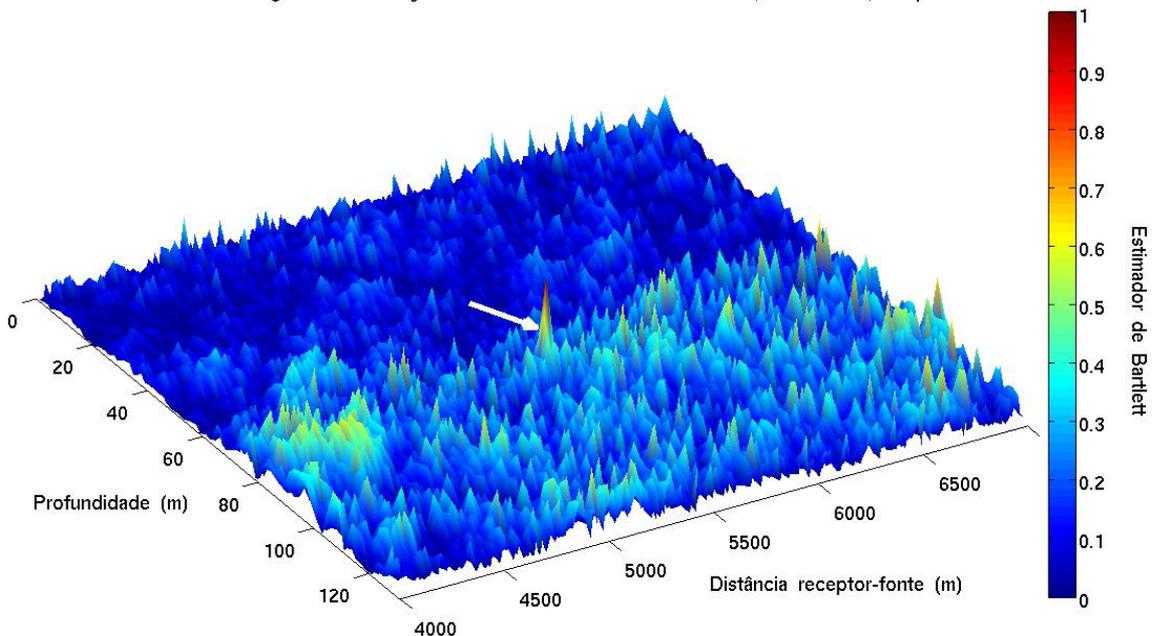
As simulações para geração dos campos de réplicas com o TRACEO3D sobre a fatia vertical consideram 301 distâncias receptor-fonte candidatas, igualmente espaçadas de 10 m entre 4000 e 7000 m e 66 profundidades, igualmente espaçadas de 2 m entre 1 e 131 m, totalizando 19.866 (301×66) posições candidatas da fonte e, consecutivamente, 19.866 rodadas do modelo. O tempo de processamento, com uso dos computadores do SiPLAB/UAlg foi de $4 \times 29,9$ h e o espaço de armazenamento de 14,5 MB.

A superfície de ambiguidade, gerada com uso do estimador de Bartlett, pode ser visualizada na Fig. 5.17, indicando uma fonte perfeitamente localizada na distância de 5440 m e profundidade de 75 m (erro nulo) e o estimador atingindo seu máximo valor igual a 1.



(a)

TRACEO3D: Elba Waveguide - Localização 2D sobre radial 90° - Dist. = 5440m, Prof. = 75m, Freq. = 331 Hz



(b)

Figura 5.17: Localização sintética com o TRACEO3D na fatia vertical do campo de pressão na marcação 90° com uso do *array* vertical: (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. A seta indica a posição calculada da fonte.

A superfície apresentada na Fig. 5.17 mostra, novamente, um comportamento irregular e o ponto de máximo do estimador destaca-se de forma bastante proeminente. As ambiguidades encontradas não são muito relevantes e apresentam, na maior parte da plotagem, valores de Bartlett inferiores a 0,5, com maior incidência na porção da coluna d'água abaixo da profundidade de início da termoclina (60 m).

Em comparação com a correspondente figura gerada pelo BELLHOP3D (Fig. 5.11), percebe-se que aqui não existem mais as descontinuidades de formato triangular antes observadas, uma vez que o TRACEO3D considera, na aproximação dos feixes gaussianos, uma gaussiana perfeita ao invés dos feixes *hat-shaped* selecionados no BELLHOP3D.

Em relação ao aspecto irregular e acidentado da superfície gerada pelo TRACEO3D, tendo em vista que o mesmo ocorre com uso do BELLHOP3D, pode-se dizer que tal feição se trata de uma peculiaridade da Teoria de Raios e não de uma característica exclusiva do TRACEO3D ou do BELLHOP3D.

Após concluída a localização sintética com o TRACEO3D sobre a fatia vertical do campo de pressão, passaremos, então, para localização tridimensional. Foi gerado um conjunto de réplicas 3D composto de 121 marcações, igualmente espaçadas de 3° entre 0 e 360° , 76 distâncias receptor-fonte, igualmente espaçadas³ de 40 m entre 4000 e 7000 m e 25 profundidades igualmente espaçadas de 5 m entre 1 e 120 m, dando origem a um total de 229.900 ($121 \times 76 \times 25$) posições candidatas da fonte.

Destaca-se que, no caso do TRACEO3D, a resolução espacial escolhida para o conjunto 3D de réplicas foi inferior à resolução anteriormente escolhida para uso no KRAKEN3D ($181 \times 301 \times 131$, cf. seção 5.1) e no BELLHOP3D ($181 \times 151 \times 120$, cf. seção 5.2). Optou-se pela redução por razões de economia de tempo computacional. A geração desse conjunto de réplicas demandou um tempo de $4 \times 3 \times 34,3 \text{ h}^4$ e um espaço de armazenamento de 166,1 MB.

A localização indicou, mais uma vez, uma fonte perfeitamente localizada na marcação 90° , distância 5440 m e profundidade 75 m (erro nulo) e o estimador atingindo seu máximo valor igual a 1. O volume de ambiguidade gerado encontra-se representado por meio dos cortes no plano da distância de 5440 m (em coordenadas cartesianas, Fig. 5.18) e no plano da profundidade de 75 m (em coordenadas polares, Fig. 5.19).

³A menos do primeiro espaçamento vertical, que foi de 4 m, todos os demais espaçamentos entre profundidades candidatas da fonte foram de 5 m, i.e., $z_s = [1 \ 5:5:120] = (1, 5, 10, 15 \dots 115, 120)$ m.

⁴A notação 4×3 significa que foram remotamente empregados os quatro computadores do SiPLAB/UAlg e, em cada um deles, foram abertas três seções da versão console do MATLAB, de modo a simular um processamento equivalente a 12 máquinas em paralelo.

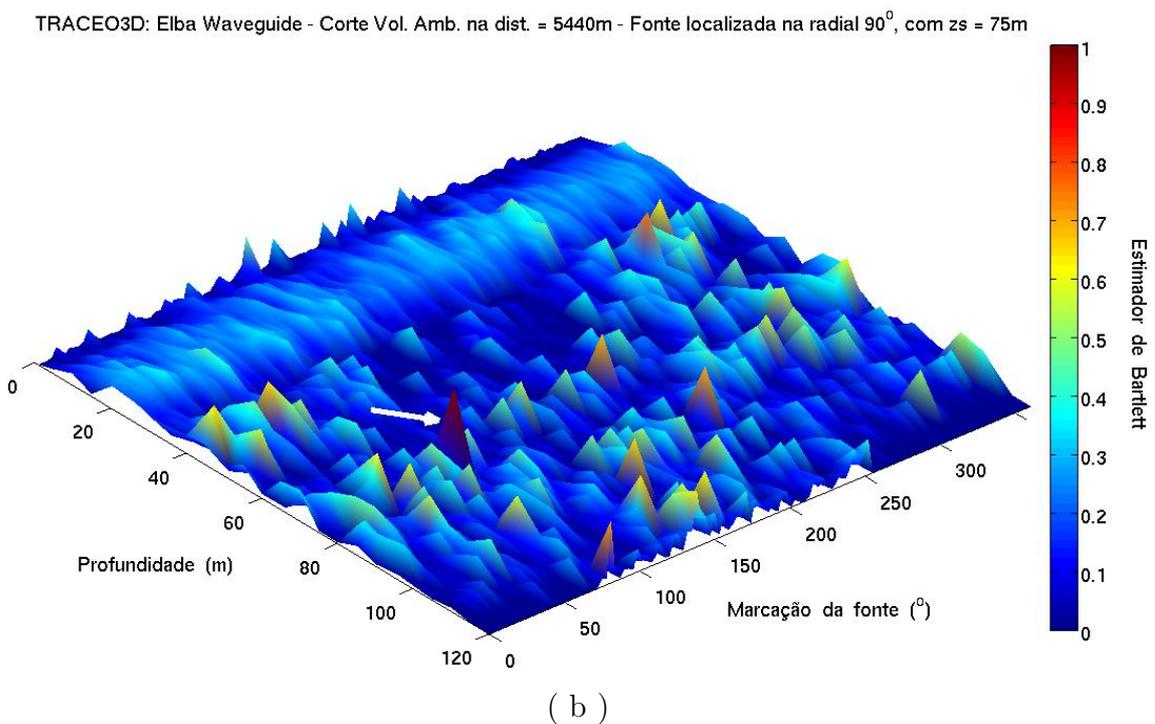
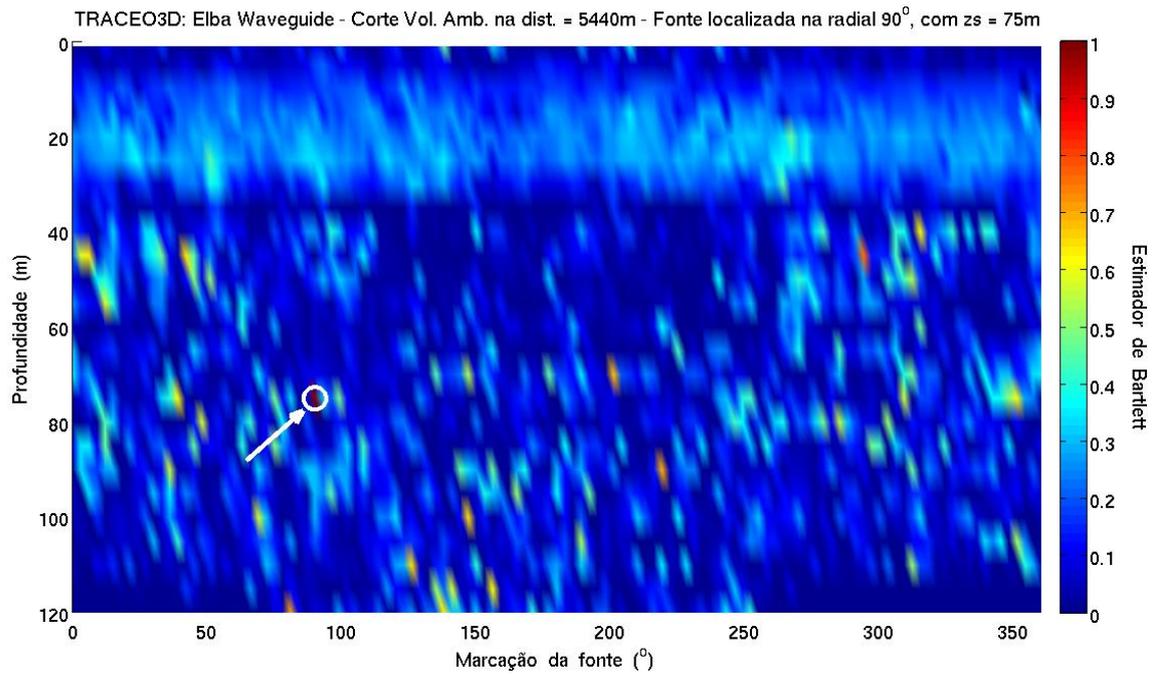


Figura 5.18: Localização 3D sintética com o TRACEO3D e uso do *array* vertical: corte no plano da distância 5440 m. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte.

Observa-se, na Fig. 5.18, maior incidência de ambiguidades na porção da coluna d'água abaixo da profundidade de início da termoclina (60 m), ao longo de marcações variadas, mas sem representarem grande concorrência com o ponto onde a fonte foi localizada (com aspecto bastante pronunciado). Percebe-se que a resolução espacial da plotagem foi fortemente degradada em função do uso de espaçamentos relativamente grosseiros entre profundidades (5 m) e entre distâncias

(40 m). Entretanto, para fins de localização sintética e verificação das rotinas, tal resolução atende às necessidades.

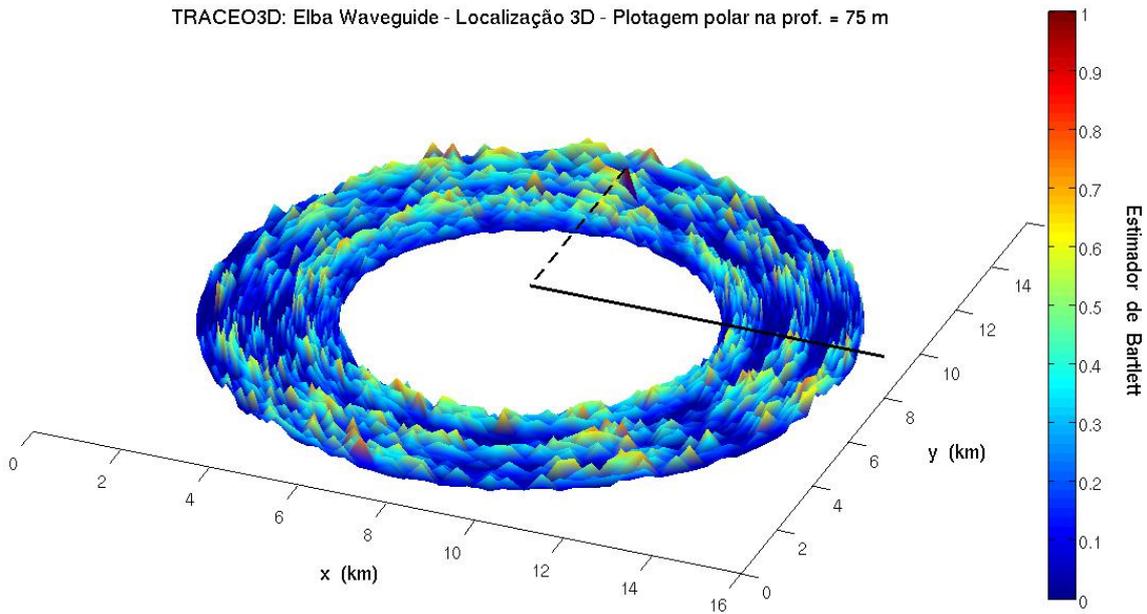


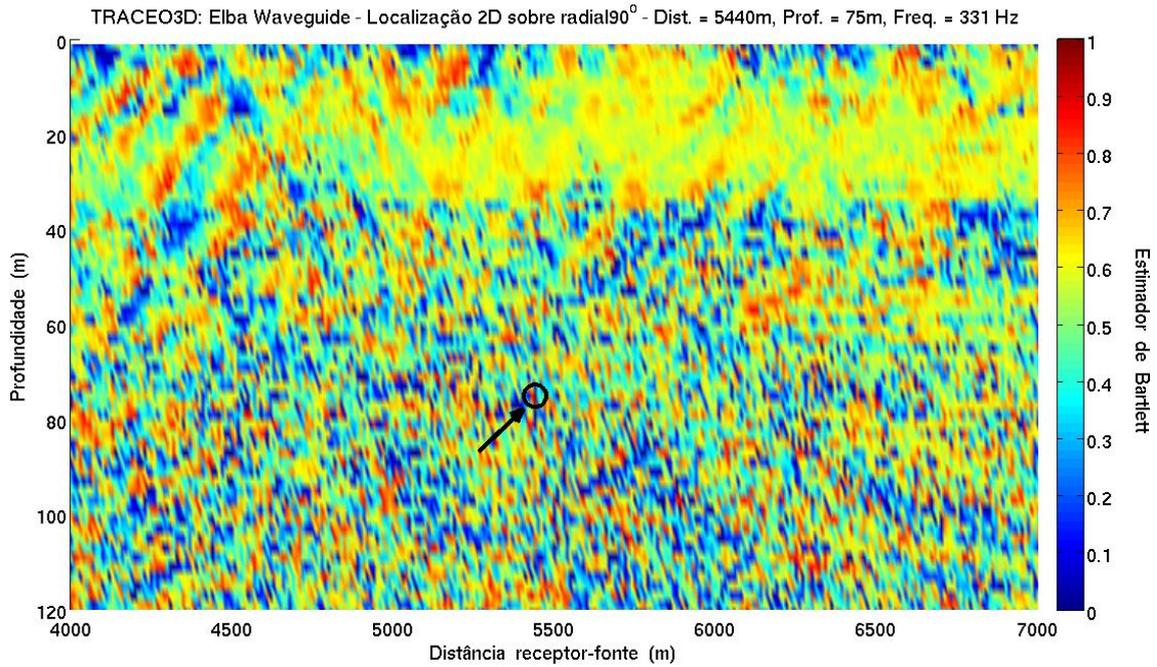
Figura 5.19: Localização 3D sintética com o TRACEO3D e uso do *array* vertical: corte de plotagem polar no plano de profundidade igual a 75 m. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais (0°); e linha tracejada: direção calculada da fonte (90°).

O anel representado na Fig. 5.19 nos mostra que ocorrem ambiguidades praticamente nos 360° , embora nenhuma delas chegue próximo ao valor do estimador no ponto onde a fonte foi localizada (a maior ambiguidade encontrada ocorre na marcação 309° com valor do estimador igual a 0,7529). Tal fato indica uma resolução azimutal razoavelmente boa.

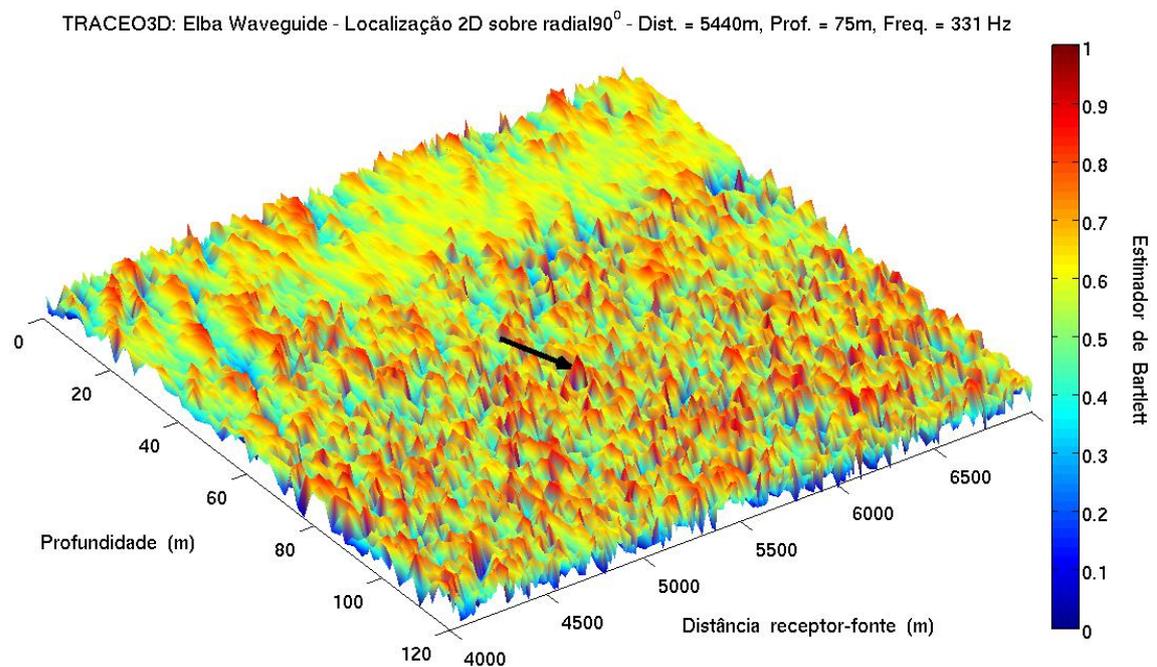
5.3.2 Localização com *array* horizontal

Considerou-se um *array* horizontal de comprimento semelhante ao *array* vertical antes utilizado, onde seu elemento médio ocupasse o ponto central da área de modelagem $(x, y) = (8000, 8000)$ m e fosse orientado no sentido N-S. O *array* horizontal foi constituído por 49 elementos, mergulhados na profundidade de 30 m, igualmente espaçados de 2 m, entre os pontos de coordenadas $(x, y) = (8000, 7952)$ m e $(8000, 8048)$ m, correspondendo a um comprimento total de 96 m.

Para localização sobre a fatia vertical do campo de pressão, foi gerado um conjunto 2D de réplicas com a mesma resolução espacial adotada no caso do *array* vertical (301 distâncias \times 66 profundidades). Foi considerada a fatia de marcação 90° referenciada ao elemento central do *array* horizontal. A superfície de ambiguidade, gerada com uso do estimador de Bartlett, pode ser visualizada na Fig. 5.20, indicando uma fonte localizada na distância de 5440 m e profundidade de 75 m (erro nulo) e o estimador atingindo seu máximo valor igual a 1.



(a)

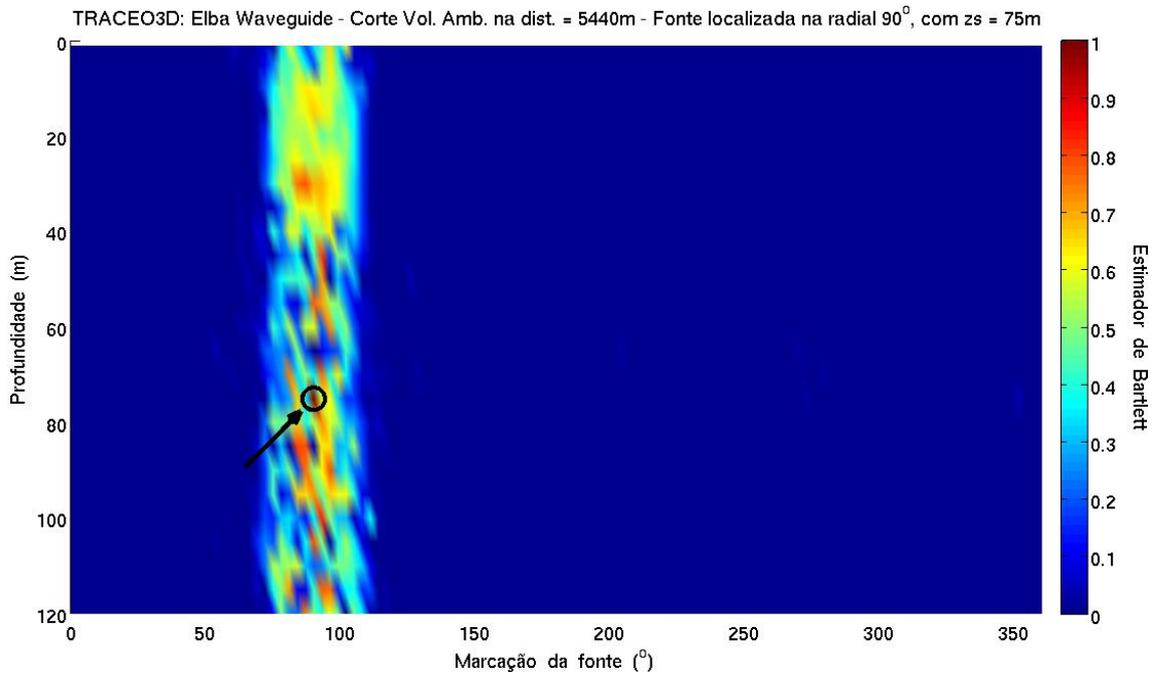


(b)

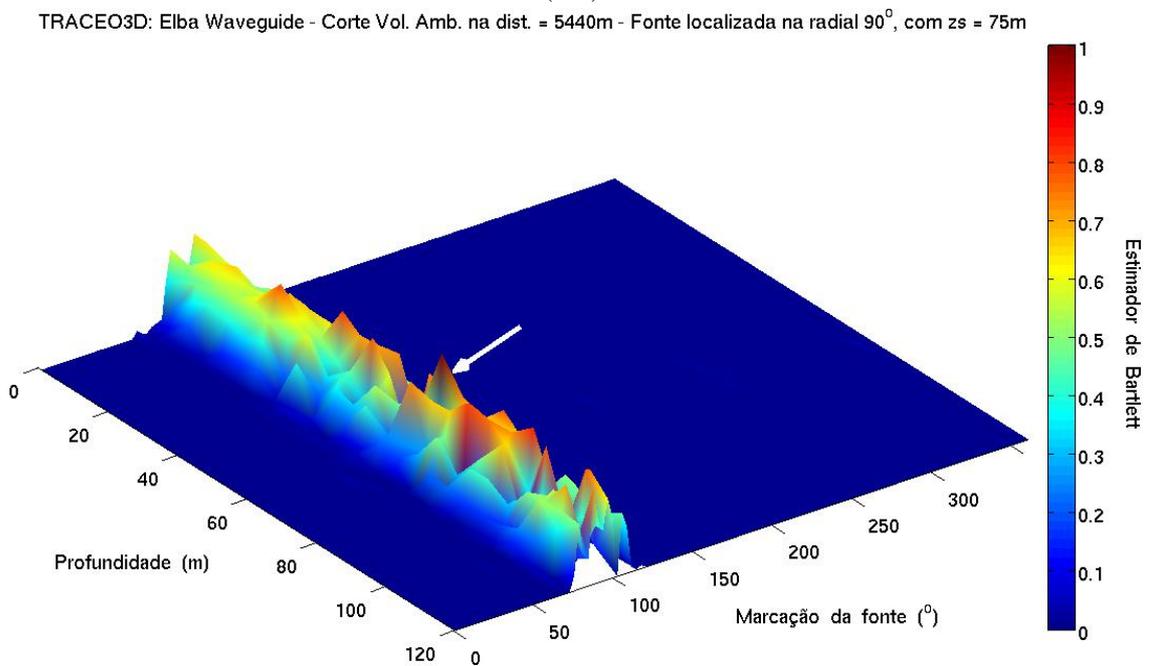
Figura 5.20: Localização sintética com o TRACEO3D na fatia vertical na marcação 90° com uso do *array* horizontal. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte.

Analisando-se a Fig. 5.20 acima, construída com uso *array* horizontal, em comparação com a Fig. 5.17, construída com uso do *array* vertical, nota-se, na figura acima, uma ocorrência bem maior de ambiguidades, distribuídas ao longo de todas as profundidades e todas as distâncias consideradas. Em geral, as ambiguidades também atingem valores mais altos do estimador. Ou seja, o poder discriminador em profundidade do arranjo horizontal se mostrou menor do que o do arranjo vertical.

Para consecução da localização 3D, foi gerado um conjunto de réplicas com a mesma resolução espacial adotada no caso do *array* vertical (121 marcações \times 76 distâncias \times 25 profundidades). O volume de ambiguidade gerado se encontra representado por meio dos cortes no plano da distância de 5440 m, Fig. 5.21 (a) e (b), e na plotagem polar no plano da profundidade da fonte (75 m), Fig. 5.22.



(a)



(b)

Figura 5.21: Localização 3D sintética com o TRACEO3D e uso do *array* horizontal: corte no plano da distância 5440 m. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. A seta indica a posição calculada da fonte.

A análise da Fig. 5.21 (construída com uso *array* horizontal) em relação à Fig. 5.18 (construída com uso *array* vertical), nos mostra que as ambiguidades em marcação foram, praticamente, eliminadas. Ressalta-se que o *array* horizontal, por si só, já provê, em termos geométricos, uma quebra da simetria azimutal, uma vez que, para uma dada marcação da fonte, o sinal acústico recebido por um sensor situado em determinado ponto do *array* será sempre diferente do sinal recebido por outro sensor situado no ponto extremo oposto desse mesmo *array* ou, até mesmo, no ponto situado logo ao lado dele.

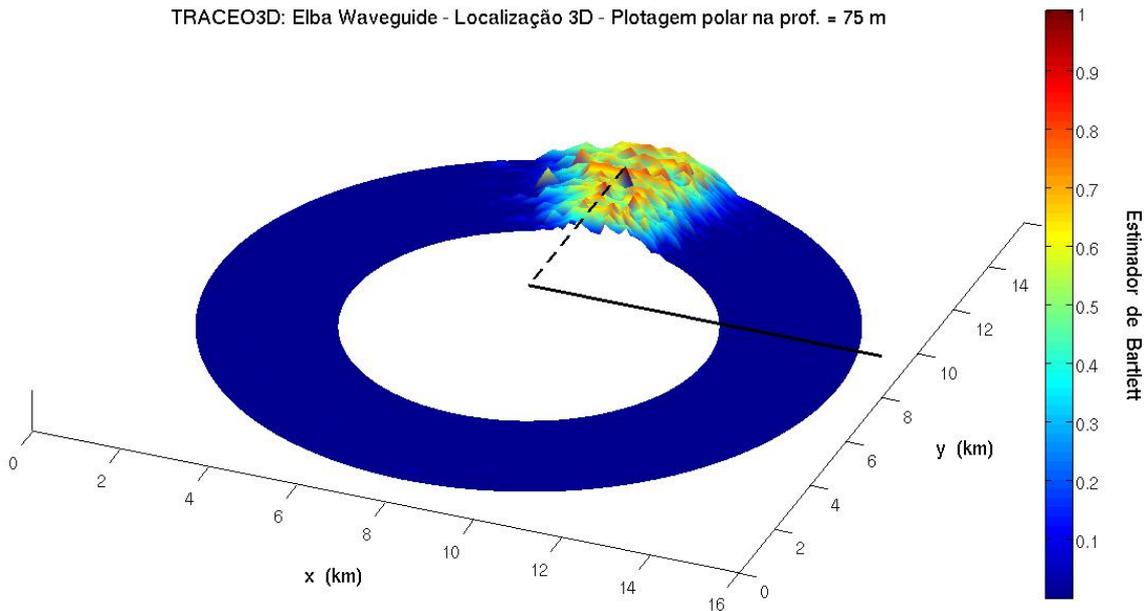


Figura 5.22: Localização 3D sintética com o TRACEO3D e uso do *array* horizontal: corte da plotagem polar no plano de profundidade igual a 75 m. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais (0°); e linha tracejada: direção calculada da fonte (90°).

Na Fig. 5.22 acima observa-se o alto poder discriminador em marcação do *array* horizontal no plano xy . A marcação da fonte calculada apresenta aspecto bastante destacado na plotagem e não existem quaisquer ambiguidades fora de um setor de $\sim 30^\circ$ de abertura, centrado na direção da fonte (90°).

Assim sendo, corroborando os resultados esperados de acordo com os conceitos básicos do processamento de sinais, fica aqui teoricamente demonstrado, por meio da modelagem acústica 3D, que o uso de arranjos horizontais de sensores contribui para quebra da simetria azimutal, trazendo um melhor poder discriminador em marcação, mas com prejuízos em termos de discriminação em profundidade. Por outro lado, o uso de arranjos verticais trará benefícios no poder discriminador em profundidade, mas acarretará prejuízos em termos de discriminação azimutal.

Em função dos resultados teóricos aqui alcançados por meio dos três modelos, pode-se concluir que as rotinas elaboradas são consistentes e atendem ao objetivo, inicialmente estabelecido da localização 3D sintética.

Este passo inicial representou um requisito fundamental no sentido de sanar as primeiras dificuldades encontradas, nomeadamente na construção do domínio tridimensional de modelagem, definição dos diferentes arquivos ambientais de entrada e mudança do ponto de referência dos ângulos horizontais, que passou a ser o *array*, sempre fixo no centro da área de modelagem, permitindo, assim, que a fonte pudesse ter liberdade para “passear” livremente ao longo dos três eixos.

Outros resultados secundários interessantes foram obtidos com o uso do perfil teórico de velocidade do som *isovelocity*, funcionando como uma espécie de amaciador da superfície de ambiguidade, e com uso de um *array* horizontal, contribuindo, favoravelmente, para quebra da simetria cilíndrica e, conseqüentemente, para o aumento da resolução azimutal, demonstrando, dessa forma, a viabilidade da potencial aplicação da metodologia em áreas de interesse militar, como na localização 3D a partir de sensores fixos no casco submarinos ou arranjos de sensores rebocados por navios de superfície ou submarinos.

Considerando-se concluída a verificação teórica da metodologia para realização da localização 3D com uso de dados sintéticos, passaremos, agora, para principal fase motivante do trabalho - a localização 3D com dados experimentais.

Capítulo 6

Resultados Experimentais e Discussão

Os dados experimentais empregados são oriundos do experimento, conduzido pelo SACLANTCEN, no mar ao norte da ilha de Elba, conforme, anteriormente, descrito na seção 3.1. Embora as transmissões da fonte estática tenham sido realizadas na frequência central de 335 Hz, o valor de 331 Hz será adotado nas simulações por corresponder à frequência onde o espectro se revela mais proeminente na análise espectral dos sinais em duas das quatro gravações disponíveis (cf. Fig 3.6, p. 30).

Uma questão básica que merece destaque ao se tratar de localização de fontes é, naturalmente, estabelecer qual será o critério para qualificar uma localização como “bem-sucedida” ou “malsucedida”. Uma análise cuidadosa da literatura atinente ao experimento e dos trabalhos prévios que abordam a solução de problemas inversos no mar de Elba [63, 65, 70] nos conduz a um certo grau de subjetividade na definição rígida desse critério, ao contrário da simplicidade que nos possa aparentar inicialmente. O problema fundamental consiste no fato de que não há meios de se conhecer, precisamente, a posição da fonte nos três eixos, x , y e z , uma vez que não se dispõe de um *Global Positioning System* (GPS) ou dispositivo semelhante mergulhado juntamente com a fonte durante a realização das transmissões.

GINGRAS [64] afirma que, em função das condições de ventos e correntes reinantes na região do experimento do mar de Elba, a posição da fonte somente pode ser conhecida dentro de um círculo de incerteza de raio de 200 m, centrado na posição de lançamento da poita. A posição do *array* vertical, por sua vez, apresenta uma acurácia de cerca de 100 m devido a limitações do sistema GPS existente a bordo do navio de apoio à pesquisa [63, 64]. Assim sendo, já teríamos uma incerteza de 300 m na medição da distância receptor-fonte; a qual, de acordo com a primeira referência [64], seria de aproximadamente 5,8 km, e a fonte estática estaria mergulhada em uma profundidade de 79 m durante a realização das transmissões. De posse das coordenadas geográficas das posições de lançamento das poitas da fonte

e do *array*, o cálculo da distância esférica¹ entre ambas as poitas é de 5,8458 km, em concordância, portanto, com valor de 5,8 km anteriormente mencionado.

Posteriormente, GINGRAS e GERSTOFT [63] afirmaram que, com base nas incertezas no posicionamento GPS do *array* vertical e da fonte no experimento de Elba, a distância fonte-receptor prevista seria de 5600 ± 200 m e a profundidade da fonte de 80 ± 2 m. Os autores demonstraram também que o uso de algoritmos genéticos (GA) para estimação de parâmetros a serem prescritos para o modelo de modos normais SNAP *range-independent* produziram uma significativa melhora na *performance* da localização 2D de fontes por MFP. Estimativas altamente consistentes foram obtidas com uso dos GA na determinação de parâmetros de profundidade local, profundidade dos receptores e velocidade compressional de propagação no som no fundo. Razoáveis estimativas foram também obtidas para outros parâmetros ambientais. Tendo em vista o sucesso então reportado no uso dos GA na estimação desses parâmetros, os mesmos serão, igualmente, empregados no presente trabalho. A Tab. 6.1 que se segue apresenta os parâmetros geométricos e geoacústicos de referência (baseados nas medições) e os estimados pelos GA.

Tabela 6.1: Valores de referência e estimados por algoritmos genéticos dos parâmetros geométricos e ambientais característicos do cenário do mar de Elba

PARÂMETROS DO MODELO	REFERÊNCIA (MEDIÇÃO)	ESTIMATIVAS ALG. GEN.
Geométricos:		
Distância da fonte (m)	5600	5437
Profundidade da fonte (m)	80,0	74,6
Profundidade do receptor (m)	112,7	111,7
Profundidade local (m)	127,0	128,9
Camada de sedimentos:		
Veloc. compressional superior (m/s)	1520	1505
Veloc. compressional inferior (m/s)	1580	1556
Densidade (g/cm ³)	1,7	2,0
Atenuação compressional (dB/λ)	0,13	0,11
Espessura (m)	2,5	3,3
Fundo:		
Veloc. compressional (m/s)	1600	1576
Densidade (g/cm ³)	1,8	1,6
Atenuação compressional (dB/λ)	0,15	0,18

Fonte: GINGRAS e GERSTOFT [63], p. 3594.

¹Cálculo realizado por meio do *script* “m_lldist” da *mapping toolbox* do MATLAB. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/mapping.html>>. Acesso em 18 fev. 2018.

Posteriormente, GERSTOFT e GINGRAS [65], considerando dessa vez o cenário de Elba como sendo um ambiente *range-dependent*, adotaram, novamente, os parâmetros geométricos de distância fonte-receptor de 5600 ± 200 m e a profundidade da fonte de 80 ± 2 m. Sendo então decidido, a princípio, adotar esses mesmos parâmetros como valores de referência no trabalho em tela.

Entretanto, tendo em vista que estamos a tratar da localização tridimensional, restava ainda estabelecer qual seria o critério para definição da margem de erro aceitável no cálculo da marcação que o *array* faz da fonte. Com base nas coordenadas geográficas das posições de lançamento das poitas da fonte e do *array*, o ângulo que o *array* marca a fonte foi calculado² como sendo de $91,3^\circ$. Em função dos círculos de incerteza no posicionamento da fonte e do *array* já comentados, estima-se que a tolerância desse ângulo de marcação seja de, aproximadamente, $3,1^\circ$, o que nos conduz a uma marcação de $91,3^\circ \pm 3,1^\circ$ a ser adotada como valor de referência para avaliação dos ângulos horizontais calculados na localização. Os parâmetros geométricos adotados como referência para avaliação da localização tridimensional se encontram consubstanciados na Tab. 6.2 que se segue.

Tabela 6.2: Parâmetros geométricos de referência para avaliação da localização 3D

Distância (m)	5600 ± 200
Profundidade (m)	$80,0 \pm 2,0$
Marcação ($^\circ$)	$91,3 \pm 3,1$

Na localização com dados experimentais, será adotada a mesma estratégia de abordagem do problema anteriormente descrita no caso sintético, i.e., utilização dos modelos KRAKEN3D, BELLHOP3D e TRACEO3D na geração dos campos de réplicas; inicialmente, considerando uma única fatia vertical do campo acústico (plano xz) e, em uma fase posterior, o espaço 3D completo.

6.1 Localização com o KRAKEN3D

6.1.1 Localização na Fatia Vertical

Como ponto de partida, o mesmo campo 2D de réplicas gerado, no cenário de Elba, com uso do KRAKEN3D no caso sintético (cf. seção 5.1) foi aproveitado nessa primeira tentativa de localização, sobre a fatia vertical, com dados experimentais. Dessa forma, a mesma malha de triangulação original, apresentada na Fig. 5.2,

²Cálculo realizado por meio do *script* “azimuth” da *mapping toolbox* do MATLAB. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/mapping.html>>. Acesso em 18 fev. 2018.

composta por 697 nós e 1303 elementos, foi aqui empregada, assim como idêntica geometria e mesmos parâmetros ambientais (cf. coluna “ALG. GEN.” da Tab. 6.1).

A superfície de ambiguidade gerada pelo estimador de Bartlett, que avalia o grau de ajuste entre o campo de réplicas e os dados reais observados, é apresentada na Fig. 6.1, onde a posição da fonte calculada pelo KRAKEN3D é indicada pela seta e encontram-se também representados:

- uma circunferência com asterisco branco, indicadora da posição 2D de referência da fonte (baseada nas medições, dist. = 5600 m e prof. = 80,0 m, cf. Tab. 6.1);
- um retângulo branco tracejado centrado na posição de referência da fonte, indicador da margem de tolerância das incertezas associadas às medições da distância e profundidade da fonte (cf. Tab. 6.2);
- uma circunferência com asterisco encarnado, indicadora da posição 2D da fonte estimada pelos GA [63] (dist. = 5437 m e prof. = 74,6 m, cf. Tab. 6.1); e
- uma circunferência com asterisco verde, indicadora da posição 2D da fonte estimada pelo KRAKEN em trabalhos pretéritos [70], calculada por MFP, sobre a fatia vertical do campo de pressão e considerando um fundo plano RI (dist. = 5380 m e prof. = 64 m).

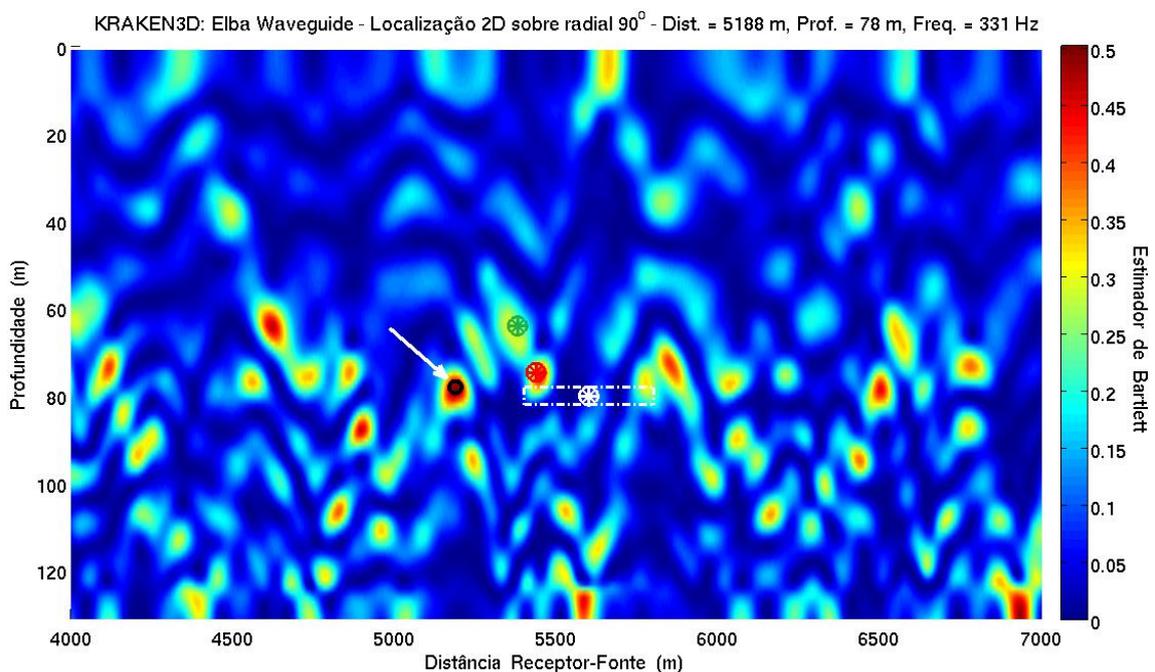


Figura 6.1: Localização 2D com o KRAKEN3D (sem calibração) e com uso de dados experimentais. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.

Pode-se perceber, pela Fig. 6.1, que a posição calculada pelo KRAKEN3D (indicada pela seta) difere da posição calculada pelo KRAKEN (indicada pelo asterisco verde). Tal diferença se deve ao fato do KRAKEN3D considerar efeitos

out-of-plane, tais como as variações batimétricas, que são desprezados pelo KRAKEN. A distância receptor-fonte calculada pelo KRAKEN3D foi subestimada em 412 m em relação à distância adotada como referência e a profundidade calculada indicou que a fonte estaria 2 m mais rasa (no limite inferior da margem de tolerância estabelecida).

O valor máximo do estimador de Bartlett alcançado foi de 0,5023, portanto menor do que o valor já calculado em trabalhos anteriores envolvendo a localização de fontes com uso da versão 2D do KRAKEN [70], que foi de 0,6049; indicando, portanto, um pior ajuste entre dados medidos e calculados pelo modelo 3D. Naturalmente, tendo em vista que a modelagem 3D considera efeitos que são, normalmente, desprezados pelo modelos 2D convencionais, era de se esperar que a concordância entre dados medidos e modelados fosse melhor com o uso da modelagem 3D, atingindo, portanto, valores mais altos para o estimador.

Entretanto, o insucesso ocorrido nessa primeira tentativa de localização no plano vertical não pode ser considerado algo totalmente inesperado, pois nenhuma calibração ou validação do modelo 3D havia ainda sido implementada para o cenário 3D de Elba. Tais ajustes compõem o ciclo de *feedback* característico da otimização da técnica de MFP (cf. Fig. 3.1, p. 24). Além disso, há de se ressaltar que os parâmetros geoacústicos do fundo aqui prescritos na configuração do KRAKEN3D são aqueles oriundos de uma otimização 2D por GA [63]; assim sendo, não se pode descartar a possibilidade de que uma nova otimização GA 3D permita um melhor ajustamento, embora tal pesquisa esteja fora do propósito principal desta tese.

Visando melhorar a *performance* do KRAKEN3D na geração dos campos de réplicas e, consecutivamente, na localização da fonte, foi realizada uma profunda investigação nos dados e parâmetros do modelo. Tal tarefa compreendeu uma verificação dos dados de entrada, parâmetros geométricos, oceanográficos e geoacústicos.

Inicialmente, o ângulo de marcação da fatia vertical do campo acústico foi alterado de 90° para $91,3^\circ$ (cf. Tab. 6.2, p. 107), a fim de prover maior coerência com as coordenadas geográficas conhecidas das posições do *array* e da fonte acústica. O tipo de interpolação do SSP foi alterado de *N2-linear* (opção “N”, sendo N o índice de refração) para *C-linear* (opção “C”), por apresentar melhor concordância na comparação com os dados acústicos medidos.

Uma análise detalhada dos dados de batimetria oriundos do Instituto Hidrográfico da Marinha Italiana (IIM), em comparação com os pontos de profundidade medida na ocasião do experimento, permitiu constatar a existência de um degrau entre ambos variando entre 0,5 e 2 m a mais nos dados do IIM. No ponto de fundeio do *array*, por exemplo, a documentação de experimento [63, 64] reporta uma batimetria de 127 m e os dados do IIM indicam uma batimetria de 127,5 m, ou seja, um desnível de 0,5 m entre ambos. Tendo em vista que os dados oriundos do

IIM são referenciados ao nível de redução³, era de se esperar que as profundidades medidas fossem ligeiramente maiores do que os dados batimétricos.

Entretanto, uma vez que, na configuração do modelo acústico, estão sendo utilizados os dados geométricos e geoacústicos estimados pelos GA, a batimetria estimada no ponto de fundeio do *array* passa a ser de 128,9 m (cf. Tab. 6.1). Tal como apresentado por GINGRAS e GERSTOFT [63], a alteração da batimetria de 127 m para o valor estimado pelos GA de 128,9 m e da profundidade do receptor de 112,7 para 111,7 m produz um melhor ajuste aos reais parâmetros ambientais e um aumento do valor alcançado pelo estimador de Bartlett no MFP. Dessa forma, visando garantir que, no ponto do *array*, ocorra a profundidade estimada pelos GA ao invés da profundidade medida, a batimetria no ponto do array foi alterada de 127 para 128,9 m; e, de modo a tornar a batimetria estimada consistente com a batimetria do IIM nos demais pontos do domínio de modelagem, toda a batimetria foi toda acrescida de 1,4 m (128,9 m - 127,5 m).

Notou-se também que a inclusão (manual) na malha de alguns nós na posição de pontos com profundidade medida no experimento (cf. seção 5.1) estava degradando os resultados da localização, ao invés de melhorá-los conforme se imaginou inicialmente. Tal constatação se mostrou mais evidente nas proximidades da fonte, onde o desnível entre medições e dados do IIM chegava a 1,4 m. Assim sendo, optou-se por remover da malha de triangulação os nós do experimento atinentes ao ponto de fundeio da fonte e ao ponto de lançamento do CTD8 (ambos com profundidade de 130 m). Dessa forma, a malha modificada ficou, agora, composta por 695 nós e 1299 elementos triangulares.

A geração de novos campos de réplicas foi realizada incorporando as alterações acima descritas, utilizando um espaçamento horizontal de 1 m entre distâncias candidatas, variando de 4000 a 7000 m (3001 distâncias) e um espaçamento vertical de 0,1 m entre profundidades candidatas de fonte, variando de 1 a 130 m (1291 profundidades), o que totalizou 3.874.291 (3001 × 1291) posições candidatas de fonte no plano vertical de marcação 91,3°.

Quanto à prescrição do campo de velocidades do som, foram considerados três casos distintos:

- CASO 1: Empregado, unicamente, o SSP 1, coletado nas proximidades da fonte, ao norte da área de modelagem (conforme já vinha sendo feito desde o início do trabalho). O tempo computacional demandado para geração desse conjunto 2D de réplicas foi de 75h 02min 30s.

³Nível de referência vertical utilizado nos dados batimétricos apresentados nas cartas náuticas oficiais publicadas pelos serviços hidrográficos. O nível de redução corresponde, aproximadamente, à média das baixa-mares de sizígia.

- CASO 2: Além do SSP 1, inicialmente empregado, foi considerado um segundo SSP (SSP 2, medido nas proximidades do *array*). A distribuição dos dois SSP's pelo domínio de modelagem foi feita de modo que fosse prescrito para cada nó da malha aquele SSP que estivesse localizado mais próximo. Como o ponto de coleta do SSP 2 está localizado nas proximidades do *array*, ponto central da área de modelagem, a maior parte dos nós passou a receber esse segundo SSP, conforme pode ser observado na Fig. 6.2 (b). Na Fig. 6.2 (a), são plotados ambos os perfis. O tempo computacional demandado para geração desse conjunto 2D de réplicas foi de 90h 01min 08s.

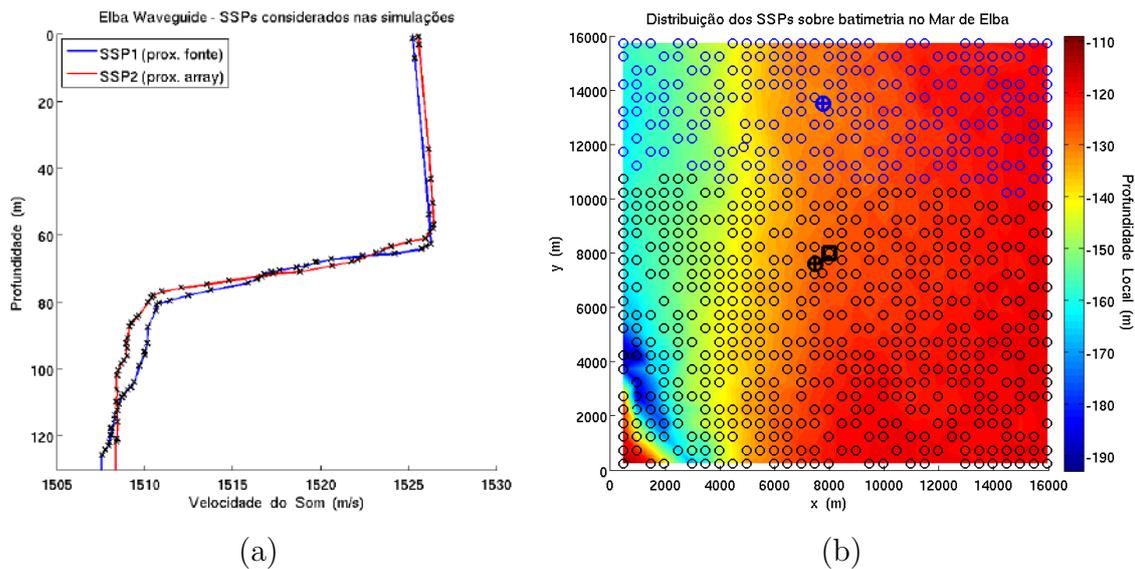


Figura 6.2: SSP's prescritos para o KRAKEN3D: (a) perfis 1 (proximidades da fonte) e 2 (proximidades do *array*); e (b) distribuição dos SSP's pelos nós da malha. Circunferências azuis: nós que receberam o SSP 1; circunferências pretas: nós que receberam o SSP 2; e circunferências com cruz: pontos de coleta dos SSP's.

- CASO 3: Empregado, unicamente, o SSP 2, coletado nas proximidades do *array*, ponto central da área de modelagem. O tempo computacional⁴ demandado para geração desse conjunto 2D de réplicas foi de 75h 00min 10s.

Os resultados da localização realizada na configuração dos três casos acima descritos são apresentados na Tab. 6.3, onde os erros apresentados são referidos à posição medida da fonte (dist. = 5600 m e prof. = 80,0 m) e o "erro 2D" é valor absoluto do erro resultante.

⁴Os tempos computacionais aqui referidos nos três casos consideram o uso remoto de um computador do SiPLAB/UAlg com processador dual Quad-Core AMD Opteron(tm) 2352 - 2.1 GHz e com 20 GB de memória RAM.

Tabela 6.3: Localização 2D com o KRAKEN3D, considerando diferentes condições de SSP

	CASO 1 (SSP 1)	CASO 2 (SSP 1 e 2)	CASO 3 (SSP 2)
Distância (m)	5397	5367	5326
erro (m)	-203	-233	-274
Profundidade (m)	79,8	78,3	78,3
erro (m)	-0,2	-1,7	-1,7
erro 2D (m)	203,0	233,0	274,0
Máx. Bartlett	0,6028	0,5431	0,4632

Pela análise dos resultados da Tab. 6.3, constata-se que a inclusão do segundo SSP degradou a localização, assim como também o valor do estimador. Teoricamente, ao se considerar uma quantidade maior SSP's na modelagem 3D, era de se esperar uma melhor concordância com a realidade; entretanto, no cenário em questão, ocorre justamente o inverso.

As razões que levam a tal discrepância não são conhecidas ao certo. Uma das possíveis causas seria o fato do SSP 2 ter sofrido alterações significativas entre o momento da coleta dos dados pelo CTD e o momento da realização das gravações acústicas. Ressalta-se que, no experimento de Elba, as gravações dos sinais transmitidos pela fonte estática ocorreram na parte da tarde do dia 26 out. (entre 15h 44min e 16h 23min) [63] e o segundo SSP foi medido na parte da manhã (10h 12min) do mesmo dia. Já o primeiro SSP foi medido no período da tarde (14h 00min), mais próximo do instante das gravações, fato que, certamente, contribuiu para melhor *performance* na localização quando é utilizado apenas o SSP 1.

Assim sendo, optou-se por prosseguir com as simulações com o KRAKEN3D considerando, apenas, o primeiro SSP (coletado nas proximidades da fonte) e abandonar o uso do segundo SSP (coletado nas proximidades do *array*).

A superfície de ambiguidade gerada pelo estimador de Bartlett atinente ao caso 1 (SSP 1) é apresentada na Fig. 6.3 abaixo, onde a posição calculada da fonte é indicada pela seta. Encontram-se também representadas as posições das fontes calculadas em trabalhos pretéritos [63, 70, 99]. É empregada a mesma legenda já apresentada na plotagem da superfície de ambiguidade da Fig. 6.1.

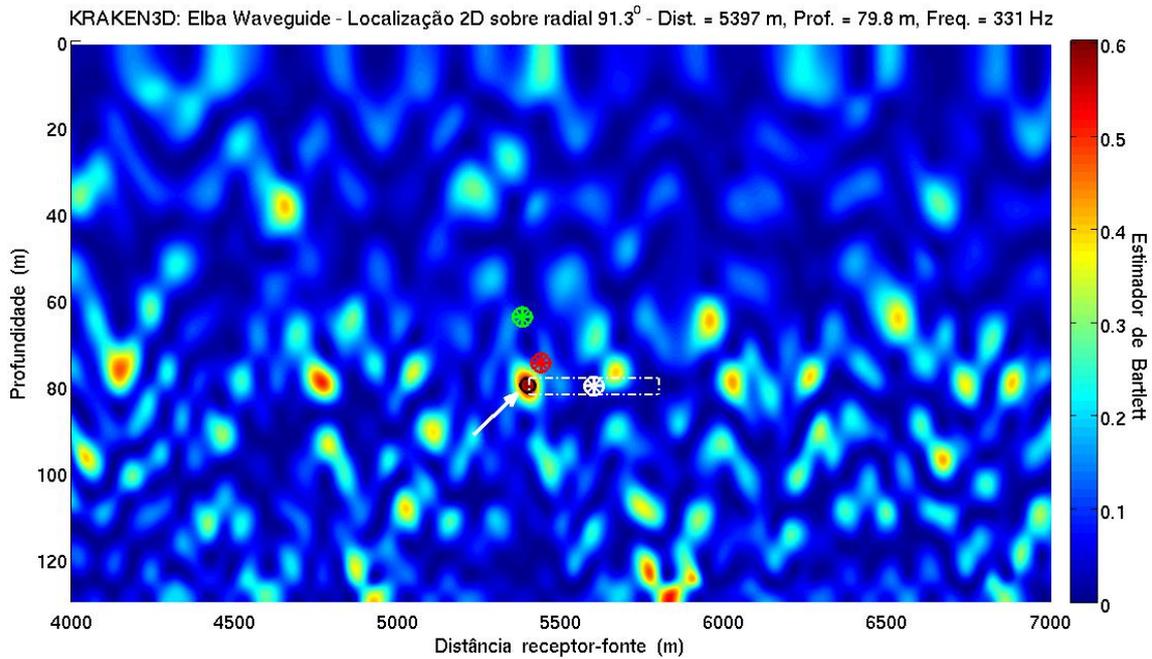


Figura 6.3: Localização 2D com o KRAKEN3D na fatia vertical. Setas: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.

Pela análise da Fig. 6.3 em conjunto com os resultados apresentados na Tab. 6.3, percebe-se que a fonte foi localizada na profundidade correta, com um erro de apenas 0,2 m (correspondente a um erro percentual de 0,25%), em uma distância que se encontra 3 m fora do limite inferior da margem de erro adotada como aceitável. O erro em distância é, portanto, de 203 m (correspondente a um erro percentual de 3,6%) e o máximo valor alcançado pelo estimador de 0,6028.

Vale ressaltar que, no caso em questão, foi escolhido fazer o localização 2D sobre o plano vertical de marcação 91,3° em função das posições geográficas conhecidas do *array* e da fonte. Nada impede, portanto, que melhores resultados na estimação da posição da fonte e no valor do estimador possam ser alcançados ao se considerar um intervalo de valores ao redor do valor de 91,3°. A localização em diferentes marcações será abordada, posteriormente, na seção 6.1.2.

Embora a distância da fonte, aqui calculada em 5397 m, esteja fora dos 5600 m \pm 200 m inicialmente estabelecidos, destaca-se que tal resultado se encontra muito próximo da distância calculada em trabalhos anteriores pelo modelo de modos normais SNAP [63], pelo KRAKEN (2D) [70] e pelo modelo de raios TRACEO [99] e também mais próxima da distância estimada pelos GA [63]. A Tab. 6.4 compara o resultado aqui obtido pelo KRAKEN3D com os resultados obtidos por diferentes trabalhos pretéritos de localização da fonte no cenário do mar de Elba.

Tabela 6.4: Comparação da localização 2D estimada pelo KRAKEN3D perante outros resultados pretéritos de localização 2D de fontes no mar de Elba

	MEDIÇÃO	KRAKEN3D	ESTIM. GA	SNAP	KRAKEN	TRACEO
	[65]		[63]	[63]	[70]	[99]
Distância (m)	5600	5397	5437	5430	5380	5269
erro (m)	-203	-	-40	-33	+17	+128
Profundidade (m)	80,0	79,8	74,6	75,6	64	78
erro (m)	-0,2	-	+5,2	+4,2	+15,8	+1,8
erro 2D (m)	203,0	-	40,3	33,3	23,2	128,0
Máx. Bartlett	-	0,6028	-	-0,3 dB	0,6049	0,5163

A análise dos resultados da Tab. 6.4 demonstra que tanto os modelos assim como a geometria estimada pelos GA indicam que a fonte está localizada em uma distância do receptor que mede cerca de 200 m a menos do que a medição encontrada na documentação do experimento, o que nos leva a crer que, de fato, a fonte, realmente, estaria em ~ 5400 m de distância ao invés dos ~ 5600 m inicialmente considerados. Vale ressaltar que o último trabalho realizado sobre localização 2D como os dados do experimento de Elba [99] considerou a posição de referência da fonte como sendo aquela estimada pelos GA (dist. = 5437 m e prof. = 74,6 m), ao invés da posição oriunda das medições.

Assim sendo, avalia-se a presente localização 2D sobre a fatia vertical do campo acústico (obtida com uso do KRAKEN3D para geração das réplicas e dados experimentais) como sendo satisfatória e, portanto, a configuração empregada no modelo estando habilitada para uso na localização sobre o espaço 3D.

6.1.2 Localização Tridimensional

Para geração do campo 3D de réplicas, de modo a otimizar o custo computacional, optou-se por realizar as simulações em duas etapas: a primeira, denominada “rodada grosseira”, utilizando um espaçamento maior entre posições candidatas da fonte; e a segunda etapa, denominada “rodada refinada”, utilizando um espaçamento entre posições candidatas da fonte bem mais reduzido. Tal procedimento visa calcular a posição estimada da fonte com resolução satisfatória, sem acarretar grandes prejuízos em termos de tempo computacional e espaço de armazenamento. Em cada conjunto de rodadas do modelo, foram adotados os seguintes critérios geométricos para as posições candidatas de fonte:

Rodada Grosseira:

- Radiais variando de 0 a 360°, com espaçamento angular regular de 2° (181 marcações);
- Distâncias receptor-fonte variando de 4000 a 7000 m, com espaçamento horizontal regular de 20 m (151 distâncias); e
- Profundidades de fonte variando de 1 a 120 m, com espaçamento vertical regular de 1 m (120 profundidades), o que corresponde a um total de 3.279.720 ($181 \times 151 \times 120$) posições candidatas da fonte nos 360°.

Rodada Refinada:

- Radiais variando de $(b_{gros} - 1^\circ)$ a $(b_{gros} + 1^\circ)$, com espaçamento angular regular de 0,1° (21 marcações), sendo b_{gros} o resultado obtido na rodada grosseira para marcação estimada da fonte;
- Distâncias receptor-fonte variando de $(r_{gros} - 10 \text{ m})$ a $(r_{gros} + 10 \text{ m})$, com espaçamento horizontal regular de 1 m (21 distâncias), sendo r_{gros} o resultado obtido na rodada grosseira para distância estimada da fonte; e
- Profundidades de fonte variando de $(d_{gros} - 0,5 \text{ m})$ a $(d_{gros} + 0,5 \text{ m})$, com espaçamento vertical regular de 0,1 m (11 profundidades), sendo d_{gros} o resultado obtido na rodada grosseira para profundidade estimada da fonte. Tal configuração corresponde a um total de 4851 ($21 \times 21 \times 11$) posições candidatas da fonte.

Todos os demais dados e parâmetros do modelo foram mantidos de acordo com a localização anteriormente realizada sobre a fatia vertical do campo acústico (cf. subseção 6.1.1).

O tempo computacional demandado para geração desse conjunto de réplicas na rodada grosseira (com uso remoto de dois computadores do SiPLAB/UAlg) foi de 2 × 34h 23min 29s e o espaço de armazenamento de 1,44 GB.

O resultado obtido não foi satisfatório, indicando uma fonte localizada na marcação 68° (erro de -23,3°), distância de 6480 m (erro de +880 m) com uma profundidade de 76 m (erro de -4 m), atingindo um valor máximo do estimador de Bartlett de 0,6369. Outros nove pontos de posição estimada da fonte foram erroneamente localizados antes que se chegasse ao primeiro resultado coerente, que ocorreu na marcação 92°, distância de 5400 m e profundidade de 80 m, com um valor máximo de estimador de Bartlett de 0,6016.

Tal resultado demonstra a necessidade de calibração adicional do modelo, de modo que, primeiramente, as variações espaciais de batimetria sejam capazes de prover uma discriminação azimutal que seja suficiente para que a fonte seja devidamente localizada em marcação. Por outro lado, há de se levar em conta que a solução correta do problema não estaria muito longe, uma vez que foram

prescritas para o modelo 3.279.720 de posições candidatas da fonte e a primeira posição coerente encontrada estava em 11^o lugar no espaço 3D.

Assim sendo, retornou-se para fase de configuração do modelo. Uma nova verificação foi realizada nos dados de entrada e na configuração do modelo acústico, além de uma revisão da literatura existente sobre o experimento. Tendo em vista que a modelagem do fundo é o ponto chave da metodologia aqui proposta, maior ênfase foi conferida na geometria e nos parâmetros geoacústicos.

Ressalta-se que a modelagem de águas rasas é extremamente sensível a problemas de *model mismatch*, decorrentes de incertezas no perfil de velocidade do som, nas variações batimétricas e nas propriedades geoacústicas do fundo, principalmente tratando-se da modelagem 3D. Uma vez que, no trabalho em tela, está sendo considerado apenas um único SSP para todo o domínio de modelagem; o fundo passa, então, a interferir, definitivamente, na acurácia das previsões dos modelos.

SOARES *et al.* [100] apresentaram, em 1999, um trabalho sobre o uso do MFP na localização 2D de uma fonte em movimento, empregando também os dados do experimento do mar de Elba, no qual utilizaram processadores de banda larga e banda estreita e o estimador de Bartlett normalizado em dB. Com ambos os processadores, a estimativa, via GA, dos parâmetros geométricos indicou uma profundidade de 129,4 m na posição do *array* vertical. A nível de investigação, passou-se a adotar essa mesma profundidade no ponto do *array*, no centro da malha triangular. De modo a tornar a batimetria estimada consistente com a batimetria do IIM nos demais pontos do domínio de modelagem, toda a batimetria foi acrescida de 1,9 m (129,4 m - 127,5 m), em substituição ao desnível de 1,4 m anteriormente considerado na localização sobre a fatia vertical (subseção 6.1.1).

Um parâmetro ambiental do modelo que vinha sendo negligenciado até este ponto do trabalho é a rugosidade interfacial. A rugosidade é um efeito de pequena escala que causa atenuação e espalhamento (*scattering*) do som. Em termos de modelagem acústica, o fundo é definitivamente a interface mais complexa, apresentando diversas características rugosas que variam de acordo com a localidade geográfica e produzem diferentes efeitos na reflexão dos raios sonoros [11]. As rugosidades do fundo consideradas pequenas (da ordem de centímetros a dezenas de metros) são as mais importantes nos processos de reflexão porque são, geralmente, da mesma ordem do comprimento da onda acústica [101]. Tendo em vista que os efeitos *out-of-plane* da reflexão (muito influenciada pela rugosidade) são considerados na modelagem 3D, decidiu-se investigar a influência da rugosidade no resultado das simulações.

ROUSEFF e EWART [102] estudaram o efeito aleatório da rugosidade interfacial na propagação acústica de águas rasas, por meio dos métodos de equações parabólicas e modos normais (com uso do NMM KRAKEN). Os autores concluíram que níveis moderados de rugosidade podem ter um efeito potencialmente significativo no campo acústico. Múltiplas interações com superfícies rugosas podem causar uma penetração supercrítica adicional no sedimento, criando um mecanismo extra de perda energética para o fundo. O trabalho proposto, que representou uma tentativa inicial de incluir uma parcela da aleatoriedade nas simulações em ambientes de águas rasas, considerou diferentes combinações de rugosidade da superfície e do fundo, os quais serão adaptados para o nosso presente cenário de estudo do mar de Elba.

Embora a superfície do mar seja, normalmente, considerada um simples contorno plano perfeitamente refletor, existem casos em que a superfície tem implicações mais profundas na propagação sonora. Um desses casos ocorre em situações de mar agitado [11]. Embora, na documentação do experimento [64], conste que as condições de mar eram favoráveis (estado do mar variando entre 2 e 3 na escala Beaufort), optou-se por realizar simulações incluindo a rugosidade na interface ar-superfície (parâmetro “sigma” na configuração do modelo). O cálculo da rugosidade foi realizado por meio da expressão (6.1) abaixo, que tem origem no espectro de Pierson-Moskowitz [103] para um mar completamente desenvolvido [102].

$$\sigma_h^2 = \frac{\alpha U^4}{4 \beta g^2} \quad (6.1)$$

onde:

- σ_h^2 é a variância da rugosidade da superfície do mar;
- $\alpha = 8,1 \times 10^{-3}$ e $\beta = 0,74$ são constantes de correlação;
- U é a velocidade do vento, em m/s, referenciada a uma altura de 19,5 m; e
- g é a aceleração da gravidade no local, considerada 9,81 m/s².

O vento reinante no momento das gravações não é conhecido, entretanto há relatos de que, no dia das gravações, o vento apresentava variações entre 12 e 20 nós de intensidade [64]. Substituindo o valor de pico do vento na expressão (6.1), chega-se ao valor da rugosidade na superfície, $\sigma_h = 0,3992$ m. Naturalmente, esse cálculo representa um valor aproximado, tendo em vista que é assumido um mar completamente desenvolvido, uma superfície com rugosidade invariável e uniforme, válida para todo o domínio de modelagem, e um vento constante com intensidade 20 nós ($\sim 10,3$ m/s).

Quanto à rugosidade do fundo, dado de medição mais difícil, não existe qualquer referência na literatura do experimento sobre seu valor. Assim sendo, foi adotado, a princípio, o mesmo valor utilizado no trabalho de ROUSEFF e EWART [102], $\sigma_b = 1,0$ m. Destaca-se que, apesar das notáveis semelhanças em termos de composição física e propriedades geoacústicas existentes entre o fundo considerado no citado trabalho (localizado no litoral de Massachusetts, EUA) e o fundo na região ao norte da ilha de Elba, o valor aqui adotado representa apenas um valor de referência para investigação do papel da rugosidade do fundo na qualidade dos resultados do modelo.

Incorporando as alterações acima descritas na configuração do modelo acústico, novos conjuntos 3D de réplicas foram gerados, utilizando os mesmos critérios de espaçamento geométrico em termos de marcação, distância e profundidade das possíveis posições candidatas da fonte. Os resultados da localização calculados pela chamada “rodada grosseira” são apresentados na Tab. 6.5, que considera dois casos: o primeiro com superfície plana e fundo rugoso e o segundo com a superfície e o fundo rugosos. Os erros apresentados são referidos à posição medida da fonte (marcação $91,3^\circ$, dist. = 5600 m e prof. = 80,0 m), o “erro 3D” é valor absoluto do erro resultante (distância ponto a ponto) em relação à medição e o “erro GA_{2D}” é o valor absoluto do erro 2D resultante referido à posição da fonte estimada pelos GA (dist. = 5437 m e prof. = 74,6 m).

Tabela 6.5: Localização com o KRAKEN3D considerando diferentes condições de rugosidade interfacial (rodada grosseira)

	CASO 1 (Fundo Rugoso)	CASO 2 (Sup. e Fundo Rug.)
Marcação ($^\circ$)		92
erro ($^\circ$)		+0,7
Distância (m)		5420
erro (m)		-180
Profundidade (m)		81
erro (m)		+1
erro 3D (m)		192,2
erro GA _{2D} (m)		18,2
Máx. Bartlett	0,6587	0,6470

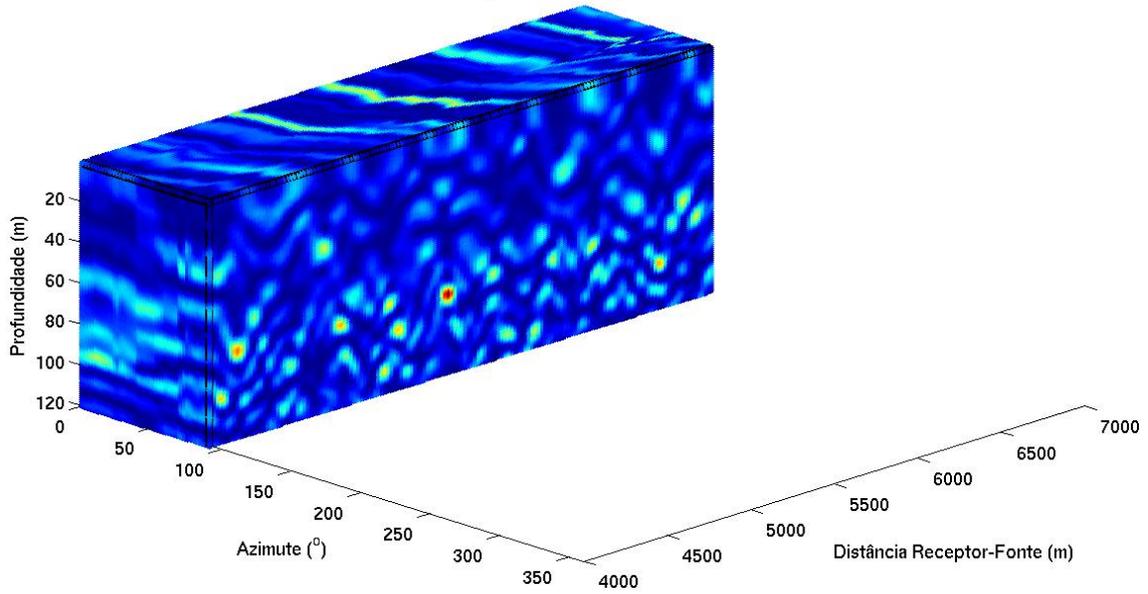
Os resultados apresentados na Tab. 6.5 indicam que as modificações realizadas na configuração do modelo acústico permitiram localizar a fonte com sucesso no espaço 3D em ambas as condições de rugosidade interfacial. Os erros em marcação, distância e profundidade da fonte estão dentro da margem de tolerância considerada aceitável (cf. Tab. 6.2) e os índices máximos alcançados pelo estimador de Bartlett também são satisfatórios, indicando uma concordância com dados medidos ligeiramente melhor quando apenas o fundo é considerado rugoso e a superfície é mantida plana (caso 1).

Destaca-se que, em relação à posição da fonte estimada pelos GA_{2D} [63], a diferença em distância é de apenas -17 m (5420 - 5437), o que corresponde a um erro percentual de 0,3% em distância; por outro lado, a diferença em profundidade sobe para +6,4 m (81,0 - 74,6), correspondendo a um erro percentual de 8,6% em profundidade. No espaço 3D, a distância linear entre o ponto xyz correspondente à posição calculada da fonte e o ponto da posição medida (sobre a marcação de referência 91,3°) é de 192,2 m em ambos os casos (cf. linha “erro 3D” na Tab. 6.5).

Na etapa seguinte, o resultado da chamada “rodada refinada” poderá, certamente, permitir maior detalhamento geométrico no cálculo da posição da fonte e, possivelmente, que o estimador atinja valores mais elevados.

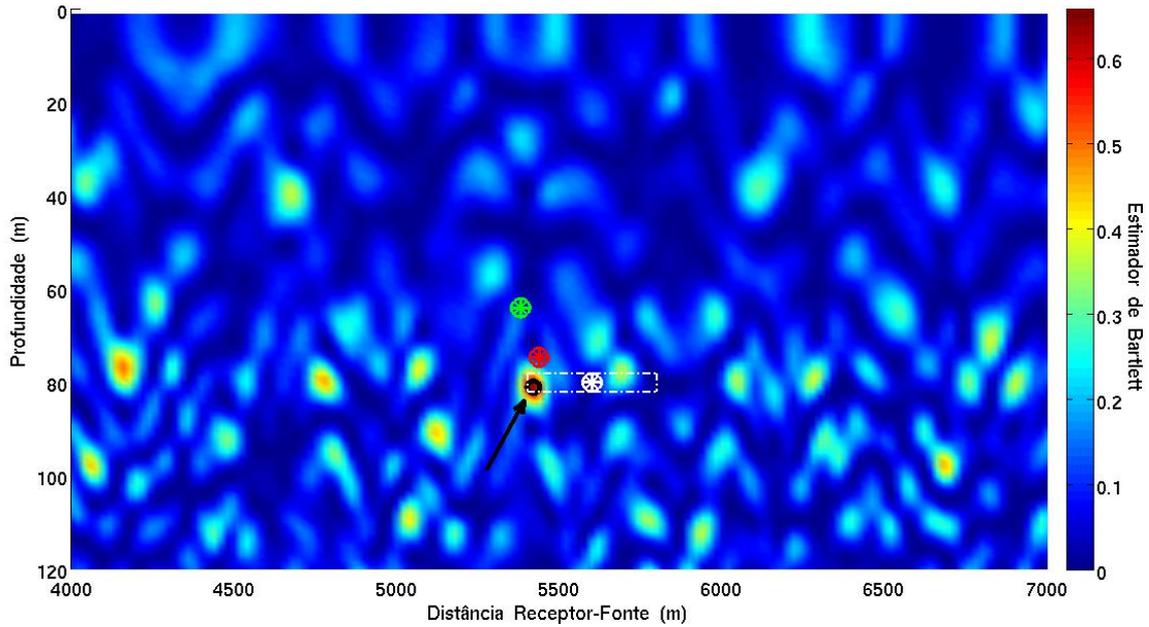
A plotagem dos volumes de ambiguidade gerados no caso 1 da Tab. 6.5 e seus respectivos cortes nos planos de interesse são apresentados nas Fig. 6.4 a 6.6 que se seguem, onde a posição da fonte é indicada pela seta. Também são representadas as posições de referência da fonte e sua incerteza associada [63, 65] (em branco), a posição da fonte estimada pelos GA_{2D} [63] (em encarnado) e a posição da fonte calculada pela versão 2D do KRAKEN [99] (em verde).

KRAKEN3D: Elba Waveguide: Localização 3D - Corte no Azimute = 92°



(a)

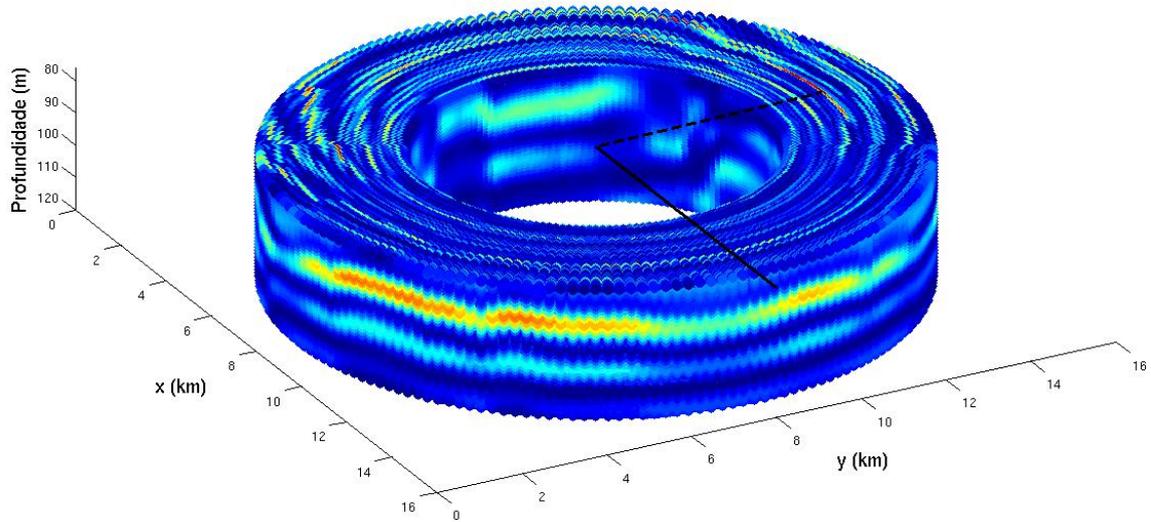
KRAKEN3D: Elba Waveguide - Corte Vol. Ambig. no azimute 92° - Fonte localizada com $r_s = 5420\text{m}$ e $z_s = 81\text{m}$



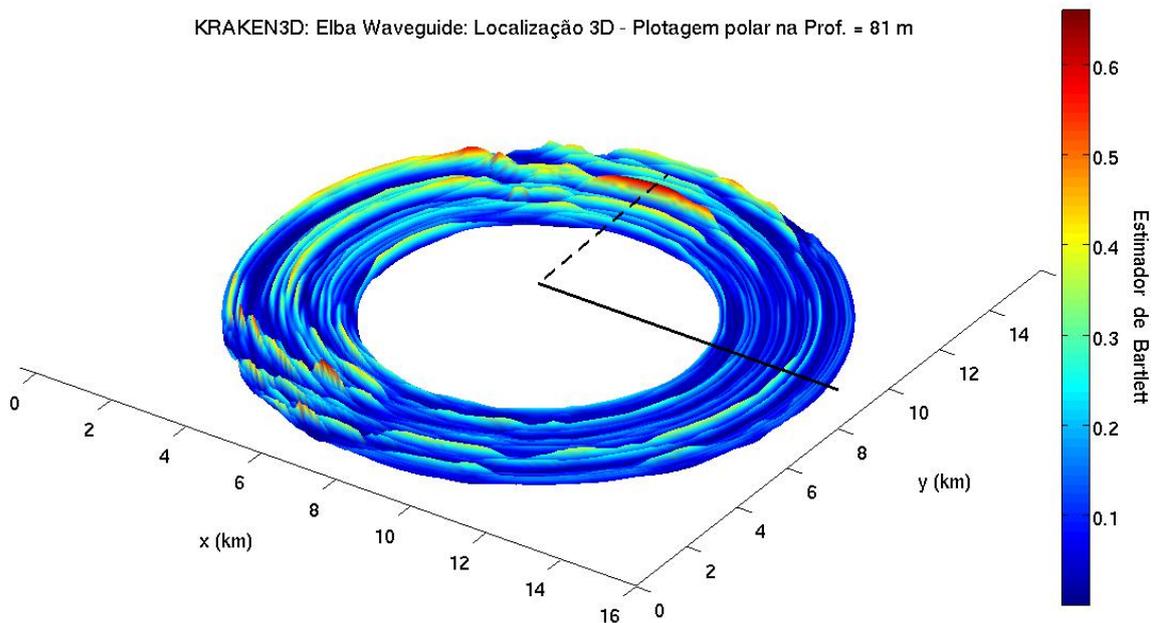
(b)

Figura 6.4: Localização com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na marcação onde a fonte foi localizada (92°). (a) perspectiva 3D; e (b) visão plana. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.

Nota-se uma superfície apresentando poucas ambiguidades, que ocorrem, predominantemente, na profundidade da fonte. A posição calculada da fonte é bem destacada, exibindo coloração bastante proeminente. Tal aspecto da superfície demonstra uma boa *performance* do estimador de Bartlett com uso de dados experimentais no cenário em questão.



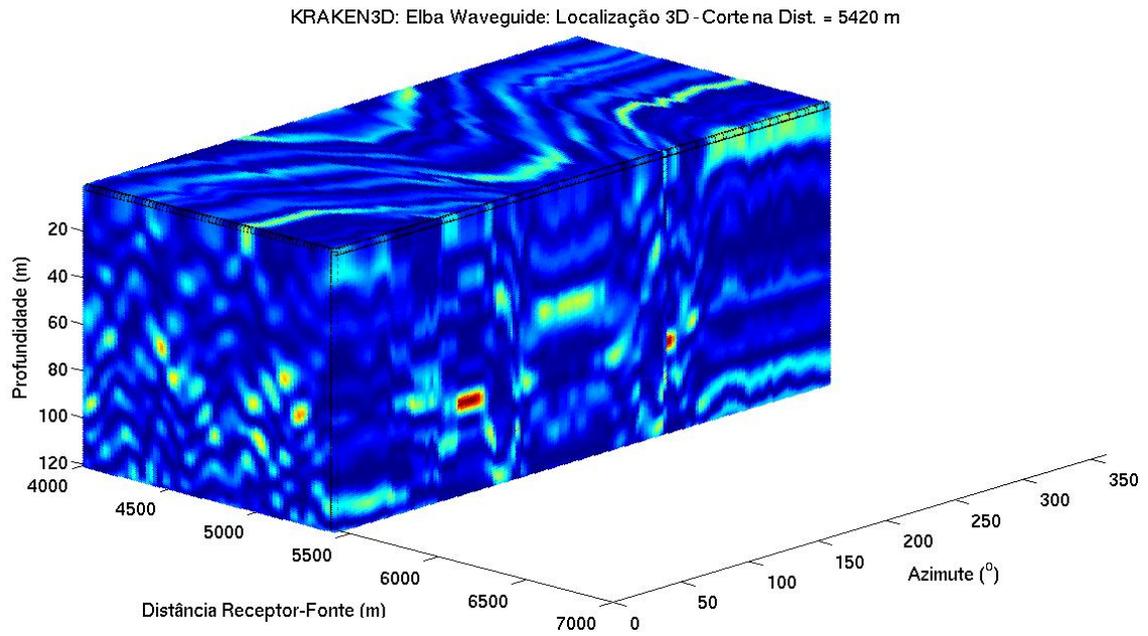
(a)



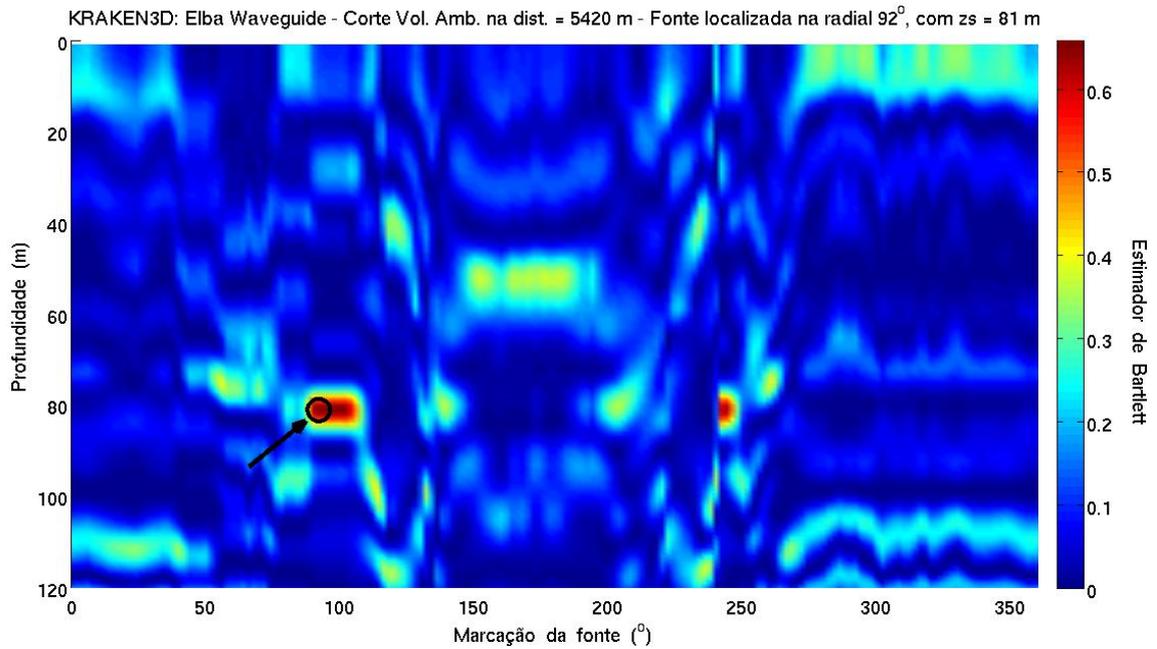
(b)

Figura 6.5: Localização com o KRAKEN3D: corte do cilindro de ambiguidade na profundidade onde a fonte foi localizada (81 m). (a) perspectiva 3D; e (b) detalhamento da “tampa” do cilindro. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais; e linha tracejada: marcação onde a fonte foi localizada (92°).

Na plotagem da “tampa” do cilindro, Fig. 6.5 (b), foi adicionada uma elevação, a fim de melhor destacar as variações do estimador ao longo do disco de ambiguidade. Pode-se perceber a ocorrência das maiores amplitudes do Bartlett ao longo da distância de localização (5420 m), dentro de um setor de abertura de $\sim 30^\circ$, indicando uma resolução azimutal relativamente grosseira. Entretanto, não são observadas muitas outras ambiguidades relevantes fora desse setor, as mais destacadas ocorrem em marcações que variam de 100° a 102° e 262° a 264° .



(a)



(b)

Figura 6.6: Localização com o KRAKEN3D: corte do volume de ambiguidade na distância onde a fonte foi localizada (5420 m). (a) perspectiva 3D; e (b) visão plana. Seta: posição calculada da fonte.

No corte em distância, apresentado na Fig 6.6, é possível observar a ocorrência de uma única ambiguidade mais relevante, localizada na marcação 244° , na mesma profundidade da fonte calculada (81 m). O valor do estimador no ponto dessa ambiguidade é de 0,6531, valor bem próximo do encontrado na posição da fonte (0,6587), demonstrando que diferentes geometrias (de diferentes marcações) produzem réplicas que oferecem um bom ajustamento com o campo observado.

Tal como anteriormente observado na localização sintética com o KRAKEN3D (Fig. 5.9, p. 85), não são observadas outras ambiguidades relevantes no corte do volume em distância ao longo das diferentes marcações, fato que contribui para atestar (agora também com uso de dados reais) a suposição inicial de que as variações batimétricas induzem uma quebra de simetria capaz de prover a discriminação em azimute na localização 3D da fonte. Tal constatação pode, da mesma forma, ser observada na Fig. 6.5 (b).

Outra feição que chama atenção na Fig 6.6 é ocorrência de descontinuidades verticais na superfície, mais visíveis nas marcações 116°, 130°, 220° e 240°. Além da distância de localização aqui apresentada (5420 m), verificou-se que tais descontinuidades podem também ser observadas em outras distâncias, apresentando pequenas flutuações na direção dos “riscos” verticais. Tais descontinuidade são decorrentes de alterações relativamente bruscas na geometria, as quais foram bem capturadas pelo modelo. De fato, nas marcações acima mencionadas, ao longo da distância receptor-fonte de 5420 m, existem variações batimétricas com gradientes relativamente acentuados, conforme pode ser observado na Fig. 6.7 que se segue.

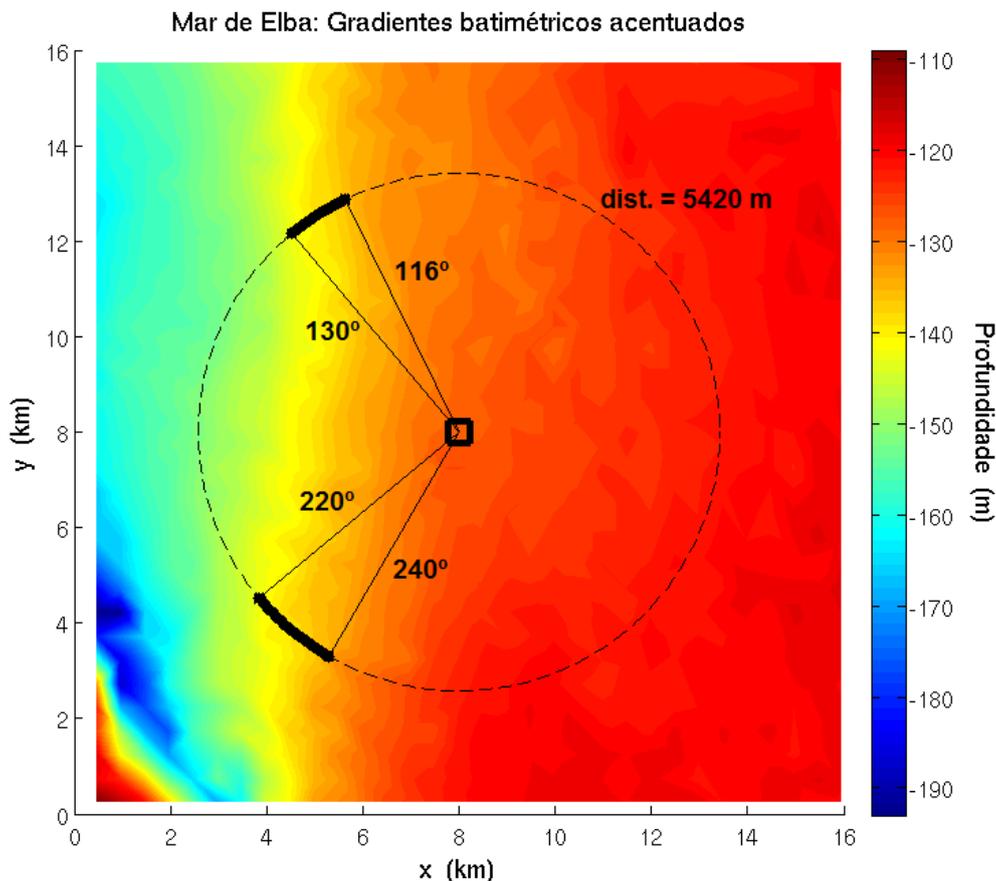


Figura 6.7: Batimetria considerada no domínio de modelagem com destaque de locais com gradientes batimétricos relativamente altos, ao longo da distância receptor-fonte de 5420 m. O quadrado preto indica o ponto de lançamento do *array*.

Uma vez realizada a localização com a geração dos campos de réplicas pela “rodada grosseira”, passaremos então para “rodada refinada”. A única diferença na configuração do modelo acústico entre as duas rodadas consiste no menor espaçamento entre as posições candidatas da fonte na segunda. Destarte, foram empregadas 21 radiais variando de 91° a 93° com espaçamento angular de $0,1^\circ$, 21 distâncias de fonte variando de 5410 a 5430 m, com espaçamento horizontal de 1 m e 11 profundidades variando de 80,5 a 81,5 m, com espaçamento vertical de 0,1 m, o que corresponde a um total de 4851 ($21 \times 21 \times 11$) posições candidatas de fonte, exigindo 441 (21×21) rodadas do programa FIELD3D. O tempo computacional demandado para geração desse conjunto de réplicas (com uso remoto dos computadores do SiPLAB/UAlg) foi de apenas 2h 41min 50s.

Os resultados da localização refinada são apresentados na Tab. 6.6 abaixo, que considera os mesmos dois casos de rugosidade interfacial antes analisados na “rodada grosseira”.

Tabela 6.6: Localização com o KRAKEN3D considerando diferentes condições de rugosidade interfacial (rodada refinada)

	CASO 1	CASO 2
	(Fundo Rugoso)	(Sup. e Fundo Rug.)
Marcação ($^\circ$)	91,9	91,7
erro ($^\circ$)	+0,6	+0,4
Distância (m)		5419
erro (m)		-181
Profundidade (m)	80,9	81,0
erro (m)	+0,9	+1,0
erro 3D (m)	190,0	185,0
erro GA _{2D} (m)	19,1	19,1
Máx. Bartlett	0,6591	0,6473

Confirmando o esperado, os resultados da “rodada refinada” (Tab. 6.6) indicam uma fonte satisfatoriamente localizada em posição mais próxima da posição de referência, distando 190,0 m (caso 1) e 185,0 m (caso 2) da posição da medição e apenas 19,1 m da posição estimada pelos GA_{2D}. Os valores de Bartlett são ligeiramente maiores do que os obtidos na “rodada grosseira”. Diante desses resultados, considera-se que o modelo está calibrado para o cenário 3D do mar de Elba, na frequência de 331 Hz, e que a fonte foi localizada com sucesso.

Validação do Modelo Acústico

Com propósito de conferir uma validação ao modelo para o cenário em questão, uma segunda gravação acústica, aqui denominada *gravação de validação*, foi empregada na localização sem que fosse alterado qualquer parâmetro ou configuração do modelo gerador das réplicas. A gravação de validação foi realizada no mesmo dia 26 out., possui mesma duração (1min 05s) e frequência (331 Hz) da gravação inicialmente usada na fase de calibração. Toda geometria, incluindo as posições da fonte e do receptor, também foi preservada, a menos das variações naturais dentro dos respectivos círculos de giro em função dos ventos e correntes. Os resultados da localização são apresentados nas Tab. 6.7 e 6.8 que se seguem.

Tabela 6.7: Localização com o KRAKEN3D e uso da gravação de validação considerando diferentes condições de rugosidade interfacial (rodada grosseira)

	CASO 1 (Fundo Rugoso)	CASO 2 (Sup. e Fundo Rug.)
Marcação (°)		92
erro (°)		+0,7
Distância (m)		5420
erro (m)		-180
Profundidade (m)		81
erro (m)		+1
erro 3D (m)		192,2
erro GA _{2D} (m)		18,2
Máx. Bartlett	0,6582	0,6466

Tabela 6.8: Localização com o KRAKEN3D e uso da gravação de validação considerando diferentes condições de rugosidade interfacial (rodada refinada)

	CASO 1 (Fundo Rugoso)	CASO 2 (Sup. e Fundo Rug.)
Marcação (°)	91,9	91,7
erro (°)	+0,6	+0,4
Distância (m)		5419
erro (m)		-181
Profundidade (m)	80,9	81,0
erro (m)	+0,9	+1,0
erro 3D (m)	190,0	185,0
erro GA _{2D} (m)	19,1	19,1
Máx. Bartlett	0,6587	0,6469

Comparando os resultados da gravação de validação, apresentados nas Tab. 6.7 e 6.8, com os resultados da gravação de calibragem, apresentados nas Tab. 6.5 e 6.6, pode-se notar que, em ambas as gravações, a fonte foi localizada precisamente na mesma posição, sendo os valores alcançados do estimador de Bartlett ligeiramente menores no uso da gravação de validação (diferenças na ordem da quarta casa decimal).

Testes adicionais foram efetuados nas frequências de 327 e 335 Hz, utilizando-se duas outras gravações realizadas no mesmo dia 26 out. Na geração dos novos conjuntos de réplicas, a menos da frequência, todos os demais dados, parâmetros e configurações do modelo foram mantidos. Em ambas as frequências, a localização da fonte não foi bem-sucedida, apresentando erros em posicionamento que extrapolam a tolerância permitida. Tal fato demonstra que a calibração realizada só é realmente válida para uma determinada frequência (331 Hz, neste caso). A localização em outras frequências exigirá a realização de calibração adicional no modelo.

Diante dos resultados acima apresentados, pode-se considerar que o modelo KRAKEN3D foi calibrado e validado para o cenário do mar de Elba, na frequência de 331 Hz, e que a fonte foi localizada no espaço 3D com sucesso. Passaremos, então, para fase do uso da Teoria de Raios na localização 3D, por meio dos modelos BELLHOP3D e TRACEO3D.

6.2 Localização com o BELLHOP3D

A estratégia empregada na localização 3D com o modelo BELLHOP3D será a mesma anteriormente empregada com o modelo KRAKEN3D: localizar a fonte, inicialmente, em uma única fatia vertical do campo de pressão (plano xz) para, em uma fase posterior, localizar a fonte no espaço tridimensional e, paralelamente, ir efetuando os ajustes e calibrações necessários para otimização do processo 3DMFP.

Para efeitos de calibração do modelo, a teoria de raios apresenta maior grau de liberdade para ajuste de parâmetros em relação à teoria de modos, i.e., o modelador dispõe de alguns parâmetros, tais como ângulo de semiabertura do feixe irradiado (parâmetro θ_{\max}) e número de raios lançados (parâmetro N_{θ}), que não podem ser prescritos para modelos de modos.

Por outro lado, modelos de modos, como o KRAKEN3D, podem permitir a prescrição de rugosidades interfaciais, ao contrário dos modelos de raios aqui empregados. Ressalta-se que, conforme apresentado na calibração realizada com o KRAKEN3D (cf. subseção 6.1.2), a introdução das rugosidades do fundo e da superfície contribuíram para o aprimoramento da localização 3D.

Assim sendo, a menos das diferenças intrínsecas entre ambos os modelos, BELLHOP3D e KRAKEN3D, a configuração adotada no uso bem-sucedido do KRA-

KEN3D, na localização anteriormente apresentada (item 6.1), será, da mesma forma, repetida para o BELLHOP3D, ou seja, será utilizada uma configuração tão próxima quanto possível daquela empregada no KRAKEN3D para localização da fonte no cenário do mar de Elba, considerando, a princípio, uma única fatia vertical do campo de pressão.

6.2.1 Localização na Fatia Vertical

A primeira tentativa de localização com uso do BELLHOP3D ocorreu sobre um plano vertical do campo de pressão na marcação 92° . Essa marcação foi escolhida por ser aquela em que a fonte foi satisfatoriamente localizada pelo KRAKEN3D na chamada “rodada grosseira” (cf. Tab. 6.5, p. 118). Foi adotado um ângulo de semiabertura do feixe irradiado, $\theta_{\max} = 40^\circ$ com 81 raios lançados ($N_\theta = 81$).

Para geração do campo de réplicas, foi utilizado um espaçamento horizontal de 1 m entre distâncias candidatas, variando de 4000 a 7000 m (3001 distâncias) e um espaçamento vertical de 1 m entre profundidades candidatas de fonte, variando de 1 a 120 m (120 profundidades), o que totalizou 360.120 (3001×120) posições candidatas da fonte no plano vertical. Tal como ocorre com o KRAKEN3D, o BELLHOP3D permite que sejam prescritas várias profundidades de fontes para uma única rodada do modelo, o que resultou em apenas 3001 rodadas para geração do conjunto 2D de réplicas. O tempo computacional demandado foi de $2 \times 13\text{h } 59\text{min } 57\text{s}$ e o espaço de armazenamento de 159,2 MB.

A localização não foi satisfatória, indicando uma fonte localizada na distância de 4960 m (erro de -640 m) e profundidade de 72 m (erro de -8 m), com valor máximo do estimador de Bartlett atingindo 0,5925. Os erros aqui apresentados estão referenciados à posição da fonte oriunda das medições e extrapolam os limites máximos do erro considerado aceitável (cf. Tab. 6.2).

Tendo em vista que o resultado da localização por meio da teoria de raios é muito sensível às características geométricas do feixe acústico irradiado [70, 99], optou-se por realizar uma investigação da influência dos parâmetros θ_{\max} e N_θ nos resultados da localização.

Assim sendo, foram selecionadas 20 semiaberturas de feixe irradiado, variando entre 35° e 54° e 61 quantitativos de raios lançados, variando entre 30 e 90, o que resultou na geração de 1220 (20×61) conjuntos de réplicas. Ou seja, para cada uma das 1220 combinações (N_θ, θ_{\max}), foi gerado um conjunto de réplicas 2D sobre a marcação 92° . Na geração de cada um desses conjuntos, foram utilizadas 101 distâncias receptor-fonte, variando entre 4000 e 7000 m e 120 profundidades candidatas de fonte, variando de 1 a 120 m, o que totalizou 12.120 (101×120) posições candidatas de fonte no plano vertical.

Para realização das 1220 tarefas de localização, foram necessárias, ao todo, 123.220 (1220×101) rodadas do modelo. O tempo computacional demandado⁵ foi de $4 \times 5 \times 126$ h 58min 40s e o espaço de armazenamento de, aproximadamente, 6 GB. O custo computacional foi demasiadamente grande, mas compensador no sentido de que permitiu investigar a papel da geometria do feixe irradiado na quantificação do erro na localização.

A Fig. 6.8 retrata o resultado final dessa investigação, onde as circunferências em preto indicam os pontos nos quais uma combinação $(N_\theta, \theta_{\max})$ localizou a fonte satisfatoriamente, i.e., com erro GA_{2D} igual ou inferior a 200 m. Relembrando, o erro GA_{2D} se refere ao valor absoluto do erro 2D resultante referido à posição da fonte estimada pelos GA [63] (dist. = 5437 m e prof. = 74,6 m).

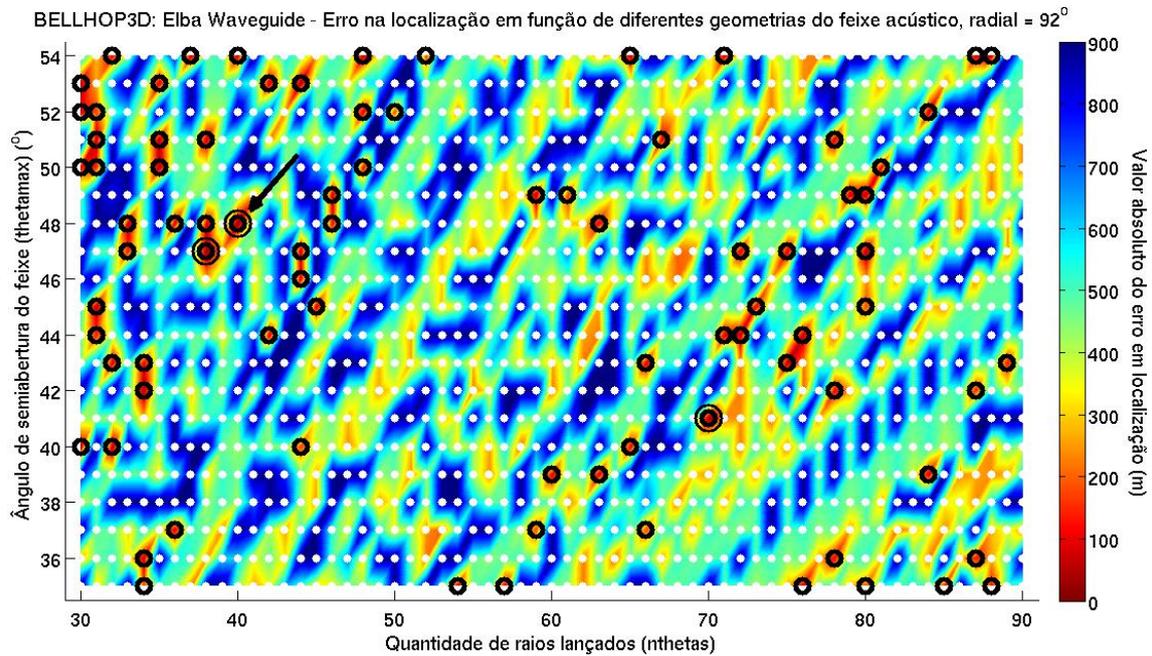


Figura 6.8: Erro na localização calculada pelo BELLHOP3D em função de diferentes geometrias do feixe irradiado. Circunferências simples: localizações satisfatórias; circunferências duplas: localizações satisfatórias que apresentam menor erro; e seta: localização satisfatória que apresenta menor erro e maior Bartlett.

A Fig. 6.8 acima ilustra a variação do erro GA_{2D} na localização da fonte feita pelo BELLHOP3D, em função de diferentes geometrias do feixe acústico irradiado, sobre a fatia vertical de marcação 92°. Um aspecto interessante é que a distribuição das circunferências se dá, aproximadamente, segundo retas de inclinações variáveis, fato que sugere um comportamento associado a um invariante do guia de ondas. Evidentemente, a investigação profunda de tal invariante foge ao propósito principal da tese, mas pode vir a ser objeto de estudos futuros.

⁵A notação 4×5 significa que foram remotamente empregados quatro computadores do Si-PLAB/UAlg e, em cada um deles, foram abertas cinco seções da versão console do MATLAB, de modo a simular um processamento equivalente a 20 máquinas em paralelo.

Pela análise da Fig. 6.8, é possível perceber que, simplesmente, a prescrição de diferentes geometrias do feixe acústico irradiado, sem que seja efetuada nenhuma outra alteração na configuração do modelo, já é suficiente para que a fonte seja localizada satisfatoriamente ou não. O menor erro GA_{2D} alcançado foi de 17,8 m, fato que ocorre em três combinações distintas de $(N_\theta, \theta_{\max})$ (circunferências duplas na Fig. 6.8), conforme apresentado na Tab. 6.9 que se segue.

Tabela 6.9: Geometrias do feixe irradiado no BELLHOP3D que resultaram no menor erro na localização 2D

$(N_\theta, \theta_{\max})$	Dist. (m)	Prof. (m)	Máx. Bart.
(40, 48°)	5420	80	0,6033
(70, 41°)	5420	80	0,5802
(38, 47°)	5420	80	0,5729

Dentre todas as combinações de geometria do feixe avaliadas, a combinação $N_\theta = 40$ e $\theta_{\max} = 48^\circ$ foi a que resultou no menor erro e com valor mais alto do estimador de Bartlett (0,6033) (ponto indicado pela seta na Fig. 6.8). Valores do estimador de Bartlett maiores que 0,6033 foram também encontrados em outras combinações, mas apresentando erros no posicionamento da fonte que extrapolam a margem de tolerância de 200 m (o máximo valor do estimador de Bartlett encontrado na análise de todas as combinações foi de 0,7642, localizando a fonte com um erro total de 259,6 m).

Adotando-se, então, os novos valores de $N_\theta = 40$, $\theta_{\max} = 48^\circ$ e preservando-se todos os demais parâmetros de configuração do modelo anteriormente adotados na primeira tentativa de localização, foi gerado um segundo conjunto de réplicas composto por 360.120 posições candidatas de fonte (120 profundidades e 3001 distâncias), sobre o plano vertical de marcação 92° . Dessa vez, conforme já previsto, a localização foi bem-sucedida, indicando uma fonte localizada na distância de 5431 m e profundidade de 80 m, com um valor máximo do estimador de Bartlett de 0,6149. A superfície de ambiguidade gerada é apresentada na Fig. 6.9.

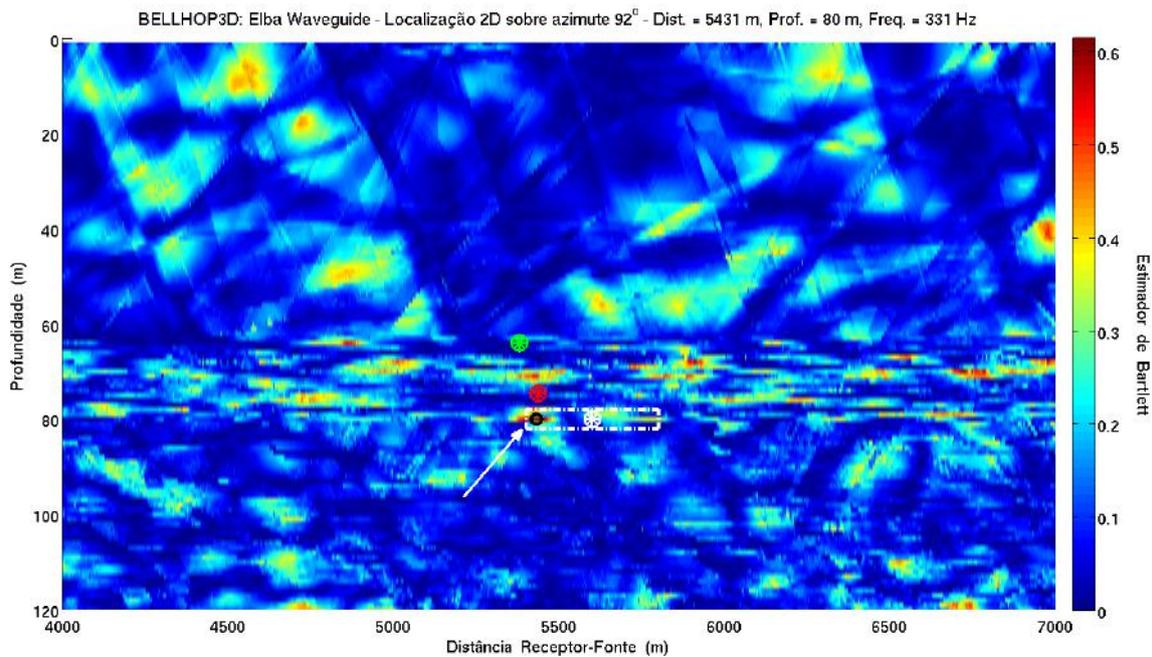


Figura 6.9: Localização 2D com o BELLHOPD na fatia vertical (sem equidistanciamento de pontos do SSP). Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.

Analisando-se a superfície de ambiguidade da Fig. 6.9, gerada por meio do BELLHOP3D, em comparação com a Fig. 6.3 (p. 113), anteriormente gerada por meio do KRAKEN3D, constata-se que o aspecto da superfície produzida pelo BELLHOP3D é muito mais acidentado e irregular. Percebe-se também que o comportamento da superfície é muito sensível às variações das profundidades da fonte, apresentando maiores irregularidades entre as profundidades de 60 e 80 metros, que coincide com a profundidade do forte gradiente da termoclina existente no SSP (cf. Fig. 6.2 (a), p. 111).

As irregularidades no aspecto da superfície de ambiguidade já haviam sido observadas também com uso de dados sintéticos (cf. seção 5.2), quando ficou demonstrado que o aspecto irregular da superfície possui relação com o comportamento irregular do SSP. Certamente, o fato da fonte ter sido lançada na base da termoclina também contribui para a ocorrência dessas irregularidades. Da mesma forma, são, novamente, aqui notadas as descontinuidades de aspecto triangular, que ocorrem em função da opção do tipo de feixe selecionado no BELLHOP3D (*hat-shaped beams*).

Visando melhorar o aspecto da superfície de ambiguidade, foram testados diferentes métodos e níveis de amaciamento e equidistanciamento de pontos do SSP. O amaciamento não trouxe grandes benefícios. Apenas um pequeno acréscimo ao valor do estimador (algo na ordem da terceira ou quarta casa decimal) pôde ser notado quando foi incorporado um amaciamento de cerca de 0,5 m de coluna d'água, exigindo uma quantidade de pontos do SSP demasiadamente grande (superior a 500 pontos), o que demandaria um tempo computacional bem maior para construção do

conjunto de réplicas, não se mostrando, portanto, vantajoso em termos de custo \times benefício.

Quanto ao equidistanciamento de pontos do SSP, foi possível observar uma sensível redução das ambiguidades e melhora significativa no valor alcançado pelo estimador quando diferentes quantitativos de pontos equidistantes eram aplicados ao SSP, e os mesmos interpolados linearmente. Destaca-se que a posição da fonte calculada também sofre pequena alteração quando diferentes quantitativos de pontos equidistantes são considerados. A Fig. 6.10 mostra a superfície de ambiguidade gerada por réplicas produzidas empregando o SSP compostos por 94 pontos equidistantes (o que corresponde a um espaçamento vertical de 1,32 m entre pontos). A fonte foi satisfatoriamente localizada na distância de 5426 m e profundidade de 80 m, com um valor máximo do estimador de Bartlett de 0,6505.

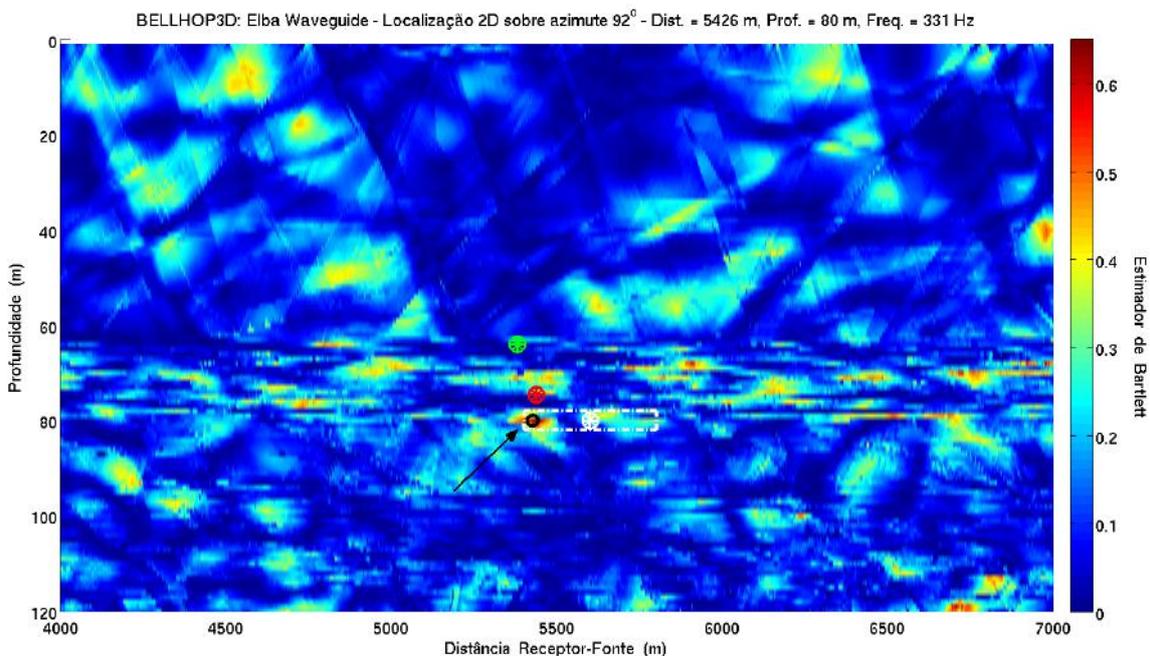


Figura 6.10: Localização 2D com o BELLHOPD na fatia vertical (com equidistanciamento de pontos do SSP). Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.

A Tab. 6.10 resume os resultados da localização 2D, considerando duas situações de SSP (com e sem equidistanciamento de pontos). Os erros apresentados são referidos à posição medida da fonte (dist. = 5600 m e prof. = 80,0 m), o “erro 2D” é valor absoluto do erro resultante em relação à medição e o erro GA_{2D} é o valor absoluto do erro resultante referido à posição da fonte estimada pelos GA (dist. = 5437 m e prof. = 74,6 m).

Tabela 6.10: Localização 2D com o BELLHOP3D considerando diferentes condições de SSP

	CASO 1	CASO 2
	(SSP sem equidist.)	(SSP com equidist.)
Distância (m)	5431	5426
erro (m)	-169	-174
Profundidade (m)		80
erro (m)		0
erro 2D (m)	169,0	174,0
erro GA _{2D} (m)	8,1	12,3
Máx. Bartlett	0,6149	0,6505

Os resultados apresentados podem ser considerados satisfatórios e, portanto, qualificados para que avancemos para etapa seguinte do trabalho - a consecução da localização por meio do BELLHOP3D nos 360° do espaço.

6.2.2 Localização Tridimensional

Adotando, no modelo BELLHOP3D, a mesma configuração acima empregada na localização sobre a fatia vertical, foi gerado um conjunto 3D de réplicas de acordo com os mesmos critérios de espaçamento geométrico de fontes candidatas antes adotados na chamada “rodada grosseira” com o KRAKEN3D (cf. subseção 6.1.2). São eles: radiais variando de 0 a 360°, com espaçamento angular regular de 2° (181 marcações); distâncias receptor-fonte variando de 4000 a 7000 m, com espaçamento horizontal regular de 20 m (151 distâncias); e profundidades de fonte variando de 1 a 120 m, com espaçamento vertical regular de 1 m (120 profundidades), o que corresponde a um total de 3.279.720 posições candidatas de fonte nos 360°. O tempo computacional demandado para geração desse conjunto de réplicas foi de $2 \times 5 \times 26\text{h } 10\text{min } 50\text{s}$.

A localização não foi bem-sucedida, indicando uma fonte localizada na marcação 216° (erro de +124,7°), distância de 4640 m (erro de -960 m) com uma profundidade de 75 m (erro de -5 m), atingindo um valor máximo do estimador de Bartlett de 0,7454.

Outros 31 pontos de posição estimada da fonte foram erroneamente localizados antes que se chegasse ao primeiro resultado coerente, que ocorreu na marcação 90°, distância de 5440 m e profundidade de 80 m, com um valor máximo de estimador de Bartlett de 0,6722.

Tal resultado demonstra que a configuração satisfatoriamente empregada na localização 2D não é adequada para localização 3D, o que exige a realização de nova calibração e alteração da configuração inicialmente empregada. Os primeiros

parâmetros que geraram desconfiança quanto à introdução de problemas de *model mismatch* foram as propriedades geoacústicas do fundo; pois, os parâmetros que vinham sendo empregados até aqui haviam sido calculados por um ajustamento 2D entre o TRACEO e o KRAKEN, que supõe um fundo simplesmente plano e um ambiente *range-independent*. De fato, o sucesso ocorrido na localização sobre a fatia vertical, por meio do BELLHOP3D, utilizando as mesmas propriedades geoacústicas oriundas de uma otimização 2D obtida por meio do TRACEO já pode ser considerado algo inusitado.

Com base na estratégia de geração de um modelo equivalente de fundo inicialmente proposta por BARROSO *et al.* [99], foi realizada uma nova otimização que consistiu, basicamente, em resolver um problema inverso que buscasse os valores de velocidade compressional no fundo (c_p), densidade (ρ) e atenuação compressional no fundo (α_p) que oferecessem uma melhor concordância entre os campos de pressão acústica coerente calculados pelo BELLHOP3D e por um modelo de referência (KRAKEN3D) de modo que a resposta acústica produzida por um modelo que considere um fundo de camada única seja tão próxima quanto possível da resposta acústica de um modelo capaz de considerar um fundo multicamadas.

Para resolver tal problema, foi avaliado o ajustamento entre o BELLHOP3D e pelo KRAKEN3D em 9261 combinações de propriedades geoacústicas ($21c_p \times 21\rho \times 21\alpha_p$). Em cada combinação, foram comparados campos de pressão 3D produzidos por ambos os modelos, posicionando-se a fonte em pontos selecionados no espaço de modo que a amostragem fosse representativa dos 360° . Assim sendo, foram selecionadas 12 marcações variando de 0 a 330° , com espaçamento angular de 30° e 7 distâncias receptor-fonte variando de 4000 a 7000 m, com espaçamento horizontal de 500 m e 120 profundidades de fonte variando de 1 a 120 m. A Fig. 6.11 representa os pontos selecionados, sobre o plano xy , para comparação dos modelos.

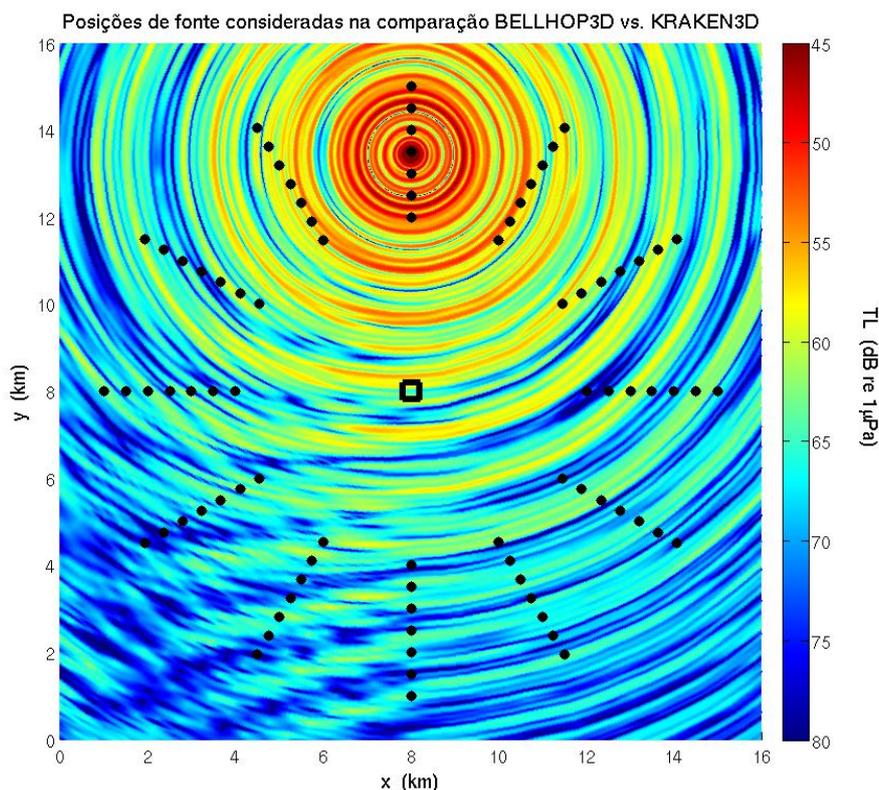


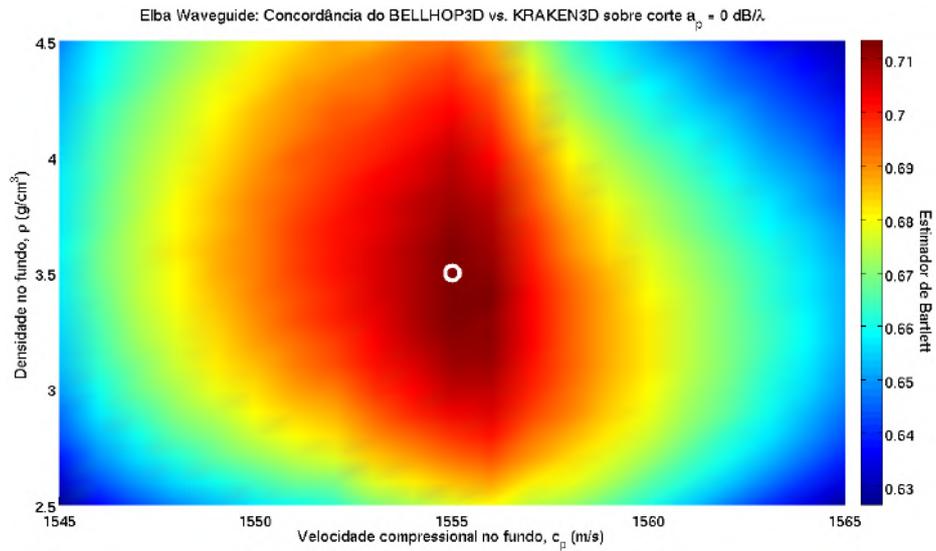
Figura 6.11: Pontos de posicionamento de fontes selecionados para serem utilizados no cálculo do modelo equivalente do fundo por meio da otimização BELLHOP3D vs. KRAKEN3D. Ao fundo, é representado o campo horizontal de TL gerado pelo KRAKEN3D na profundidade de 80 m.

Para avaliação da concordância entre os modelos, foi novamente empregado o critério de Bartlett; dessa forma, foi gerado um volume cúbico de Bartlett de dimensões $21 \times 21 \times 21$. Os resultados dessa otimização são apresentados na Tab. 6.11 que se segue, onde também são apresentados, para efeito de comparação, as propriedades geoacústicas oriundas do ajustamento 2D feito entre o TRACEO e o KRAKEN, as quais haviam sido empregadas na localização sobre a fatia vertical.

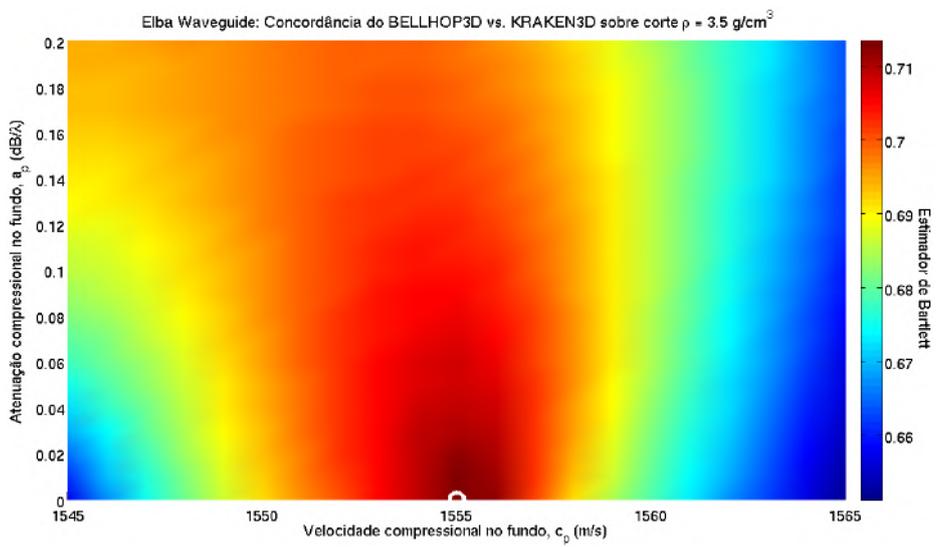
Tabela 6.11: Resultados das otimizações 3D (BELLHOP3D vs. KRAKEN3D) e 2D (TRACEO vs. KRAKEN) para cálculo do modelo equivalente do fundo no mar de Elba, segundo o critério de Bartlett

	Otimização 3D	Otimização 2D
		[99]
velocidade (m/s)	1555	1558
densidade (g/cm ³)	3,5	2,8
atenuação (dB/λ)	0	0

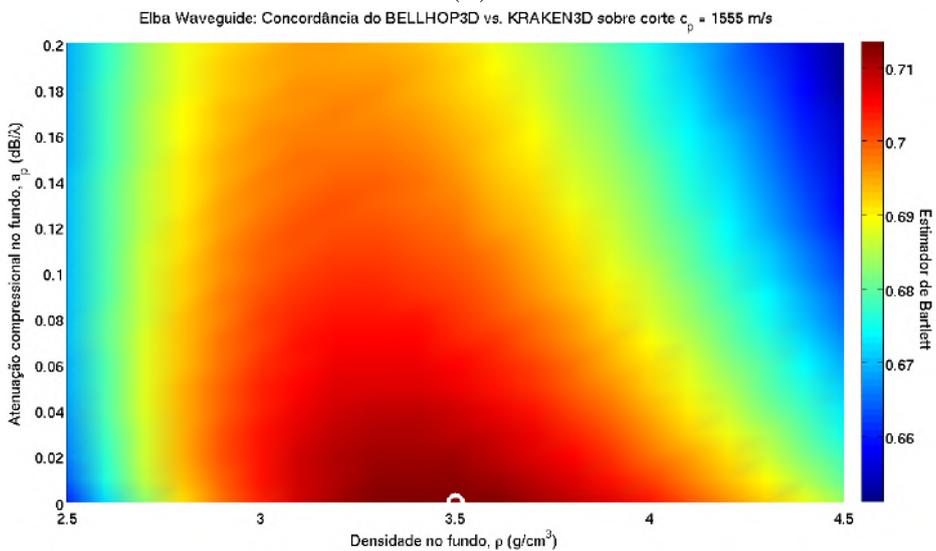
As Fig. 6.12 (a), (b) e (c) que se seguem representam os respectivos cortes do cubo de Bartlett nos planos correspondentes às propriedades do fundo no ponto de melhor ajustamento entre os campos calculados pelo BELLHOP3D e pelo KRAKEN3D.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.12: Volume de Bartlett gerado pela otimização BELLHOP3D vs. KRAKEN3D. O cubo está representado por meio dos cortes $\alpha_p = 0$, $\rho = 3,5$ g/cm^3 e $c_p = 1555$ m/s. A circunferência branca indica o ponto de melhor ajustamento.

De posse dessas novas propriedades geoacústicas, foi feita uma segunda investigação da influência dos parâmetros N_θ e θ_{\max} na qualidade da localização sobre a fatia de marcação 92° , tal como realizado, anteriormente, na subseção 6.2.1. A Fig. 6.13 abaixo apresenta o resultado da variação do erro GA_{2D} na localização da fonte feita pelo BELLHOP3D, em função de diferentes geometrias do feixe acústico irradiado.

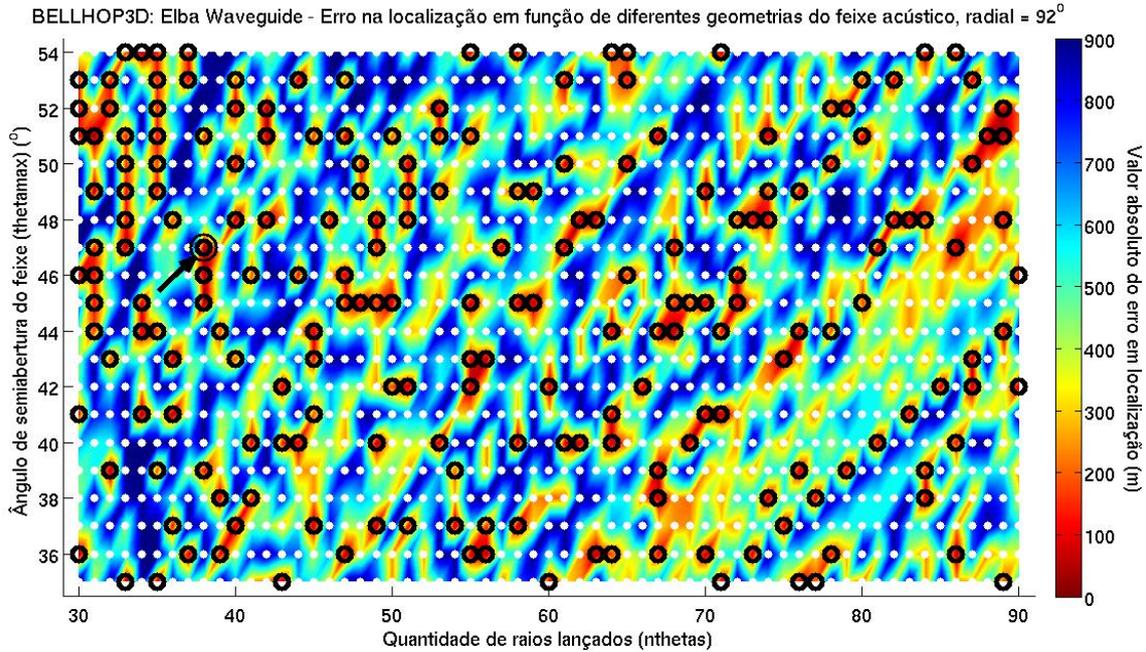


Figura 6.13: Erro na localização calculada pelo BELLHOP3D em função de diferentes geometrias do feixe, com uso do modelo equivalente do fundo calculado por meio da otimização BELLHOP3D vs. KRAKEN3D. Circunferências simples: localizações satisfatórias; e circunferência dupla indicada pela seta: localização satisfatória que apresenta menor erro e maior Bartlett.

Pela análise da Fig. 6.13 em comparação com o resultado anterior da Fig. 6.8 (p. 128), é possível observar que a quantidade de combinações (N_θ , θ_{\max}) que localizaram a fonte com sucesso aumentou significativamente. No primeiro caso (com uso da otimização 2D para estimação das propriedades geoacústicas) ocorreram apenas 74 localizações bem-sucedidas das 1220 combinações investigadas, o que corresponde a um percentual de 6,1% de índice de acerto. No segundo caso (com uso da otimização 3D para estimação das propriedades geoacústicas), o quantitativo de localizações bem-sucedidas aumentou para 210, correspondendo a um percentual de 17,2% de índice de acerto. Os valores de $N_\theta = 38$ e $\theta_{\max} = 47^\circ$ foram os que resultaram na melhor localização em relação à posição da fonte estimada pelos GA_{2D} , sendo atingido um máximo valor do estimador de Bartlett de 0,7020.

Tal como anteriormente notado na Fig. 6.8 (p. 128), percebe-se aqui a ocorrência da distribuição das circunferências ao longo de retas de inclinação variável, sugerindo um comportamento associado a um invariante do guia de ondas.

Adotando-se então as propriedades geoacústicas do fundo $c_p = 1555$ m/s, $\rho = 3,5$ g/cm³ e $\alpha_p = 0$ dB/ λ e a geometria do feixe irradiado com $N_\theta = 38$ e $\theta_{\max} = 47^\circ$ foi realizada uma segunda “rodada grosseira” e gerado um novo conjunto 3D de réplicas.

O resultado da localização ainda não foi satisfatório, indicando uma fonte localizada na marcação 210° (erro de $+118,7^\circ$), distância de 4900 m (erro de -700 m) com uma profundidade de 76 m (erro de -4 m), com valor máximo do estimador de Bartlett de 0,7682. Embora a fonte tenha sido novamente localizada na posição errada, essa nova configuração do modelo trouxe benefícios uma vez que a primeira posição coerente ocorreu na 15^a colocação, na marcação 90° , distância de 5420 m e profundidade de 80 m, com valor máximo do estimador de 0,7235 (na configuração anterior, a primeira posição coerente ocupava a 33^a colocação).

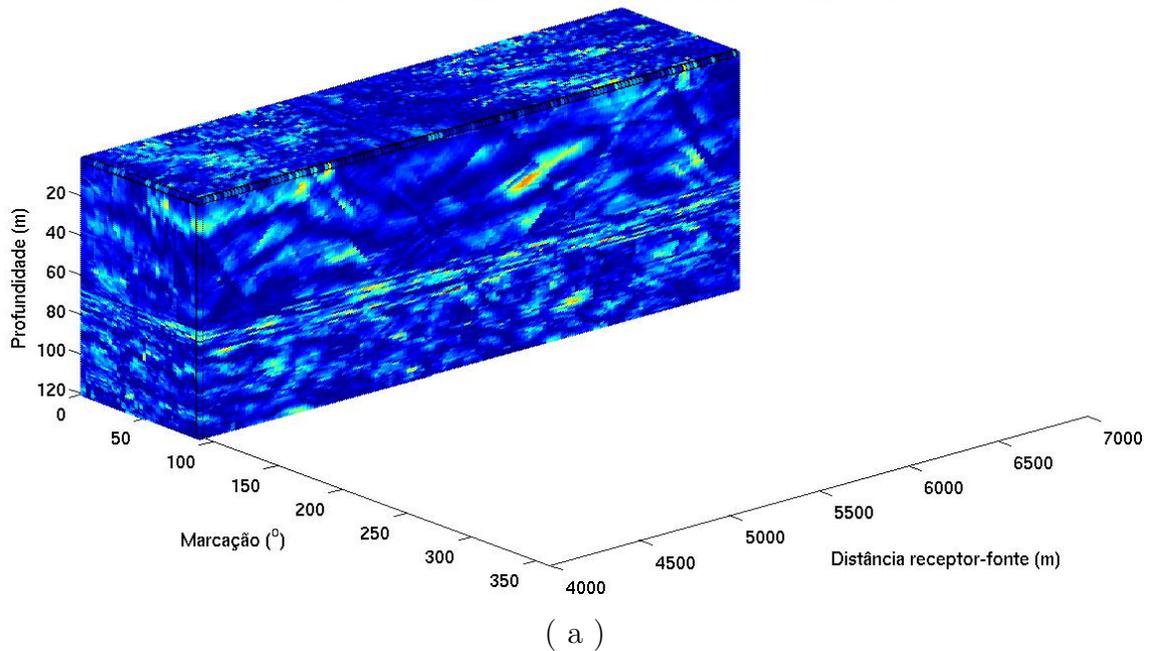
Na busca de uma calibração do modelo que fornecesse resultados mais acurados e tendo em vista a grande sensibilidade dos resultados em função do perfil de velocidade do som, decidiu-se aumentar o número de pontos equidistantes do SSP de 94 para 262, correspondendo a um espaçamento vertical de 0,48 m entre pontos, valor esse equivalente ao menor espaçamento vertical existente nos dados do SSP coletados *in situ*. Tal alteração visa aumentar o refinamento dos pontos do SSP e, dessa forma, garantir maior fidelidade dos dados de entrada do modelo em relação aos dados medidos em campo (ainda que tal alteração acarrete maior custo computacional em termos de tempo de processamento).

Adicionalmente, optou-se por dobrar a grade dos dados batimétricos. Ou seja, em função do espaçamento horizontal dos dados fornecidos pelo IIM, vinha sendo, até aqui, empregada uma grade regular de 34×34 pontos (34 coordenadas no eixo x por 34 coordenadas no eixo y), a nova grade passou a ser composta de 67×67 pontos e os pontos intermediários interpolados linearmente.

Incorporando as alterações acima mencionadas, em relação ao SSP e à grade batimétrica, somada às relativas às propriedades geoacústicas do fundo e à geometria do feixe, um novo conjunto de réplicas foi calculado. O tempo de processamento foi de $2 \times 6 \times 24$ h 41min 43s e o espaço de armazenamento de 1,45 GB. A fonte foi satisfatoriamente localizada na posição apresentada na Tab. 6.12 (p. 141), onde os erros apresentados são referidos à posição medida da fonte (dist. = 5600 m, prof. = 80,0 m e marcação $91,3^\circ$), o “erro 3D” é valor absoluto do erro resultante (distância ponto a ponto) em relação à medição e o erro GA_{2D} é o valor absoluto do erro 2D resultante referido à posição da fonte estimada pelos GA (dist. = 5437 m e prof. = 74,6 m).

A plotagem dos volumes de ambiguidade gerados e seus respectivos cortes nos planos de interesse são apresentados nas Fig. 6.14 a 6.16 que se seguem.

BELLHOP3D: Elba Waveguide - Localização 3D - Corte na Marcação = 90°



BELLHOP3D: Elba Waveguide - Corte vol. ambiguidade na marcação 90° - Fonte localizada em $r_s = 5400\text{m}$ e $z_s = 80\text{m}$

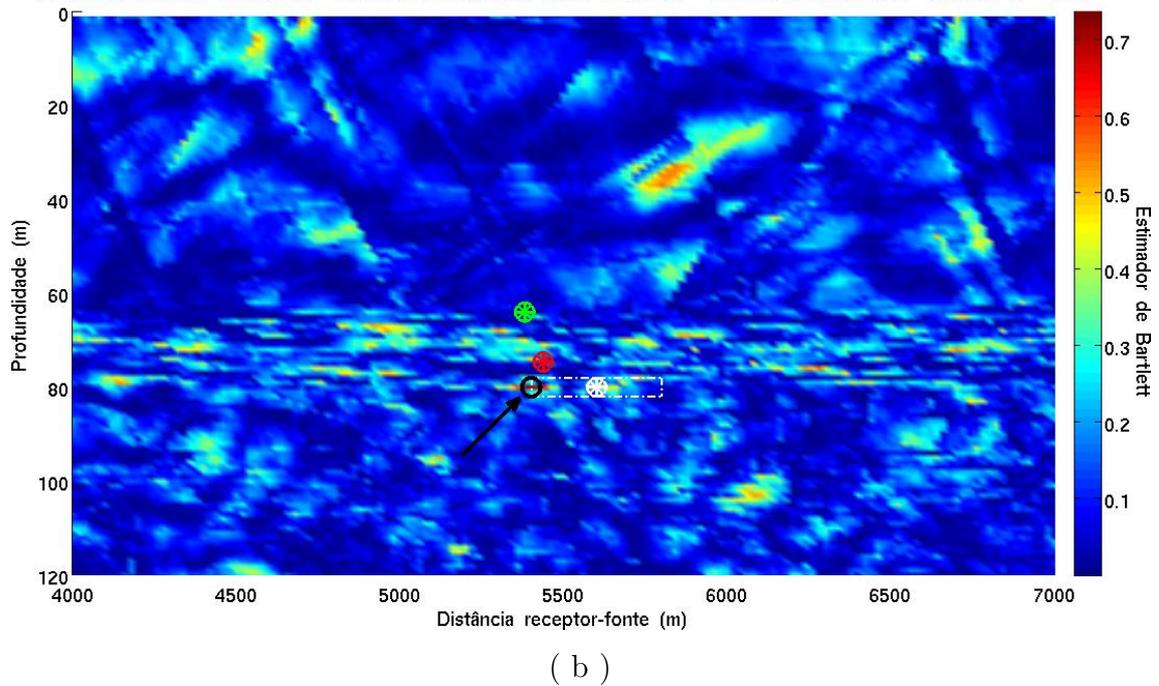
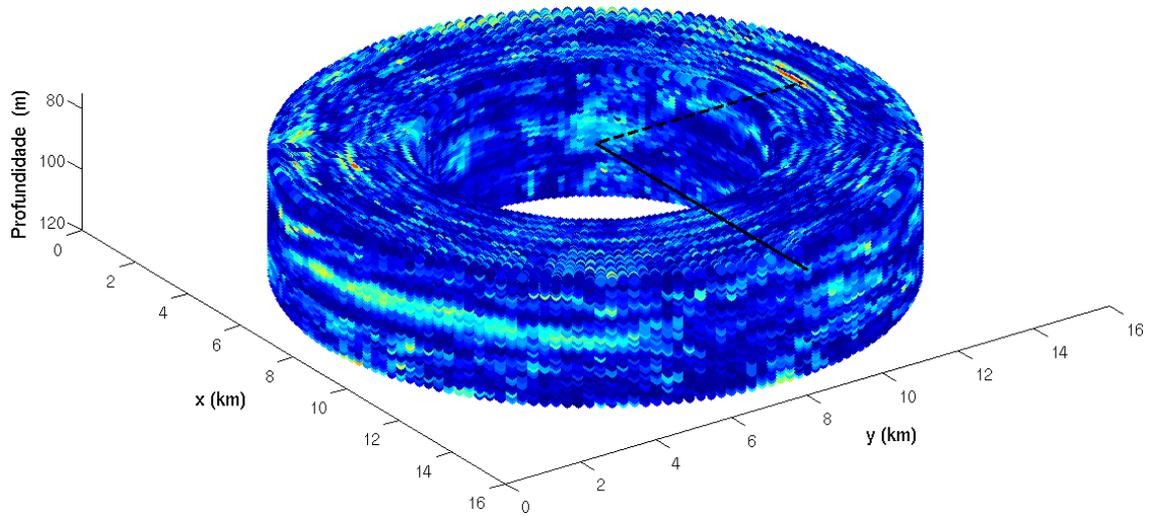
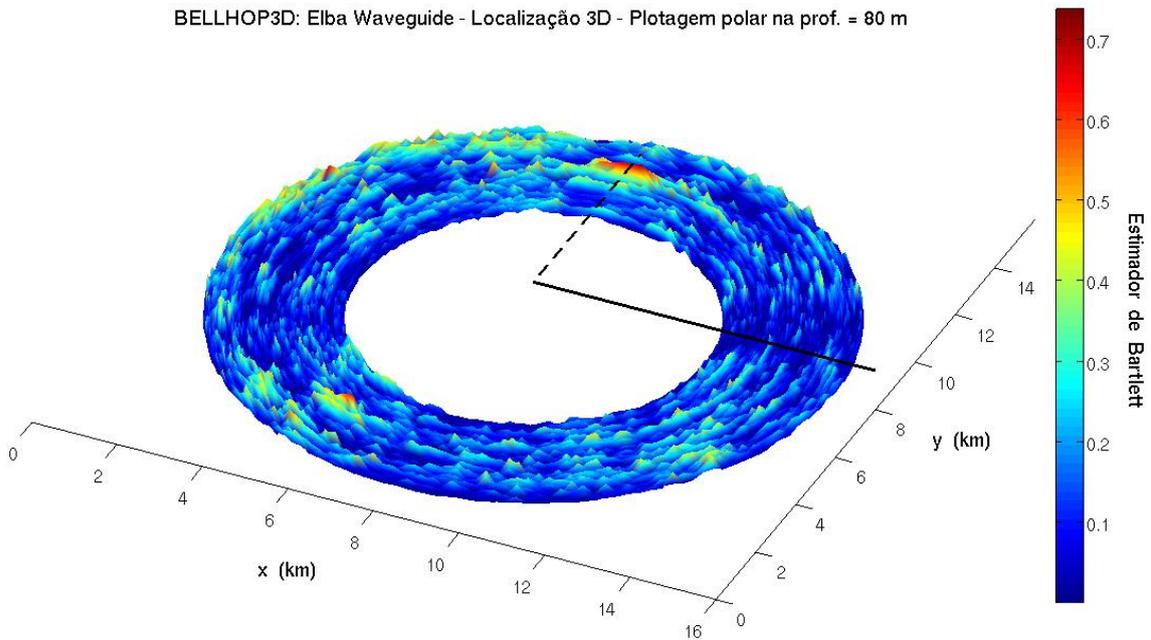


Figura 6.14: Localização com o BELLHOP3D: corte do volume de ambiguidade na marcação onde a fonte foi localizada (90°). (a) perspectiva 3D; e (b) visão plana. Setas: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.

Tal como ocorrido na localização sobre a fatia vertical (Fig. 6.10), o aspecto da superfície aqui gerada é irregular, apresentando forte sensibilidade às variações das profundidades da fonte e poucas ambiguidades. A ambiguidade concorrente mais proeminente ocorre na distância 5800 m e profundidade 37 m.



(a)

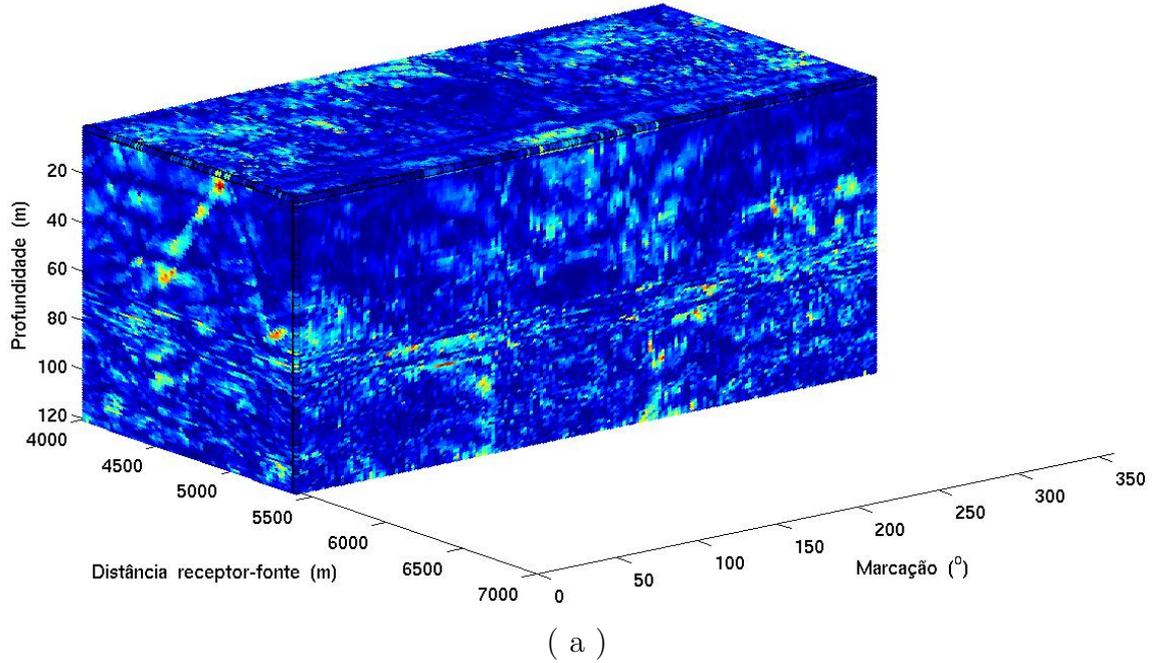


(b)

Figura 6.15: Localização com o BELLHOP3D: corte do cilindro de ambiguidade na profundidade onde a fonte foi localizada (80 m). (a) perspectiva 3D; e (b) detalhamento da “tampa” do cilindro. Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais; e linha tracejada: marcação onde a fonte foi localizada (90°).

Na plotagem da “tampa” do cilindro, Fig. 6.15 (b), pode-se notar uma boa resolução azimutal no cálculo da direção da fonte na marcação 90° . As ambiguidades azimutais mais destacadas ocorrem na marcação 250° , apresentando Bartlett igual a 0,6276. Em comparação com a “tampa” do cilindro anteriormente gerada na localização realizada pelo KRAKEN3D (Fig. 6.5 (b), p. 121) é possível notar também a ocorrência de ambiguidades nas proximidades dessa mesma marcação 250° .

BELLHOP3D: Elba Waveguide - Localização 3D - Corte na dist. = 5400 m



BELLHOP3D: Elba Waveguide - Corte Vol. Amb. na dist. = 5400m - Fonte localizada na radial 90° , com $z_s = 80m$

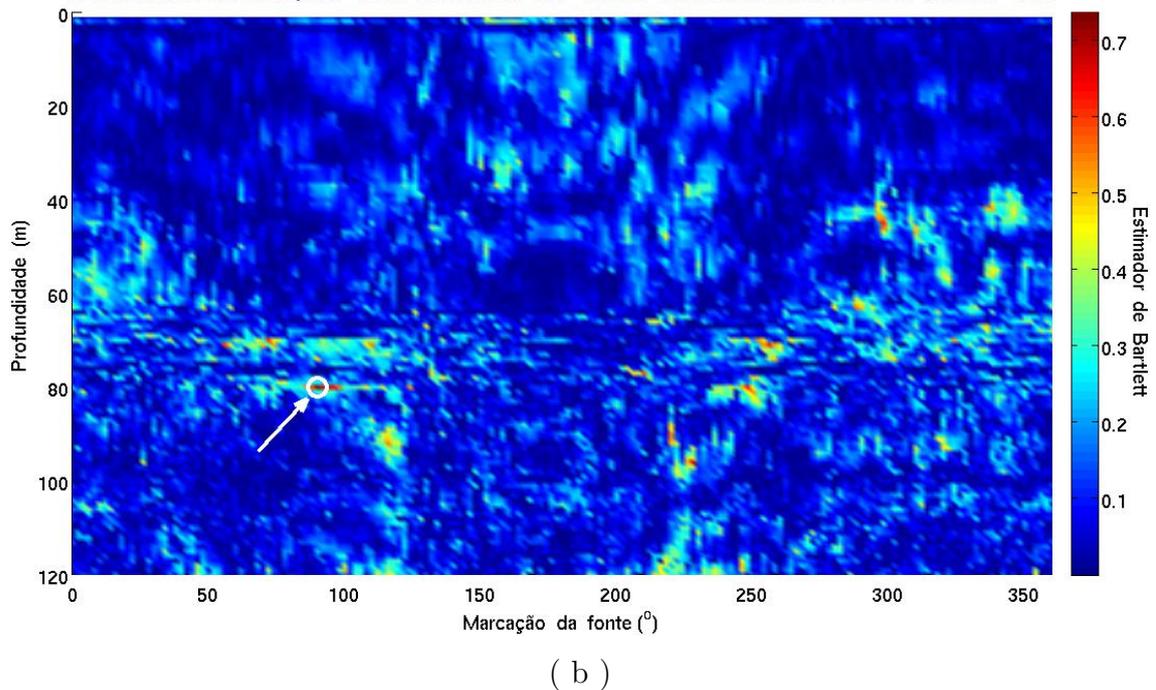


Figura 6.16: Localização com o BELLHOP3D: corte do volume de ambiguidade na distância onde a fonte foi localizada (5400 m). (a) perspectiva 3D; e (b) visão plana. Seta: posição calculada da fonte.

No plano da distância de localização, apresentado na Fig 6.16, embora a superfície também seja irregular, não ocorrem muitas ambiguidades relevantes. As mais destacadas ocorrem por volta da marcação 250° , tal como também constatado anteriormente na localização realizada pelo KRAKEN3D (cf. Fig. 6.6 (b)).

Tabela 6.12: Localização com o BELLHOP3D (rodada grosseira)

Marcação ($^{\circ}$)	90
erro ($^{\circ}$)	-1,3
Distância (m)	5400
erro (m)	-200
Profundidade (m)	80
erro (m)	0
erro 3D (m)	235,7
erro GA _{2D} (m)	37,4
Máx. Bartlett	0,7368

Para consecução da “rodada refinada” foram empregadas 21 radiais variando de 89° a 91° com espaçamento angular de $0,1^{\circ}$, 21 distâncias de fonte variando de 5390 a 5410 m, com espaçamento horizontal de 1 m e 11 profundidades variando de 79,5 a 80,5 m, com espaçamento vertical de 0,1 m, o que corresponde a um total de 4851 posições candidatas de fonte, exigindo 441 rodadas do BELLHOP3D. O tempo computacional demandado para geração desse conjunto de réplicas foi de apenas 26min 36s. Os resultados da localização são apresentados na Tab. 6.13.

Tabela 6.13: Localização com o BELLHOP3D (rodada refinada)

Marcação ($^{\circ}$)	90,6
erro ($^{\circ}$)	-0,7
Distância (m)	5409
erro (m)	-191
Profundidade (m)	80,1
erro (m)	+0,1
erro 3D (m)	202,5
erro GA _{2D} (m)	28,5
Máx. Bartlett	0,7478

Os resultados da “rodada refinada” (Tab. 6.13) indicam uma fonte satisfatoriamente localizada em posição mais próxima da posição de referência, distando 202,5 m da posição da medição e 28,5 m estimada pelos GA_{2D} e apresentando um valor máximo do estimador de 0,7478, portanto ligeiramente maior do que o valor resultante da rodada grosseira (0,7368).

A Fig. 6.17 que se segue apresenta o traçado de raios produzido pelo BELLHOP3D, com uso da configuração de calibração para o cenário de mar de Elba. Foram prescritos três azimutes de lançamento dos feixes. O azimute central corresponde à direção estimada da fonte ($90,6^{\circ}$).

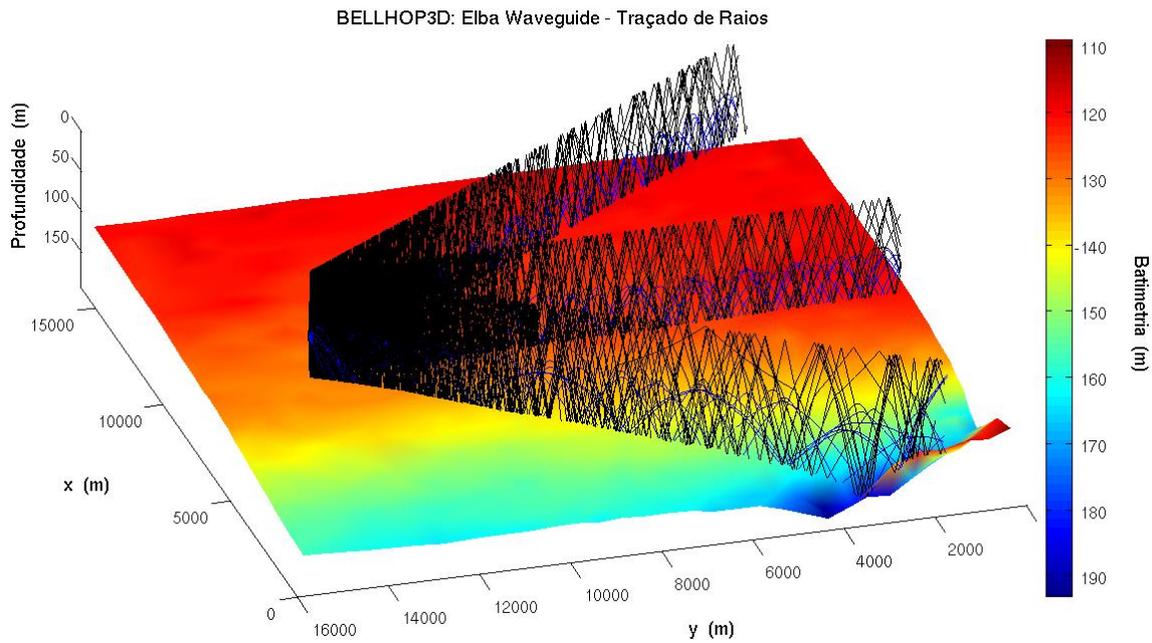


Figura 6.17: Traçados de raios no mar de Elba com uso do BELLHOP3D.

Validação do Modelo Acústico

Da mesma forma que foi, anteriormente, feito por ocasião da localização com o KRAKEN3D, uma segunda gravação acústica (gravação de validação) foi aqui empregada na localização sem que fosse alterado qualquer parâmetro ou configuração do modelo. Ambas as gravações, de calibração e validação, possuem mesma frequência (331 Hz) e mesma duração (1min 05s).

Conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Tab. 6.14, tanto na “rodada grosseira” como na “rodada refinada”, a fonte foi localizada exatamente na mesma posição, com leve redução do valor do estimador no segundo caso.

Tabela 6.14: Localização com o BELLHOP3D e uso da gravação de validação

	Rod. Grosseira	Rod. Refinada
Marcação (°)	90	90,6
erro (°)	-1,3	-0,7
Distância (m)	5400	5409
erro (m)	-200	-191
Profundidade (m)	80	80,1
erro (m)	0	+0,1
erro 3D (m)	235,7	202,5
erro GA _{2D} (m)	37,4	28,5
Máx. Bartlett	0,7354	0,7460

Testes adicionais da calibração obtida com uso da frequência 331 Hz foram realizados com duas outras gravações, nas frequências de 327 e 335 Hz. Em ambas as

frequências o erro encontrado no posicionamento 3D da fonte extrapolou a tolerância permitida, confirmando o que já havia sido previamente constatado com uso do KRAKEN3D, que a calibração é *frequency-dependent*.

Os resultados aqui alcançados demonstram que o BELLHOP3D pode ser considerado calibrado e validado para o ambiente do mar de Elba na frequência de 331 Hz, e a localização 3D da fonte acústica foi bem-sucedida. Passaremos então para fase seguinte do trabalho, que consiste em verificar a possibilidade de fazer com o modelo TRACEO3D o mesmo que foi feito com os modelos KRAKEN3D e BELLHOP3D.

6.3 Localização com o TRACEO3D

Assim como o BELLHOP3D, o TRACEO3D é um modelo de traçado de raios. Tal fato permite que seja prescrita para o TRACEO3D uma configuração muito próxima da, anteriormente, empregada para o BELLHOP3D (cf. seção 6.2).

6.3.1 Localização na Fatia Vertical

Como ponto de partida, para consecução da localização sobre a fatia vertical (plano xz) com o TRACEO3D, foi empregada a mesma configuração anteriormente utilizada pelo BELLHOP3D na localização 3D (subitem 6.2.2), incluindo a mesma geometria do feixe acústico irradiado ($N_\theta = 38$ e $\theta_{\max} = 47^\circ$), assim como os parâmetros do modelo equivalente do fundo oriundos do ajustamento BELLHOP3D vs. KRAKEN3D ($c_p = 1555$ m/s, $\rho = 3,5$ g/cm³ e $\alpha_p = 0$ dB/ λ). Dessa forma, pretende-se verificar se tais parâmetros, satisfatoriamente empregados no BELLHOP3D, podem também ser aplicados na localização com o TRACEO3D.

Para construção dos campos 2D de réplicas sobre a fatia vertical de marcação 90° , visando economia de tempo computacional, mostrou-se mais viável ampliar o espaçamento entre distâncias horizontais receptor-fonte de 1 para 4 m. Assim sendo, foram efetuados cálculos entre 4000 a 7000 m de distância, totalizando 751 distâncias candidatas regularmente espaçadas de 4 m. Em relação às profundidades, foi mantido o mesmo critério de espaçamento vertical anteriormente utilizado com o KRAKEN3D e com o BELLHOP3D, i.e., 1 m, totalizando 120 profundidades candidatas, regularmente espaçadas de 1 m, entre 1 e 120 m. Tal resolução espacial corresponde a um campo de réplicas composto por 90.120 (751×120) posições candidatas de fonte. O tempo computacional demandado para geração desse conjunto de réplicas foi de $4 \times 27,4$ h e o espaço de armazenamento de 67,1 MB.

A localização não foi satisfatória, indicando uma fonte localizada em uma distância de 6192 m do receptor e na profundidade de 60 m, totalizando um erro

com valor absoluto de 592,3 m em relação à posição de referência. O máximo valor do estimador de Bartlett alcançado foi de 0,6449.

Tal como anteriormente realizado com o BELLHOP3D (subseção 6.2.1), procedeu-se uma investigação do efeito das variações da geometria do feixe acústico irradiado no resultado da localização (sendo mantidos todos os demais parâmetros de configuração do modelo). Assim sendo, foram realizadas tentativas de localização para 31 valores de quantitativo de raios, N_θ , variando entre 35 e 65 e 21 valores de semiabertura do feixe, θ_{\max} , variando entre 45° e 65° .

Por ocasião da geração dos 651 (31×21) conjuntos de réplicas, a fim de tornar a pesquisa viável em termos de custo computacional, foi necessário um aumento brusco nos critérios de espaçamento horizontal e vertical entre posições candidatas de fonte. Cada conjunto de réplicas passou então a ser composto por 51 distâncias receptor-fonte regularmente espaçadas de 60 m entre 4000 e 7000 m e 25 profundidades regularmente espaçadas⁶ de 5 m entre 1 e 120 m, o que correspondeu a 1275 (51×25) posições candidatas de fonte a serem analisadas em cada uma das 651 diferentes combinações (N_θ, θ_{\max}), totalizando 830.025 (651×1275) rodadas do TRACEO3D, o que demandou um tempo computacional de $4 \times 5 \times 83,3$ h.

A Fig. 6.18 apresenta a variação do erro GA_{2D} encontrado na localização sobre a fatia vertical do campo na marcação 90° , em função de diferentes valores de quantitativo de raios lançados e semiabertura do feixe.

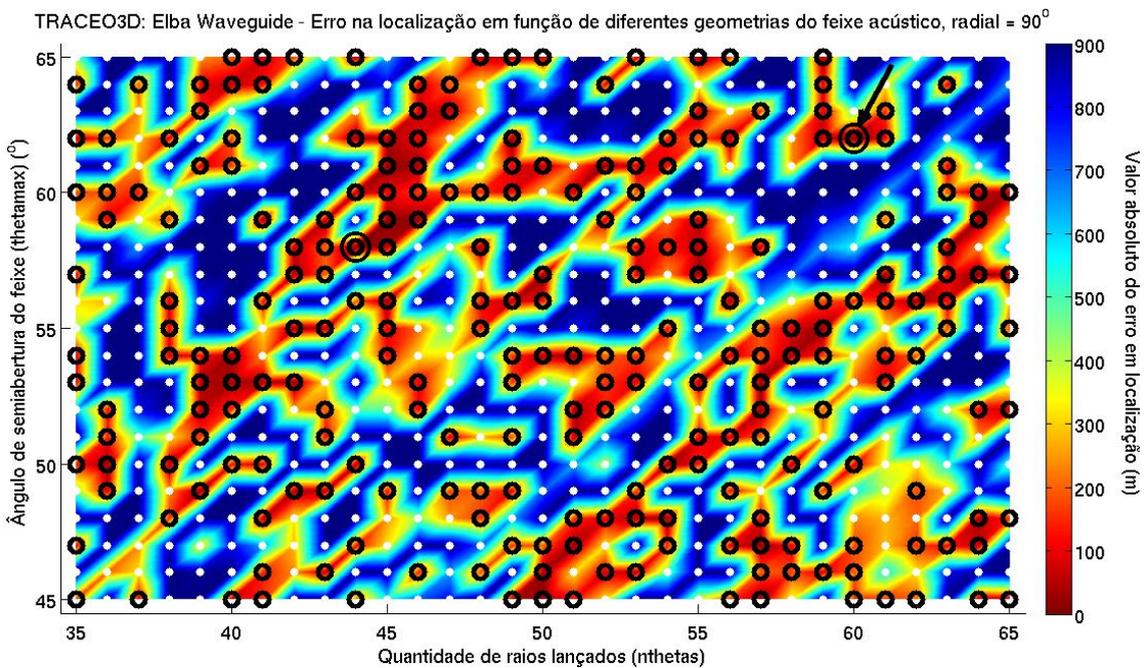


Figura 6.18: Erro na localização calculada pelo TRACEO3D em função de diferentes geometrias do feixe irradiado. Circunferências simples: localizações satisfatórias; circunferências duplas: localizações que apresentam menor erro; seta: localização que apresenta menor erro e maior Bartlett.

⁶A menos do primeiro espaçamento vertical entre profundidades candidatas da fonte, que foi de 4 m, todos os demais foram de 5 m, i.e., $z_s = [1\ 5:5:120] = (1, 5, 10, 15 \dots 115, 120)$ m.

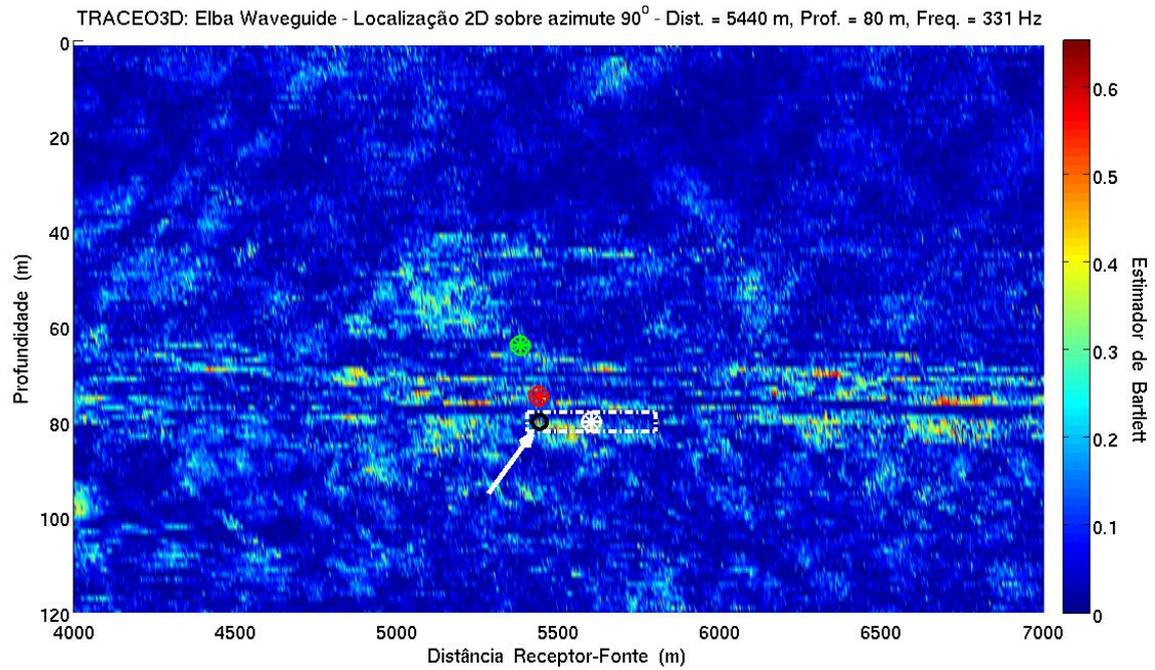
Na Fig. 6.18, as circunferências simples indicam os pontos onde uma combinação $(N_\theta, \theta_{\max})$ localizou a fonte satisfatoriamente, ou seja, onde a fonte foi localizada com um erro GA_{2D} de valor igual ou inferior a 200 m (áreas em encarnado). Os pontos envolvidos por circunferências duplas indicam as combinações $(N_\theta, \theta_{\max})$ onde foi encontrado o menor erro e o ponto destacado pela seta indica, entre as combinações que produziram o menor erro, aquela que atingiu o maior valor do estimador de Bartlett.

Comparando o resultado da Fig. 6.18 com o correspondente cálculo executado por meio do BELLHOP3D (cf. Fig. 6.8, p. 128), é possível constatar que o percentual de acerto do TRACEO3D (36,7 %) foi bem superior ao do BELLHOP3D (6,1 %), embora o intervalo de variação de N_θ e θ_{\max} utilizado no TRACEO3D (35 a 65 e 45° a 65° respectivamente) tenha sido inferior ao anteriormente utilizado no caso do BELLHOP3D (30 a 90 e 35° a 54° respectivamente). Também é possível observar, na Fig. 6.18, a distribuição aproximada das circunferências ao longo de retas de diferentes inclinações (embora seja menos evidente do que na Fig. 6.8, gerada pelo BELLHOP3D).

As combinações $(N_\theta, \theta_{\max}) = (44, 58^\circ)$ e $(60, 62^\circ)$ foram as que localizaram a fonte como o menor erro absoluto (circunferências duplas na Fig. 6.18). Em ambas as combinações, a fonte foi localizada na distância de 5440 m e profundidade 80 m (erro total = 6,2 m em relação à posição estimada pelos GA), com o estimador de Bartlett atingindo, respectivamente, os valores de 0,6143 e 0,6532. Pode-se, portanto, dizer que a melhor localização ocorre com $N_\theta = 60$ e $\theta_{\max} = 62^\circ$ (ponto indicado pela seta na Fig. 6.18); sendo, então, adotada essa geometria do feixe para geração de um novo conjunto de réplicas sobre a fatia vertical na marcação 90°.

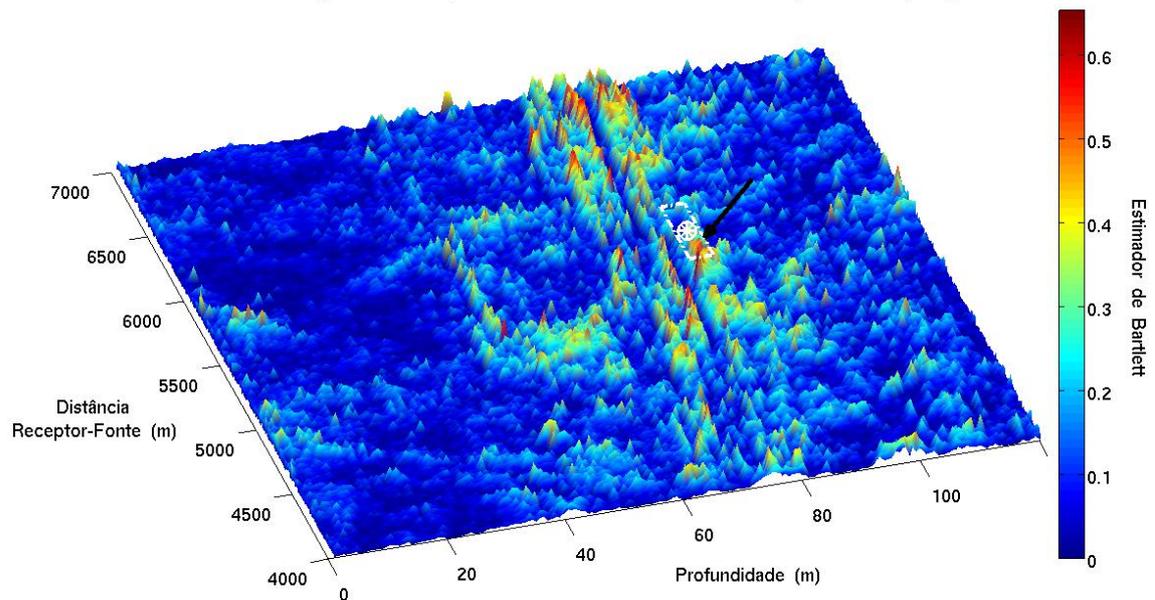
Para geração desse novo conjunto de réplicas, foi mantida a mesma resolução espacial anteriormente adotada (90.120 fontes candidatas com 751 distâncias horizontais espaçadas de 4 m e 120 profundidades espaçadas de 1 m). O tempo computacional demandado foi consideravelmente superior ($4 \times 44,4$ h, ao invés das $4 \times 27,4$ h anteriores), certamente por estar-se utilizando uma quantidade maior de raios (60 raios, ao invés dos 38 anteriormente utilizados), corroborando a ideia de que o tempo de processamento é diretamente proporcional à quantidade de raios lançados. O espaço de armazenamento se manteve praticamente inalterado (66,9 MB).

Conforme já previsto de acordo com a pesquisa acima realizada, a localização foi bem-sucedida. A superfície de ambiguidade gerada, a partir desse novo conjunto de réplicas, é apresentada na Fig. 6.19 (a). Visando melhor evidenciar as variações do estimador, é apresentada uma perspectiva tridimensional da superfície na Fig. 6.19 (b).



(a)

TRACEO3D: Elba Waveguide - Localização 2D sobre azimute 90° - Dist. = 5440 m, Prof. = 80 m, Freq. = 331 Hz



(b)

Figura 6.19: Localização com o TRACEO3D na fatia vertical: (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.

Tal como anteriormente constatado na localização realizada como o BEL-LHOP3D (cf. Fig. 6.10, p. 131), pode-se aqui também notar o aspecto irregular da superfície de ambiguidade e a forte dependência do resultado em relação à profundidade da fonte, o que é mais visível no comportamento de tendência horizontal dos pontos máximos do estimador (cores encarnadas e alaranjadas na Fig. 6.19), localizados, predominantemente, entre as profundidades de 60 e 80 m.

Outrossim, ainda comparando o presente resultado com o cálculo realizado pelo BELLHOP3D, destaca-se que, na superfície apresentada na Fig. 6.19, gerada pelo TRACEO3D, não existem mais as descontinuidades de aparência triangular, antes observadas na Fig. 6.10, produzida pelo BELLHOP3D. Tal fato se deve ao tipo de feixe gaussiano empregado pelos diferentes modelos; pois, conforme já mencionado, o TRACEO3D adota uma gaussiana perfeita ao invés da aproximação *hat-shaped* selecionada para o BELLHOP3D.

A Tab. 6.15 que se segue apresenta os resultados da localização com o TRACEO3D sobre a fatia vertical, onde os erros apresentados são referidos à posição medida da fonte (dist. = 5600 m e prof. = 80,0 m), o “erro 2D” é valor absoluto do erro resultante em relação à medição e o erro GA_{2D} é o valor absoluto do erro resultante referido à posição da fonte estimada pelos GA (dist. = 5437 m e prof. = 74,6 m).

Tabela 6.15: Localização 2D com o TRACEO3D

Distância (m)	5440
erro (m)	-160
Profundidade (m)	80
erro (m)	0
erro 2D (m)	160,0
erro GA _{2D} (m)	6,2
Máx. Bartlett	0,6532

Pode-se perceber que o resultado da localização aqui calculado coincide com o resultado anteriormente calculado por ocasião da pesquisa dos valores de N_θ e θ_{\max} ; entretanto, tal fato não pode ser tomado como regra, tendo em vista que a resolução espacial das posições candidatas da fonte adotada na geração do conjunto de réplicas (751 distâncias \times 120 profundidades) é bem maior do que a resolução adotada na pesquisa supracitada (51 distâncias \times 25 profundidades).

Em relação ao resultado encontrado nas localizações 2D realizadas pelos dois modelos anteriores sobre a fatia vertical, pode-se dizer que o TRACEO3D foi o que conseguiu chegar mais próximo da posição da fonte estimada pelos GA_{2D}, ao obter um erro de apenas 6,2 m, o menor comparado ao obtido pelo KRAKEN3D, 40,3 m (Tab. 6.4, p. 114) e pelo BELLHOP3D, 12,3 m (Tab. 6.10, p. 132). Assim sendo, a localização realizada pelo TRACEO3D sobre a fatia vertical foi avaliada como sendo satisfatória e; então, a configuração aqui empregada foi selecionada para o cálculo das simulações ao longo das demais marcações, de modo a completar os 360° do espaço tridimensional.

6.3.2 Localização Tridimensional

O primeiro conjunto de réplicas gerado por meio da “rodada grosseira” do TRACEO3D foi constituído de 121 marcações igualmente espaçadas de 3° entre 0° e 360° , 76 distâncias receptor-fonte igualmente espaçadas 40 m entre 4000 e 7000 m e 23 profundidades de fonte igualmente espaçadas⁷ de 5 m entre 1 e 110 m, correspondendo a um total de 211.508 ($121 \times 76 \times 23$) rodadas do modelo. Destaca-se que, por questão de economia de custo computacional, a resolução espacial adotada nessa primeira “rodada grosseira” do TRACEO3D foi bem menor do que a anteriormente adotada na “rodada grosseira” do KRAKEN3D e do BELLHOP3D (181 marcações \times 151 distâncias \times 120 profundidades). A geração desse conjunto de réplicas demandou um tempo computacional de $4 \times 5 \times 26,3$ h e um espaço de armazenamento de 157,3 MB.

A localização 3D indicou uma fonte localizada na marcação 102° , distância 6360 m e profundidade de 80 m, apresentando um valor de 0,7356 para o estimador de Bartlett. Os valores de marcação e distância obtidos encontram-se fora da margem de erro aceitável (estabelecido na Tab. 6.2). O primeiro valor coerente ocorreu na sexta colocação, indicando uma fonte localizada na marcação 90° , distância 5440 m e profundidade 80 m, com Bartlett de 0,6532 (mesma posição encontrada na localização sobre a fatia vertical, subseção 6.3.1).

Os primeiros parâmetros que geraram suspeita de estarem ocasionando problemas de *model mismatch* foram as propriedades geoacústicas do fundo; pois, até aqui, vinham sendo utilizadas as propriedades oriundas do ajustamento realizado entre o BELLHOP3D e o KRAKEN3D. O insucesso ocorrido nessa primeira tentativa de localização sugere que seja calculado um novo modelo equivalente do fundo; agora, resultante de um ajustamento realizado entre o TRACEO3D e o KRAKEN3D.

Entretanto, tendo em vista que um modelo equivalente do fundo, resultante de um ajustamento 2D entre o TRACEO e o KRAKEN, havia sido previamente calculado para o cenário do mar de Elba em trabalhos anteriores [70, 99], optou-se por testar esse modelo equivalente 2D, antes de se implementar uma nova equivalência TRACEO3D vs. KRAKEN3D, o que seria bastante dispendioso em termos computacionais. Assim sendo, as propriedades geoacústicas do fundo (de camada única) foram alteradas de $c_p = 1555$ m/s e $\rho = 3,5$ g/cm³ para $c_p = 1558$ m/s, $\rho = 2,8$ g/cm³ (cf. Tab 6.11, p. 134). A atenuação no fundo, α_p , foi mantida nula por ser esse o valor encontrado em ambas as equivalências.

Tal alteração na interface água-fundo exigiu a realização de uma segunda investigação do efeito das variações da geometria do feixe acústico no resultado da localização, na qual foi preservada toda a configuração do modelo utilizada na

⁷A menos do primeiro espaçamento vertical entre profundidades candidatas da fonte, que foi de 4 m, todos os demais foram de 5 m, i.e., $z_s = [1\ 5:5:110] = (1, 5, 10, 15 \dots 115, 110)$ m.

primeira investigação (Fig. 6.18) a menos das propriedades do fundo. Foram igualmente mantidos os intervalos de busca de N_θ e θ_{\max} , assim como a resolução espacial das posições candidatas de fonte em cada conjunto de réplicas gerado. A Fig. 6.20 apresenta o resultado dessa nova investigação.

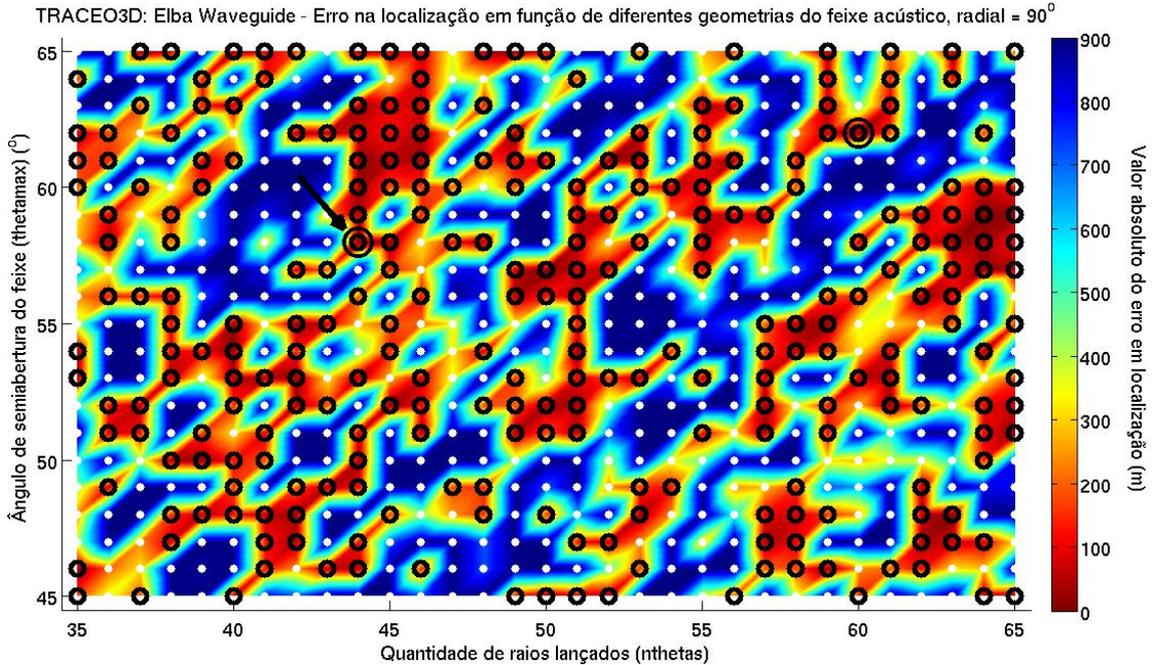


Figura 6.20: Erro na localização calculada pelo TRACEO3D com uso da equivalência 2D TRACEO vs. KRAKEN [99], em função de diferentes geometrias do feixe irradiado. Circunferências simples: localizações satisfatórias; circunferências duplas: localizações que apresentam menor erro; e seta: localização que apresenta menor erro e maior Bartlett.

O índice de acerto dessa segunda investigação foi de 41,5%, ou seja, 270 combinações de $(N_\theta, \theta_{\max})$ localizaram a fonte satisfatoriamente das 651 combinações avaliadas. O resultado supera os índices encontrados pelo TRACEO3D na primeira investigação, que foi de 36,7% (Fig. 6.18), e também pelo BELLHOP3D nas duas investigações realizadas, que foram respectivamente 6,1% e 17,2% (Fig. 6.8 e 6.13).

Ainda comparando a Fig. 6.20 acima com a Fig. 6.18 (obtida considerando a equivalência BELLHOP3D vs. KRAKEN3D), nota-se que as combinações $(N_\theta, \theta_{\max})$ que localizaram a fonte como o menor erro GA_{2D} (circunferências duplas) foram as mesmas encontradas em ambas as investigações: $(N_\theta, \theta_{\max}) = (44, 58^\circ)$ e $(60, 62^\circ)$. As posições calculadas nessas duas combinações também não foram alteradas: distância = 5440 m e profundidade = 80 m. Entretanto, a combinação $(N_\theta, \theta_{\max}) = (44, 58^\circ)$ (indicada pela seta na Fig. 6.20) foi a que obteve o maior valor do estimador de Bartlett (0,7238). Assim sendo, os novos valores obtidos para geometria do feixe, $(N_\theta, \theta_{\max}) = (44, 58^\circ)$, passaram, então, a ser prescritos para o TRACEO3D na construção do campo 3D de réplicas.

Adicionalmente, ressalta-se que a redução no número de raios lançados, de 60 (quantitativo, anteriormente, usado na localização 2D sobre a fatia vertical) para 44, também se mostra mais favorável por razões de economia de tempo computacional.

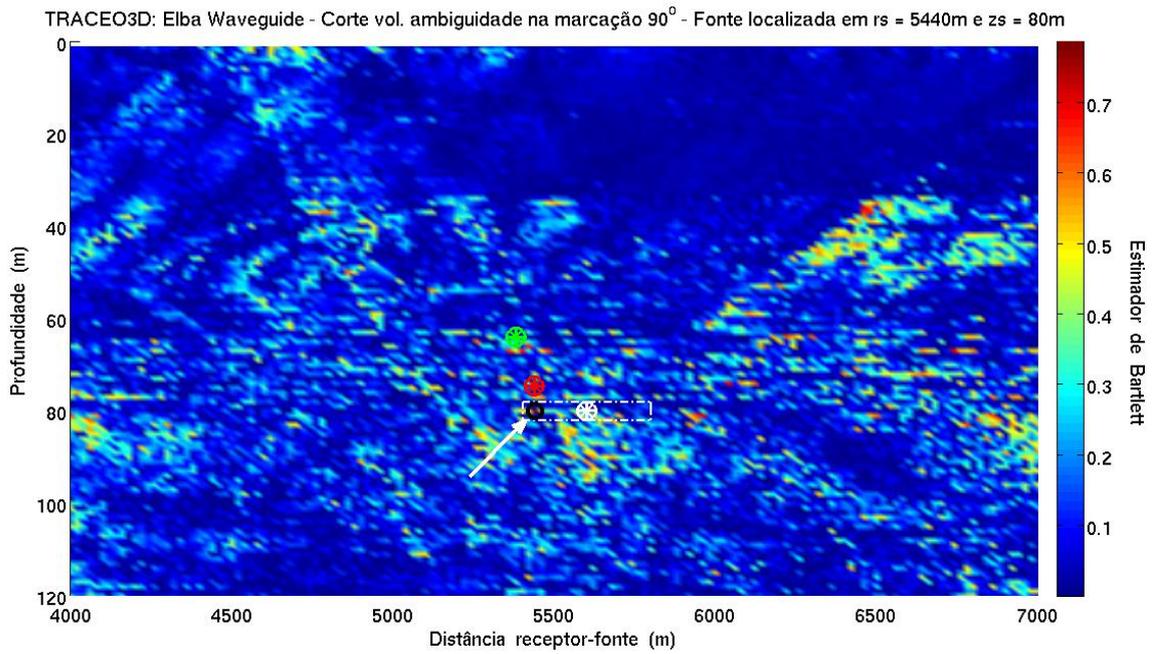
Além da geometria do feixe irradiado, outro parâmetro que sofreu alteração na configuração do TRACEO3D foi o equidistanciamento de pontos do SSP. Visando conferir maior fidelidade às medições, o intervalo vertical entre pontos equidistantes do SSP foi reduzido de modo a corresponder a, aproximadamente, metade do menor espaçamento vertical existente nos dados do SSP coletados *in situ*. Dessa forma, os 262 pontos inicialmente utilizados foram substituídos por 523 pontos, correspondendo a um espaçamento vertical regular de 0,24 m entre pontos.

Incorporando as alterações acima citadas (na geometria do feixe e na distribuição de pontos do SSP), novos conjuntos 3D de réplicas foram gerados, aumentando-se gradativamente a resolução espacial das posições candidatas da fonte e verificando-se o resultado da localização em cada etapa. Ao final, o espaçamento horizontal entre distâncias receptor-fonte foi reduzido de 40 m (valor utilizado na primeira “rodada grosseira” com o TRACEO3D) para 20 m e o espaçamento vertical entre profundidades foi reduzido de 5 m para 1 m, dando origem a um conjunto de réplicas composto por 121 marcações (de 0 a 360°) × 151 distâncias (de 4000 a 7000 m) × 120 profundidades (de 1 a 120 m), totalizando 2.192.520 rodadas do modelo. A geração desse conjunto de réplicas demandou um tempo computacional de 4 × 12 × 151,1 h e um espaço de armazenamento de 1,16 GB.

A localização 3D apresentou resultado satisfatório, indicando uma fonte localizada na marcação 90°, distância 5440 m e profundidade de 80 m (valores bem próximos dos obtidos nos cálculos feitos na “rodada grosseira” do BELLHOP3D, Tab. 6.12, p. 141), com um valor máximo do estimador de Bartlett de 0,7869. Tal posição corresponde a um erro absoluto de 203,2 m em relação à posição da medição e de apenas 6,2 m em relação à posição estimada pelos GA_{2D}.

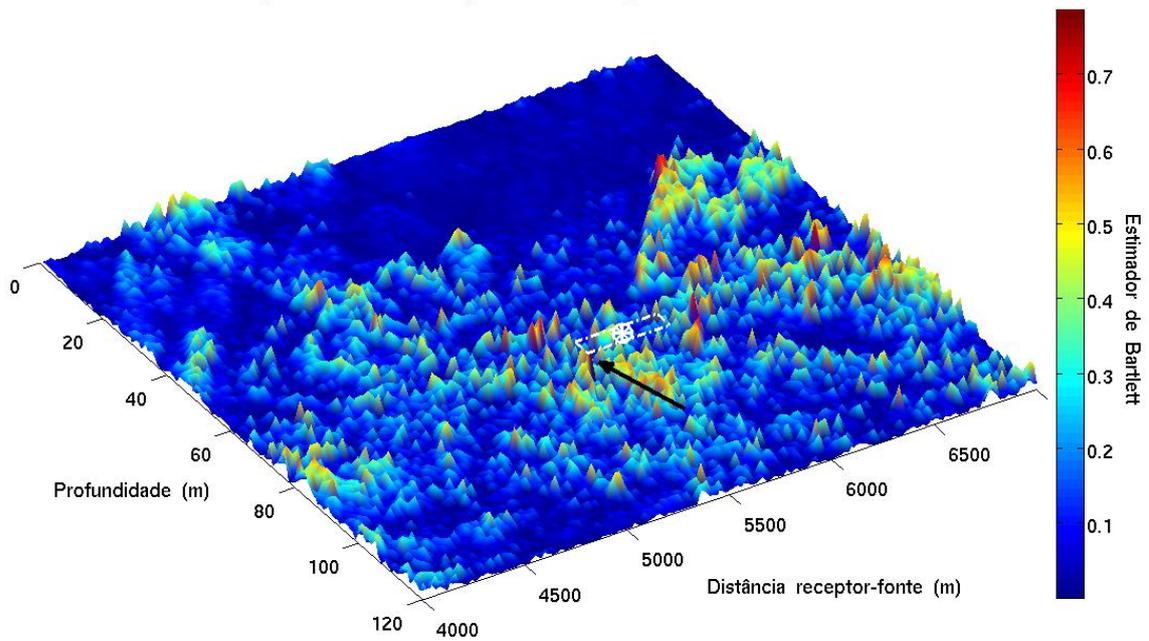
Ressalta-se também o alto valor encontrado para o estimador de Bartlett (0,7869), o que pode ser considerado um pleno sucesso ao tratar-se de dados reais; tal valor supera os resultados de 0,6587 e 0,7368, antes encontrados nas “rodadas grosseiras” realizadas, respectivamente, pelo KRAKEN3D (Tab. 6.5, p. 118) e pelo BELLHOP3D (Tab. 6.12, p. 141).

A plotagem dos volumes de ambiguidade cortados nos planos de interesse são apresentados nas Fig. 6.21 a 6.23 que se seguem. Além da vista plana, é apresentada uma vista em perspectiva, a fim de melhor destacar as variações do estimador.



(a)

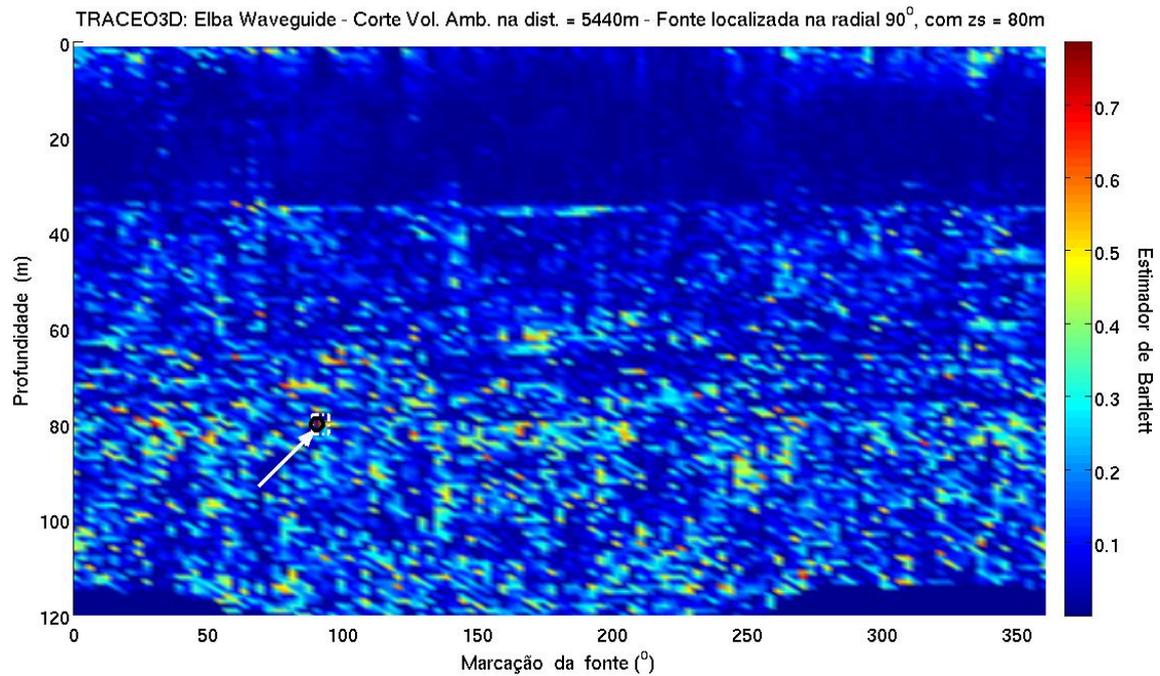
TRACEO3D: Elba Waveguide - Corte vol. ambiguidade na marcação 90° - Fonte localizada em $r_s = 5440\text{m}$ e $z_s = 80\text{m}$



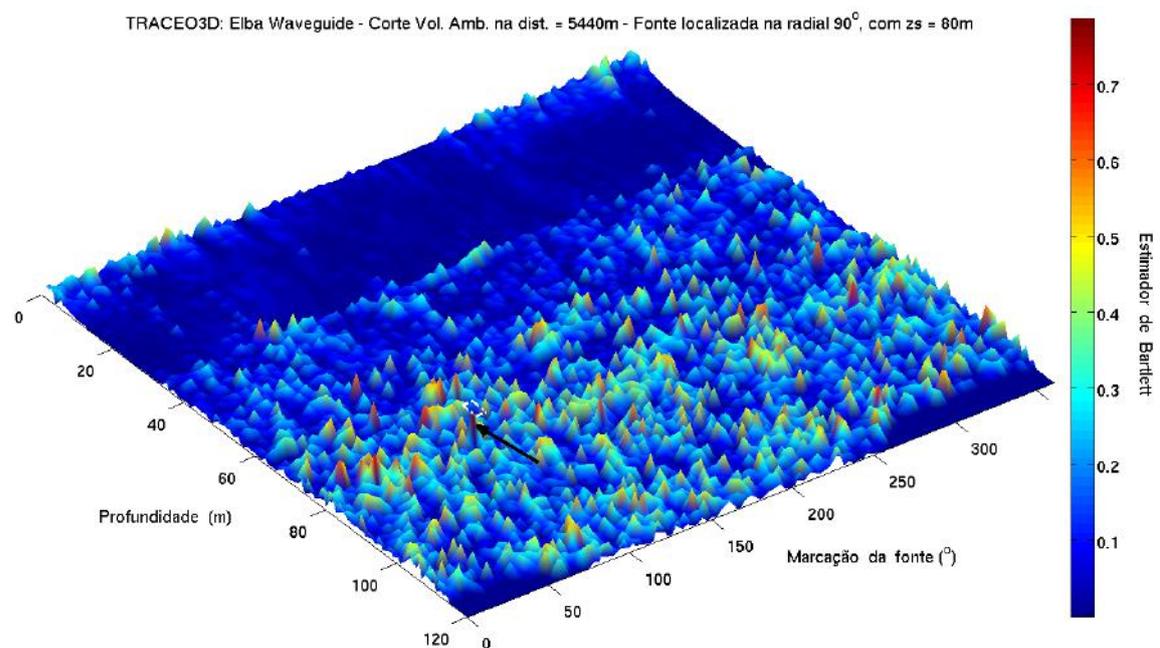
(b)

Figura 6.21: Localização com o TRACEO3D: corte no plano da marcação 90° . (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte; asterisco verde: posição calculada pelo KRAKEN (2D); asterisco encarnado: posição estimada pelos GA; e asterisco branco: posição da medição.

Tal como observado nas superfícies de ambiguidade geradas pelo BELLHOP3D, o aspecto da superfície da Fig. 6.21 também é acidentado e se mostra muito sensível às variações da profundidade da fonte. São notadas maiores irregularidades ao longo da profundidade da termoclina (entre 60 e 80 m), onde também ocorrem as ambiguidades mais proeminentes.



(a)



(b)

Figura 6.22: Localização com o TRACEO3D: corte no plano da distância de 5440 m. (a) vista plana; e (b) vista em perspectiva. Seta: posição calculada da fonte.

Uma primeira impressão da Fig. 6.22 nos conduz à ideia de que nada se pode concluir do aspecto irregular e acidentado da superfície. Entretanto, uma análise mais cuidadosa nos permite notar que as ambiguidades são bem menores em comparação com a Fig. 6.21 e, mais uma vez, a marcação $\sim 250^\circ$ se mostra como sendo uma direção preferencial para ocorrências de ambiguidades, sobretudo entre as profundidades de 85 e 95 m; algo semelhante foi notado nas correspondentes plotagens realizadas com o KRAKEN3D (Fig. 6.6) e BELLHOP3D (Fig. 6.16).

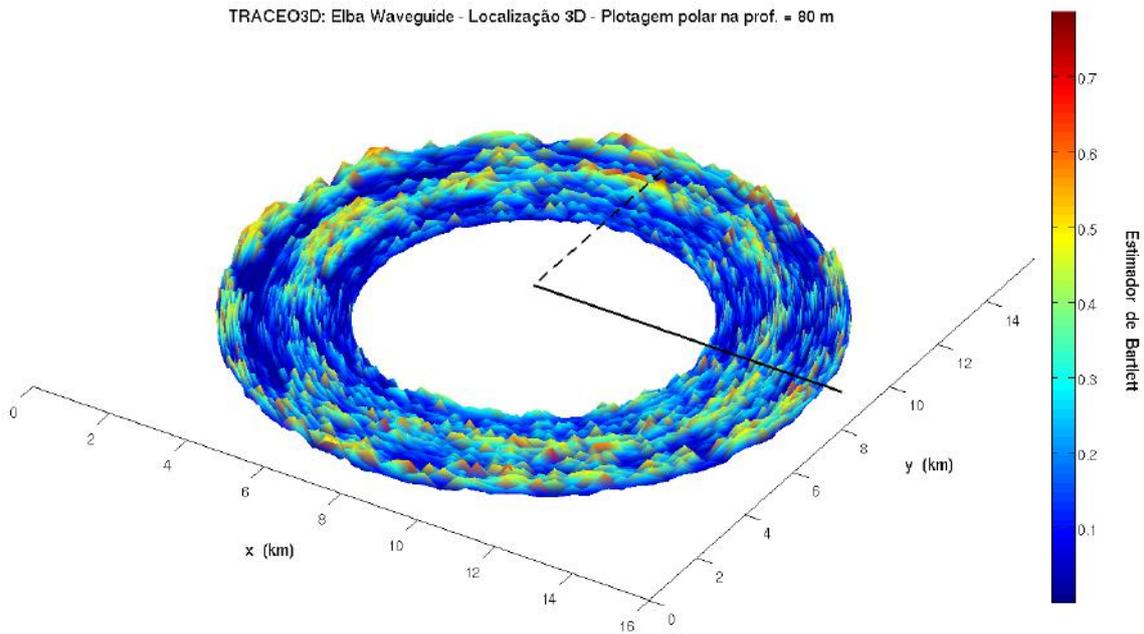


Figura 6.23: Localização com o TRACEO3D: corte do cilindro de ambiguidade na profundidade onde a fonte foi localizada (80 m). Linha cheia: direção de origem dos ângulos horizontais; e linha tracejada: marcação onde a fonte foi localizada (90°).

A análise do anel de ambiguidade apresentado na Fig. 6.23 demonstra uma boa resolução azimutal no cálculo da marcação da fonte (representada pela linha tracejada), permitindo uma definição de direção melhor do que as anteriormente obtidas por meio do KRAKEN3D (Fig. 6.5) e do BELLHOP3D (Fig. 6.15).

A Tab. 6.16 que se segue resume o resultado encontrado na localização 3D pela “rodada grosseira” do TRACEO3D.

Tabela 6.16: Localização com o TRACEO3D (rodada grosseira)

Marcação ($^\circ$)	90
erro ($^\circ$)	-1,3
Distância (m)	5440
erro (m)	-160
Profundidade (m)	80
erro (m)	0
erro 3D (m)	203,2
erro GA_{2D} (m)	6,2
Máx. Bartlett	0,7869

Para consecução da “rodada refinada” foram empregadas 31 radiais variando de 88.5° a 91.5° , com espaçamento angular de $0,1^\circ$, 21 distâncias receptor-fonte variando de 5430 a 5450 m, com espaçamento horizontal de 1 m e 11 profundidades variando de 79,5 a 80,5 m, com espaçamento vertical de 0,1 m, o que corresponde

a um total de 7161 ($31 \times 21 \times 11$) posições candidatas de fonte; e, portanto, 7161 rodadas do TRACEO3D. O tempo computacional demandado para geração desse conjunto de réplicas foi de 12,3 h. Os resultados da localização são apresentados na Tab. 6.17 que se segue, incluindo os erros em relação à posição de referência (observação) e o valor absoluto da distância linear em relação à posição estimada pelos GA_{2D}.

Tabela 6.17: Localização com o TRACEO3D (rodada refinada)

Marcação (°)	89,9
erro (°)	-1,4
Distância (m)	5442
erro (m)	-158
Profundidade (m)	80,0
erro (m)	0
erro 3D (m)	207,7
erro GA _{2D} (m)	7,4
Máx. Bartlett	0,7926

A “rodada refinada” aqui realizada pelo TRACEO3D produziu uma pequena degradação no posicionamento da fonte em relação ao cálculo anteriormente feito na “rodada grosseira”.

Confrontando os resultados da Tab. 6.17 acima com os da “rodada grosseira” (Tab. 6.16), percebe-se que, em relação à posição de referência, o erro em direção sofreu um acréscimo absoluto de $0,1^\circ$ e o erro em distância foi reduzido de 2 m. Ocorreu também um pequeno afastamento da fonte em relação à posição estimada pelos GA_{2D}, ampliando o erro absoluto em 1,2 m ($7,4 - 6,2$ m). O valor do estimador de Bartlett apresentou um sensível aumento, embora tal fato não tenha trazido benefícios em termos de acurácia no posicionamento.

A Fig. 6.24 que se segue apresenta o traçado de raios produzido pelo TRACEO3D, com uso da configuração de calibração, para o cenário de mar de Elba. Foram prescritos três azimutes de lançamento dos feixes. O azimute central corresponde à direção estimada da fonte ($89,9^\circ$). O número de raios lançados em cada azimute foi reduzido de 44 para 11 a fim de facilitar a visualização da plotagem.

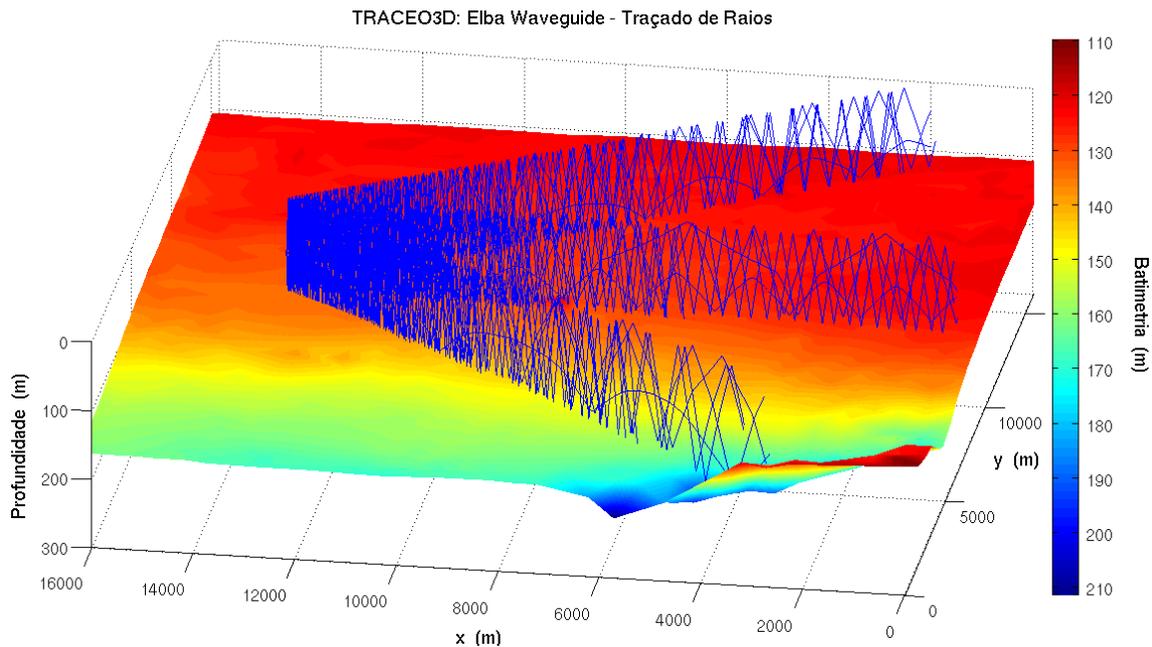


Figura 6.24: Traçados de raios no mar de Elba com uso do TRACEO3D

Validação do Modelo Acústico

Conforme anteriormente realizado com o KRAKEN3D e com o BELLHOP3D, uma segunda gravação acústica de frequência 331 Hz (gravação de validação) foi aqui empregada na localização sem que fosse alterado qualquer parâmetro ou configuração do modelo. Os resultados dessa etapa de validação são apresentados na Tab. 6.18 que se segue.

Tabela 6.18: Localização com o TRACEO3D e uso da gravação de validação

	Rod. Grosseira	Rod. Refinada
Marcação (°)	90	89,9
erro (°)	-1,3	-1,4
Distância (m)	5440	5442
erro (m)	-160	-158
Profundidade (m)	80	80,0
erro (m)	0	0
erro 3D (m)	203,2	207,7
erro GA _{2D} (m)	6,2	7,4
Máx. Bartlett	0,7816	0,7920

Os resultados apresentados na Tab. 6.18 demonstram que, com uso da gravação de validação, a fonte foi localizada exatamente na mesma posição que havia sido, anteriormente, calculada com uso da gravação de calibração (cf. Tab.

6.16 e 6.17), ocorrendo leve redução no valor do estimador. Assim sendo, o TRACEO3D pode ser, finalmente, considerado calibrado e validado para o ambiente do mar de Elba na frequência de 331 Hz, e a fonte acústica localizada com sucesso no espaço 3D.

Resumo dos resultados experimentais

A Tab. 6.19 que se segue apresenta o resultado final das localizações 3D calculadas pelos três modelos empregados no trabalho em tela.

Tabela 6.19: Resumo dos resultados das localizações 3D calculada pelos três modelos

	KRAKEN3D	BELLHOP3D	TRACEO3D
Marcação (°)	91,9	90,6	89,9
erro (°)	+0,6	-0,7	-1,4
Distância (m)	5419	5409	5442
erro (m)	-181	-191	-158
Profundidade (m)	80,9	80,1	80,0
erro (m)	+0,9	+0,1	0
erro 3D (m)	190,0	202,5	207,7
erro GA _{2D} (m)	19,1	28,5	7,4
Máx. Bartlett	0,6591	0,7478	0,7926

A análise da Tab. 6.19 demonstra que foi possível obter uma localização 3D bem-sucedida com uso dos três modelos. Os resultados obtidos se encontram dentro das margens de erros aceitáveis (originalmente estabelecidos na Tab. 6.2). Ressalta-se a boa coerência dos resultados obtidos pelos diferentes modelos nas três grandezas que definem o posicionamento da fonte: marcação, distância e profundidade.

Quanto ao distanciamento em relação à posição da medição, o resultado mais próximo foi obtido pelo KRAKEN3D (190,0 m) e o mais afastado, pelo TRACEO3D (207,7 m). Entretanto, ressalta-se que o modelo equivalente do fundo empregado pelo TRACEO3D é oriundo de uma equivalência 2D (enquanto que o BELLHOP3D empregou uma equivalência 3D), fato que, certamente, contribuiu para a maior discrepância nos resultados obtido pelo TRACEO3D. Em relação à posição estimada pelos GA_{2D}, o melhor resultado foi alcançado pelo TRACEO3D (7,4 m) e o mais afastado, pelo BELLHOP3D (28,5 m).

Os valores mais altos atingidos pelo estimador de Bartlett foram encontrados com uso dos modelos de raios, indicando um melhor ajuste entre dados modelados e observados, embora tal fato não tenha se traduzido em benefícios em termos de acurácia no posicionamento da fonte.

Capítulo 7

Conclusão e Sugestões para Futuros Trabalhos

Em função dos resultados obtidos com uso de dados sintéticos e experimentais na localização 3D, pode-se elencar as seguintes conclusões:

- Apesar das variações batimétricas do ambiente em questão não serem grandes, a quebra da simetria azimutal, provocada por tais variações, se mostrou suficiente para prover a discriminação em marcação no direcionamento da fonte, possibilitando, assim, a localização 3D de uma fonte estática, de banda estreita, com uso de um único *array* vertical de hidrofones e demonstrando o uso bem-sucedido da técnica 3DMFP combinada com o ESP;
- Os campos de réplicas do 3DMFP foram gerados por três diferentes modelos de propagação acústica: um que adota a abordagem de modos normais e dois que adotam a abordagem de raios. Os três modelos apresentaram resultados satisfatórios, possibilitando a localização 3D com dados experimentais, dentro das margens de erro consideradas aceitáveis. Em relação à posição medida da fonte, os resultados obtidos pelos diferentes modelos apresentaram valores bem próximos entre si. O modelo que apresentou o melhor resultado na localização 3D foi o NMM KRAKEN3D, obtendo um erro absoluto de 190,0 m e o resultado mais afastado foi obtido pelo RTM TRACEO3D, apresentando um erro de 207,7 m. Em relação à posição 2D da fonte estimada pelos GA_{2D}, o modelo que apresentou o melhor resultado na localização foi o RTM TRACEO3D, obtendo um erro absoluto de apenas 7,4 m e o resultado mais afastado foi obtido pelo RTM BELLHOP3D, indicando um erro de 28,5 m;
- A distância receptor-fonte estimada pelos três modelos variou entre 5409 e 5442 m. Tal resultado concorda com o valor calculado por outros modelos em trabalhos pretéritos (cf. Tab. 6.4, p. 114). Assim sendo, somos levados a

crer que a distância real da fonte está mais próxima do valor estimado pelos GA_{2D} (5437 m) do que do valor da medição constante na documentação do experimento (~ 5600 m);

- Apesar do uso de uma frequência considerada baixa em um ambiente de águas rasas, a *performance* dos RTM BELLHOP3D e TRACEO3D foi satisfatória, indicando que o cálculo do modelo equivalente do fundo, realizado por meio das otimizações BELLHOP3D vs. KRAKEN3D e TRACEO vs. KRAKEN, foi eficiente, i.e., foi possível reproduzir, com uso de modelos de raios e de um fundo isocamada, uma resposta acústica semelhante àquela produzida por um modelo de modos com um fundo multicamadas;
- Confirmando o conhecimento disponível na literatura, o detalhado conhecimento do SSP e dos contornos do guia de ondas se mostrou essencial para o sucesso da técnica do 3DMFP. No caso do NMM KRAKEN3D, a inclusão das rugosidades interfaciais do fundo e da superfície contribuiu para o aprimoramento da localização 3D. No caso dos modelos de raios, o equidistanciamento de pontos do SSP contribuiu para a redução das ambiguidades; e
- A localização 3D com uso de dados sintéticos modelados permitiu visualizar a melhor *performance* do *array* horizontal na discriminação em azimute, a despeito do prejuízo na discriminação em profundidade. O uso do SSP teórico *isovelocity* possibilitou esclarecer a questão do aspecto irregular das superfícies de ambiguidade produzidas pelos modelos de raios.

Sugere-se para futuros trabalhos a realização de um experimento no mar, especificamente programado para tarefas de localização 3D de fontes. A fonte acústica poderia ser um submarino ou dispositivo arraiado por navio de superfície, de modo que os sinais pudessem ser emitidos em diferentes profundidades, distâncias e marcações em relação a um *array* fixo. As propriedades geoacústicas ao longo das diferentes camadas do fundo e a batimetria devem ser bem conhecidas (a batimetria, preferencialmente, adquirida por meio de um ecobatímetro multifeixe). As estações de CTD (para cálculo dos SSP's) devem ser distribuídas de modo a cobrir a maior extensão possível do domínio de modelagem e realizadas em instantes tão próximos quanto permitido do momento das gravações. Certamente, um experimento realizado nessas condições reduziria, drasticamente, o esforço de calibração dos modelos e ampliaria a capacidade de avaliação da acurácia na localização 3D.

Enfim, considera-se que o presente trabalho tenha oferecido uma parcela significativa de contribuição para solução do problema inverso da localização, com potencial emprego em sistemas fixos costeiros, submarinos ou navios de superfície com uso de um *array* rebocado. Alternativamente, extensões da metodologia aqui

proposta podem ser pesquisadas e implementadas no sentido de prover o acompanhamento de fontes em movimento, a localização em tempo real (por meio de processamento paralelo ou cálculo antecipado dos conjuntos de réplicas) e a localização de alvos dissimulados silenciosos, que apresentam níveis desfavoráveis de SNR.

Vale ressaltar que, pela informação que se tem, este trabalho foi o primeiro a aplicar a modelagem acústica 3D (de modos e de raios) na localização tridimensional de fontes de banda estreita em águas rasas, fazendo uso da quebra da simetria azimutal do ambiente e empregando dados experimentais coletados sobre um único *array* vertical de hidrofones.

A qualidade dos resultados aqui obtidos com uso da modelagem 3D, em face das incertezas e imprecisões ambientais e geométricas introduzidas, atesta, de fato, que é chegado o momento em que a modelagem acústica 3D, definitivamente, caminha para tomar o lugar da tradicional modelagem 2D; possibilitando, dessa forma, a geração de previsões mais acuradas e confiáveis, o que muito favorecerá a solução da imensa gama dos problemas *model-based*.

Referências Bibliográficas

- [1] SOUSA, A. V. G. *Estimação de Distância de Fontes Sonoras no Mar com Técnicas Acústicas Passivas*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, ago. 2008. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_d/AnaValeriaGrecoDeSousa.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2018.
- [2] RODRÍGUEZ, O. C. *Modelos de Propagação Acústica Submarina: comparação de resultados com a solução analítica do problema de três camadas*. Trabalho de síntese relativo às provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, SiPLAB/FCT/Universidade do Algarve, Faro, Portugal, dez. 1995. Disponível em: <<http://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/orodrig1.95.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2018.
- [3] JESUS, S. M., SILVA, A. J., RODRÍGUEZ, O. C. “Acústica Submarina em Alta Frequência: Teoria, Simulação e Resultados Experimentais”. In: *VII ETAS - Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina*, pp. 76–92, Rio de Janeiro, RJ, nov. 2007. IPqM. Disponível em: <<http://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/sjesus2.07.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2018.
- [4] BRASIL. “Estratégia Nacional de Defesa”. Ministério de Defesa, 2012. Disponível em: <http://www.defesa.gov.br/arquivos/estado_e_defesa/END-PND_Optimized.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2018.
- [5] KUPERMAN, W. A., LYNCH, J. F. “Shallow-Water Acoustics”, *Physics Today*, v. 57, n. 10, pp. 55–61, out. 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1825269>>. Acesso em: 1 mar. 2018.
- [6] ETTER, P. C. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. 4 ed. Boca Raton, FL, CRC Press, Taylor & Francis Group, fev. 2013.
- [7] TOLSTOY, I., CLAY, C. S. *Ocean Acoustics: Theory and Experiment in Underwater Sound*. Advanced Physics Monograph Series. New York, NY, McGraw-Hill, 1966.

- [8] GOMEZ, C. “Wave Propagation in Shallow-Water Acoustic Random Waveguides”, *Commun. Math. Sci.*, v. 9, n. 1, pp. 81–125, 2011. Disponível em: <<http://math.stanford.edu/~chgomez/swprop.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [9] MOURA, N. N. *Deteção e Classificação de Sinais de Sonar Passivo Usando Métodos de Separação Cega de Fontes*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, abr. 2013. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_d/NatanaelNunesDeMoura.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2018.
- [10] PERKINS, J. S., KUPERMAN, W. A. “Environmental Signal Processing: Three-Dimensional Matched-Field Processing with a Vertical Array”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 87, n. 4, pp. 1553–1556, abr. 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.399563>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [11] JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B., et al. *Computational Ocean Acoustics*. Modern Acoustics and Signal Processing. 2 ed. New York, NY, Springer-Verlag, 2011.
- [12] HINICH, M. J. “Maximum-Likelihood Signal Processing for a Vertical Array”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 54, n. 2, pp. 499–503, 1973. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.1913606>>. Acesso em: 30 jan. 2018.
- [13] BUCKER, H. P. “Use of Calculated Sound Fields and Matched-Field Detection to Locate Sound Sources in Shallow Water”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 59, n. 2, pp. 368–373, 1976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.380872>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [14] TOLSTOY, A. “Applications of Matched-Field Processing to Inverse Problems in Underwater Acoustics”, *Inverse Problems*, v. 16, n. 6, pp. 1655–1666, dez. 2000. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0266-5611/16/i=6/a=304>>. Acesso em: 25 jan. 2018.
- [15] ZALA, C. A., OZARD, J. M. “Matched-Field Processing in a Range-Dependent Environment”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 88, n. 2, pp. 1011–1019, ago. 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.399851>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [16] TIEMANN, C. O., PORTER, M. B., FRAZER, L. N. “Automated Model-Based Localization of Marine Mammals Near Hawaii”. In: *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295)*, v. 3, pp. 1395–1400, Honolulu, Hawaii, nov. 2001.

IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/968038/metrics>>. Acesso em: 24 jan. 2018.

- [17] BAGGEROER, A. B., KUPERMAN, W. A., SCHMIDT, H. “Matched Field Processing: Source Localization in Correlated Noise as an Optimum Parameter Estimation Problem”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 83, n. 2, pp. 571–587, 1988. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.396151>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [18] CLAY, C. S. “Optimum Time Domain Signal Transmission and Source Location in a Waveguide”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 81, n. 3, pp. 660–664, 1987. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.394834>>. Acesso em: 31 jan. 2018.
- [19] JESUS, S. M. “Localização de Fontes Acústicas em Águas Pouco Profundas”. In: *IV ETAS - Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina*, Rio de Janeiro, RJ, nov. 1999. IPqM. Disponível em: <<http://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/sjesus1.99.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2018.
- [20] WESTWOOD, E. K. “Broadband Matched-Field Source Localization”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 91, n. 5, pp. 2777–2789, maio 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.402958>>. Acesso em: 26 jan. 2018.
- [21] TIEMANN, C. O., THODE, A. M., STRALEY, J., et al. “Three-Dimensional Localization of Sperm Whales Using a Single Hydrophone”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 120, n. 4, pp. 2355–2365, out. 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.2335577>>. Acesso em: 24 jan. 2018.
- [22] PESSEK, K. *Estimativa de Distância Passiva por Método Acústico Interferométrico*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, set. 2013. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/KleberPessek.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2018.
- [23] FRANKEL, A. S., CLARK, C. W., HERMAN, L. M., et al. “Spatial Distribution, Habitat Utilization, and Social Interactions of Humpback Whales, *Megaptera Novaeangliae*, off Hawai’i, Determined Using Acoustic and Visual Techniques”, *Canadian Journal of Zoology*, v. 73, n. 6, pp. 1134–1146, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/z95-135>>. Acesso em: 24 jan. 2018.
- [24] TIEMANN, C. O., PORTER, M. B., FRAZER, L. N. “Localization of Marine Mammals Near Hawaii Using an Acoustic Propagation Model”,

- J. Acoust. Soc. Am.*, v. 115, n. 6, pp. 2834–2843, jun. 2004. Disponível em: <http://hlsresearch.com/personnel/porter/papers/JASA/TiemannPorter%202834_1.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2018.
- [25] TOLSTOY, A. *Matched Field Processing for Underwater Acoustics*. Singapore, World Scientific, 1993.
- [26] BUCKER, H. P., PORTER, M. B. “Gaussian Beams and 3-D Bottom Interacting Acoustic Systems”. In: Akal, T., Berkson, J. M. (Eds.), *Ocean Seismo-Acoustics: Low-Frequency Underwater Acoustics*, pp. 87–101, Boston, MA, Springer US, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2201-6_10>. Acesso em: 23 jan. 2018.
- [27] BUCKER, H. P., WHITNEY, J. A., YEE, G. S., et al. “Reflection of Low-Frequency Sonar Signals from a Smooth Ocean Bottom”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 37, n. 6, pp. 1037–1051, 1965. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.1909516>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [28] BAER, R. N. “Propagation Through a Three-Dimensional Eddy Including Effects on an Array”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 69, n. 1, pp. 70–75, jan. 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.385253>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [29] LEE, D., SCHULTZ, M. H. *Numerical Ocean Acoustic Propagation in Three Dimensions*. 1 ed. Farrer Road, Singapore, World Scientific, 1995.
- [30] PERKINS, J. S., BAER, R. N. “An Approximation to the Three-Dimensional Parabolic-Equation Method for Acoustic Propagation”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 72, n. 2, pp. 515–522, ago. 1982. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1121/1.388032>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [31] TAPPERT, F. D. “The Parabolic Approximation Method”. In: Keller, J. B., Papadakis, J. S. (Eds.), *Wave Propagation and Underwater Acoustics*, v. 70, *Lecture Notes in Physics*, cap. 5, pp. 224–287, New York, NY, Springer-Verlag, 1977.
- [32] SIEGMANN, W. L., KRIEGSMANN, G. A., LEE, D. “A Wide-Angle Three-Dimensional Parabolic Wave Equation”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 78, n. 2, pp. 659–664, ago. 1985. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.392434>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [33] BAER, R. N., MOSELEY, W. B. “Three-Dimensional Propagation Modeling Using the Parabolic Approximation”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 61, n. Supl.

- 1, pp. S11–S12 (resumo), 1977. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.2015414>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [34] ČERVENÝ, V., POPOV, M. M., PŠENČÍK, I. “Computation of Wave Fields in Inhomogeneous Media - Gaussian Beam Approach”, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 70, n. 1, pp. 109–128, jul. 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb06394.x>>. Acesso em: 17 fev. 2018.
- [35] PORTER, M. B., BUCKER, H. P. “Applications of Gaussian Beam Tracing to Two- and Three-Dimensional Problems in Ocean Acoustics”. In: Ames, W. F. (Ed.), *Numerical and Applied Mathematics*, J.C. Baltzer AG, pp. 335–339, 1989. Disponível em: <<http://hlsresearch.com/personnel/porter/papers/GBT%203D%20grey.pdf>>. Acesso em: 17 jan 2018.
- [36] IVANSSON, S. M. “Stochastic Ray-Trace Computations of Transmission Loss and Reverberation in 3-D Range-Dependent Environments”. In: *8th ECUA - Eighth European Conference on Underwater Acoustics*, v. 1, pp. 131–136, Carvoeiro, Portugal, jun. 2006. CINTAL, Universidade do Algarve.
- [37] COLLINS, M. D., CHIN-BING, S. A. “A Three-Dimensional Parabolic Equation Model that Includes the Effects of Rough Boundaries”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 87, n. 3, pp. 1104–1109, mar. 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.398783>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [38] BUCKER, H. P. “A Simple 3-D Gaussian Beam Propagation Model for Shallow Water”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 95, n. 5, pp. 2437–2440, maio 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.409853>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- [39] JONES, R. M., RILEY, J. P., GEORGES, T. M. *Versatile Three-Dimensional Hamiltonian Ray-Tracing Program for Acoustic Waves in the Atmosphere Above Irregular Terrain*. NOAA technical report, SAO/NASA Astrophysics Data System, ago. 1986. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1986vtdh.rept.....J>>. Acesso em: 24 jan 2018.
- [40] KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B., PERKINS, J. S., et al. “Rapid Computation of Acoustic Fields in Three-Dimensional Ocean Environments”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 89, n. 1, pp. 125–133, jan. 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.400518>>. Acesso em: 25 fev. 2018.

- [41] KUPERMAN, W. A., PERKINS, J. S. “Environmental Signal Processing (ESP): An Application of Three-Dimensional Matched Field Processing in the Ocean”. In: *Multidimensional Signal Processing Workshop (MDSP), Sixth, Session TA2*, p. 82. IEEE, set. 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/MDSP.1989.97039>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [42] PERKINS, J. S., KUPERMAN, W. A., INGENITO, F. “Environmental Symmetry Breaking: An Application of 3-D Matched-Field Processing”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 84, n. Supl. 1, pp. S18 (resumo), 1988. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.2026047>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [43] SILVA, J. R. M., PETRAGLIA, M. R., PARENTE, C. E. “Localização Passiva da Fonte Sonora Submarina em Águas Rasas Utilizando Dados Reais Coletados na Costa Brasileira”. In: *II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (II SEMENGO)*, Rio Grande, RS, 2006. Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Disponível em: <<http://www.semengo.furg.br/2006/30.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2018.
- [44] VIANNA, M. L., SOARES-FILHO, W. “Broadband Noise Propagation in a Pekeris Waveguide”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 79, n. 1, pp. 76–83, jan. 1986. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.393557>>. Acesso em: 26 jan. 2018.
- [45] ROCHA, A. P. *Aplicação de Técnica de Inversão para a Determinação da Posição de uma Fonte Sonora Monocromática em Movimento Retilíneo Uniforme no Interior de um Guia de Ondas através de Coincidência de Modos Normais (matched-mode)*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, nov. 1997.
- [46] MAIA, L. P. *Inversão Geoacústica e Localização Passiva de Fontes em Águas Rasas*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, mar. 2010. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/LussacPrestesMaia.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2018.
- [47] CHAVES, A. H. S. *Um Estudo sobre o Padrão de Interferência Sonora em Águas Rasas e sua Aplicação no Aprimoramento da Estimativa de Distância e Velocidade por Método Passivo*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, abr. 2015. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_d/AntonioHugoSaroldiChaves.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2018.

- [48] PORTER, M. B. *Signal and Noise in 3D Environments*. Ocean Acoustics Annual Report FY15, Office of Naval Research (ONR), Arlington, VA, dez. 2015. Disponível em: <<http://www.onr.navy.mil/reports/FY15/oaporter.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [49] RODRÍGUEZ, O. C., STURM, F., PETROV, P. S., et al. “Three-Dimensional Model Benchmarking for Cross-Slope Wedge Propagation”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 141, n. 5, pp. 3655–3655, maio 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.4987913>>. Acesso em: 27 jan. 2018.
- [50] PORTER, M. B. *The KRAKEN Normal Mode Program (DRAFT)*. La Spezia, Italy, maio 2001. Disponível em: <<http://oalib.hlsresearch.com/Modes/kraken.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2018.
- [51] PORTER, M. B. “BELLHOP3D User Guide”. Heat, Light, and Sound Research, Inc., jul. 2016. Disponível em: <<http://oalib.hlsresearch.com>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [52] RODRÍGUEZ, O. C. *The TRACEO3D Gaussian Beam Model*. Preliminary report, SiPLAB/FCT/Universidade do Algarve, Faro, Portugal, 2016.
- [53] STURM, F. “Examination of Signal Dispersion in a 3-D Wedge-Shaped Waveguide Using 3DWAPE”, *Acta Acustica united with Acustica*, v. 88, n. 5, pp. 714–717, set. 2002. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaua/2002/00000088/00000005/art00028>>. Acesso em: 27 jan. 2018.
- [54] JESUS, S. M., SOARES, C., ZABEL, F. “Target Detection in a AIS Modeled Shipping Noise Field off the West Coast of Portugal”. In: *4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition - UACE2017*, Koukounariés, Skiathos island, Greece, set. 2017. European Acoustics Association - EAA. Disponível em: <http://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/sjesus4.17_abs.html>. Acesso em: 27 jan. 2018.
- [55] SANTOS, A. B., FELISBERTO, P., JESUS, S. M. “Using Shipping Noise for Sound Speed Inversion in Coastal Areas”. In: *OCEANS 2017 MTS/IEEE*, pp. 1–5, Aberdeen, Scotland, jun. 2017. IEEE. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8085009>>. Acesso em: 27 jan. 2018.
- [56] FELISBERTO, P., RODRÍGUEZ, O. C., SANTOS, P., et al. “Experimental Results of Underwater Cooperative Source Localization Using a Single Acoustic Vector Sensor”, *Sensors*, v. 13, n. 7, pp. 8856–8878, jul.

2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/7/8856>>. Acesso em: 17 fev. 2018.
- [57] TARAGLIO, S., FRATICCHINI, F. “Swarm Underwater Acoustic 3D Localization: Kalman vs Monte Carlo”, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, v. 12, n. 7, pp. 102, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/61034>>. Acesso em: 1 mar. 2018.
- [58] HAYWARD, T. J. “Information-Theoretic Analysis of Iterated Bayesian Acoustic Source Localization in a Static Ocean Waveguide”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 137, n. 5, pp. 2758–2772, maio 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.4919294>>. Acesso em: 27 jan. 2018.
- [59] JIANG, Y. M., OSLER, J. “Underwater Source Localization Using a Hydrophone-Equipped Glider”. In: *21st International Congress on Acoustics - ICA2013*, v. 19, p. 070070, Montreal, Canada, jun. 2013. International Commission for Acoustics. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.4800708>>. Acesso em: 23 jan. 2018.
- [60] U.S. OFFICE OF NAVAL RESEARCH (ONR). “Ocean Acoustics Library”. Heat, Light & Sound Research, Inc. [*on-line*]. Disponível em: <<http://oalib.hlsresearch.com/>>. Acesso em: 16 fev. 2018.
- [61] SOARES, C., JESUS, S. M. “Processamento por Ajuste de Campo em Acústica Submarina e Aplicações”. In: *Jornadas do Mar: um Oceano de Oportunidades*, Lisboa, Portugal, nov. 2004. Escola Naval. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.1/5269>>. Acesso em: 11 fev. 2018.
- [62] ETTER, P. C. “Advanced Applications for Underwater Acoustic Modeling”, *Advances in Acoustics and Vibration*, v. 2012, pp. 28, jan. 2012. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/aav/2012/214839/>>. Acesso em: 28 fev 2018.
- [63] GINGRAS, D. F., GERSTOFT, P. “Inversion for Geometric and Geoacoustic Parameters in Shallow Water: Experimental Results”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 97, n. 6, pp. 3589–3598, jun. 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.412442>>. Acesso em: 10 fev. 2018.
- [64] GINGRAS, D. F. *North Elba Sea Trial Summary*. Technical report, NATO SACLANTCEN, La Spezia, Italy, ago. 1994. Disponível em: <http://spib.linse.ufsc.br/data/array/SACLANT_tech_doc.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2018.

- [65] GERSTOFT, P., GINGRAS, D. F. “Parameter Estimation Using Multifrequency Range-Dependent Acoustic Data in Shallow Water”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 99, n. 5, pp. 2839–2850, maio 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.414818>>. Acesso em: 10 fev. 2018.
- [66] MARTIN, R. L. *SACLANT Undersea Research Centre Research & Accomplishments: 1975-1989*. Special Report M-107, North Atlantic Treaty Organization, San Bartolomeo (SP), Italy, dez. 1992. Disponível em: <http://www.cmre.nato.int/about-cmre/fact-sheets/doc_download/85>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [67] BARROSO, V. J. *Metodologia para Geração de Cartas de Correntes de Maré em Sistemas Estuarinos e Recintos Portuários com Aplicação na Baía de Todos os Santos, BA*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, mar. 2009. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/VicenteBarrosoJunior.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2018.
- [68] UNIVERSIDADE DO ALGARVE. “Ocean Acoustic Modeling”. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Laboratório de Processamento de Sinais (SIPLAB/FCT/UAlg) [on-line]. Disponível em: <<http://www.siplab.fct.ualg.pt/models.shtml>>. Acesso em: 10 fev. 2018.
- [69] PORTER, M. B., TOLSTOY, A. “The Matched-Field Processing Benchmark Problems”, *Journal of Computational Acoustics*, v. 2, n. 3, pp. 161–185, set. 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1142/S0218396X94000129>>. Acesso em: 11 fev. 2018.
- [70] BARROSO, V. J. *Shallow Water Source Acoustic Localization: Use of TRACEO Ray Tracing Model in Matched-Field Processing Techniques*. Internal Report 01/15, CINTAL, Universidade do Algarve, Faro, Portugal, out. 2015. Disponível em: <http://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/rep_0115.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2018.
- [71] RODRÍGUEZ, O. C., SANTOS, P., JESUS, S. M. “Modelação Acústica Submarina de Alta Frequência Baseada em Traçamento de Raios: Revisão Teórica e Aplicações Atuais”. In: *VIII ETAS - Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina*, Rio de Janeiro, RJ, nov. 2009. Disponível em: <<http://sapiencia.ualg.pt/handle/10400.1/5226>>. Acesso em: 17 fev. 2018.
- [72] ROSMAN, P. C. C. “Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos”. In: da Silva, R. C. V. (Ed.), *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*, v. 3,

1 ed., Associação Brasileira de Recursos Hídricos, pp. 231–348, Rio de Janeiro, RJ, nov. 1997.

- [73] MEDWIN, H., CLAY, C. S. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Applications of Modern Acoustics. San Diego, CA, Academic Press, out. 1997.
- [74] PEKERIS, C. L. “Theory of Propagation of Explosive Sound in Shallow Water”, *Geological Society of America Memoirs*, v. 27, pp. 1–116, jan. 1948.
- [75] IDE, J. M., POST, R. F., FRY, W. J. “The Propagation of Underwater Sound at Low Frequencies as a Function of the Acoustic Properties of the Bottom”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 19, n. 1, pp. 283–283, 1947.
- [76] COATES, R. F. W. *The Advanced Sonar Course: Further Topics in Underwater Acoustics*. Seiche.Com Ltd., 2002.
- [77] STAKGOLD, I. *Green’s Functions and Boundary Value Problems*. 1 ed. New York, NY, John Wiley & Sons, set. 1979.
- [78] MARIN, F. O. *Tomografia Acústica Oceânica por Tempo de Percurso Modal em Águas Rasas*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, maio 2015. Disponível em: <<http://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/fmarin1.15.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2018.
- [79] PERKINS, J. S., KUPERMAN, W. A., INGENITO, F., et al. “Modeling Ambient Noise in Three-Dimensional Ocean Environments”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 93, n. 2, pp. 739–752, fev. 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.405437>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [80] LICHTÉ, V. H. “On the Influence of Horizontal Temperature Layers in Sea Water on the Range of Underwater Sound Signals”, *Physikalische Zeitschrift*, v. 20, n. 17, pp. 385–389, set. 1919. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1912/3021>>. Acesso em: 28 fev. 2018. (tradução de Wittenborn, A. F., 1977).
- [81] RODRÍGUEZ, O. C. *The TRACEO Ray Tracing Program*. SIPLAB/FCT/Universidade do Algarve, Faro, Portugal, jan. 2011. Disponível em: <<http://www.siplab.fct.ualg.pt/models/traceo/manual.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- [82] POPOV, M. M. *Ray Theory and Gaussian Beam Method for Geophysicists*. Technical report, Universidade Federal da Bahia - EDUFBA, Salvador,

- BA, 2002. Disponível em: <<http://www.cpgg.ufba.br/publicacoes/popov.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- [83] SNIEDER, R., SAMBRIDGE, M. “Ray Perturbation Theory for Traveltimes and Ray Paths in 3-D Heterogeneous Media”, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 109, n. 2, pp. 294–322, maio 1992. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00099.x>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [84] EY, E., RODRÍGUEZ, O. C. *The cTraceo User Manual*. SiPLAB/FCT/Universidade do Algarve, Faro, Portugal, jan. 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.1/5274>>. Acesso em: 17 fev. 2018.
- [85] POPOV, M. M. “A New Method of Computation of Wave Fields Using Gaussian Beams”, *Wave Motion*, v. 4, n. 1, pp. 85–97, jan. 1982. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0165-2125\(82\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0165-2125(82)90016-6)>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- [86] PORTER, M. B., BUCKER, H. P. “Gaussian Beam Tracing for Computing Ocean Acoustic Fields”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 82, n. 4, pp. 1349–1359, jun. 1987. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.395269>>. Acesso em: 17 fev. 2018.
- [87] PORTER, M. B., LIU, Y.-C. “Finite-Element Ray Tracing”. In: *Proceedings of the International Conference on Theoretical Computational Acoustics*, v. 2, pp. 947–956. World Scientific Publishing Co., 1994. Disponível em: <<http://www.hlsresearch.com/personnel/porter/papers/ICTCP%20ray%20paper.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [88] FERREIRA, M. B., BARROSO, V. J., SATO, O. T., et al. “Propagação Acústica na Água Modal Subtropical do Atlântico Sul”, *Anais Hidrográficos*, , n. tomo 72, pp. 126–140, set. 2016. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br.dhn/files/anais/ah_2015.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- [89] BABICH, V. M., POPOV, M. M. “Propagation of Concentrated Sound Beams in a Three-Dimensional Inhomogeneous Medium”, *Sov. Phys. Acoust.*, v. 27, n. 6, pp. 459–462, 1982.
- [90] PORTER, M. B. “Out-of-Plane Effects in Three-Dimensional Oceans”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 137, n. 4, pp. 2419–2419, abr. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.4920825>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

- [91] NA, Y., PARK, J., HAN, J., et al. “Bearing Error Estimation in Inhomogeneous Ocean Applying the Three-Dimensional BELLHOP Propagation Model”, *IEICE technical report. Ultrasonics*, v. 112, n. 186, pp. 77–80, ago. 2012. Disponível em: <<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009626888/en/>>. Acesso em: 3 out. 2016.
- [92] PORTER, M. B. *Out-of-Plane Effects in Ocean Acoustics*. Ocean Acoustics Annual Report FY13, Office of Naval Research (ONR), Arlington, VA, nov. 2013. Disponível em: <<http://www.onr.navy.mil/reports/FY13/oaporter.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [93] CALAZAN, R., RODRÍGUEZ, O. C. “Three-Dimensional Eigenray Search for a Vertical Line Array”. In: *4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition - UACE2017*, pp. 941–946, Koukounariés, Skiathos island, Greece, set. 2017. European Acoustics Association - EAA. Disponível em: <http://www.uaconferences.org/docs/UACE2017_Papers/941_UACE2017.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2018.
- [94] JESUS, S. M., SILVA, A. J., MARTINS, C., et al. *Underwater Acoustic Barriers Experiment UAB’07 Part A: the Hopavågen Bay*. Internal Report 05/07, CINTAL, Universidade do Algarve, Faro, Portugal, dez. 2007. Disponível em: <http://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/rep_0507.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [95] POPOV, M. M., PŠENČÍK, I. “Computation of Ray Amplitudes in Inhomogeneous Media with Curved Interfaces”, *Studia Geoph. Geod.*, v. 22, n. 3, pp. 248–258, 1978. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01627902>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [96] RODRÍGUEZ, O. C., COLLIS, J. M., SIMPSON, H. J., et al. “Seismo-Acoustic Ray Model Benchmarking Against Experimental Tank Data”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 132, n. 2, pp. 709–717, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.4734236>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [97] ČERVENÝ, V., PŠENČÍK, I. “Ray Amplitudes of Seismic Body Waves in Laterally Inhomogeneous Media”, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 57, n. 1, pp. 91–106, abr. 1979. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1979.tb03774.x>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [98] SCHMIDT, H. *SAFARI: Seismo-Acoustic Fast Field Algorithm for Range-Independent Environments. User’s Guide*. La Spezia, Italy, set. 1988. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a200581.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

- [99] BARROSO, V. J., RODRÍGUEZ, O. C., PARENTE, C. E., et al. “Use of Ray Tracing Modeling in Shallow Water Acoustic Source Localization Combined with Matched-Field Processing Techniques”, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 34, n. 3, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v34i3.830>>. Acesso em: 1 mar. 2018.
- [100] SOARES, C., WALDHORST, A., JESUS, S. M. “Matched Field Processing: Environmental Focusing and Source Tracking with Application to the North Elba Data Set”. In: *OCEANS '99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century*, v. 3, pp. 1598–1602. IEEE, set. 1999. Disponível em: <<http://w3.ualg.pt/~sjesus/pubs/c23.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2018.
- [101] HAMPTON, L. *Physics of Sound in Marine Sediments*. Marine Science 1. Austin, TX, Springer Science & Business Media, 1974.
- [102] ROUSEFF, D., EWART, T. E. “Effect of Random Sea Surface and Bottom Roughness on Propagation in Shallow Water”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 98, n. 6, pp. 3397–3404, dez. 1995. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1121/1.413790>>. Acesso em: 22 fev. 2018.
- [103] PIERSON, W. J., MOSKOWITZ, L. “A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii”, *Journal of Geophysical Research*, v. 69, n. 24, pp. 5181–5190, dez. 1964.