



DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ALVOS SUBMARINOS A PARTIR  
DE INTERFERÊNCIAS DEVIDAS AO EFEITO LLOYD-MIRROR

Diego Felipe Gimenez de Andrade

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro  
Marcos Nicolás Gallo

Rio de Janeiro  
Abril de 2020

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ALVOS SUBMARINOS A PARTIR DE  
INTERFERÊNCIAS DEVIDAS AO EFEITO LLOYD-MIRROR

Diego Felipe Gimenez de Andrade

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

Orientador: Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro  
Prof. Marcos Nicolás Gallo

Aprovada por: Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro  
Prof. Marcos Nicolás Gallo  
Dr. William Soares Filho  
Dr. Natanael Nunes de Moura Júnior

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2020

Gimenez de Andrade, Diego Felipe

Determinação de parâmetros de alvos submarinos a partir de interferências devidas ao Efeito Lloyd-Mirror/  
Diego Felipe Gimenez de Andrade – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XIV, 67p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Marcos Nicolás Gallo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 64-65.

1. Lloyd-Mirror. 2. interferência. 3. submarinos. 4. análise de movimento do alvo. I. Parente Ribeiro, Carlos Eduardo *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*Ora, a fé é a certeza de coisas  
que se esperam, a convicção de  
fatos que não se vêem. Pois pela  
fé, os antigos obtiveram bom  
testemunho. Pela fé, entendemos  
que foi o universo formado pela  
palavra de Deus, de maneira que  
o visível veio a existir das coisas  
que não aparecem. Hebreus 11: 1  
a 3. Dedico esta obra a Deus, à  
minha família e ao povo  
brasileiro*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e forças para chegar até aqui, pela minha família, pelas experiências de vida que pouquíssimos podem ter, pelo acesso à cultura e ao conhecimento e pelas realizações e conquistas que ele me permitiu alcançar. Todas essas conquistas não aconteceriam sem as orientações, conselhos e apoio de familiares, amigos e colegas de trabalho. Gostaria de agradecer a todos que me apoiaram nessa jornada:

À minha esposa Bruna Rodrigues Gimenez de Andrade pela atenção, cuidado e companheirismo em inúmeros momentos difíceis de minha vida, mas em especial por ter me tornado uma pessoa mais animada, madura e solidária, por ter comemorado comigo mais esta vitória e por ter me apoiado em todas as minhas batalhas, amo você e que Deus nos abençoe sempre.

Ao meu pai, Afonso Pires de Andrade, por ter sido um exemplo de dedicação e esforço e por ter me orientado e advertido desde cedo sobre a importância da dedicação ao estudos.

À minha mãe, Maiza Lima Gimenez, pelo sacrifício incondicional a mim dedicado. Por todo seu amor, carinho, preocupação e cuidado.

À minha querida irmã Thamiris e também ao meu irmão Pedro, pelo carinho, preocupação e companheirismo. Ao meu tio Luis Cláudio Lima Gimenez, minha avó Dalva, meus tios Vicente Gomes Nôca, Aparecida Pires Gomes, Liamara Pires e a todos os meus demais parentes pela amizade, carinho e incentivo.

Aos amigos da Marinha do Brasil, pelo constante incentivo e participação na minha formação profissional ao longo de inúmeros momentos da minha carreira: Diogo de Souza Taranto, Leonardo Cesar Cassiles de Souza, Alex Bolhosa Ferreira, Luciano Santi, Alexandre Almeida dos Santos, Leonardo Gomes, Rodrigo Baptista Pereira e seu pai, Gustavo Augusto Mascarenhas Goltz, Bruno Guimarães Silva, Alfredo Luiz Schafér, Bruno Nunes Mendes, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira, Roberto Gazola Ortiz, Maurício Rocha Feres, Leandro de Brito Lanes, Thiago Carneiro de Menezes, Leandro Amaral de Sousa e, em especial ao Pablo Salgado de Jesus, que muito colaborou com este trabalho. Muito obrigado!

Aos meus queridos professores por terem acreditado em mim e me incentivado desde o início deste curso, em especial: Ao meu orientador Carlos Eduardo Parente

Ribeiro, pelo carinho, amizade e por toda a imprescindível ajuda sem a qual não teria sido possível concluir este trabalho, ao Natanael Nunes de Moura Junior e ao seu saudoso pai Natanael Nunes de Moura por quem tenho muito carinho, ao Luiz Gallisa Guimarães e ao Fabio Nascimento pela dedicação e atenção e a todos os demais professores que me instruíram desde criança e me permitiram chegar até este momento. Obrigado Professores!

Ao meu querido amigo Diogo de Souza Taranto e também à sua esposa pela amizade, carinho, atenção e pelo apoio em inúmeros momentos difíceis que forjaram essa amizade. Agradeço em especial pelas orações e orientações espirituais que contribuíram muito para a edificação da minha família. Agradeço também aos meus amigos Jhonathan Roberto Santos Rosa, Guilherme Fernandes dos Santos e Alexandre Magalhães da Cunha pelo esforço em prol da minha conversão.

À minha amiga Bianca de Oliveira Aguiar pelo seu exemplo de determinação e coragem e por ter me convidado para presenciar e participar dos principais momentos de sua vida.

A todos os meus chefes e ex-comandantes, em especial ao CA Thadeu Marcos Orosco Coelho Lobo, CA Manoel Luiz Pavão Barroso, CMG Leonardo Coutinho de Carvalho, CMG Maurício do Nascimento Pinto, CF Gustavo de Oliveira Lotfi e ao CC Anderson Feitosa da Silva.

A todos os colegas e funcionários do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIOc) pelo carinho e atenção, muito obrigado!

Agradeço também a todos os militares do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Àttila Monteiro Aché (CIAMA) em especial ao CMG Hélio Moreira Branco Junior, CMG José Carlos Negreiros Lima, CF Carlos Alberto Leite Machado, suboficial Rodrigo Nunes Sampaio e Sargento Alberto de Souza Paixão pela ajuda e apoio administrativo.

Por fim e não menos importante, agradeço também a todos os irmãos e irmãs da Igreja Presbiteriana de Maricá, em especial ao Pastor Ronaldo Carvalho Lopes e à sua esposa Norma Boechat, ao Presbítero Marco Inácio da Costa, aos presbíteros Clair Pires dos Santos, Marcos Roberto Soares Pimenta e Neeskens Quintanilha, à irmã Aparecida Mariano da Silva, à irmã Alcimar Soares, ao irmão Bruno Boechat Damaceno Lopes e à sua esposa Fernanda Santos, ao irmão Ewerton Borges de Souza e à sua esposa Renata Santos pelas orações, pelo carinho e pelas orientações que, certamente, muito contribuíram para que eu chegasse a este momento.

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

## DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ALVOS SUBMARINOS A PARTIR DE INTERFERÊNCIAS DEVIDAS AO EFEITO LLOYD-MIRROR

Diego Felipe Gimenez de Andrade

Abril/2020

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro  
Marcos Nicolás Gallo

Programa: Engenharia Oceânica

Apresenta-se, nesta dissertação de mestrado, a possibilidade de utilização das interferências devidas ao efeito Lloyd-Mirror em prol da determinação de parâmetros de alvos submarinos, em especial a sua profundidade. Este estudo foi elaborado a partir de gravações de medições de ruídos irradiados obtidas na raia acústica do Centro de Análise de Sistemas Operativos (CASOP) localizado em Arraial do Cabo - RJ (Brasil).

As gravações de ruído irradiado foram analisadas a partir de um espectrograma desenvolvido durante essa pesquisa. Para obter os parâmetros da análise de movimento do alvo (AMA) foram elaborados programas de simulação capazes de gerar as características de um sinal submetido ao efeito Lloyd-Mirror levando em consideração a profundidade da fonte sonora, a distância entre a fonte sonora e o receptor, ângulo de marcação que o alvo faz do receptor (ângulo de proa) e a velocidade relativa entre a fonte sonora e o receptor além de realizar os cálculos característicos de uma rosa de manobras.

Os resultados dessas simulações mostram que, uma vez conhecida a direção da marcação do alvo, profundidade e velocidade do receptor, os espaçamentos entre os “mínimos” de sinal devidos à interferência destrutiva podem ser correlacionados a uma solução para a AMA que forneça a distância ao alvo, sua velocidade, rumo e o principal, sua profundidade.

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

DETERMINATION OF SUBMARINE TARGET PARAMETERS USING  
INTERFERENCES DUE TO THE LLOYD'S MIRROR EFFECT

Diego Felipe Gimenez de Andrade

April/2020

Advisors: Carlos Eduardo Parente Ribeiro  
Marcos Nicolás Gallo

Department: Ocean Engineering

This master's dissertation presents the possibility of using the interference due to the Lloyd-Mirror effect in order to determine the parameters of submarine targets, especially its depth. This study was made from recordings of irradiated noise measurements obtained in the acoustic ray of the Center for Analysis of Operating Systems (CASOP) located in Arraial do Cabo, RJ (Brazil).

The radiated noise recordings were analyzed from a spectrogram developed during this research. In order to obtain the target movement analysis (AMA) parameters, simulation programs were developed to generate the characteristics of a signal subjected to the Lloyd-Mirror effect taking into account the sound source depth, the distance between the sound source and the receiver, the marking angle that the target makes of the receiver and the relative speed between the sound source and the receiver, and performing the characteristic calculations of a maneuvering rose.

The results of these simulations show that, once the target marking direction, depth and receiver speed are known, the spacings between the signal " minimums " due to destructive interference can be correlated to a solution for AMA that provides the distance to the target, its speed, heading and the main its depth.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo Geral . . . . .	5
1.2 Objetivo Específico . . . . .	5
<b>2 Embasamento Teórico</b>	<b>6</b>
2.1 Equação da velocidade do som e a estratificação do oceano . . . . .	6
2.2 O PVS ao longo da costa Brasileira . . . . .	8
2.3 Fronteiras . . . . .	9
2.4 Principais caminhos percorridos pelas ondas sonoras . . . . .	11
<b>3 Efeito LLOYD-MIRROR</b>	<b>13</b>
3.1 Padrão de campo próximo Lloyd-Mirror . . . . .	13
3.2 Perdas por espalhamento na superfície . . . . .	18
3.3 Dados coletados . . . . .	23
3.4 Efeito observado em ruídos de Banda larga . . . . .	24
3.5 Análise de Banda Estreita . . . . .	28
3.5.1 Resolução trigonométrica aplicada um tom discreto submetido ao efeito Lloyd-Mirror . . . . .	28
<b>4 Metodologia de emprego do Efeito Lloyd-Mirror em proveito da determinação de parâmetros de alvos submarinos</b>	<b>32</b>
4.1 Programas utilizados na determinação de parâmetros de alvos sub- marinos . . . . .	32
4.1.1 Sequência de cálculos do programa simulacenario.m . . . . .	33
4.1.2 Sequência de cálculos do programa calculaparametros.m . . . . .	39
<b>5 Testes e análise de resultados</b>	<b>48</b>
5.1 Testes e simulações realizadas com os programas simulacenario.m e calculaparametros.m: . . . . .	48
5.1.1 Simulação determinística . . . . .	48

5.1.2	Simulação com alvo apresentando rumo de colisão . . . . .	51
5.1.3	Simulação com a presença de erros aleatórios na determinação dos “mínimos” . . . . .	52
5.1.4	Simulação com ruído . . . . .	55
5.1.5	Simulação com guinada do alvo . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>60</b>
6.1	Conclusões . . . . .	60
6.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	62
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>64</b>
<b>A</b>	<b>Algumas considerações matemáticas</b>	<b>66</b>

# Lista de Figuras

2.1	Perfil de Velocidade do Som (PVS) e as camadas típicas do oceano, Figura retirada de [2] . . . . .	7
2.2	Influência de bolhas na redução da velocidade do som na água retirado de [2] . . . . .	10
2.3	Principais caminhos percorridos pelas ondas sonoras, Figura 1.7 de [2]	11
3.1	Esquema básico do efeito Lloyd-Mirror, adaptado de [2]. . . . .	14
3.2	Comparação entre a solução exata (preto) e a fórmula simplificada [2] (amarelo) . . . . .	18
3.3	Coefficientes de reflexão a serem multiplicados no termo referente ao sinal refletido na superfície para tons discretos de 50Hz e 400Hz em função do estado do mar adotando grazing angle de $30^\circ$ . . . . .	20
3.4	Em preto temos um sinal sob efeito Lloyd-Mirror considerando o mar um refletor perfeitamente liso e em azul o mesmo sinal considerando o mar rugoso e o coeficiente de reflexão de -0,73 . . . . .	21
3.5	Perda na superfície em dB para tons discretos de 50Hz e 400Hz em função do estado do mar adotando grazing angle de $30^\circ$ . . . . .	22
3.6	Derrota observada durante uma das gravações de medição de ruído irradiado na raia acústica do CASOP. . . . .	23
3.7	Exemplo de estrias obtidas em uma das gravações. O PMA está próximo do ponto 5000, onde as estrias ficam na direção horizontal. . . . .	24
3.8	Exemplo de estrias obtidas em uma gravação referente a uma fonte sonora pertencente a uma classe completamente diferente do representado na Figura 3.7 . . . . .	25
3.9	“Mínimos” observados durante uma gravação . . . . .	26
3.10	“Mínimos” observados e ajustados por um polinômio . . . . .	27
3.11	“Mínimos” de sinal simulados que podem ser comparados aos obtidos através de uma gravação ou em uma medição instantânea . . . . .	27
3.12	Resolução trigonométrica do Efeito Lloyd-Mirror . . . . .	29

3.13	Tom discreto de 50Hz gerado por um submarino a 150m de profundidade. O sinal é submetido ao efeito Lloyd-Mirror sendo recebido por outro submarino a 250m de profundidade . . . . .	30
4.1	Representação em uma Rosa de Manobras da situação de rumo de colisão entre dois alvos, na Figura podemos observar o rumo do submarino que está recebendo o sinal ( $R_r$ ), a marcação que o receptor faz do alvo $M_a$ , o Rumo do alvo ( $R_a$ ), a velocidade do alvo ( $V_a$ ) e três intervalos de tempo entre “mínimos” $dt_1$ , $dt_2$ e $dt_3$ . A profundidade e a velocidade relativa serão determinados em tempo real. . . . .	33
4.2	Representação da Matriz1. Essa matriz armazena em suas quatro primeiras linhas os parâmetros do alvo (distância, profundidade, ângulo de proa e velocidade relativa). . . . .	35
4.3	Representação da Matriz6. Essa matriz armazena os valores de intervalos de “mínimos” obtidos de uma coluna da matriz2). . . . .	36
4.4	Representação da Matriz5. Nessa matriz, as colunas contendo intervalos de “mínimos” obtidas na matriz6 são “empilhadas”. . . . .	37
4.5	Representação de um tom discreto de 50Hz à esquerda e de um tom discreto de 400Hz à direita, ambos sob influência do efeito Lloyd-Mirror. Esta Figura foi obtida através de uma simulação considerando a fonte sonora a 100m de profundidade, o receptor a 150m de profundidade, a distância entre ambos de 3000m e uma superfície livre de rugosidades característica de estado do mar zero. . . . .	38
4.6	Diagrama de blocos ilustrando os principais processos realizados pelo programa simulacenario.m. . . . .	39
4.7	Representação de parâmetros simulados armazenados na Matriz2. Na Figura podemos observar alguns intervalos entre “mínimos”. . . . .	40
4.8	Representação da comparação entre um sinal real e um sinal simulado realizada pelo programa calculaparametros.m. A melhor solução é aquela que fornece o menor resultado após a diferença entre a matriz4(representada à esquerda do sinal de menos) e a matriz7(representada à direita do sinal de menos). . . . .	41
4.9	Representação da coluna da Matriz8 que fornece o melhor resultado após a comparação entre um sinal real e um sinal simulado. Nesse caso em particular, o resultado fornece valor zero em todas as linhas, pois foi realizada uma simulação determinística. Ou seja, é um caso em que há uma correlação perfeita, como será apresentado no próximo capítulo. . . . .	42

4.10	Representação em uma Rosa de Manobras da situação em que o alvo não está em rumo de colisão. Na figura $R_r$ e $V_r$ são o rumo e a velocidade do nosso submarino, $\hat{A}$ o ângulo de proa, $r_1$ e $r$ as distâncias ao longo da marcação relativa do alvo, $a_1$ a linha de movimento relativo (dmr) do alvo, $r_{pma}$ a distância ao alvo no PMA e $N$ é o valor de uma das várias marcações sucessivas que serão obtidas. . . . .	43
4.11	Representação em um “calunga” onde podemos observar o ângulo $\hat{A}$ da simulação (vetora), o novo ângulo inicial $AA = A+N$ correspondente ao primeiro “mínimo”, o vetor de distância inicial de simulação (Vetordist), a primeira distância percorrida ao longo da dmr ( $a_1$ ), o acréscimo do ângulo devido à variação de marcação do alvo ( $N$ ) entre a marcação inicial do alvo e a marcação do alvo no instante de ocorrência do primeiro “mínimo” e a distância $R_1$ ao alvo no instante da ocorrência do primeiro “mínimo”. Este é o novo ponto da partida: $AA$ , $R_1$ , $N$ , feito pelo programa simulacenarios.m após a detecção do primeiro “mínimo”. . . . .	44
4.12	Representação em um “calunga” onde podemos observar o ângulo entre a dmr e a marcação inicial do primeiro mínimo ( $AA$ ), o ângulo $F$ entre a dmr e o norte verdadeiro, o ângulo ( $FF$ ) entre a marcação atual do alvo e o eixo horizontal. Esse ângulo é usado para plotagem de um “mínimo”. A distância inicial $R_1$ (ao primeiro mínimo), a distância $R?$ a um “mínimo” qualquer, o ângulo $N$ entre a marcação de um “mínimo” e a marcação inicial, o triângulo de velocidades $EGH$ , o ângulo $E$ (ângulo superior no triângulo de velocidades), o vetor $V_r$ correspondente à velocidade do observador, o vetor alvo correspondente à velocidade do alvo, o vetor $V_{rel}$ correspondente à velocidade relativa entre o alvo e o observador, o ângulo $H$ e o ângulo $G$ . . . . .	45
4.13	Diagrama de blocos ilustrando os principais processos realizados pelo programa calculacolisao.m. As plotagens em uma Rosa de Manobras são feitas com um programa auxiliar denominado rosademano-bras13.m desenvolvido ao longo dessa pesquisa. . . . .	47
5.1	Representação da coluna da Matriz $\delta$ que fornece o melhor resultado após a comparação entre um sinal real e um sinal simulado. Nesse caso em particular, o resultado fornece valor zero em todas as linhas pois foi realizada uma simulação determinística, ou seja, é um caso perfeito. . . . .	49

5.2	Ilustração representando o resultado obtido após uma simulação determinística. . . . .	50
5.3	Resultado obtido após uma simulação determinística plotado em uma Rosa de Manobras. . . . .	51
5.4	Resultado obtido após uma simulação de um caso de alvo em rumo de colisão plotado em uma Rosa de Manobras. . . . .	52
5.5	Resultado armazenado na matriz8. Observe que, a coluna de solução não mais apresenta valores de zeros, mas é a que apresenta os menores valores. Ou seja, essa coluna é a que apresenta melhor correlação e, por isso, representa melhor a situação que está sendo analisada. . . .	53
5.6	Plotagem em uma Rosa de Manobras do resultado de uma simulação considerando erro aleatório na determinação dos “mínimos”. Nesse teste foram adicionados valores aleatórios obtidos a partir de uma distribuição uniforme aos intervalos entre “mínimos” da coluna 20393 gerada pelo programa simulacenarios.m e utilizada para simular um sinal real. Após o teste, o programa apresentou como solução a coluna 20393. Ou seja, nesse caso, conseguiu-se obter o resultado esperado, mesmo na presença de erro aleatório. . . . .	54
5.7	Representação de dois diferentes cenários que são gerados a partir de diferentes valores considerando erros aleatórios na determinação dos “mínimos”. . . . .	55
5.8	Representação do sinal acrescido de um ruído aleatório com distribuição uniforme à esquerda e da plotagem da solução do teste em uma Rosa de Manobras à direita. . . . .	56
5.9	Representação do mesmo sinal, acrescido de um ruído aleatório com distribuição uniforme de menor intensidade que o ilustrado na Figura 5.8 à esquerda, e da plotagem da solução do teste em uma Rosa de Manobras à direita. . . . .	57
5.10	Representação da comparação entre os resultados obtidos e armazenados na matriz8 para a coluna 20393 considerando o acréscimo de dois diferentes ruídos aleatórios com distribuição uniforme ao sinal. . .	58
5.11	Representação da situação em que o alvo efetua uma guinada durante a detecção dos intervalos entre os “mínimos. . . . .	59

# Capítulo 1

## Introdução

A propagação sonora debaixo d'água vem sendo utilizada por animais marinhos como um método de localização e comunicação há milhões de anos. Uma das mais antigas referências ao estudo do som debaixo da água remonta a 1490 quando Leonardo Da Vinci, dois anos antes de Colombo descobrir a América registrou em suas anotações que: “Se você parar com o seu navio no mar, introduzir a extremidade de um tubo na água e colocar o seu ouvido na outra extremidade do tubo, você ouvirá navios a grande distância de você” [2]. Alguns séculos depois, mais precisamente em 1827, Colladon e Sturm realizaram uma experiência no Lago de Genebra, na Suíça que se tornou o primeiro registro de medição da velocidade do som na água, o que contribuiu significativamente para o estudo da acústica submarina, tendo sido obtido o valor de 1435 m/s, que se mostrou uma excelente aproximação[5].

Uma lista impressionante de físicos e matemáticos, que vão desde Galileu e Newton até Rayleigh e além, poderia ser citada em função de grandes contribuições para a teoria da acústica em gases, líquidos e sólidos[2]. Nesse sentido, a história da acústica parece uma verdadeira disputa entre físicos e matemáticos. As disputas daqueles dias envolveram gigantes da ciência e não eram para os intelectualmente mansos. Por exemplo, as ideias de Euler e de Lagrange sobre a propagação do som foram atacadas de forma bastante enérgica por d'Alembert. Este último foi o primeiro a desenvolver a equação diferencial parcial que descreve o movimento de vibração de uma corda, a mesma a que hoje em dia nos referimos como a equação da onda[2]. Cabe ressaltar que, não dispondo de computadores atuais ou métodos numéricos associados, ele desenvolveu um método para resolver este tipo de equação: separação de variáveis[2].

O processamento de sinais acústicos sempre foi objeto de estudo das principais potências marítimas em função de sua aplicabilidade para fins civis e militares.

A utilização de sistemas sonares (Sound Navigation and Ranging) para fins civis ganhou forte incentivo após a tragédia do Titanic em 1912[5], que poderia ter sido evitada com a utilização de um sistema sonar capaz de detectar obstáculos

e evoluiu em função da necessidade de se desenvolver sistemas capazes de contribuir para evitar o encalhe de navios (ecobatímetro), realizar medições de correntes oceânicas (ADCP), tomografia acústica do ambiente marinho e estimativas de condições meteo-oceanográficas e localização de cardumes em prol da pesca. Aqui cabe ressaltar que o fenômeno que será apresentado também encontra utilizações aplicáveis à biologia marinha. Em [10] são apresentados estudos que analisam a viabilidade de utilizar o Efeito Lloyd-Mirror para localizar cetáceos passivamente.

A possibilidade de prospecção de petróleo a partir do fundo do mar gerou um novo e notório incentivo ao estudo da sondagem (processo no qual um navio ou embarcação sonda uma área seguindo linhas contínuas, uniformemente espaçadas, cujas sondagens indicam as profundidades de uma área e que representa o relevo submarino de uma faixa), perfilagem sísmica (processo que utiliza fontes acústicas que emitem frequências geralmente inferiores a 20kHz para investigação da região abaixo da superfície), imageamento de alta resolução (processo que consiste em gerar imagens de alta resolução do leito marinho e de objetos que estejam abaixo da superfície do mar e, também da comunicação submarina em função da necessidade de realizar operação com sensores e instrumentos autônomos submarinos remotamente operados.

No meio militar, a guerra submarina já era uma realidade antes da Primeira Guerra Mundial e, a relação entre o conhecimento da acústica submarina e sua aplicabilidade para fins militares tornou-se extremamente evidente durante a Segunda Guerra Mundial, quando submarinos alemães ameaçaram a livre navegação no oceano Atlântico. O povo brasileiro experimentou, em um passado não muito distante, a capacidade de emprego desses meios navais. Além de ser um operador dessas fascinantes máquinas, o Brasil também sofreu baixas devido ao emprego dos mesmos por nações inimigas durante as duas grandes guerras mundiais[7]. Cabe ressaltar que, ao longo da Segunda Guerra Mundial, um total de trinta e cinco navios brasileiros foram afundados por submarinos alemães e italianos. Desse total, trinta e três eram navios mercantes[7]. O total de mortos no mar superou as baixas sofridas pela Força Expedicionária Brasileira na Itália[7]. Diante do exposto, não é difícil perceber a dificuldade de se detectar esses meios navais que, obviamente, graças ao avanço tecnológico, se tornam cada vez mais silenciosos, discretos e eficientes.

O efeito de interferência de imagem, também conhecido como espelho de Lloyd ou Lloyd-Mirror, batizado com esse nome em homenagem ao matemático Humphrey Lloyd (1800-1881), foi estudado durante a Segunda Guerra Mundial com o objetivo de avaliar as potencialidades do seu emprego na acústica submarina e na análise sonar[1].

Segundo a revista *Acoustics Today* [1], esse efeito de interferências foi estudado pelo Comitê Nacional de Pesquisa e Defesa (NDRC). Em 1945, o NDRC emitiu um

relatório técnico de vinte volumes resumindo essa pesquisa e os Livros Vermelhos considerados de alto interesse para a acústica submarina, que posteriormente se tornaram os volumes básicos e essenciais da doutrina de guerra antissubmarino (guerra A/S)[1].

Após a Segunda Guerra Mundial, diante das experiências vividas, as principais potências militares se debruçaram sobre a acústica submarina desenvolvendo sonares e armas de capacidade cada vez maior, com o evidente objetivo de garantir sua liberdade de operação no contexto da Guerra Fria.

Em 1969 os estudos foram reimpressos pelo Comando de Material da Marinha Norte-Americana (NAVMAT) e utilizados como referência de muitos indivíduos e instituições, tais como a divisão de pesquisa militar da universidade da Califórnia, o Instituto oceanográfico de Woods Hole, o Instituto de tecnologia e laboratório de acústica submarina de Massachusetts, laboratório da Divisão de pesquisa militar da Universidade Colúmbia, dentre outros[1].

Após o termino da Guerra Fria, as principais potências militares começaram a se preocupar com um outro tipo de “inimigo”, os submarinos convencionais, vendidos em larga escala para países subdesenvolvidos que, muitas vezes, mostram-se politicamente instáveis e, que podem ser usados por marinhas de recursos limitados, mas que, por suas características de baixa emissão de ruídos, apresentam-se como uma arma praticamente “stealth” (indetectável), ou seja, digna de atenção em função da potencialidade e riscos inerentes ao emprego dessas armas, em especial como ameaça ao comércio marítimo e ao direito de livre navegação.

Sendo assim, os estudos relativos ao Efeito Lloyd-Mirror ganharam nova ênfase face à necessidade contínua de monitoramento e defesa da soberania em águas territoriais e Zonas Econômicas Exclusivas em função da sua aplicabilidade para meios de busca e guerra antissubmarino e, também, para os próprios submarinos pois lhes permite realizar a determinação da Solução da Análise do movimento do Alvo (AMA) “solução do alvo” de forma passiva (não requer emissões de energia por parte do submarino, garantindo-lhe a condição de silêncio necessária para permanecer “stealth” ) uma vez que, um mar calmo com superfície “especular” (que possa ser tratado como um espelho), e um arranjo de hidrofones aliado ao software ideal são os únicos requisitos necessários para se analisar esse efeito de geometria conhecida. A aplicação do Efeito Lloyd-Mirror em estudos científicos recentes voltados para a determinação da distância a um alvo submarino podem ser observados em alguns artigos e teses tais como em [8], onde o autor utiliza o método invariante de guia de ondas para fornecer um modelo alternativo para as formações de estrias observadas quando as fontes passam pelo PMA[8]. Um outro exemplo de artigo que também estuda a determinação da distância e da profundidade do alvo é apresentado em [9] onde o autor afirma que a estrutura do padrão Lloyd-Mirror é devida

à distância e à profundidade da fonte, e que portanto, seu estudo permite a extração dessas duas grandezas e reitera que, enquanto os níveis de banda larga são frequentemente baixos demais para permitir um completo padrão para ser analisado, o significativamente mais alto nível das linhas de frequência estreitas (narrowband) também carrega a modulação de interferência, permitindo a extração de informações moduladas a partir dessas linhas[9].

À medida que as redes de modems de comunicação e hidrofones acústicos se tornam difundidas no ambiente submarino, surge a oportunidade de usar esses sistemas para monitorar o campo acústico, detectar a presença de embarcações marítimas e extrair de forma passiva várias informações do ruído irradiado dessas fontes sonoras, tais como: características de propulsão e sistemas de máquinas auxiliares empregados (geradores, bombas...), níveis de cavitação, velocidade, distância e assinaturas acústicas dessas fontes sonoras, como sugerido em [8].

Através de sua capacidade de detectar, rastrear e identificar alvos de interesse, uma rede de detecção submarina que empregue modems e hidrofones acústicos para detecção e comunicação[8] poderia aumentar, consideravelmente, tanto a segurança de águas costeiras, quanto a de zonas portuárias, além de contribuir para a segurança do tráfego marítimo internacional.

O objetivo desta dissertação consiste em determinar parâmetros de alvos submarinos (profundidade, velocidade, distância e rumo), a partir de interferências devidas ao efeito Lloyd-Mirror. Durante esta pesquisa foi realizado processamento acústico de séries temporais de gravações de ruídos irradiados por diferentes meios marítimos fornecidas pela Marinha do Brasil. Assim sendo, foram testadas formulações matemáticas desenvolvidas no estudo do efeito de Lloyd-Mirror, um efeito amplamente conhecido nos estudos da óptica e que vem sendo observado na análise de espectrogramas relativos a eventos em que embarcações são gravadas enquanto passam próximo de hidrofones.

Durante esse estudo foi analisada a viabilidade técnica de se utilizar esse efeito natural em prol aplicações táticas e de monitoramento acústico que poderão contribuir e ser aplicadas em sistemas de hidrofones dedicados à vigilância e monitoramento acústico da costa e defesa portuária, sistemas de sonobóias dedicadas a localização de submarinos e, por fim, poderão também ser aplicadas a sonares utilizados por submarinos. Nesta pesquisa foram aplicadas técnicas matemáticas ao processamento dos sinais obtidos com objetivo de, a partir da análise de espectrogramas, determinar a velocidade, distância em relação ao hidrofone e a profundidade da fonte sonora, através dos efeitos e consequências que interferências devidas ao efeito de Lloyd-Mirror acarretam em sinais de banda larga (Broadband) e de banda estreita (Narrowband).

## **1.1 Objetivo Geral**

Desenvolver metodologias para análise de sinais acústicos gerados por ruídos de banda larga e de banda estreita irradiados por navios ou submarinos que apresentem interferências devidas ao efeito Lloyd-mirror.

## **1.2 Objetivo Específico**

O objetivo específico desta dissertação consiste em determinar técnicas que permitam obter os parâmetros de alvos submarinos (profundidade, velocidade, distância e rumo) a partir de interferências devidas ao efeito de Lloyd-Mirror.

# Capítulo 2

## Embasamento Teórico

### 2.1 Equação da velocidade do som e a estratificação do oceano

O oceano age como um guia de ondas acústico[2], tendo como limite superior a superfície, onde interage com a atmosfera e como limite inferior o fundo do mar, onde interage com vários tipos de “solos” ou leitos marinhos diferentes com características variáveis de relevo e formação química.

A velocidade do som no guia de ondas desempenha o mesmo papel que o índice de refração faz na óptica[2], e normalmente, essa velocidade é relacionada à densidade e à compressibilidade dos fluidos [2].

No oceano, a densidade está relacionada à pressão estática, salinidade e à temperatura[2]. A velocidade do som no oceano é uma função crescente de temperatura, salinidade, e pressão, sendo esta última uma função de profundidade. Costuma-se expressar a velocidade do som ( $c$ ) como uma função empírica de três variáveis independentes: temperatura ( $T$ ), em graus centígrados; salinidade ( $S$ ), em partes por mil; e profundidade ( $z$ ), em metros. Uma expressão simplificada para essa dependência é[2]:

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016Z \quad (2.1)$$

Mudanças sazonais e diurnas afetam os parâmetros oceanográficos no oceano. Além disso, todos esses parâmetros variam em função da geografia[2]. Na Figura 2.1, pode-se observar um conjunto típico de perfis de velocidade do som indicando a maior variabilidade perto da superfície em função da estação climática e da hora do dia.

A influência da temperatura na variação do Perfil de Velocidade do Som (PVS) pode ser medida e observada ao longo do ano e também ao longo do dia. Durante a

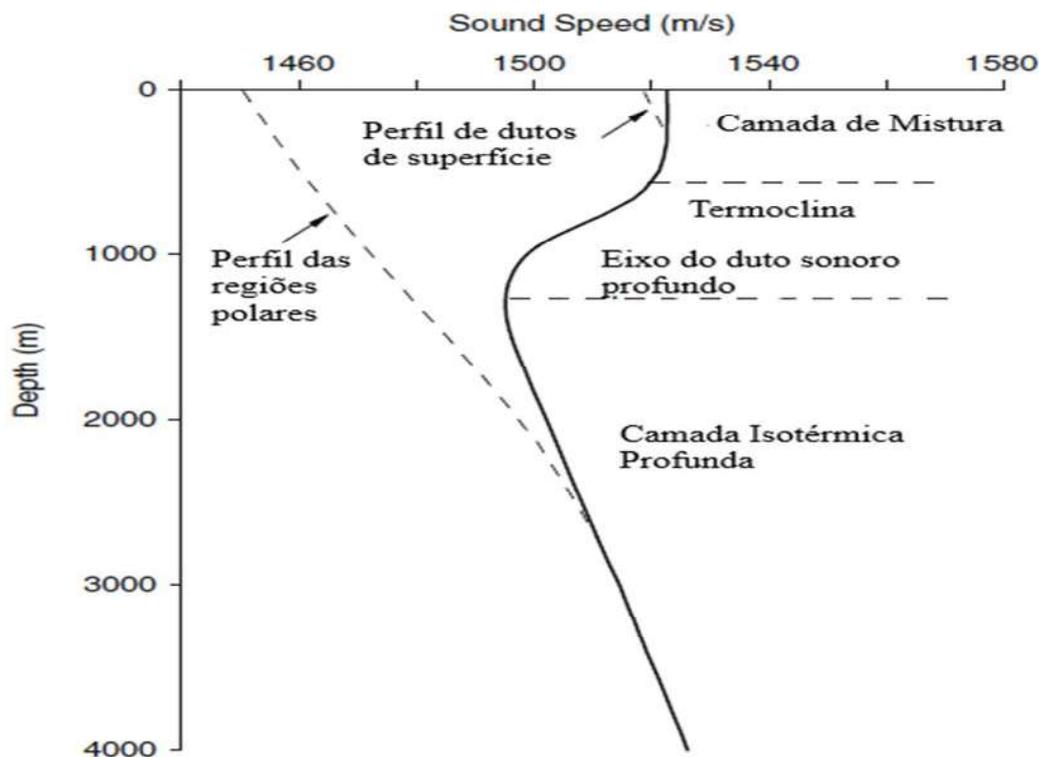


Figura 2.1: Perfil de Velocidade do Som (PVS) e as camadas típicas do oceano, Figura retirada de [2]

estação mais quente e, também, na parte mais quente do dia, quando a temperatura aumenta em função de um maior aquecimento da superfície do mar, observa-se que a velocidade do som se torna maior nessa região. Esse aquecimento próximo da superfície (e subsequente resfriamento) tem um profundo efeito nos sonares das embarcações de superfície[2]. Assim, o aquecimento diurno causa desempenho de sonar mais fraco à tarde[2], um fenômeno conhecido como efeito da tarde. A variabilidade sazonal, no entanto, é muito maior e, portanto, mais importante no que diz respeito à acústica submarina.

Em regiões não polares, as propriedades oceanográficas da água perto da superfície resultam da mistura devida à atividade do vento e das ondas na interface entre o ar e o mar[2]. Geralmente, essa camada próxima à superfície apresenta uma temperatura constante, exceto quando a superfície está calma e quente[2]. Assim, nesta camada mista isotérmica, temos um perfil de velocidade do som que aumenta suavemente com a profundidade por causa do efeito do gradiente de pressão[2], o último termo na Equação (2.1), Essa é a região do duto de superfície, e sua existência depende das condições oceanográficas próximas à superfície. Note que quanto mais agitada a parte superior da camada, mais profunda se torna a camada de mistura e menos provável se torna a possibilidade de haver qualquer fuga de raios dessa camada.

Portanto, a tempestade atmosférica aliada ao efeito do vento pode interferir misturando as águas próximas à superfície, de modo que um duto seja criado ou, caso já exista, tenha suas dimensões ampliadas[2].

Abaixo da camada de mistura, observa-se a presença de uma camada denominada termoclina, onde a temperatura diminui com profundidade e, portanto, a velocidade do som também diminui gradativamente[2]. Abaixo da termoclina, observa-se uma região de temperatura praticamente constante com valores típicos de 4°C, podendo chegar a 2°C, em função de propriedades termodinâmicas da água salgada submetida a alta pressão) e a velocidade do som aumenta devido a esse aumento da pressão que ocorre em função do aumento da profundidade, essa região é conhecida como isotérmica profunda[2].

Portanto, entre a camada de mistura e a região isotérmica profunda, observa-se um ponto de inflexão no PVS, esse efeito é devido à redução da velocidade do som (em função da queda de temperatura) até um valor mínimo, quando então começa novamente a aumentar em função do aumento da pressão devido ao aumento da profundidade. Essa velocidade mínima é denominada eixo do canal ou duto profundo de som. Cabe ressaltar que, nas regiões polares, a água é mais fria perto da superfície e, decorre daí que, a velocidade de som mínima ocorre na interface oceano-ar (ou gelo) como indicado na Figura 2.1. Em regiões da plataforma continental (águas rasas) com profundidades da ordem de algumas centenas de metros, apenas a parte superior do PVS na Figura 2.1 é relevante. Esta região superior depende da estação e da hora do dia, que, por sua vez, afetam a propagação do som na coluna de água.

## 2.2 O PVS ao longo da costa Brasileira

É importante destacar que essa estrutura da velocidade do som do oceano é variável pois o oceano possui seu próprio sistema climático. Esse sistema apresenta fenômenos de mesoescala que, quando estimados, contêm mais de 90% da energia cinética dos oceanos. Some-se a isso a influência das correntes, no caso da costa brasileira, poderíamos citar a forte influência da Corrente do Brasil, Corrente das Guianas e da corrente das Falklands.

A corrente das Guianas e a corrente do Brasil surgem a partir da divisão da corrente Sul Equatorial[12]e [13] quando esta encontra a costa brasileira deslocando-se no sentido leste-oeste. Dessa divisão, surgem dois ramos: a corrente do Brasil (que segue no sentido sul), e a corrente das Guianas (que segue no sentido sentido noroeste), dirigindo-se ao Caribe. Ambas são correntes de águas não profundas e apresentam temperatura quente, pois se originam de áreas equatoriais[12], ambas influem diretamente na formação da camada de mistura. A corrente do Brasil segue movimento paralelo à costa leste da América do Sul e, após pós cruzar a altura do

Rio da Prata, encontra-se com a Corrente das Malvinas, que é uma corrente fria, característica da região ao sul do paralelo  $45^\circ$ .

A Corrente de Falklands ou das Malvinas é proveniente das Malvinas e banha toda costa da Argentina e do Uruguai e, durante parte do ano chega às regiões Sul e Sudeste do Brasil. Sua influência na precipitação pluviométrica e clima vão até o paralelo de latitude  $18^\circ$ [13].

## 2.3 Fronteiras

Conforme previamente comentado, a propagação do som nos oceanos requer compreensão de que o oceano atua como um guia de ondas tendo a superfície do mar como limite superior onde, em função da grande diferença de impedância em relação ao ar, essa fronteira pode ser tratada como um refletor quase perfeito e, como seu limite inferior, esse guia de ondas possui o fundo do mar, um limite com perdas e que apresenta uma topografia fortemente variável em todas as bacias oceânicas. Ambos os limites apresentam uma rugosidade de pequena escala associada[2]. No caso da superfície por exemplo, observam-se as ondas gravitacionais superficiais que causam espalhamento das ondas sonoras que chegam até a superfície.

Em termos de modelagem acústica, o fundo do mar é definitivamente o limite mais complexo, exibindo características de refletividade vastamente diferentes em diferentes localizações[2]. O efeito de espalhamento na superfície será abordado com maiores detalhes no capítulo 3.

Um outro efeito muito importante para o estudo da propagação acústica é a infusão bolhas de ar. Embora a concentração volumétrica de ar seja relativamente pequena, geralmente uma pequena fração de 1%, o efeito no campo acústico pode ser significativo uma vez que a velocidade do som depende do módulo de volume do fluido e da densidade[2].

A partir da Figura 2.2 retirada de [2] pode-se observar que, mesmo com pequenas concentrações de bolhas reduzindo velocidade do som para frações de volume acima de 0,1 %, a velocidade de som efetiva é menor que a velocidade do som no ar[2].

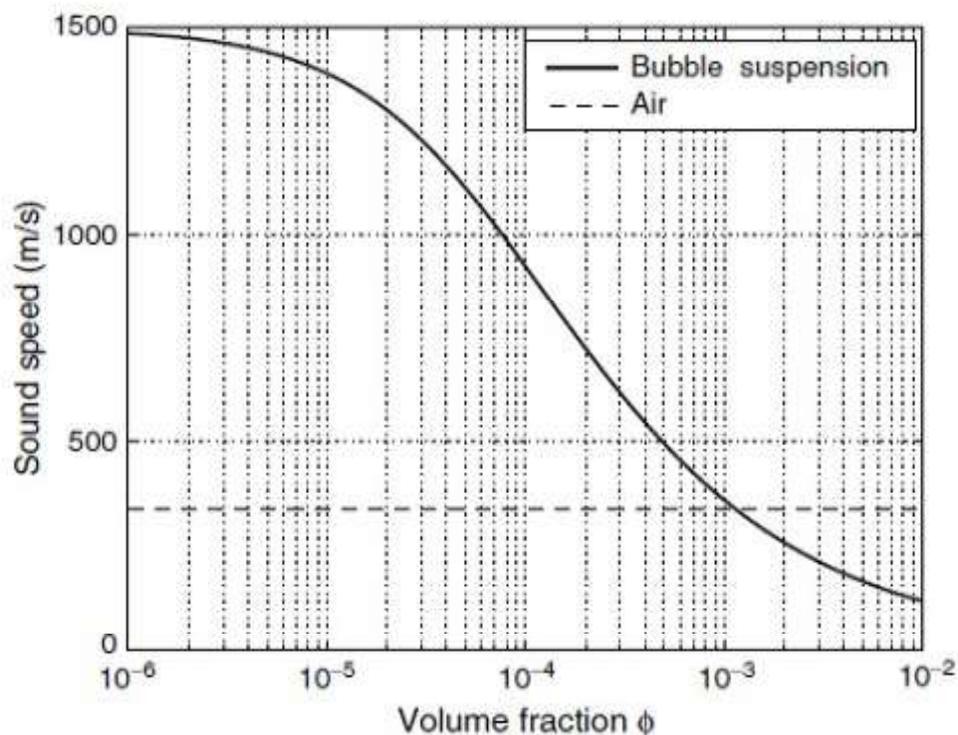


Figura 2.2: Influência de bolhas na redução da velocidade do som na água retirado de [2]

Cabe ressaltar que bolhas de gás também podem impactar no caminho de raios sonoros que se reflitam no fundo, onde pode ocorrer a produção de gases devidos a processos de decomposição biológica. A estrutura do fundo do oceano depende da geologia local. Mas, em geral, consiste de uma fina estratificação de sedimentos sobre a crosta oceânica nas regiões mais profundas e estratificação relativamente espessa sobre crosta na plataforma continental[2].

A natureza da estratificação depende de muitos fatores, incluindo idade geológica e atividade geológica local[2]. Assim, sedimentos relativamente recentes serão caracterizados por uma estratificação plana paralela ao fundo do mar, enquanto depósitos de sedimentos mais antigos e sedimentos mais próximos aos limites da placa continental podem ter sofrido deformações mais significativas.

Outras características geológicas podem introduzir deformações na estratificação de sedimentos dando origem a diapiros ou falhas geológicas salinas uma vez que a salinidade também influencia na velocidade do som.

A importância de tratar o fundo do oceano com precisão nos modelos numéricos depende de fatores como separação fonte-receptor, frequência da fonte e profundidade do oceano[2]. Assim, a interação com o fundo é, em geral, sem importância para grandes faixas de distâncias, altas frequências e águas profundas devido ao perfil de velocidade de som refrativo para cima[2]. Por outro lado, um correto tra-

tamento do fundo como um meio viscoelástico (estratificado) é crucial para o curto alcance, propagação de baixa frequência ou águas rasas.[2]

## 2.4 Principais caminhos percorridos pelas ondas sonoras

Nos oceanos, diferentes perfis de propagação podem ser observados como consequência dos diferentes PVS. Os diferentes caminhos percorridos pela energia sonora podem ser entendidos a partir da lei de Snell, que relaciona o ângulo do raio (frente de onda), em relação à horizontal, à velocidade do som local. Não é difícil perceber que como uma implicação dessa lei, o som “se curve” localmente em direção a regiões de baixa velocidade do som ou seja “aprisionado” em regiões de baixa velocidade.

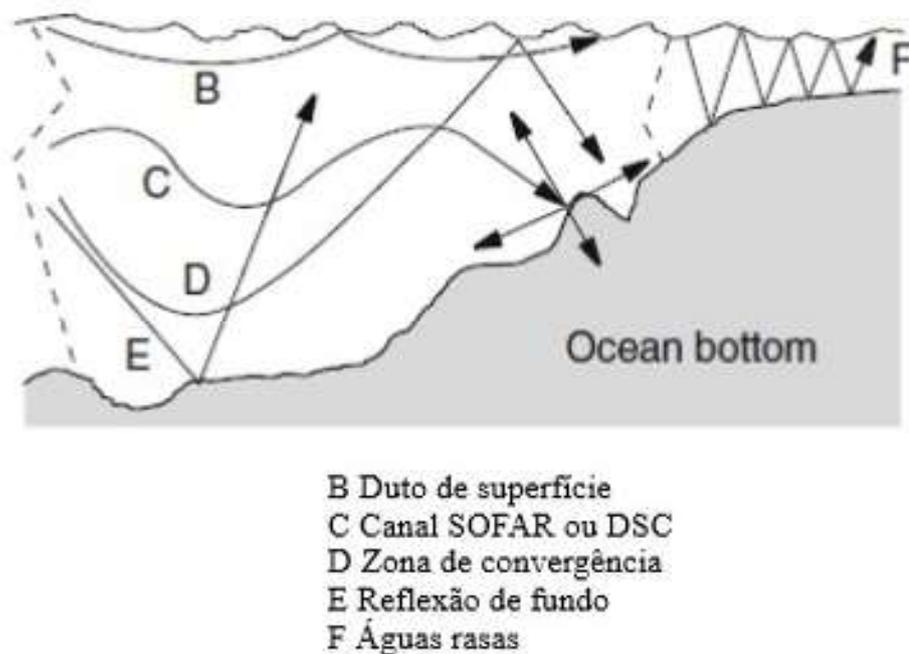


Figura 2.3: Principais caminhos percorridos pelas ondas sonoras, Figura 1.7 de [2]

A Figura 2.3 obtida em [2] apresenta os principais caminhos percorridos pelas ondas sonoras na acústica submarina.

O Caminho B corresponde à propagação no duto de superfície, onde a velocidade mínima do som está na superfície do oceano. No Caminho C, representado por um raio que deixa uma fonte mais profunda em um ângulo horizontal raso, observa-se a propagação característica do Canal SOFAR (Sound Fixing And Ranging) ou

DSC(Deep Sound Channel), um canal de som profundo, cujo eixo está na velocidade mínima de som exibida que atua como um guia de ondas para ondas de som de baixa frequência. Dentro deste canal, as ondas sonoras podem viajar milhares de milhas antes de se dissiparem, uma vez que, para as latitudes médias, o som no canal profundo se propaga sem interagir com fronteiras onde poderia ocorrer perdas. O Caminho D, que apresenta ângulos levemente mais íngremes (menores ângulos de incidência) do que aqueles associados com o Caminho C, é a propagação da zona de convergência, especialmente periódica (35 a 70 km). Esse fenômeno produz zonas de alta intensidade perto da superfície por causa da natureza refrativa ascendente do perfil de velocidade de som profundo.

Conforme representado na Figura 2.1, pode haver uma profundidade na camada isotérmica profunda na qual a velocidade do som seja a mesma que a observada na superfície, essa profundidade é chamada de profundidade crítica e, com efeito, é o limite inferior do canal de som profundo. Um receptor abaixo desta profundidade só receberá som de fontes rasas distantes via caminhos que interagem na superfície[2].

Uma profundidade crítica positiva, ou “excesso de profundidade” permite que o ambiente suporte propagação de longa distância sem interação de fundo, enquanto que a profundidade crítica negativa implica que o fundo do mar é a fronteira do canal de som profundo.

A reflexão de fundo vista no Caminho E, também é um fenômeno periódico mas apresenta uma distância de propagação total mais curta por causa de perdas quando o som é refletido do fundo do oceano[2]. Por fim, o Caminho F representa uma propagação característica em uma regiões de águas rasas, como uma plataforma continental. Nessa região, o som é canalizado em um guia de ondas delimitado acima pela superfície do oceano e abaixo pelo fundo do oceano. Existe uma classificação alternativa de caminhos de raios no oceano que é brevemente introduzida em [2]. Esta classificação distingue quatro tipos de raios: (1) raios propagando apenas via caminho refratado e chamados raios refratados refratados (RR) representados pelo Caminho C; (2) raios refletidos na superfície do mar e chamados de raio refratado superfície-refletido (RSR), representados pelos Caminhos B e D; (3) raios refletidos no fundo do mar e chamados refratados refletidos no fundo (RBR); e (4) raios refletidos na superfície do mar e no fundo do mar denominados refletidos na superfície refletidos no fundo (SRBR), equivalente ao Caminho F.

Claramente, os caminhos SRBR são os que mais apresentam perdas, pois estão sujeitos a todos os mecanismos de perdas presentes no guia de ondas oceânicas. Esse caminho é coerente com os experimentos que foram analisados em proveito desta dissertação, depreende-se daí que, os ruídos analisados sofreram grandes perdas por propagação. Por outro lado, os caminhos RR são afetado somente pela atenuação e espalhamento na coluna de água (sem perdas nas fronteiras).

# Capítulo 3

## Efeito LLOYD-Mirror

### 3.1 Padrão de campo próximo Lloyd-Mirror

Um padrão de campo próximo que há décadas vem sendo observado em gravações realizadas na raia de medição de ruídos irradiados do Centro de Apoio a Sistemas Operativos da Marinha do Brasil (CASOP) é o efeito Lloyd-Mirror. Esse efeito consiste em um padrão de interferência acústica criado por uma fonte pontual colocada perto de uma suave e perfeitamente refletora superfície do mar[2]. A geometria desse efeito pode ser observada na Figura 3.1, com S indicando a posição da fonte a uma profundidade  $z_s$  abaixo da superfície do mar ( $z = 0$ ). Para um campo pontual qualquer  $P(r, z)$ , em uma região de águas profundas (desconsiderando reflexões no fundo), existem apenas dois caminhos de energia possíveis conectando fonte e receptor: o caminho direto SP e o caminho refletido pela superfície SAP. Assumindo reflexão especular na superfície do mar, o caminho refletido pode ser tratado como se tivesse sido gerado a partir da fonte imaginária S'.

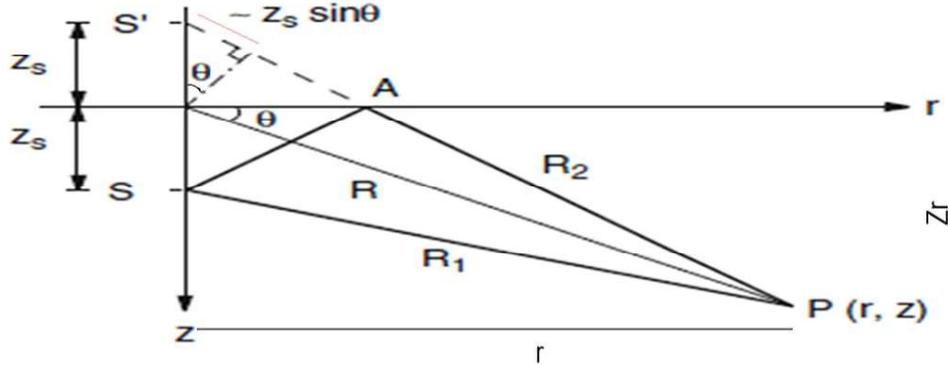


Figura 3.1: Esquema básico do efeito Lloyd-Mirror, adaptado de [2].

Assim, o campo total em  $P(r,z)$  pode ser escrito simplesmente como a soma de contribuições devidas a duas fontes pontuais [2]:

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{ikR_2}}{R_2} \quad (3.1)$$

onde  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de ondas acústico

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z - z_s)^2} \quad \text{e} \quad R_2 = \sqrt{r^2 + (z + z_s)^2} \quad (3.2)$$

A Equação (3.1) representa um padrão de interferência bastante complexo. O sinal de menos nessa equação representa a inversão de fase sofrida pelo sinal refletido na superfície do mar (uma explicação mais detalhada é apresentada no Apêndice A desta dissertação). Em [2], o autor afirma que é possível obter uma expressão simplificada assumindo que a distância  $R$  da origem seja muito maior que a profundidade da fonte  $Z_s$  denotando o ângulo de declinação por  $\Theta$ , encontramos que, para  $R \gg Z_s$ , as distâncias  $R_1$  e  $R_2$  podem ser aproximadas por:

$$R_1 \cong R - Z_s \sin \Theta \quad \text{e} \quad R_2 \cong R + Z_s \sin \Theta \quad (3.3)$$

Assumindo ainda que as distâncias que aparecem nos denominadores de ambos os termos podem ser substituídas simplesmente pela distância  $R$  e, sabendo-se que,

as amplitudes decaem lentamente com a distância podemos obter:

$$p(r, z) \cong \frac{1}{R} [e^{ik(R-Z_s \sin \Theta)} - e^{ik(R+Z_s \sin \Theta)}] \quad (3.4)$$

De onde podemos obter:

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR}}{R} [e^{-ikZ_s \sin \Theta} - e^{ikZ_s \sin \Theta}] \quad (3.5)$$

Cabe ressaltar que, ao seguir a sugestão do autor[2] e assumindo que R1 e R2 são muito maiores que  $Z_s$  e que ambos podem ser bem aproximados por R estamos, destruindo a interferência, mas podemos aproximar o denominador da equação [3.1] (porque é um termo multiplicativo, interfere apenas na amplitude da interferência e não no padrão da interferência). Além disso, podemos separar o expoente na equação acima, dado que a base é o número de Euler, a lei da soma para potência continua válida. Ou seja, como  $e^{ik(R-Z_s \sin \theta)} = e^{ikR} e^{-Z_s \sin \theta}$  podemos chegar na equação 3.8 a partir das Equações 3.6 e de 3.7

Uma vez que  $e^{ix} = \cos(x) + i \operatorname{sen}(x)$  e que,  $e^{-ix} = \cos(-x) + i \operatorname{sen}(-x)$  e, sabendo-se também que  $\cos(x) = \cos(-x)$  obtemos que:

$$e^{-ix} = \cos(x) + i \operatorname{sen}(-x) \quad (3.6)$$

Portanto, somando podemos obter

$$e^{ix} + e^{-ix} = 2i \sin(x) \quad (3.7)$$

Usando  $x = -ikz_s \sin \Theta$ , vemos que a equação 3.5 pode ser simplificada nos permitindo obter:

$$p(r, z) = \frac{-2i}{R} \sin(kz_s \sin \theta) e^{ikR} \quad (3.8)$$

Ao calcularmos o módulo  $e^{ikR}$  é unitário assim como i, e portando “saem da fórmula” de forma que o módulo da amplitude pode ser dado pelo termo senoidal a seguir que retrata a variação da amplitude:

$$|p| = \frac{2}{R} | \sin(kz_s \sin \theta) | \quad (3.9)$$

Os pontos máximos e mínimos dessa amplitude ocorrem quando  $\sin(kz_s \sin \theta) = + - 1$ , ou seja, nos múltiplos ímpares de  $\pi/2$  (lembrando que um número ímpar é simplesmente um número da forma  $2m - 1$ ), ou seja, quando:

$$kz_s \sin \Theta = \frac{(2m - 1)\pi}{2}, \text{ de onde obtemos } \sin \Theta = \frac{(2m - 1)\pi}{(2kz_s)} \quad (3.10)$$

Quando tivermos um múltiplo de  $\pi$  estamos na posição em que o seno assume zero, nesses casos teremos

$$\sin\Theta = m \frac{\pi}{kz_s} \quad (3.11)$$

com  $m$  começando em zero, ou  $m - 1$  começando em 1.

Para uma fonte pontual no espaço livre, teríamos uma onda de expansão esférica com  $|p| = 1/R$ . A superfície do mar é vista gerando um padrão direcional com pressões máxima e mínima dadas por:

$$|p|_{max} = 2/R \quad \text{para} \quad \sin\Theta = (2m - 1)\pi/2kz_s \quad \text{onde} \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (3.12)$$

$$|p|_{min} = 0 \quad \text{para} \quad \sin\Theta = (m - 1)\pi/kz_s \quad \text{onde} \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (3.13)$$

Onde temos que o máximo de pressão apresenta valor de módulo máximo igual ao dobro de uma única fonte (interferência construtiva) enquanto que o mínimo de pressão é zero ou próximo de zero (interferência destrutiva)[2].

Como  $\frac{2m-1}{2kz_s}$  deve ser o  $\sin\Theta$ , seu valor certamente deverá ser inferior a 1, o que limita o número de máximos encontrados (são finitos). Chamando de  $M$  o maior inteiro que satisfaz essa equação, o número  $M$  de feixes de Lloyd pode ser determinado em pela Equação 3.17 [2]:

$$\frac{(2m - 1)\pi}{2kz_s} \leq 1 \quad (3.14)$$

Lembrando que  $k = 2\pi/\lambda$  temos:

$$\frac{(2m - 1)\lambda}{4kz_s} \leq 1 \quad (3.15)$$

Isolando  $M$  podemos obter:

$$M \leq \frac{2z_s}{\lambda} + 0.5 \quad (3.16)$$

Uma vez que o maior inteiro que satisfaz essa equação é a sua própria parte inteira, o autor chega na equação:

$$M = \text{int}\left(\frac{2z_s}{\lambda} + 0.5\right) \quad (3.17)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda acústico. Assim, o número de feixes é diretamente proporcional à distância da fonte à superfície em termos de comprimentos de onda. Ou seja, como podemos observar, o número de feixes, e conseqüente número de “mínimos”, depende da frequência do tom discreto que está sendo analisado e da

profundidade da fonte sonora ( $Z_s$ ). Na acústica submarina, a dependência da pressão sonora em relação à distância a uma profundidade fixa  $z_r$  é de grande importância. Introduzindo  $\sin\theta = Z_r/R$  na Equação 3.9 e sabendo-se que  $R \gg z_r$  podemos considerar válida a aproximação que o autor faz na Figura 3.1 quando considera que  $\sqrt{(r^2 + z_r^2)} \simeq R$  o que nos permite obter

$$|p| = \frac{2}{\sqrt{r^2 + z_r^2}} \left| \sin\left(\frac{kz_s z_r}{\sqrt{r^2 + z_r^2}}\right) \right| \quad (3.18)$$

que novamente é uma expressão demonstrando os máximos e mínimos intermitentes da amplitude de pressão em relação à distância. Para grandes distâncias, aproximando também  $\sin\theta \simeq \theta$  (aqui estamos assumindo que o ângulo é pequeno, essa aproximação é muito boa para ângulos de até  $14^\circ$ , onde o erro fica em menos de 1%, para um ângulo de  $45^\circ$  o erro seria de 10%, esse cálculo é apresentado no Apêndice A desta dissertação). A expressão acima pode ser simplificada obtendo-se:

$$|p| = \frac{2}{\sqrt{r^2 + z_r^2}} \left| \sin\left(\frac{kz_s z_r}{\sqrt{r^2 + z_r^2}}\right) \right| \simeq \frac{2}{\sqrt{r^2 + z_r^2}} \left(\frac{kz_s z_r}{\sqrt{r^2 + z_r^2}}\right) \quad (3.19)$$

de onde podemos obter:

$$|p| \simeq \frac{(2kz_s z_r)}{r^2} \quad (3.20)$$

Uma comparação entre os resultados obtidos utilizando a Equação simplificada 3.18 e a Equação exata 3.1 pode ser observada na Figura 3.2 que nos permite observar que ambas apresentam resultados similares, o que leva a crer que a fórmula simplificada também representa bem o fenômeno para curtas distâncias.

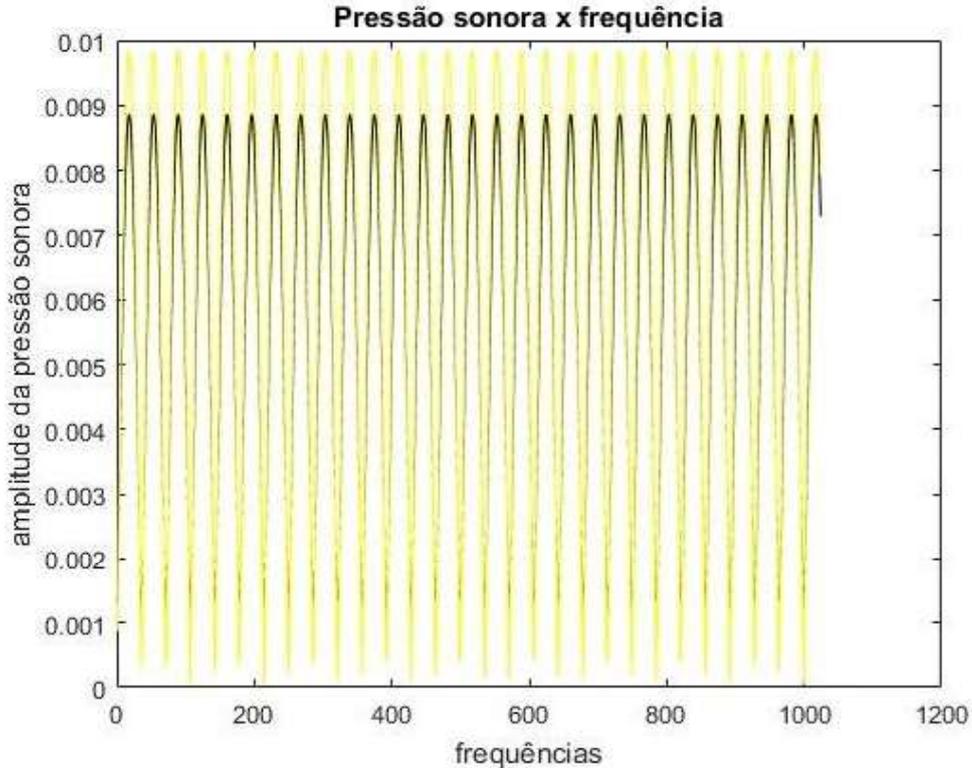


Figura 3.2: Comparação entre a solução exata (preto) e a fórmula simplificada [2] (amarelo)

## 3.2 Perdas por espalhamento na superfície

Quando uma onda sonora plana que se propaga na água atinge uma superfície perfeitamente lisa e refletora, quase toda a energia é refletida nessa fronteira na direção especular e direta (para frente) como uma onda plana coerente[4].

À medida que a superfície do mar se torna rugosa devido principalmente ao vento, o som refletido na superfície será espalhado em todas as direções. O termo perda de superfície refere-se à diminuição da quantidade de energia coerente dirigida para frente após a reflexão na superfície[6]. A perda de superfície é portanto uma redistribuição da energia incidente em raios, não correspondendo ao caminho refletido esperado[6].

Uma vez que o efeito Lloyd-Mirror consiste justamente na interferência entre as ondas sonoras que percorrem um caminho direto entre a fonte sonora e o receptor e as que são refletidas na superfície antes de chegar ao receptor, se torna necessário estudar o efeito que a rugosidade do estado do mar pode acarretar nesse processo.

Se a rugosidade da superfície do mar for pequena em relação ao comprimento de onda acústico  $\lambda$ , a perda de reflexão pode ser considerada como devida simplesmente ao processo de espalhamento. Uma fórmula muito eficiente e confiável para descrever

a refletividade em uma fronteira rugosa é a equação de Rayleigh[2]:

$$R'(\theta) = R(\theta)e^{-0,5\tau^2} \quad (3.21)$$

onde  $R'(\theta)$  é o novo coeficiente de reflexão, reduzido devido à dispersão na interface aleatoriamente rugosa[2].

$\tau$  é o parâmetro de rugosidade de Rayleigh definido como[2]:

$$\tau = 2k\sigma \sin(\theta) \quad (3.22)$$

Onde  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de onda,  $\sigma$  é a amplitude das ondas da superfície do mar em valor root-mean-square(RMS), que pode ser obtido para cada estado do mar a partir de uma conversão dos valores de Hs disponibilizados pela Organização Marítima Internacional(IMO) para cada estado do mar e theta é o “grazing angle” (complemento do ângulo de incidência)[2]. Observe que, o coeficiente de reflexão para uma superfície perfeitamente lisa é -1 em função dos processos de condensação e rarefação que acarretam na inversão de fase da onda refletida na superfície como já anteriormente comentado (pressure release condition) de modo que a Equação 3.21 pode ser reescrita como[2]:

$$R'(\theta) = -e^{-0,5\tau^2} \quad (3.23)$$

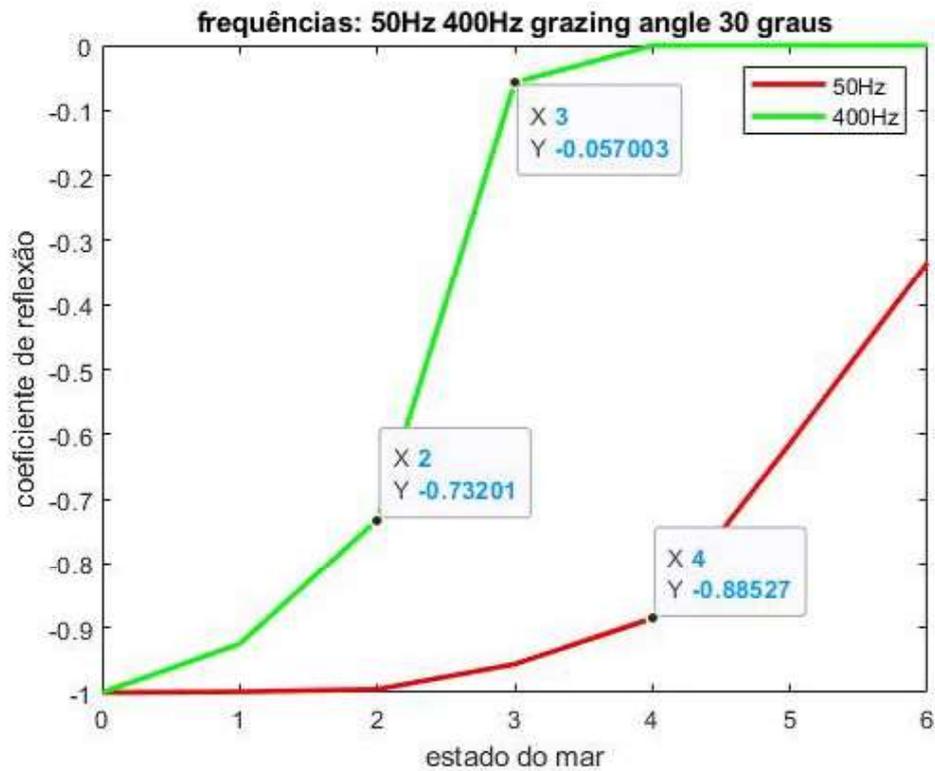


Figura 3.3: Coeficientes de reflexão a serem multiplicados no termo referente ao sinal refletido na superfície para tons discretos de 50Hz e 400Hz em função do estado do mar adotando grazing angle de 30°

A Figura 3.3 nos permite obter alguns exemplos de coeficientes de reflexão para frequências de 50Hz e 400Hz. Observe que menores frequências são menos afetadas pelo estado do mar e portanto permitem a utilização de um sistema que se baseie no efeito Lloyd-Mirror em condições de mar mais severas. Em compensação, menores frequências produzem menos “mínimos”.

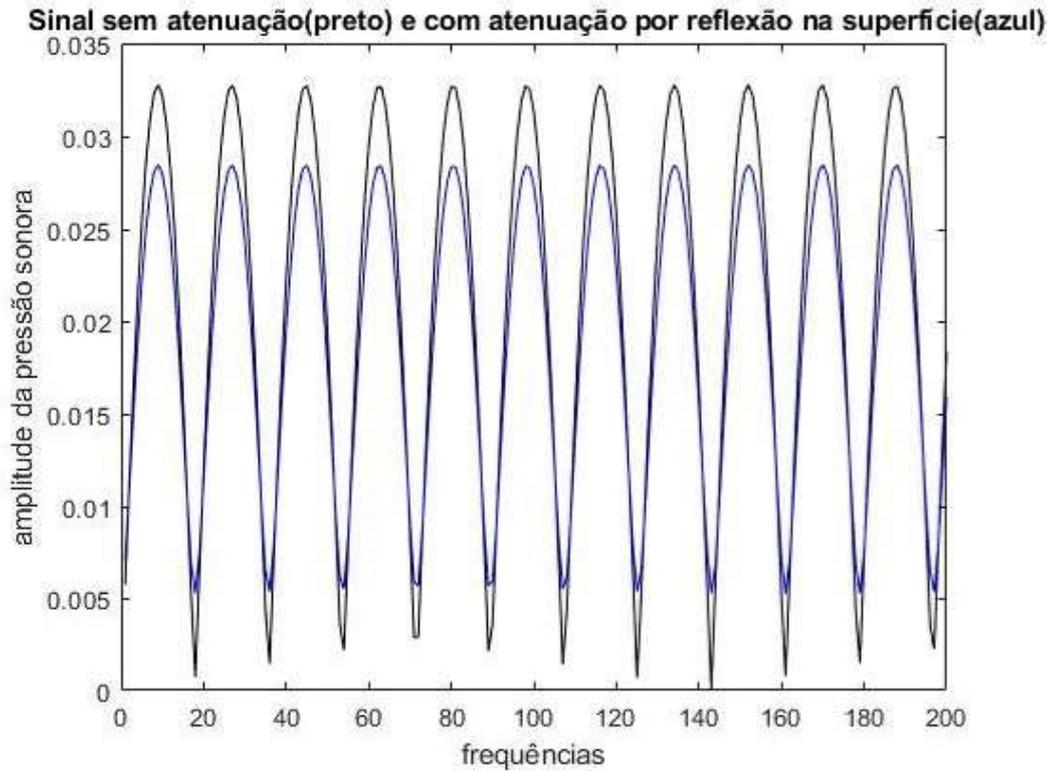


Figura 3.4: Em preto temos um sinal sob efeito Lloyd-Mirror considerando o mar um refletor perfeitamente liso e em azul o mesmo sinal considerando o mar rugoso e o coeficiente de reflexão de  $-0,73$

Podemos observar pela Figura 3.4 que o efeito do estado do mar não altera a fase do sinal, e que a aplicação de um coeficiente de reflexão em função da rugosidade devida ao estado do mar preenche os nulos do padrão de interferência e reduz a magnitude do picos, conforme afirmado em [1].

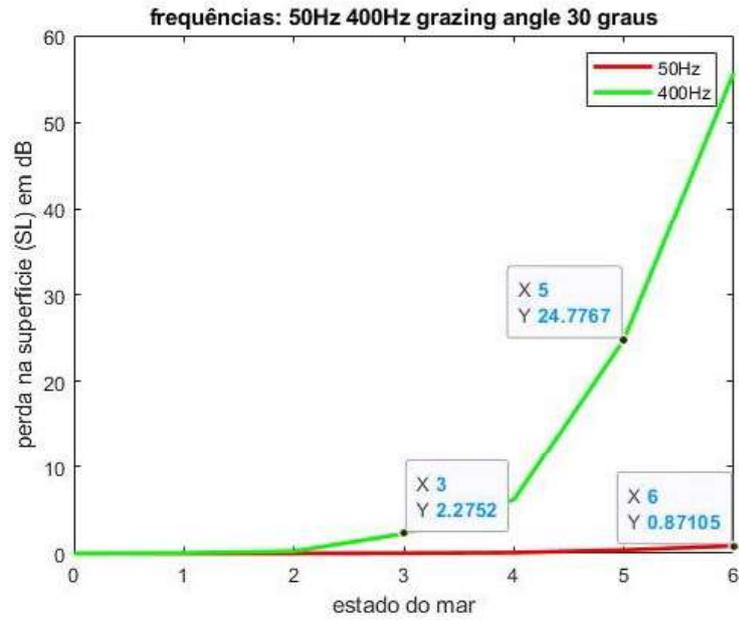


Figura 3.5: Perda na superfície em dB para tons discretos de 50Hz e 400Hz em função do estado do mar adotando grazing angle de 30°

A Figura 3.5 nos permite observar a perda em dB por espalhamento na superfície do mar para frequências de 50Hz e 400Hz.

### 3.3 Dados coletados

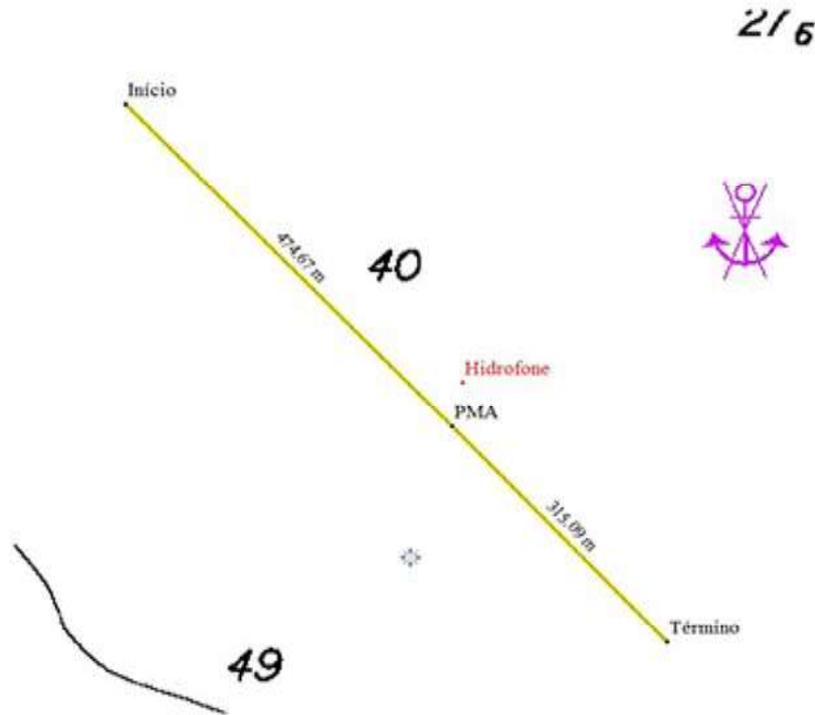


Figura 3.6: Derrota observada durante uma das gravações de medição de ruído irradiado na raia acústica do CASOP.

A pesquisa no campo da acústica oceânica experimental requer inúmeros equipamentos, com tipicamente ao menos um navio e muitas vezes uma variedade de plataformas no mar equipadas com projetores de som, arranjos de hidrofones receptores e sensores para medir o meio ambiente oceânico[2]. Os requisitos para medir esse meio ambiente oceânico surgem pois o oceano é o meio que define o índice acústico de refração. Além disso, a superfície e o fundo do oceano (e camadas abaixo), são as interfaces que definem as condições de contorno das equações diferenciais parciais descritivas da propagação do som no oceano.[2]

Inicialmente, essa pesquisa utilizou um banco de dados formado por algumas gravações de ruídos referentes a fontes sonoras pertencentes a classes significativamente diferentes. Todas as gravações podem ser consideradas um experimento controlado, uma vez que são conhecidas a posição do hidrofone de medição, as posições dessas fontes sonoras no início, no Ponto de Maior Aproximação (PMA) e ao término de cada gravação, a duração de cada corrida, o rumo e a velocidade da fonte sonora que foi gravada e, por fim, a profundidade local e o tipo de fundo além do PVS observado durante a gravação. A Figura 3.6 representa a dinâmica desses experimentos.

Durante a fase inicial da pesquisa foram desenvolvidos programas computacionais que permitiam calcular a solução da AMA a partir de ruídos de banda larga para alvos no PMA, região onde a geometria do fenômeno praticamente não se altera.

### 3.4 Efeito observado em ruídos de Banda larga

A análise de áudios permitiu observar a ocorrência desse efeito em ruídos de banda larga e de banda estreita. As Figuras a 3.7 e 3.8 retratam a formação de estrias a partir de ruídos de banda larga.

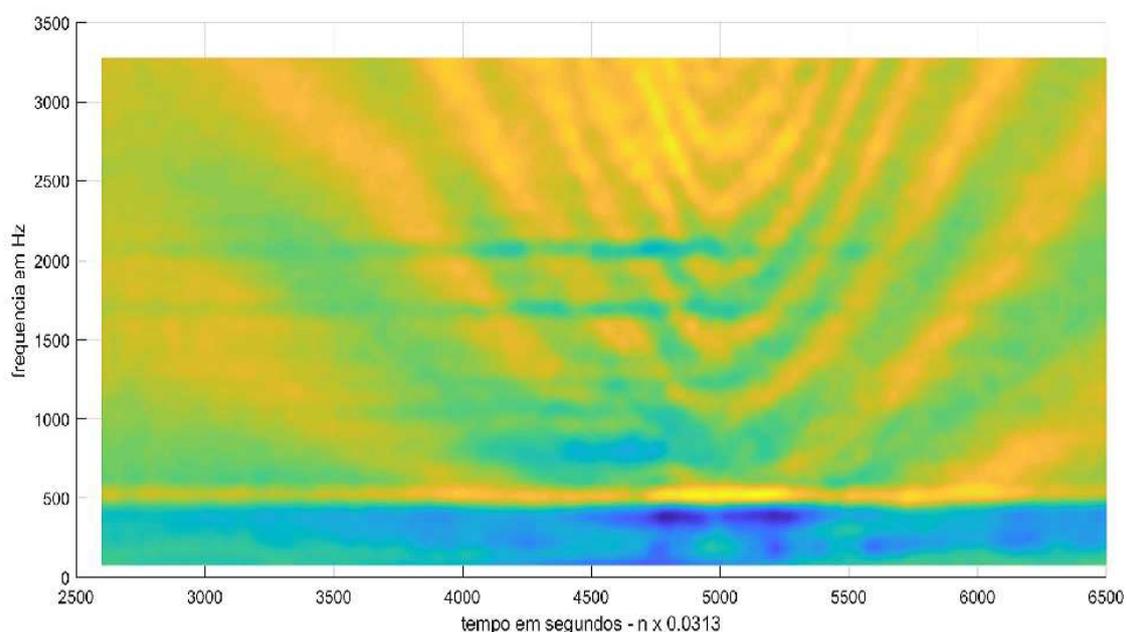


Figura 3.7: Exemplo de estrias obtidas em uma das gravações. O PMA está próximo do ponto 5000, onde as estrias ficam na direção horizontal.

As imagens foram obtidas através de um programa de MATLAB desenvolvido durante a pesquisa que processou a gravação disponibilizada pelo Instituto de Pesquisas da Marinha IPqM para o XIII Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina (ETAS 2018).

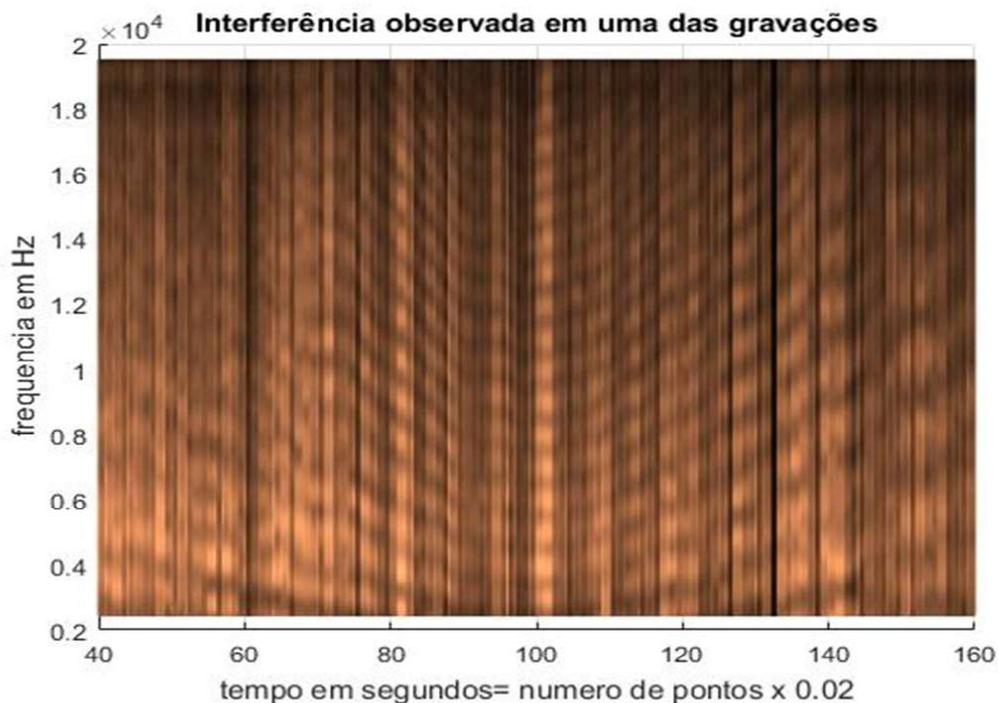


Figura 3.8: Exemplo de estrias obtidas em uma gravação referente a uma fonte sonora pertencente a uma classe completamente diferente do representado na Figura 3.7

Durante essa pesquisa, foi realizada a comparação dos intervalos entre os “mínimos” observados de contatos registrados nessas gravações, no instante em que estavam no PMA, com intervalos entre “mínimos” gerados através de programas de simulação, com o objetivo de obter a solução de parâmetros do alvo.

Para corridas observadas na raia, a idéia é que o simulador gere várias curvas para diferentes valores de profundidade do hélice e distância, enquanto no caso de um submarino em alto mar, o simulador gerará curvas em função de diferentes valores de velocidade relativa, ângulo de proa (marcação que o alvo faria do receptor), distância e profundidade.

Nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 podemos observar respectivamente os “mínimos” observados no PMA durante uma das gravações, os “mínimos” observados e ajustados por um polinômio e, por fim, os “mínimos” simulados para essa gravação.

Durante a fase inicial dessa pesquisa, as gravações eram analisadas através de um espectrograma e, quando era possível observar a formação de estrias características do efeito Lloyd-Mirror, os “mínimos” de sinal devidos à interferência destrutiva eram medidos no PMA obtendo-se Figuras similares à 3.9 e, em seguida, eram comparados com mínimos produzidos por uma simulação, tal como o exemplo da Figura 3.11.



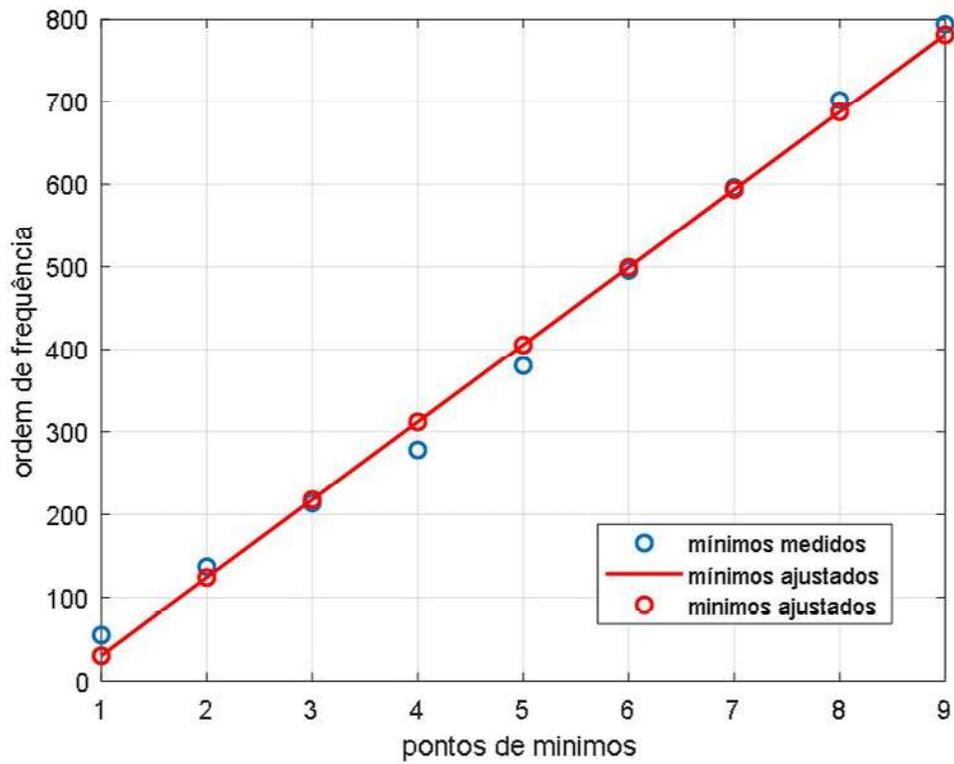


Figura 3.10: “Mínimos” observados e ajustados por um polinômio

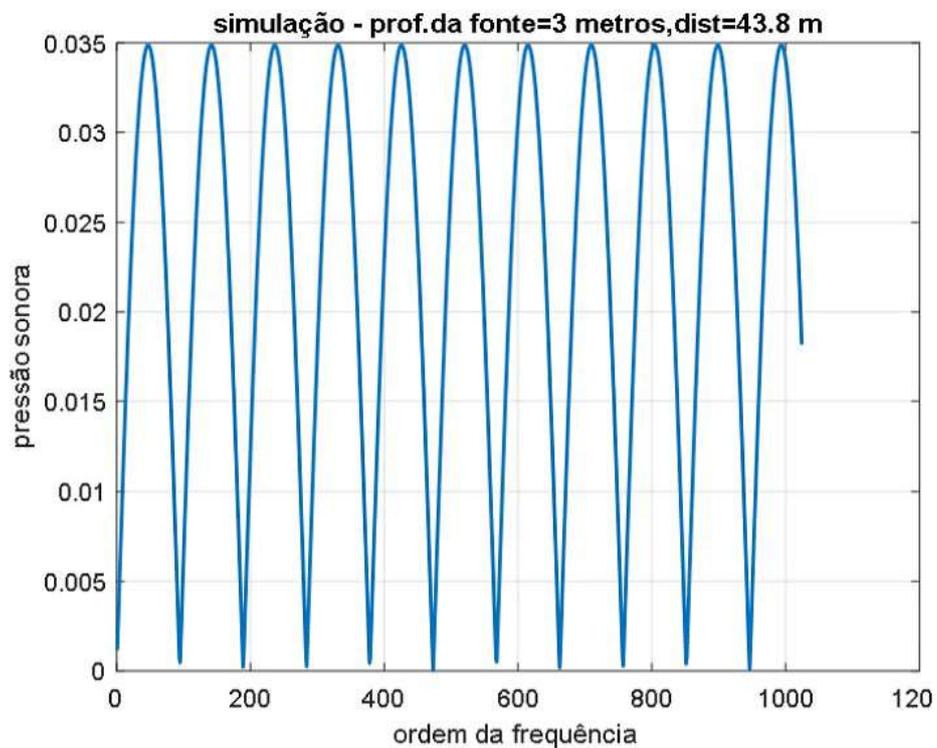


Figura 3.11: “Mínimos” de sinal simulados que podem ser comparados aos obtidos através de uma gravação ou em uma medição instantânea

A detecção desse fenômeno em ruídos de banda estreita é essencial para que se possa determinar os parâmetros de alvos submarinos a partir de interferências devidas ao efeito Lloyd-Mirror, uma vez que não é esperado que um submarino emita ruídos de banda larga.

Foi observado que as gravações não eram propícias para uma análise mais aprofundada desse efeito aplicado a tons discretos. Basicamente as gravações foram realizadas a partir de fontes sonoras com valores de profundidade em torno de 5m a partir da superfície do mar, o que diminui a formação dos feixes de Lloyd-Mirror como já anteriormente explicado. Além disso, o hidrofone utilizado nas gravações também estava localizado em profundidades rasas, geralmente a 35m abaixo da superfície, o que prejudica a geometria do fenômeno. Diante desses fatores, optou-se por continuar esta pesquisa a partir de simulações. Como será demonstrado nos capítulos a seguir, esse fenômeno pode ser utilizado em proveito do cálculo de distância passiva, medição da velocidade, rumo e profundidade da fonte sonora, inserindo-se os intervalos de tempos entre ao menos três “mínimos” referentes a frequências submetidas a esse tipo de interferência em um programa simulador que esteja operando e receba automaticamente as informações de profundidade, rumo e velocidade do nosso submarino.

## **3.5 Análise de Banda Estreita**

### **3.5.1 Resolução trigonométrica aplicada um tom discreto submetido ao efeito Lloyd-Mirror**

A modelagem da propagação do som no oceano é complexa porque o ambiente varia lateralmente (é “range dependent”) e todos os efeitos ambientais sobre a propagação dependem da frequência acústica de uma maneira bastante complicada[2].

Uma ferramenta bastante útil, para visualizar os resultados de um tom discreto submetido ao efeito Lloyd-Mirror, é a resolução trigonométrica apresentada a seguir, que pode ser reproduzida em um programa computacional.

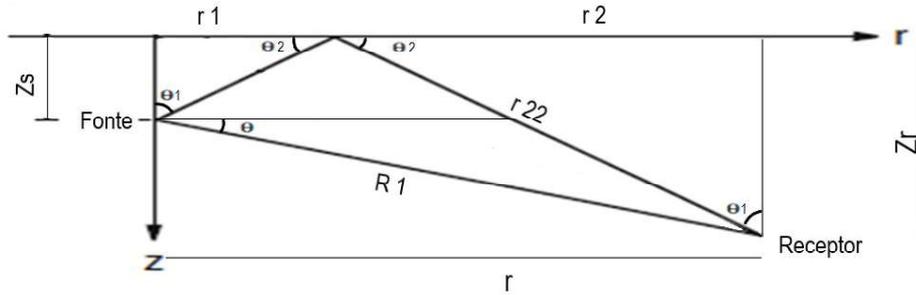


Figura 3.12: Resolução trigonométrica do Efeito Lloyd-Mirror

Na Figura 3.12 podemos observar que:

$$R2 = r_{21} + r_{22} \quad (3.24)$$

$$R1 = \sqrt{r^2 + (z_r - z_s)^2} \quad (3.25)$$

$$r_1 = r_{21} \sin \theta_1 \quad (3.26)$$

$$r_2 = r_{22} \sin \theta_1 \quad (3.27)$$

$$z_r = r_{22} \cos \theta_1 \quad (3.28)$$

$$z_s = r_{21} \cos \theta_1 \quad (3.29)$$

Utilizando semelhança de triângulos vemos que:

$$\frac{r_{22}}{r_{21}} = \frac{z_r}{z_s} = \frac{r_2}{r_1} \quad (3.30)$$

Assim, podemos obter que:

$$\frac{z_s + z_r}{z_r} = \frac{r_1 + r_2}{r_2} = \frac{r}{r_2} \quad (3.31)$$

Uma vez que:

$$\frac{r_{21} + r_{22}}{r_{22}} = \frac{r_1 + r_2}{r_2} \quad (3.32)$$

Obtemos que:

$$\frac{R_2}{r_{22}} = \frac{r}{r_2} \quad (3.33)$$

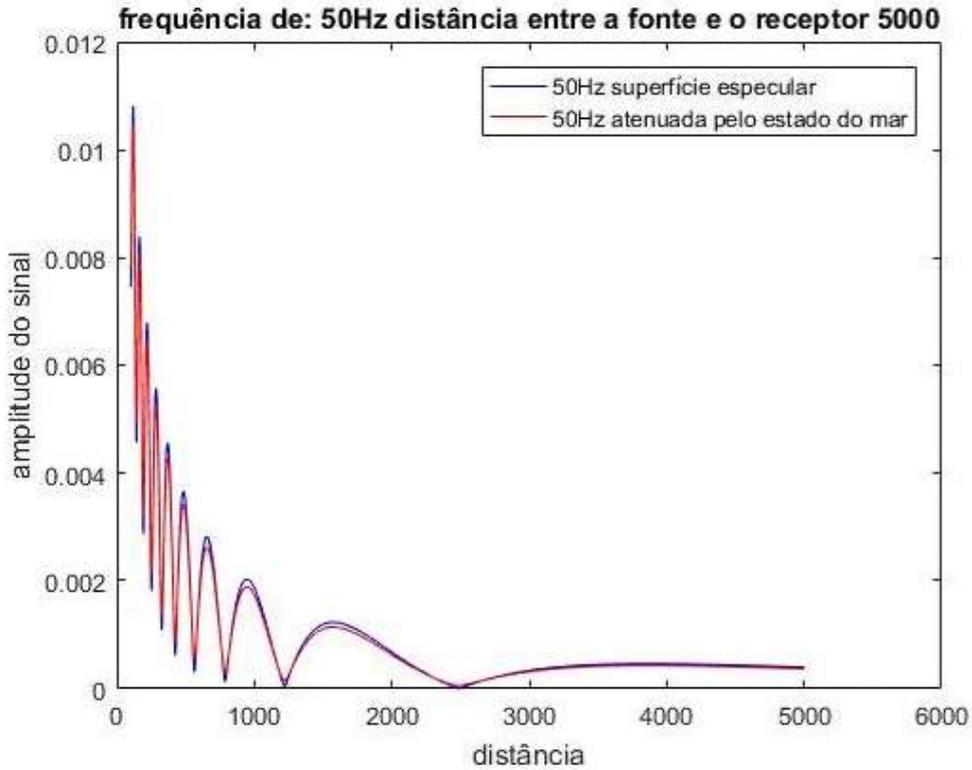


Figura 3.13: Tom discreto de 50Hz gerado por um submarino a 150m de profundidade. O sinal é submetido ao efeito Lloyd-Mirror sendo recebido por outro submarino a 250m de profundidade

Na Figura 3.13 podemos observar a simulação de um Tom de 50Hz gerado por um submarino, a 150m de profundidade, que se desloca com uma velocidade de 5 nós, sendo recebido por outro submarino, parado a 250m de profundidade. Nessa simulação o PVS era de isovelocidade e a velocidade do som adotada foi de 1500m/s

A distância em que ocorre o primeiro “mínimo” devido a interferência destrutiva é de 2500m do receptor, o que coincide com a fórmula apresentada a seguir obtida de [6], que permite calcular a distância do receptor ao “mínimo” mais distante.

$$R_{null} = \frac{2z_s z_r}{\lambda} = \frac{r}{r_2} \quad (3.34)$$

A linha em azul representa o efeito em caso de Estado do Mar zero, a linha vermelha representa o efeito suavemente atenuado em função das perdas por espalhamento na superfície, em um caso de Estado do Mar 2.

## Capítulo 4

# Metodologia de emprego do Efeito Lloyd-Mirror em proveito da determinação de parâmetros de alvos submarinos

### 4.1 Programas utilizados na determinação de parâmetros de alvos submarinos

Neste capítulo serão apresentados os programas que foram desenvolvidos para estabelecer uma metodologia de determinação dos parâmetros de um alvo submarino através do Efeito Lloyd-Mirror. O alvo é uma fonte sonora que, a princípio, não estará gerando ruídos de banda larga, mas provavelmente estará emitindo ruídos de banda estreita, que nada mais são que tons discretos de frequências referentes aos equipamentos que estarão em funcionamento, tais como: Ar-condicionado, frigorífica, conversores elétricos destinados a transformar energia elétrica contínua em alternada, bombas empregadas pelo sistema hidráulico ou pelos sistemas de circulação dedicados a troca de calor, engrenagens redutoras e eixos, dentre outros. Espera-se que esses tons discretos, após serem submetidos ao Efeito Lloyd-Mirror possam ser detectados pelo sonar passivo do receptor e que, em função das interferências características desse efeito, possam ser determinados os parâmetros da Análise de Movimento do Alvo (AMA).

Primeiramente é utilizado um programa de simulação denominado simulacenario.m, que tem por objetivo gerar um conjunto de valores de: velocidade relativa entre o alvo e o receptor do sinal, profundidade do alvo, distâncias entre o alvo e o receptor do sinal e ângulo de proa do alvo, que nada mais é que a marcação relativa que o alvo faria do nosso submarino ou do receptor do sinal. Esse programa for-

nece um conjunto de parâmetros que serão utilizados em seguida em um programa de comparação e cálculo de solução da AMA, denominado calculaparametro.m. É importante ressaltar que, os programas apresentados a seguir foram elaborados e testados para os casos em que o alvo esteja, ou não, em “rumo de colisão”. A Figura 4.1 ilustra um exemplo em que o alvo apresenta “rumo de colisão”, que é caracterizado pela contínua redução da distância entre o alvo e o receptor, enquanto o valor da marcação que o receptor faz do alvo permanece constante.

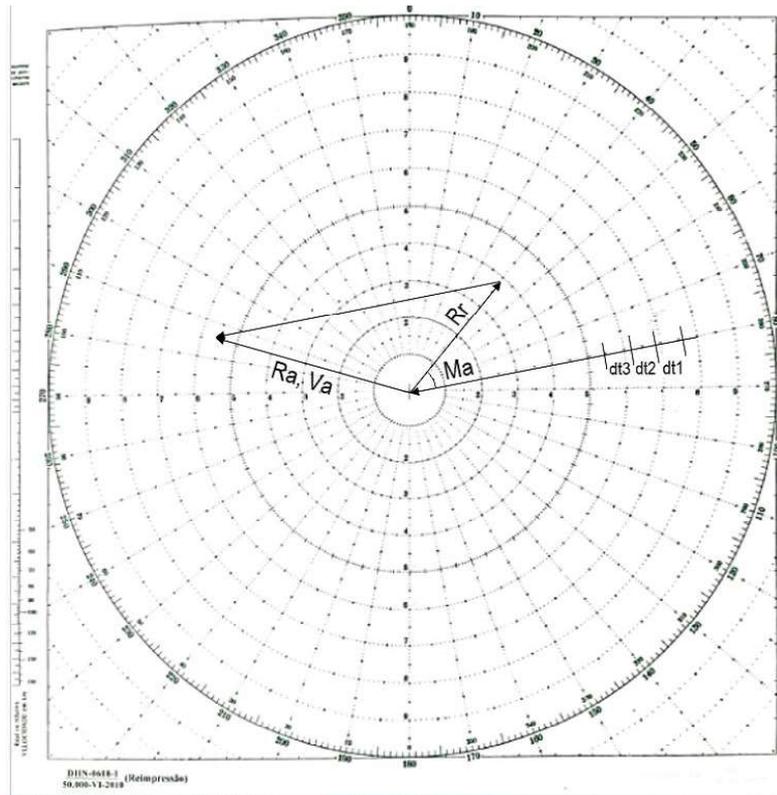


Figura 4.1: Representação em uma Rosa de Manobras da situação de rumo de colisão entre dois alvos, na Figura podemos observar o rumo do submarino que está recebendo o sinal ( $R_r$ ), a marcação que o receptor faz do alvo  $M_a$ , o Rumo do alvo ( $R_a$ ), a velocidade do alvo ( $V_a$ ) e três intervalos de tempo entre “mínimos”  $dt_1$ ,  $dt_2$  e  $dt_3$ . A profundidade e a velocidade relativa serão determinados em tempo real.

#### 4.1.1 Sequência de cálculos do programa simulacenario.m

O objetivo desse programa é simular eventuais cenários, que serão utilizados para comparações com uma situação real na qual seja detectado um tom discreto, que esteja sendo submetido a interferências devidas ao efeito Lloyd-Mirror e que tenha sido gerado por um alvo submarino.

Os dados iniciais da simulação são: A frequência de amostragem utilizada pelo operador sonar, o intervalo de tempo das amostras utilizado na simulação ( $tt_2$ ), a profundidade ( $Z_r$ ), o rumo ( $R_r$ ) e velocidade ( $V_r$ ) do próprio submarino (receptor do sinal), a frequência do tom discreto que está sendo observado, e a velocidade de propagação do som no mar (a princípio foi adotado um perfil isovelocidade, 1500 m/s).

O programa gera as diferenças de tempo entre “mínimos” ou “máximos” (a partir de agora, será usada apenas a expressão “mínimos”, mas cabe ressaltar que, tudo que será apresentado é válido também para a análise dos “máximos” de sinal devidos ao efeito de interferências Lloyd-Mirror). Essas diferenças de tempo são geradas em função das seguintes variáveis: vinte valores de velocidade relativa entre o submarino que está recebendo o sinal e o alvo, considerando vinte valores de profundidade do alvo, vinte valores de ângulo de proa do alvo e vinte valores de distâncias entre o alvo e o receptor do sinal. São simuladas  $20^4$ , ou seja, cento e sessenta mil possibilidades de valores a partir desse programa. A faixa dinâmica e o total desses valores serão ditados pela experiência e pelas limitações de computação. Exemplo dos vetores utilizados:

O vetor de distâncias ( $vetordist$ ) possui valor inicial mil e cem metros, valor final de quinhentos e dez metros, e varia com um intervalo de trinta metros (negativo), representando os vinte possíveis valores de distâncias. O vetor de profundidades ( $vetorprof$ ) possui profundidade inicial de cem metros, profundidade final de duzentos e noventa metros e varia com um intervalo de dez metros, representando os vinte possíveis valores de profundidades. O vetor de ângulo de proa apresenta um ângulo inicial de zero graus (caso de uma pseudo colisão), valor final de trinta graus e varia com um intervalo de 1.51 graus, representando os vinte possíveis valores de ângulos de proa. Por fim, o vetor de velocidades relativas ( $vetorvrel$ ) possui valor inicial de 2 m/s, valor final de 4,9 m/s e varia a cada 0,15 m/s representando os vinte possíveis velocidades relativas.

Para cada conjunto de valores são calculados o sinal recebido, “os mínimos” do sinal, a diferença de tempo entre os “mínimos”, a distância equivalente a cada “mínimo” e o percurso correspondente ao longo da trajetória de movimento relativo. Esses resultados são armazenados em uma matriz ( $matriz_2$ ). Além disso, uma outra matriz ( $matriz_1$ ), armazena em suas quatro primeiras linhas os principais parâmetros do alvo: distância, profundidade, ângulo de proa, velocidade relativa e, na quinta linha, o valor dado pelo cálculo do produto entre a distância ao alvo e o seno do ângulo de proa ( $\hat{A}$ ), que é conhecido pelos submarinistas como distância à rota e que, em um dado instante, coincide com a distância ao alvo no PMA. É importante ressaltar que a  $matriz_1$  e a  $matriz_2$  possuem o mesmo número de colunas e que, ao se escolher uma coluna de qualquer uma dessas duas matrizes, os

parâmetros nela armazenados referem-se aos parâmetros armazenados na mesma coluna da outra matriz. Ou seja, tomando-se como exemplo a coluna 20393 da matriz1, os parâmetros do alvo de distância, profundidade, ângulo de proa e velocidade relativa armazenados nessa coluna são relativos aos parâmetros de intervalo entre “mínimos” armazenados na coluna 20393 da matriz2.

```

>> matriz1(:,20390:20396)

ans =

    3.0000    3.0000    3.0000    3.0000    3.0000    3.0000    3.0000  Ordem da distância
   11.0000   11.0000   11.0000   11.0000   11.0000   11.0000   11.0000  Ordem da profundidade
   20.0000   20.0000   20.0000   20.0000   20.0000   20.0000   20.0000  Ordem do ângulo de proa
   10.0000   11.0000   12.0000   13.0000   14.0000   15.0000   16.0000  Ordem da velocidade relativa
  484.7024  484.7376  484.7363  484.7363  484.7318  484.7168  484.7409  Distância à rota
    0.5007    0.5007    0.5007    0.5007    0.5007    0.5007    0.5007  ângulo de proa
  
```

Figura 4.2: Representação da Matriz1. Essa matriz armazena em suas quatro primeiras linhas os parâmetros do alvo (distância, profundidade, ângulo de proa e velocidade relativa).

O cálculo do sinal é feito pela fórmula exata do efeito Lloyd-Mirror, considerando-se uma situação de isovelocidade:

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR1}}{R1} - \frac{e^{ikR2}}{R2} \quad (4.1)$$

onde  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de onda.

Foi utilizada a solução trigonométrica já apresentada no capítulo três, item 3.5.1 e na Figura 3.12 desta dissertação. Após o cálculo do sinal, o mesmo é submetido a uma solução matemática que permite determinar os “mínimos” do sinal devidos ao efeito de interferência Lloyd-Mirror e também as diferenças entre esses “mínimos”.

Uma vez que as diferenças de tempo correspondem a um conjunto de valores das variáveis citadas anteriormente, em tempo real, espera-se que as diferenças de tempo

observadas em um sinal real que tenha sido detectado poderão ser comparadas com essas diferenças geradas a partir dos conjuntos de parâmetros simulados, permitindo obter o conjunto de solução que melhor representa o alvo, essa comparação é realizada pelo programa `calculaparametros.m`. Para que posteriormente seja realizada essa comparação, o programa de simulação cria uma matriz (`matriz6`) que é formada por seis linhas e vinte e cinco colunas preenchidas a partir dos “mínimos” de cada coluna da `matriz2` da seguinte maneira: Supondo a coluna de número cem da `matriz2` tomada a título de exemplificação, armazena-se na primeira coluna da `matriz6` os valores do primeiro ao sexto intervalo de “mínimos” obtidos da coluna cem da `matriz2`. Na segunda coluna da `matriz6`, são armazenados os valores do sétimo ao décimo segundo intervalo, e assim sucessivamente, de modo que, na última coluna da `matriz6` (vigésima quinta) serão armazenados do vigésimo quinto ao trigésimo intervalo entre “mínimos”.

```

Command Window
>>
>> matriz6(:, 1:10)

ans =

    234    225    216    208    202    195    190    185    180    176
    225    216    208    202    195    190    185    180    176    173
    216    208    202    195    190    185    180    176    173    169
    208    202    195    190    185    180    176    173    169    168
    202    195    190    185    180    176    173    169    168    165
    195    190    185    180    176    173    169    168    165    164
  
```

Figura 4.3: Representação da Matriz6. Essa matriz armazena os valores de intervalos de “mínimos” obtidos de uma coluna da `matriz2`).

Em seguida, os valores de intervalos de mínimos são reorganizados, cria-se uma nova matriz (`matriz5`) que será utilizada no programa `calculaparametros.m`. Essa matriz armazena todas as colunas da `matriz6` empilhadas em uma mesma coluna, isso é feito para cada coluna da `matriz2`.

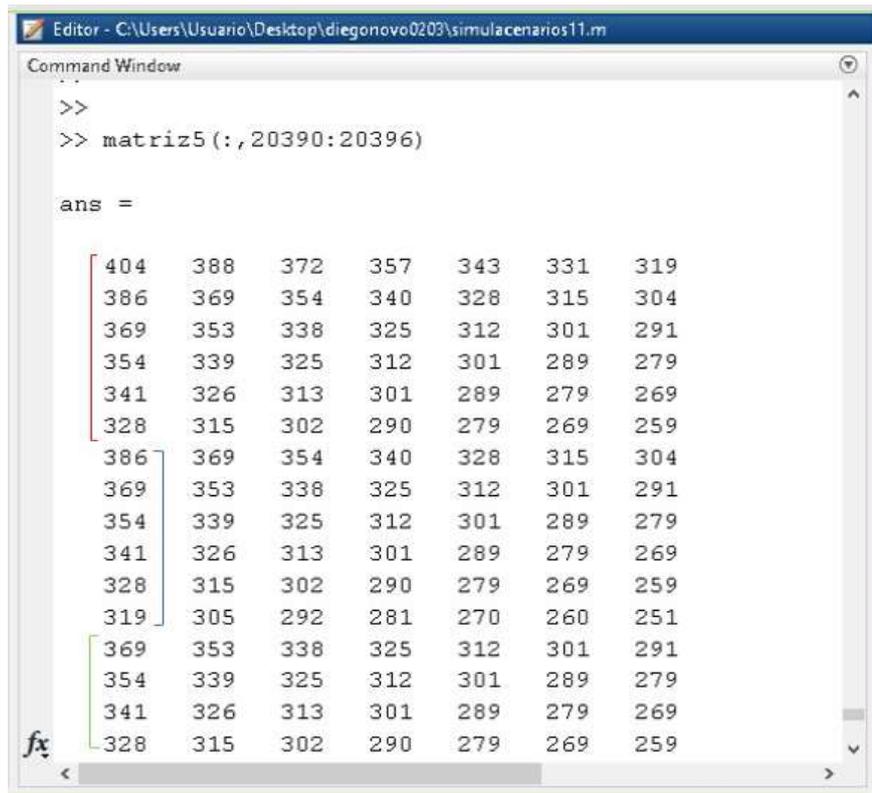


Figura 4.4: Representação da Matriz5. Nessa matriz, as colunas contendo intervalos de “mínimos” obtidas na matriz6 são “empilhadas”.

É importante ressaltar que, quanto maior o número de “mínimos”, mais precisa será a determinação dos parâmetros do alvo e, como será comentado no próximo parágrafo, menor a possibilidade de ambiguidade de soluções. A Figura a seguir foi gerada em uma simulação feita em proveito desta dissertação, e representa uma comparação entre tons discretos de diferentes frequências submetidos ao efeito Lloyd-Mirror, nela podemos observar um tom discreto de 50Hz à esquerda e um tom discreto de 400Hz à direita. Através da Figura podemos observar que, quanto maior a frequência, maior o número de “mínimos”, o que é coerente pois para uma geometria fixa, caracterizada pela diferença de percursos percorridos pela frente de onda sonora (direto e refletido na superfície), quanto maior a diferença entre essa diferença de percursos e o comprimento de onda, maior será o número de “mínimos”. Nessa simulação, a fonte sonora estava a 100m de profundidade, o receptor a 150m de profundidade e a distância entre ambos era de 3000m. Repare o espaçamento entre os pontos em que ocorre a interferência destrutiva, em um caso de detecção no mar, o operador sonar ou o próprio sistema sonar poderiam comparar o efeito no sinal real recebido com o gerado pela simulação para obter a solução sugerida.

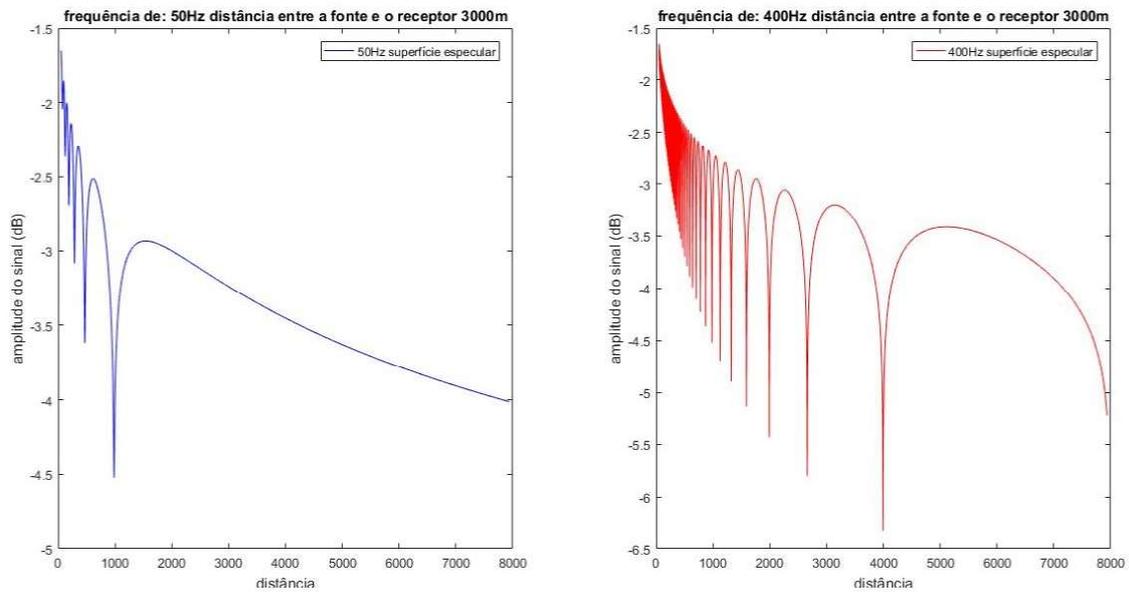


Figura 4.5: Representação de um tom discreto de 50Hz à esquerda e de um tom discreto de 400Hz à direita, ambos sob influência do efeito Lloyd-Mirror. Esta Figura foi obtida através de uma simulação considerando a fonte sonora a 100m de profundidade, o receptor a 150m de profundidade, a distância entre ambos de 3000m e uma superfície livre de rugosidades característica de estado do mar zero.

Cabe ressaltar que, eventuais alterações nos parâmetros de entrada têm que ser automaticamente ajustadas no programa de simulação, pois esse programa tem que estar rodando online e ser constantemente atualizado em uma situação real.

O diagrama de blocos apresentado na Figura a seguir ilustra todos os principais processos realizados pelo programa simulacenario.m.

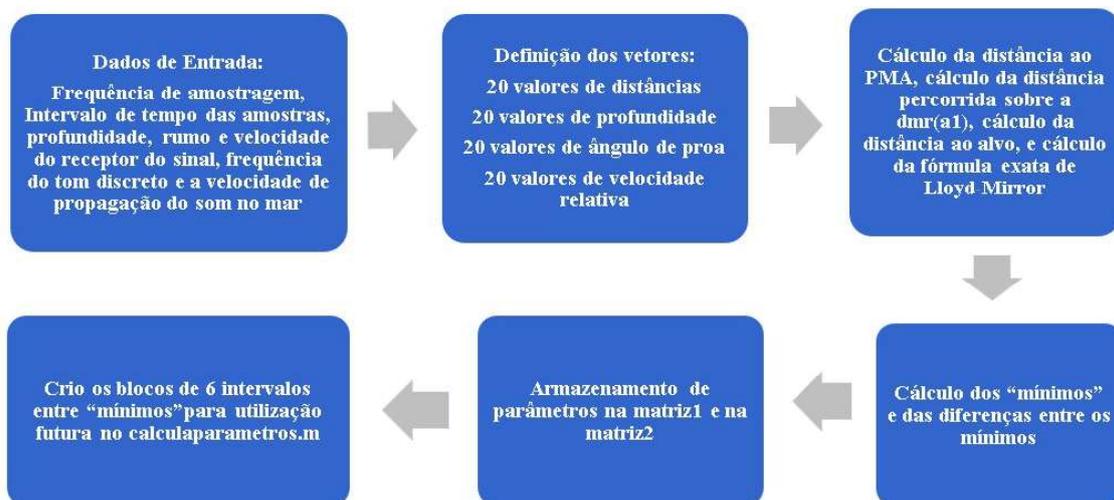


Figura 4.6: Diagrama de blocos ilustrando os principais processos realizados pelo programa simulacenario.m.

#### 4.1.2 Sequência de cálculos do programa calculaparametros.m

Após a determinação do sinal simulado, de seus “mínimos” e do intervalo de tempo entre eles, um outro programa foi utilizado tendo como dados de entrada ao menos três diferenças entre quatro “mínimos”. Na realidade, na versão final do programa foram utilizadas seis diferenças para comparação com as diferenças geradas no programa simulacenario.m.

Esse programa destina-se a realizar a comparação entre as diferenças relativas ao intervalo de tempo entre ocorrência de “mínimos”, obtidos em um sinal real, e o conjunto de intervalos gerados pelo programa simulacenarios.m e armazenados na matriz2. Além disso, o programa também pode ser utilizado em testes e simulações, utilizando-se uma coluna da matriz2 no lugar de um sinal real, como será apresentado no capítulo cinco que apresenta os resultados dos testes realizados.

Principais etapas do programa:

Serão considerados, sequencialmente, os conjuntos de diferenças de “mínimos” para comparação, utilizando-se os valores das diferenças previamente acumuladas na matriz2 após a execução do simulacenario.m.

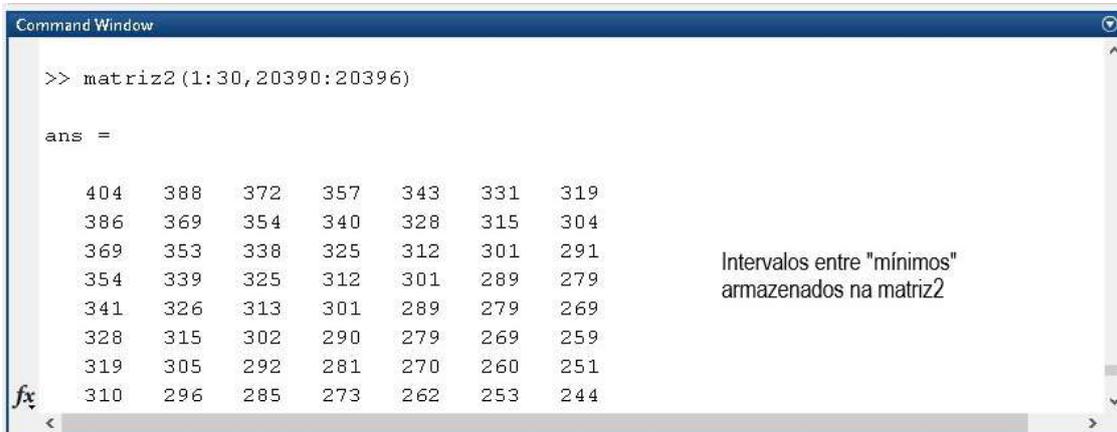


Figura 4.7: Representação de parâmetros simulados armazenados na Matriz2. Na Figura podemos observar alguns intervalos entre “mínimos”.

O cálculo da comparação é feito através de duas matrizes auxiliares, a matriz4, onde é armazenado o “bloco” de seis intervalos referentes ao sinal real e a matriz7, que nada mais é que uma reorganização dos intervalos armazenados na da matriz5 criada no programa de simulação. Inicialmente são utilizadas seis diferenças. Em seguida, com a chegada de novos “mínimos”, sucessivamente são apresentadas novas diferenças e canceladas as primeiras, de modo que a comparação é feita subtraindo-se esses intervalos de tempo obtidos no sinal real dos valores fornecidos pelo programa simulacenario.m. A comparação é feita sempre com o mesmo número de diferenças obtidas do sinal real e geradas pelo programa simulacenario.m. Ou seja, se foram utilizados seis intervalos reais, eles serão comparados com conjuntos de seis intervalos simulados. Esses conjuntos são comparados com conjuntos selecionados das colunas geradas pelo programa de simulação como mostrado na Figura apresentada a seguir:

<b>real</b>	<b>subtrai</b>	<b>simulado</b>					
1	-	1	2	3	4	5	.....
2		2	3	4	5	6	.....
3		3	4	5	6	7	.....
4		4	5	6	7	8	.....
5		5	6	7	8	9	.....
6		6	7	8	9	10	.....

Figura 4.8: Representação da comparação entre um sinal real e um sinal simulado realizada pelo programa calculaparametros.m. A melhor solução é aquela que fornece o menor resultado após a diferença entre a matriz4 (representada à esquerda do sinal de menos) e a matriz7 (representada à direita do sinal de menos).

Toma-se então as diferenças entre o conjunto recebido e as várias colunas simuladas, armazena-se o valor dessas diferenças nas linhas da matriz8 e, o número dos instantes dos “mínimos”, na matriz9. A Figura a seguir ilustra o resultado armazenado na Matriz8 após uma comparação:

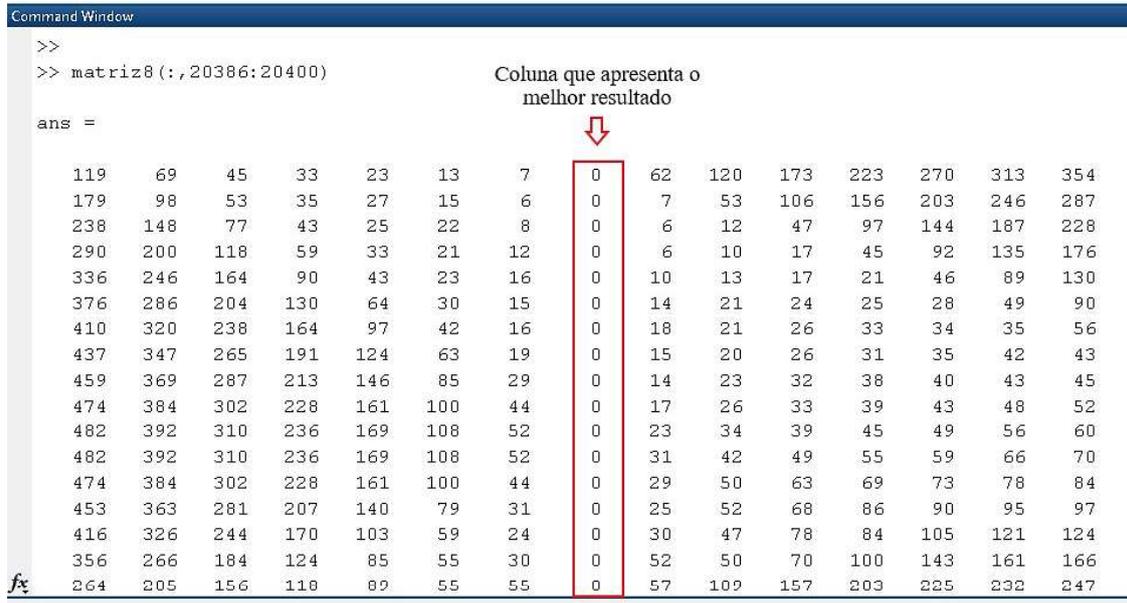


Figura 4.9: Representação da coluna da Matriz8 que fornece o melhor resultado após a comparação entre um sinal real e um sinal simulado. Nesse caso em particular, o resultado fornece valor zero em todas as linhas, pois foi realizada uma simulação determinística. Ou seja, é um caso em que há uma correlação perfeita, como será apresentado no próximo capítulo.

Uma vez que o resultado das diferenças entre os valores armazenados na Matriz4 e na Matriz7 é armazenado na matriz8, a coluna da matriz8 que apresenta os menores valores é a que contém a solução. A partir daí, já se pode inferir que, quanto maior o número de intervalos entre “mínimos”, mais linhas serão utilizadas, o que reduz o risco de problemas de ambiguidade maximizando a capacidade de correlação do programa.

A matriz8 tem várias linhas, cada uma correspondente à chegada de um novo “mínimo” e várias colunas, cada uma correspondente às comparações entre as diferenças de “mínimos” do sinal real e as colunas da matriz7, gerada a partir da matriz2 obtida após a execução do programa simulacenario.m, como explicado nos itens 4.1.1 e 4.1.2.

Após a correlação, seleciona-se a coluna que apresenta os intervalos mais similares ao sinal armazenado na matriz4 e obtém-se os valores de distâncias horizontais(r) correspondentes à ocorrência dos “mínimos” e os segmentos de distância percorrido ao longo da trajetória de movimento relativo (a11) na matriz2. Em seguida, são

calculadas as novas marcações correspondentes aos novos “mínimos” utilizando-se a lei dos senos.

Por fim, com os valores de distância ( $r$ ), da distância percorrida ao longo da trajetória de movimento relativo ( $a_{11}$ ) e também do ângulo de proa obtido do vetor ( $aa$ ), calcula-se o ângulo  $N$  referente à variação das marcações do alvo. Esses valores serão utilizados para plotagem na rosa de manobras, como pode ser visto na Figura 4.10.

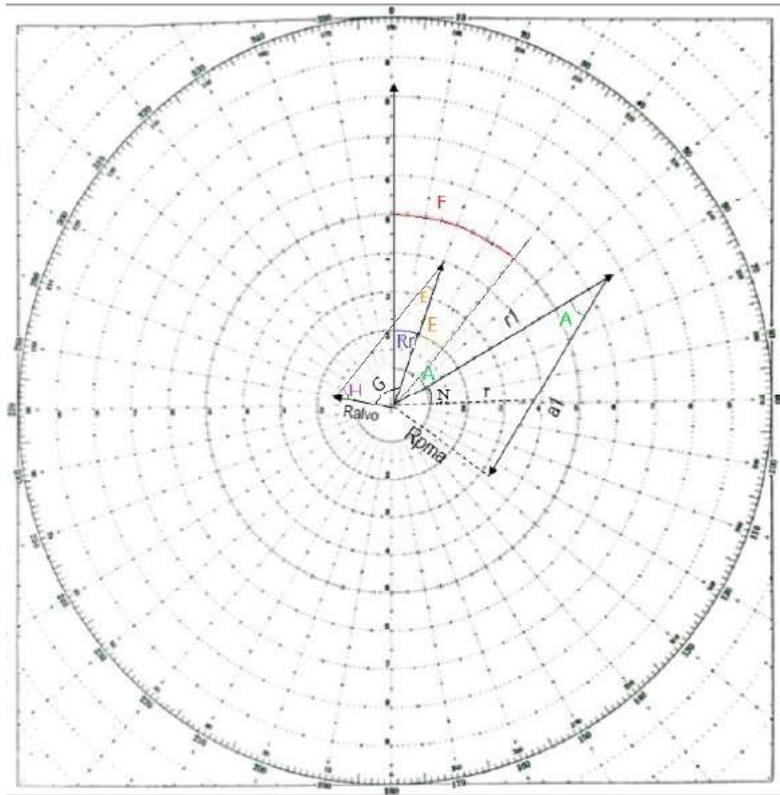


Figura 4.10: Representação em uma Rosa de Manobras da situação em que o alvo não está em rumo de colisão. Na figura  $R_r$  e  $V_r$  são o rumo e a velocidade do nosso submarino,  $\hat{A}$  o ângulo de proa,  $r_1$  e  $r$  as distâncias ao longo da marcação relativa do alvo,  $a_1$  a linha de movimento relativo (dmr) do alvo,  $r_{pma}$  a distância ao alvo no PMA e  $N$  é o valor de uma das várias marcações sucessivas que serão obtidas.

### Cálculo final dos parâmetros

Os demais parâmetros de solução do alvo (rumo e velocidade) serão calculados para a coluna que apresentou a melhor solução após o processo de correlação previamente apresentado.

A coluna de solução obtida na matriz<sup>8</sup> após a correlação fornece o valor de velocidade relativa e a distância entre o alvo e o nosso submarino que serão utilizados em um novo cálculo para que se possa obter o rumo e a velocidade do alvo. Assim

sendo, foi definida uma nova variável auxiliar ( $E$ ) que representa o ângulo entre o vetor que representa a projeção paralela ao movimento relativo do alvo e o vetor que representa o rumo e a velocidade do nosso submarino, como pode ser visualizado na Figuras 4.10 e 4.12.

Uma representação mais detalhada é apresentada nos “calungas” disponibilizados nas Figuras a seguir. No primeiro calunga a situação apresentada na Figura 4.10 é atualizada de modo a realizar-se o cálculo da análise de movimento do alvo após a detecção do primeiro “mínimo”. Nessa Figura podemos observar todos os ângulos que foram utilizados na solução do problema de rosa de manobras:

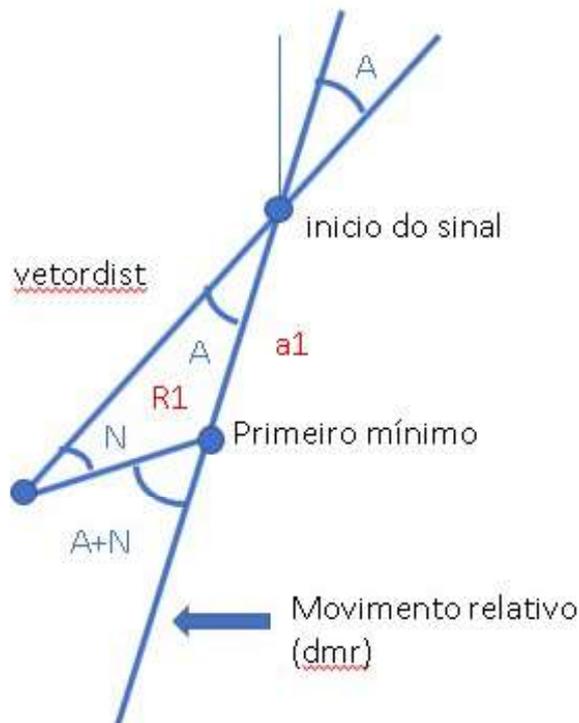


Figura 4.11: Representação em um “calunga” onde podemos observar o ângulo  $\hat{A}$  da simulação (vetora), o novo ângulo inicial  $AA = A+N$  correspondente ao primeiro “mínimo”, o vetor de distância inicial de simulação (Vetordist), a primeira distância percorrida ao longo da dmr ( $a1$ ), o acréscimo do ângulo devido à variação de marcação do alvo ( $N$ ) entre a marcação inicial do alvo e a marcação do alvo no instante de ocorrência do primeiro “mínimo” e a distância  $R1$  ao alvo no instante da ocorrência do primeiro “mínimo”. Este é o novo ponto da partida:  $AA$ ,  $R1$ ,  $N$ , feito pelo programa simulacenarios.m após a detecção do primeiro “mínimo”.

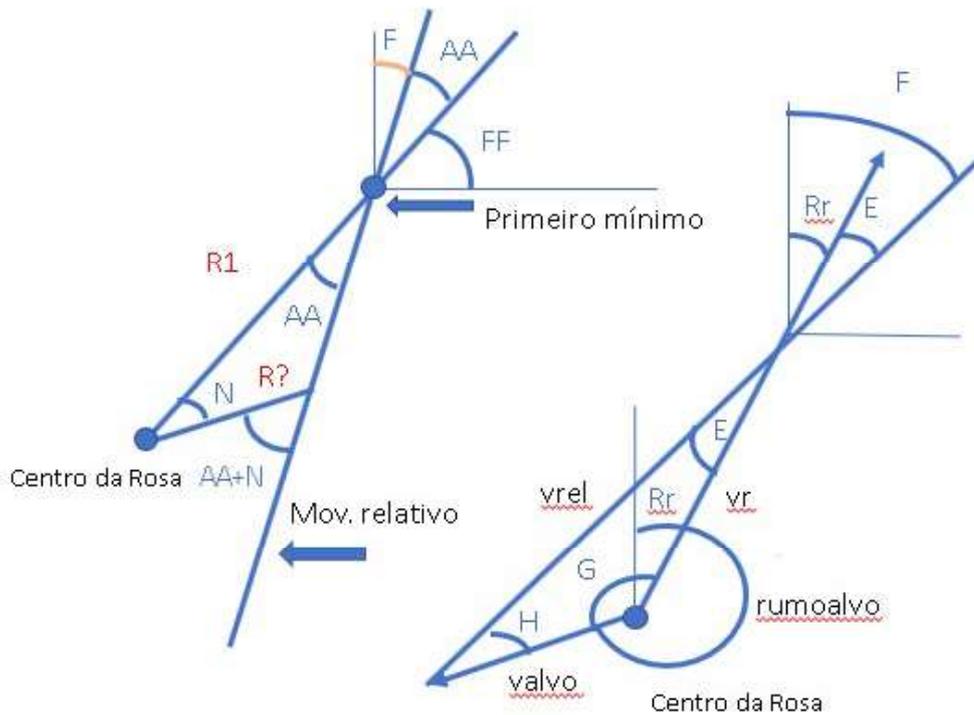


Figura 4.12: Representação em um “calunga” onde podemos observar o ângulo entre a dmr e a marcação inicial do primeiro mínimo (AA), o ângulo F entre a dmr e o norte verdadeiro, o ângulo (FF) entre a marcação atual do alvo e o eixo horizontal. Esse ângulo é usado para plotagem de um “mínimo”. A distância inicial R1 (ao primeiro mínimo), a distância R? a um “mínimo” qualquer, o ângulo N entre a marcação de um “mínimo” e a marcação inicial, o triângulo de velocidades EGH, o ângulo E (ângulo superior no triângulo de velocidades), o vetor Vr correspondente à velocidade do observador, o vetor valvo correspondente à velocidade do alvo, o vetor Vrel correspondente à velocidade relativa entre o alvo e o observador, o ângulo H e o ângulo G.

O ângulo (AA) é o novo ângulo de proa do alvo acrescido de uma variação de marcação que é fruto do deslocamento do alvo entre o instante da detecção do alvo e o instante da detecção de um “mínimo”:

$$AA = A + N \quad (4.2)$$

O ângulo (F) é definido entre a dmr e o norte verdadeiro, e é dado por:

$$F = \frac{\pi}{2} - (FF + AA) \quad (4.3)$$

Onde o ângulo FF corresponde ao ângulo entre a marcação atual do alvo e o eixo

auxiliar horizontal.

O ângulo (E) é aquele cujo módulo é dado pela diferença entre o ângulo F e o rumo do observador

$$E = | F - rr | \quad (4.4)$$

A velocidade do alvo é determinada pela lei dos cossenos aplicada ao triângulo definido pelos vetores que representam a velocidade do alvo, velocidade relativa e velocidade do nosso submarino:

$$valvo = \sqrt{vrel^2 + vr^2 - 2 * vrel * vr * cos(E)} \quad (4.5)$$

O rumo do alvo é obtido pelo cálculo do ângulo(H) através da lei dos senos:

$$\frac{vr}{sin(H)} = \frac{valvo}{sin(E)} \quad (4.6)$$

$$H = asin\left(\frac{vr * sin(E)}{valvo}\right) \quad (4.7)$$

Uma vez obtido o ângulo(H), podemos obter o ângulo(G)

$$G = \pi - (E + H) \quad (4.8)$$

Por fim, para uma situação em que o nosso submarino e a marcação que fazemos do alvo estejam no primeiro quadrante (000 – 090) temos que o rumo do alvo pode ser calculado pela diferença entre o ângulo (G) e o rumo do nosso submarino (rr)

$$Ralvo = 360 - G - rr \quad (4.9)$$

O diagrama de blocos apresentado na Figura 4.13 ilustra todos os principais processos realizados pelo programa calculacolisao.m.

### Diagrama de blocos do programa calculacolisao.m

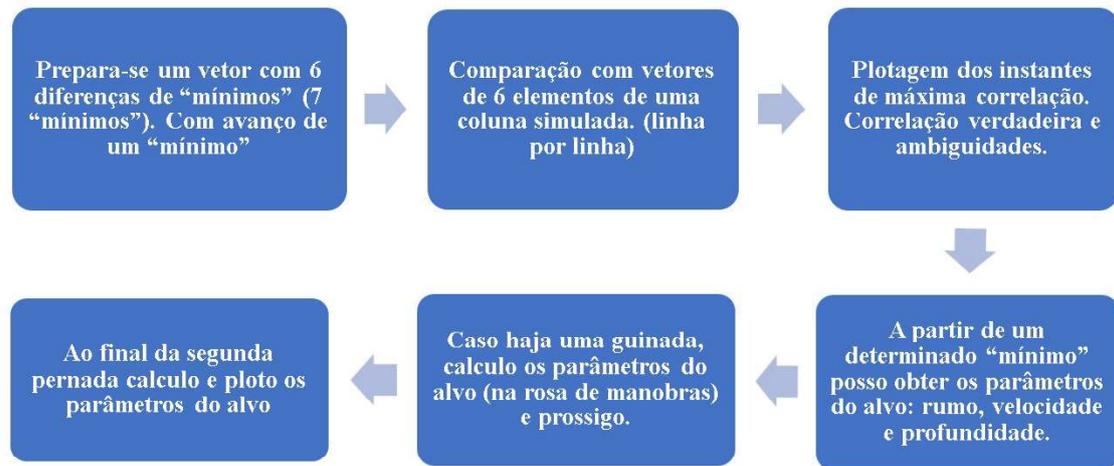


Figura 4.13: Diagrama de blocos ilustrando os principais processos realizados pelo programa calculacolisao.m. As plotagens em uma Rosa de Manobras são feitas com um programa auxiliar denominado rosademanobras13.m desenvolvido ao longo dessa pesquisa.

# Capítulo 5

## Testes e análise de resultados

### 5.1 Testes e simulações realizadas com os programas `simulacenario.m` e `calculaparametros.m`:

#### 5.1.1 Simulação determinística

Na simulação determinística, escolhe-se uma determinada coluna entre as simuladas que foram armazenadas na `matriz2` e na `matriz1` após a execução do programa `simulacenario.m`. Essa coluna escolhida é caracterizada por valores de distância, profundidade da fonte, ângulo de proa inicial e velocidade relativa e armazena um conjunto de intervalos entre os “mínimos” gerados pela simulação.

Na simulação determinística, a correlação é feita utilizando essa coluna escolhida como se ela fosse um conjunto real de seis diferenças de “mínimos” sucessivas, obtidas durante a detecção de um sinal real submetido ao efeito Lloyd-Mirror. A simulação é denominada determinística pois não considera erros ou ruídos. Segue-se aqui o mesmo procedimento já previamente apresentado no capítulo anterior: Calcula-se a diferença entre os valores armazenados nesta coluna e os conjuntos com esse mesmo tamanho (seis intervalos) obtidos de diferentes colunas da simulação. A cada novo “mínimo” é calculada uma nova diferença de tempo. Em seguida, cancela-se o primeiro intervalo entre “mínimos”, admite-se o novo e calcula-se a diferença entre o conjunto que simula o sinal real, que será armazenado na `matriz4`, e as colunas da `matriz7`. Poder ser utilizada como exemplo a coluna 20393, já apresentada no capítulo anterior, uma das cento e sessenta mil possibilidades geradas pela simulação.

Faz-se a comparação com as colunas entre um e trinta mil (para abreviar o tempo de processamento). A execução desse teste é obtida pela diferença entre o vetor “real” e a matriz de seis linhas (seis intervalos entre “mínimos”) e  $n$  colunas. O resultado esperado consiste em uma solução “perfeita” caracterizada por uma coluna de zeros cuja soma do absoluto será armazenada em uma matriz de trinta

linhas e trinta mil colunas(matriz8) onde cada linha representa um novo conjunto real e cada coluna uma coluna simulada. Na matriz 9 são armazenados os índices das colunas simuladas;

A Figura a seguir ilustra o resultado armazenado na Matriz8 após uma comparação. Observe que a primeira linha da matriz8 já indica diferença zero, isto é, uma boa correlação ocorre no primeiro intervalo de “mínimos”:



Figura 5.1: Representação da coluna da Matriz8 que fornece o melhor resultado após a comparação entre um sinal real e um sinal simulado. Nesse caso em particular, o resultado fornece valor zero em todas as linhas pois foi realizada uma simulação determinística, ou seja, é um caso perfeito.

O resultado para essa comparação pode ser observado na Figura 5.2:

<b>Parâmetro</b>	<b>valor</b>	<b>Unidade</b>
Coluna	20393	-
Profundidade do alvo	200	m
rumo do alvo	214	graus
Velocidade do alvo	1.7	m/s
Velocidade do alvo	3.3	nós
Distância inicial	1010	m
Distância no PMA	485	m
Velocidade relativa	3.8	m/s
Velocidade relativa	7.4	nós
ângulo de proa	29	graus

Figura 5.2: Ilustração representando o resultado obtido após uma simulação determinística.

O resultado também pode ser observado em uma Rosa de Manobras onde é mostrado todo o cenário da situação calculada, diversas ocorrências de “mínimos” ao longo do movimento relativo e o resultado vetorial para rumo e velocidade do alvo para a situação determinística, como podemos observar na Figura 5.3.

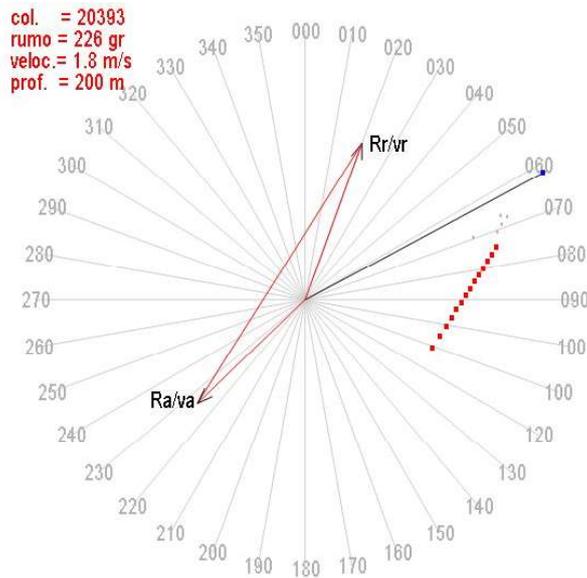


Figura 5.3: Resultado obtido após uma simulação determinística plotado em uma Rosa de Manobras.

Na Figura 5.3, o símbolo azul corresponde ao primeiro “mínimo” detectado. Em seguida o programa aguarda a ocorrência de seis intervalos, começa a fazer as plotagens em cinza após o sétimo “mínimo” e plota em vermelho após a ocorrência de mais três intervalos, ou seja, após o décimo “mínimo”.  $R_r$  e  $v_r$  são rumo e velocidade do observador respectivamente,  $R_a$  é o rumo do alvo,  $v_a$  a velocidade do alvo. O primeiro “mínimo” detectado corresponde ao primeiro valor de distância simulado.

### 5.1.2 Simulação com alvo apresentando rumo de colisão

O procedimento para determinar a correlação é similar àquele descrito na simulação determinística. Simula-se agora o alvo apresentando rumo de colisão (não necessariamente haverá uma colisão, pois o alvo pode estar em uma profundidade diferente, trata-se de uma pseudo colisão). As possíveis ambiguidades e as plotagens anteriores à ocorrência do décimo “mínimo” aparecem como pontos cinzas. Após a correlação ter analisado mais de nove intervalos (dez “mínimos”), as plotagens são apresentadas em vermelho. Foi simulada uma coluna em que o ângulo de proa do alvo é igual a zero, ou seja, o alvo está aproado ao observador, é interessante notar o aumento das ambiguidades apresentadas em cinza. Aqui é vista uma grande

quantidade de ambiguidades, mesmo assim, a coluna selecionada como resposta possui uma quantidade de coincidências muito maior que as colunas que apresentam ambiguidades, o que prova que a técnica de correlação é satisfatória.

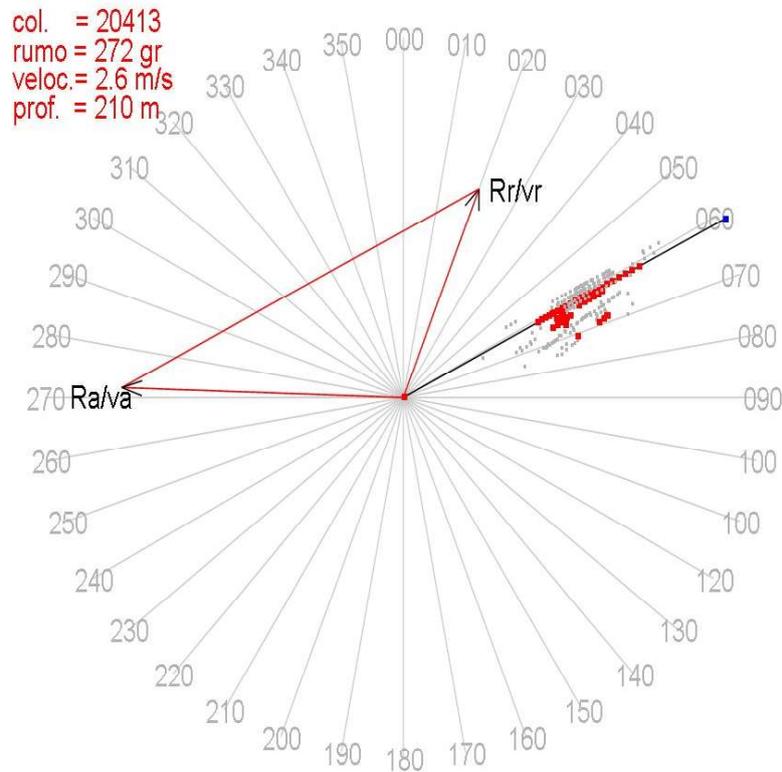


Figura 5.4: Resultado obtido após uma simulação de um caso de alvo em rumo de colisão plotado em uma Rosa de Manobras.

### 5.1.3 Simulação com a presença de erros aleatórios na determinação dos “mínimos”

Neste caso é feita a comparação entre as diferenças de tempo entre “mínimos” simulados e uma coluna com alguns erros impostos, tentando simular uma situação real. Somam-se às diferenças de “mínimos” de uma coluna, valores aleatórios obtidos a partir de uma distribuição uniforme, o objetivo deste teste é meramente verificar a robustez do programa.



Figura 5.5: Resultado armazenado na matriz8. Observe que, a coluna de solução não mais apresenta valores de zeros, mas é a que apresenta os menores valores. Ou seja, essa coluna é a que apresenta melhor correlação e, por isso, representa melhor a situação que está sendo analisada.

Pretende-se que o resultado possa equivaler à instabilidades na detecção dos instantes dos “mínimos”. Os vários valores de ambiguidades também são plotados. Os “mínimos” agora encontrados não têm valor zero como no caso determinístico. Os valores encontrados para os “mínimos” não correspondem exatamente a uma coluna específica, mas os valores dos parâmetros são relativamente próximos aos da coluna base 20393.

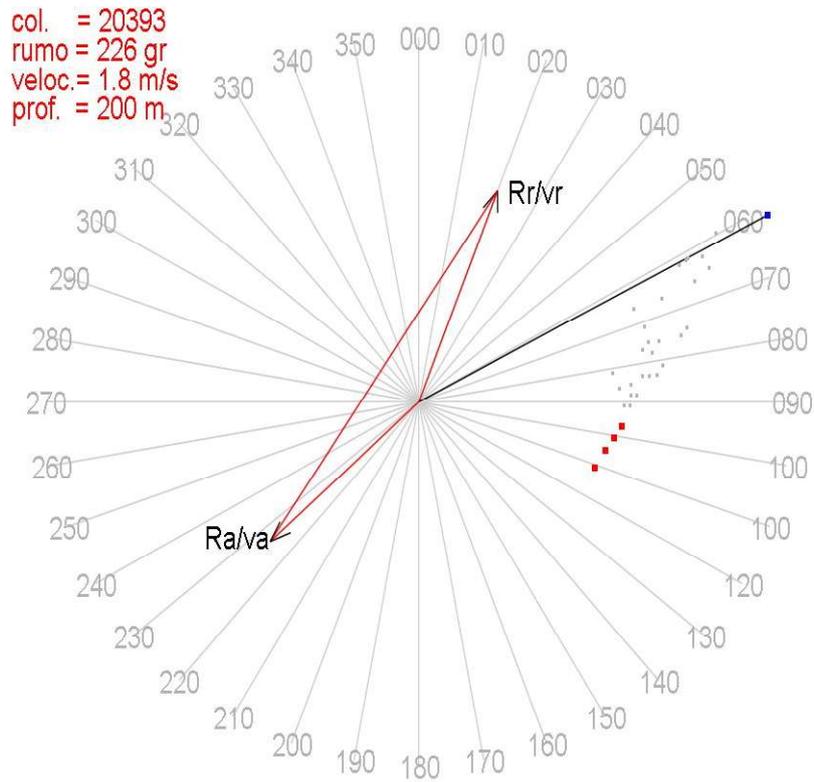


Figura 5.6: Plotagem em uma Rosa de Manobras do resultado de uma simulação considerando erro aleatório na determinação dos “mínimos”. Nesse teste foram adicionados valores aleatórios obtidos a partir de uma distribuição uniforme aos intervalos entre “mínimos” da coluna 20393 gerada pelo programa simulacenarios.m e utilizada para simular um sinal real. Após o teste, o programa apresentou como solução a coluna 20393. Ou seja, nesse caso, conseguiu-se obter o resultado esperado, mesmo na presença de erro aleatório.

Na Figura a seguir são ilustrados dois diferentes cenários considerando erro aleatório na determinação dos “mínimos”. Observa-se que, mesmo com um fator de erro mais elevado, foi possível encontrar a coluna correta como solução. É interessante observar o aumento da quantidade de plotagens em cinza que ilustra o aumento dos erros e dos casos de ambiguidade.

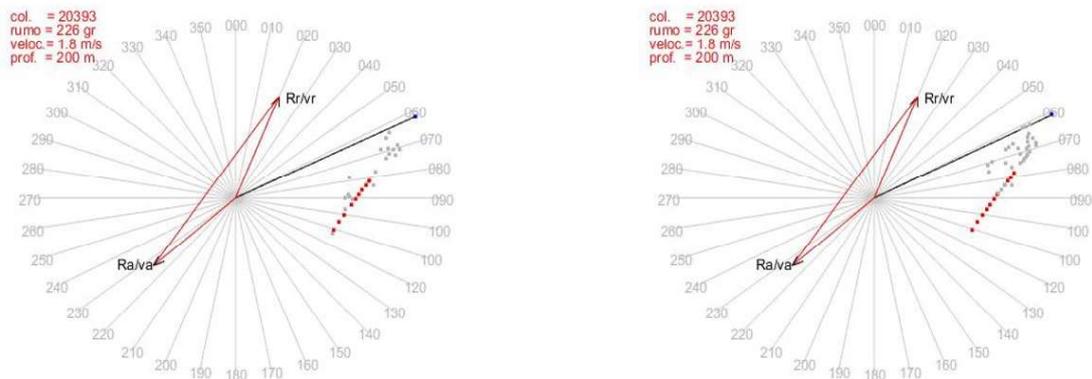


Figura 5.7: Representação de dois diferentes cenários que são gerados a partir de diferentes valores considerando erros aleatórios na determinação dos “mínimos”.

#### 5.1.4 Simulação com ruído

Nesta simulação, um ruído uniforme aleatório é adicionado ao sinal recebido correspondente ao tom discreto detectado. Não existe aqui a intenção de representar fidedignamente o ruído ambiente, mas sim de testar novamente a capacidade do programa de encontrar a solução, mesmo após a adição de um ruído ao sinal. O ruído ambiente é um tema complexo muito bem representado pelo clássico artigo de Wenz [14] que forneceu uma análise espectral gráfica e esquemática onde foram apresentados níveis de ruído por faixas de frequência e foram identificadas fontes de ruído ambiente e as conseqüentes omnidirecionais [15]. Após o acréscimo do ruído, filtra-se o sinal antes da determinação do intervalo entre os “mínimos”. Em seguida, segue-se o cálculo dos parâmetros a partir da técnica de correlação já previamente demonstrada.

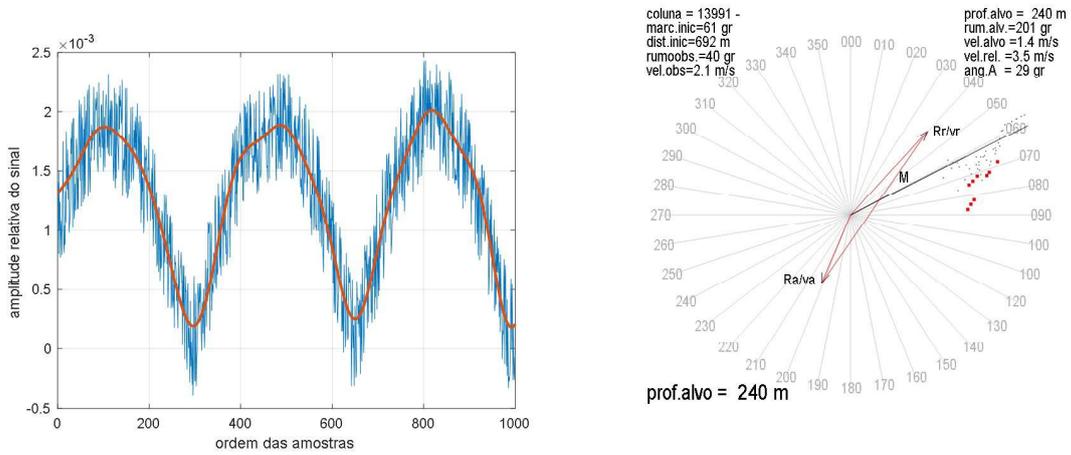


Figura 5.8: Representação do sinal acrescido de um ruído aleatório com distribuição uniforme à esquerda e da plotagem da solução do teste em uma Rosa de Manobras à direita.

Observa-se na Figura acima que o ruído interferiu na solução, levando o programa a escolher como solução uma coluna diferente da que foi inserida no teste simulando um sinal real. Já na Figura abaixo, observa-se que com um ruído menor, o programa fornece como solução a coluna 20393 que foi fornecida como teste, em lugar do sinal real.

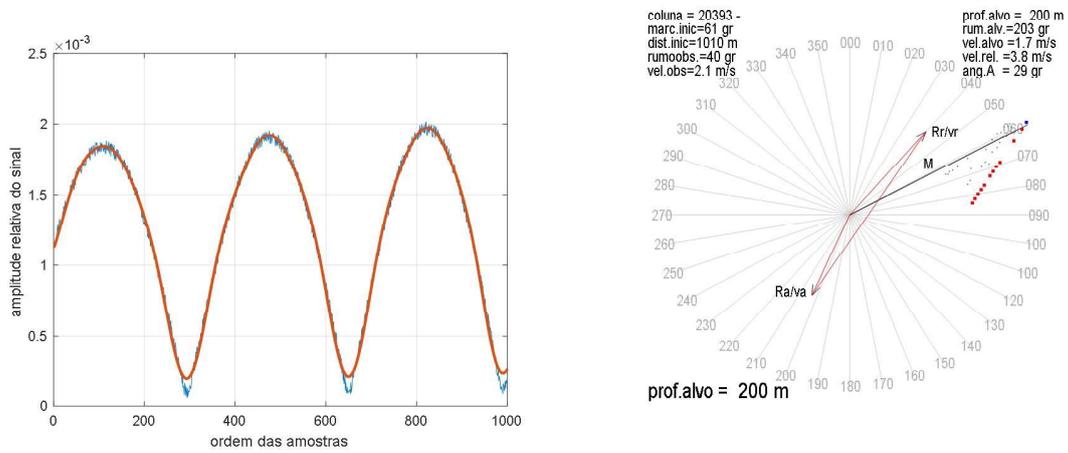


Figura 5.9: Representação do mesmo sinal, acrescido de um ruído aleatório com distribuição uniforme de menor intensidade que o ilustrado na Figura 5.8 à esquerda, e da plotagem da solução do teste em uma Rosa de Manobras à direita.

Comparando os dois resultados podemos observar que, nesse caso, houve uma diferença de 318m em distância, 0,3m/s para a velocidade do alvo, 2 graus para o rumo e 40m em profundidade. Na Figura abaixo, podemos observar o resultado armazenado na matriz8 após o cálculo da comparação utilizando o ruído ilustrado na Figura 5.8, acima e o ruído ilustrado na Figura 5.9, abaixo.

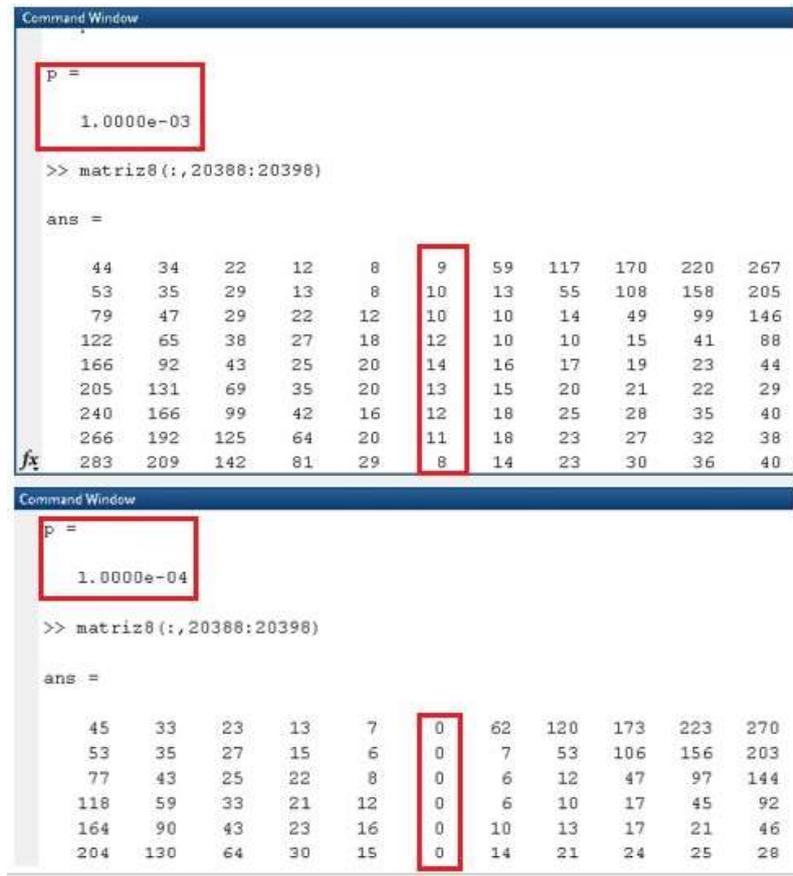


Figura 5.10: Representação da comparação entre os resultados obtidos e armazenados na matriz8 para a coluna 20393 considerando o acréscimo de dois diferentes ruídos aleatórios com distribuição uniforme ao sinal.

### 5.1.5 Simulação com guinada do alvo

Essa simulação tem por objetivo testar o funcionamento dos programas em um caso em que o alvo realize uma guinada durante a observação do sinal.

É selecionada a coluna 20393 para simular o sinal real e uma marcação inicial, são obtidas as diferenças de tempo entre “mínimos” e são executados os programas calculaparametros.m e rosademanobras13.m (programa auxiliar destinado à plotagem da solução). Em seguida, é escolhida uma nova coluna (20013) e uma nova marcação do alvo, e são executados novamente os programas calculaparametros.m e rosademanobras13.m.

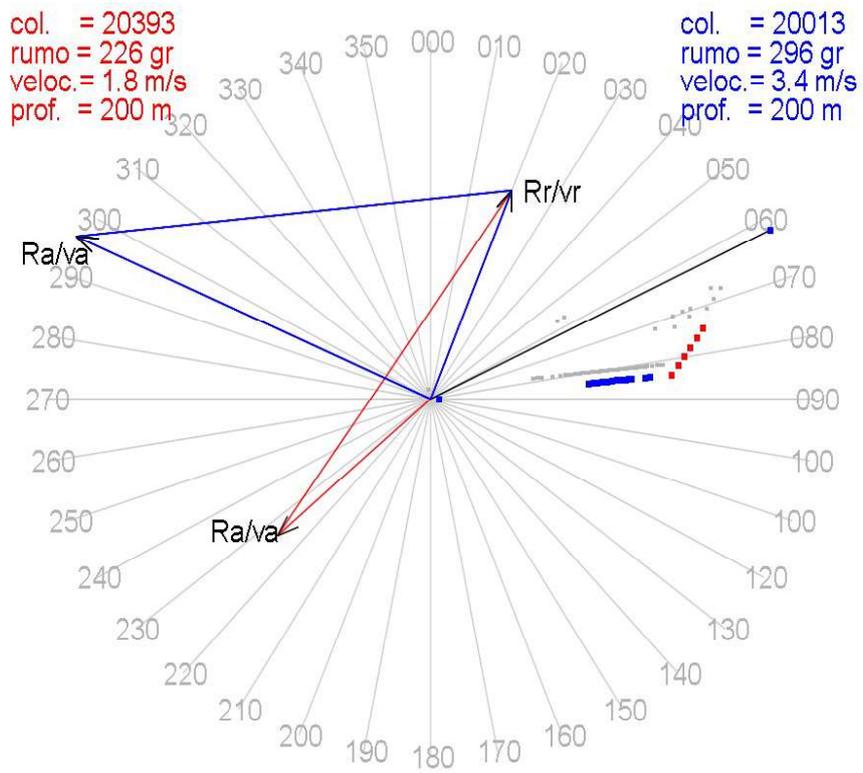


Figura 5.11: Representação da situação em que o alvo efetua uma guinada durante a detecção dos intervalos entre os “mínimos”.

O resultado plotado na Rosa de Manobras demonstra que, mesmo que o alvo efetue uma guinada durante a detecção, uma solução será apresentada pelo programa.

# Capítulo 6

## Considerações finais

### 6.1 Conclusões

Durante esta pesquisa observou-se que, uma vez que os tons discretos gerados por equipamentos empregados a bordo de submarinos sejam submetidos ao efeito Lloyd-mirror, o padrão de interferências pode ser aproveitado como instrumento de determinação dos parâmetros da análise de movimento do alvo para solução de tiro. Cabe ressaltar que foi constatado que esse feito está sendo utilizado em ao menos dois sistemas de combate empregados por outras marinhas. Um desses sistemas é utilizado por sonobóias, e fornece a distância e a profundidade do alvo no PMA. O outro sistema é utilizado por submarinos e fornece a distância, profundidade e velocidade do alvo.

É interessante comentar que, nos testes de desenvolvimento desses programas, só foram analisadas trinta mil possibilidades em função das limitações de memória e capacidade de processamento disponíveis. A disponibilidade de hardware e software de melhor qualidade permitirá a análise completa das cento e sessenta mil possibilidades, ou mais, além de permitir uma reavaliação das dimensões das matrizes de combinações, o que permitirá aumentar os limites de profundidade, a faixa de analisada de distâncias ao alvo e obter uma maior precisão na determinação da velocidade. Acredita-se que a experiência dos profissionais envolvidos com a operação dos sonares associada à capacidade de computação em tempo real permitirão definir os limites e as necessidades a serem priorizadas, tendo sempre em mente que, uma maior precisão poderá demandar mais tempo e um maior esforço de processamento para que se obtenha a solução da AMA.

Foi observado que a correlação aplicada à análise de tons discretos só pode ser feita com a diferença de tempo entre os “mínimos”, e não com os instantes dos “mínimos” propriamente ditos.

Cabe ressaltar que, caso seja empregado a bordo de um submarino, o programa

simulacenarios.m deve estar sempre atualizado em termos de rumo, velocidade e profundidade do submarino receptor do sinal. Acredita-se que uma medição em tempo real deve fornecer mais informações sobre instabilidades na determinação dos instantes dos “mínimos”. Foram feitos testes que permitiram observar que, mesmo que haja erros na determinação dos “mínimos” ou que a detecção ocorra na presença de ruídos, uma solução será fornecida e a margem de erro observada nesses casos parece ser aceitável diante da capacidade do armamento a ser empregado. Cabe ressaltar aqui que, no caso de um tom discreto, o ruído é analisado em uma banda estreita, sendo submetido a uma análise espectral, e que é esperado que isso já reduza muito o efeito do ruído e melhore a relação sinal-ruído.

Com relação às ambiguidades, a idéia básica deste trabalho foi não procurar exaustivamente eliminar as possíveis ambiguidades, mas sim apresentá-las na plotagem e tirar partido de correlações coerentes que permitam determinar os parâmetros do alvo.

Outro aspecto importante a ser considerado é que, a análise do “máximo” de sinal, embora seja menos precisa, pode garantir uma relação sinal-ruído suficiente para detecção em casos em que, a princípio, o alvo ainda não tenha sido detectado, seja devido a um maior ruído ambiente ou a um excelente isolamento acústico.

Com relação ao tempo necessário para determinação de uma solução, cabe ressaltar que trata-se de uma função da frequência do tom discreto e da profundidade da fonte sonora, essas duas variáveis impactarão diretamente na quantidade de “mínimos” e, conseqüentemente, na disponibilidade de intervalos entre “mínimos” a serem analisados. É interessante comentar que o Efeito Lloyd-Mirror pode fornecer informações de distância ao alvo utilizando frequências que talvez não sejam detectadas pela faixa de operação dos sonares dedicados a medição passiva de distâncias. Outra consideração interessante é que a distância Ekelund requer o prévio conhecimento da velocidade do alvo, informação que talvez não esteja disponível para um alvo que não esteja “cavitando”. Ainda com relação à distância Ekelund, ela requer o uso de guinadas que podem gerar ruídos devidos ao uso do leme e requer um tempo de ao menos três minutos em cada rumo para determinação da solução do alvo, sendo muito provavelmente uma solução mais lenta que a sugerida nesta pesquisa.

Uma vez que maiores frequências fornecerão mais “mínimos” em um mesmo intervalo de tempo, espera-se que a análise de maiores frequências permita que a solução seja obtida mais rapidamente, mas deve-se ter em mente que, frequências maiores são mais suscetíveis a perdas por espalhamento na superfície em função do estado do mar, como já previamente apresentado no capítulo 3. Sendo assim, acredita-se que o sistema funcionará sempre que houver uma relação sinal-ruído suficiente.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

As investigações de tons discretos na raia não produziram resultados válidos pela pouca quantidade de “mínimos”, provavelmente devido à geometria do problema e às pequenas profundidades do receptor e da fonte sonora durante as medições, além da presença de ruídos de banda larga. Espera-se que as medições realizadas com a nova raia acústica móvel da Marinha do Brasil possam otimizar a capacidade de detecção e análise desse efeito em tons discretos gerados por submarinos. Ainda com relação a esses experimentos, é interessante que, nas novas medições de ruídos, sejam registrados o estado do mar e, o perfil de velocidade do som, além da profundidade local e do tipo de fundo. Sugere-se a leitura do processo de calibração de hidrofones descrito em [1] em que o autor apresenta um caso em que um arranjo rebocado está a uma profundidade de 175m, a fonte sonora a 300m, o sinal é um tom discreto de 175Hz e a calibração é feita a uma distância de 2500m.

Como previamente apresentado nas conclusões, foram consideradas distâncias para detecção relativamente pequenas, e por isso as análises foram realizadas considerando uma condição de isovelocidade. O uso de um traçado de raios, como sugerido em [11] pode permitir maior acurácia na detecção dos parâmetros do alvo na presença de outros perfis de velocidade do som no mar.

É necessário completar os programas considerando as possibilidades de detecção em todos os quadrantes, com objetivo de eliminar qualquer erro devido ao cômputo dos diferentes ângulos. Além disso, podem ser realizados estudos levando em consideração as reflexões no fundo a fim de verificar se isso aumentaria a acurácia na determinação de parâmetros de alvos submarinos em situações em que os dois submarinos estejam abaixo da profundidade de camada.

A estabilidade e o comportamento de um tom discreto irradiado por um submarino e sua correspondente relação sinal-ruído podem e devem ser melhor investigados. Uma possibilidade de experimento consiste em utilizar os sonares Flank Array dos novos submarinos da classe Riachuelo como receptores do sinal irradiado pelos submarinos da classe Tupi e realizar gravações desses experimentos que permitam um aprofundamento do conhecimento sobre esse tipo de ruído. É interessante ressaltar que, utilizando esses recursos, a gravação poderia ser realizada em águas profundas, o que excluiria componentes devidos a reflexões no fundo além de fornecer resultados obtidos a partir de uma geometria mais favorável à ocorrência do efeito Lloyd-Mirror, uma vez que o receptor e a fonte sonora estariam em profundidades significativamente maiores que aquelas observadas durante as medições de ruído irradiado na raia acústica do CASOP.

Outra possibilidade de estudo futuro consiste em utilizar a distância ao alvo ou a velocidade do alvo como dados de entrada na simulação, em proveito de uma

maior precisão na obtenção da profundidade do alvo em casos em que seja possível determinar a distância ao alvo por outra forma de Análise de Movimento do Alvo ou através de algum sensor dedicado a essa finalidade e a velocidade do alvo pelo efeito dopler. Entretanto, cabe lembrar que, uma vez que a detecção de submarinos ocorre geralmente a curtas distâncias, talvez não haja tempo suficiente para aguardar a obtenção da velocidade ou da distância para inserir no sistema.

Por fim, acredita-se que trabalhos futuros analisando o efeito Lloyd-Mirror aplicado a ruídos de banda larga poderão também ser úteis à Marinha do Brasil, pois poderão ser utilizados para fornecer uma rápida solução da AMA de contatos de superfície que estejam cavitando, o que poderá contribuir não só para fins de combate mas também para a garantia da segurança da navegação em casos de retorno à cota periscópica e à superfície.

# Referências Bibliográficas

- [1] CAREY, W. M. “Lloyd’s mirror image interference effects”, *Acoustics Today*, v. 5, 2009.
- [2] JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B., et al. *Computational Ocean Acoustics*. 2 ed. New York, Springer, 2011.
- [3] CONTRERAS, F. *Um estudo sobre o uso de interferometria acústica aplicada a caracterização do ruído de banda larga de navios*. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1990.
- [4] ETTER, P. C. *Underwater Acoustic Modelings*. 2 ed. London, Chapman e Hall, 1996.
- [5] MEDWIN, H., CLAY, C. S. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. 2 ed. San Diego London, Academic Press, 1998.
- [6] HODGES, R. P. *Underwater Acoustics: analysis, design and performance of sonar*. 2 ed. West Sussex, United Kingdom, Wiley, 2010.
- [7] ALMEIDA, F. E. *Introdução à história marítima brasileira*. 22 ed. Rio de Janeiro, Brasil, Serviço de Documentação da Marinha, 2006.
- [8] WILSON, J. K. *Maritime surveillance using a wideband hydrophone*. Masters dissertation, Naval Postgraduate School, Monterey, California., 2007.
- [9] LEWIS, P. R. *Source localisation using Lloyd’s Mirror Fringes on Narrowband Lines*. Melbourne, Austrália, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1997.
- [10] PEREIRA, A., HARRIS, D., TYACK, P., et al. “Lloyd’s mirror effect in fin whale calls and its use to infer the depth of vocalizing animals”, *Acoustical Society of America, Proceedings of Meetings on Acoustics*, v. 27, 2016.
- [11] ASTOLA, P., TABUS, I. “Immersion depth estimation using spectrograms displaying Lloyd’s mirror patterns”, *IEEE - 2014 6th International Sym-*

*posium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, 2014.

- [12] PICKARD, G. L., EMERY, W. J. *Descriptive Physical Oceanography. An Introduction.* 4 ed. New York, USA, Pergamon Press, 1982.
- [13] BROWN, E., OLLING, A., PARK, D., et al. *Ocean Circulation.* 2 ed. Singapore, Singapore, The Open University, 2001.
- [14] WENZ, G. M. "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources." *acoustical society of america*, v. 34, 1962.
- [15] CAREY, W. M., EVANS, R. B. *Ocean Ambient Noise Measurement and Theory.* 2 ed. New York, USA, Springer, 2011.

# Apêndice A

## Algumas considerações matemáticas

No capítulo 3, na equação 3.1 o sinal de menos é obtido devido à inversão de fase sofrida pelo termo referente ao sinal refletido na superfície:

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR1}}{R1} + \frac{e^{ikR2+i\pi}}{R2} \quad (\text{A.1})$$

que pode ser reescrita como:

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR1}}{R1} + \frac{e^{ikR2}}{R2} * e^{i\pi} \quad (\text{A.2})$$

Pela fórmula de Euler vemos que:

$$e^{i\pi} = \cos(\pi) + i\text{sen}(\pi) \quad (\text{A.3})$$

Substituindo  $\cos(\pi)$  por  $-1$  e  $\text{sen}(\pi)$  por  $0$  obtemos a fórmula fornecida pelo autor[2]:

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR1}}{R1} - \frac{e^{ikR2}}{R2} \quad (\text{A.4})$$

Cabe ressaltar que esse resultado satisfaz a condição de fronteira na superfície (pressure-release,  $p = 0$ ), o que é aceitável considerando que a pressão, ao nível do mar, seja zero. Uma aproximação ainda mais precisa poderia ser utilizada somando a pressão atmosférica nessa equação, o que faria pouca diferença para grandes profundidades, mas pode apresentar uma diferença considerável em águas rasas.

No capítulo 3, logo após a equação 3.17 é informado que o autor utiliza a aproximação  $\text{sen}(\theta) = \theta$  e é apresentado o erro que pode ser de menos de 1% para ângulos de até  $14^\circ$  ou de 10%, para um ângulo de  $45^\circ$ . A determinação desse erro em função da aproximação  $\text{sen}(\theta) = \theta$  pode ser obtido pela expansão do seno em

série de Taylor truncada em seu segundo termo:

$$f(x) = f(0)x + f'(0) + f''(0)\frac{x^2}{2!} + f'''(0)\frac{x^3}{3!} \quad (\text{A.5})$$

o que nos permite obter:

$$\text{sen}(x) = 0 + 1 * x + 0 - 1 * \frac{x^3}{3!} \quad (\text{A.6})$$

que equivale a:

$$\text{sen}(x) = x - \left(\frac{x^3}{3}\right) \quad (\text{A.7})$$

substituindo x por  $\theta$ :

$$\text{sen}(\theta) = \theta - \left(\frac{\theta^3}{3}\right) \quad (\text{A.8})$$

Dividindo todos os termos por  $\theta$  podemos obter:

$$\frac{\text{sen}(\theta)}{\theta} = 1 - \frac{\theta^2}{6} \quad (\text{A.9})$$

Que equivale a:

$$\frac{\theta^2}{6} = 1 - \frac{\text{sen}(\theta)}{\theta} \quad (\text{A.10})$$

Uma vez que  $\text{sen}(\theta) \simeq \theta$  e não igual, obtemos:

$$\left(\frac{\text{sen}(\theta)}{\theta}\right) = 10^{-n} \quad (\text{A.11})$$

Onde  $10^{-n}$  é o erro desejado. Assim, podemos obter o valor de  $\theta$  em radianos para o erro máximo desejado:

$$|\theta| = \sqrt{6 * 10^{-n}} \quad (\text{A.12})$$

$$|\theta| = \sqrt{6} * 10^{\frac{-n}{2}} \quad (\text{A.13})$$