

CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA RAIA VIRTUAL  
DE TIRO DA MARINHA

Leonardo Cesar Cassiles de Souza

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  
Nelson Violante de  
Carvalho

Rio de Janeiro  
Agosto de 2019

CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA RAIA VIRTUAL  
DE TIRO DA MARINHA

Leonardo Cesar Cassiles de Souza

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

Examinada por:

---

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.

---

Prof. Lussac Prestes Maia, Ph.D.

---

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

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
AGOSTO DE 2019

Souza, Leonardo Cesar Cassiles de

Contribuições ao Desenvolvimento do Projeto da Raia Virtual de Tiro da Marinha / Leonardo Cesar Cassiles de Souza – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XII, 59 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Nelson Violante de Carvalho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 58-59.

1. Localização de fontes. 2.Raia Virtual de Tiro. 3.Marinha. I. Ribeiro, Carlos Eduardo Parente *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*“Portanto, quer comais quer bebais, ou  
façais outra qualquer coisa, fazei tudo  
para a glória de Deus.”*

*(Apóstolo Paulo)*

## **Dedicatória**

*À minha amada esposa, Hilana, minha  
fortaleza em todos os momentos, minha  
grande motivação para enfrentar cada  
desafio da vida.*

## **Agradecimentos**

*“Porque Deus tanto amou o mundo que deu o seu Filho Unigênito, para que todo o que nele crer não pereça, mas tenha a vida eterna.*

*Pois Deus enviou o seu Filho ao mundo, não para condenar o mundo, mas para que este fosse salvo por meio dele.”*

João 3:16,17 (Bíblia Sagrada – Nova Versão Internacional)

Agradeço primeiramente a Deus, autor da Vida. Tudo foi feito por Ele e sem Ele, nada do que foi feito se fez.

Aos meus pais (em memória) Paulo e Rita, pelo exemplo e apoio que sempre tive durante todos os anos que pude contar com sua presença.

Ao meu irmão Junior e sua família, pelo companheirismo e por entender minha ausência nesse período.

Aos meus orientadores, Professor Parente e Professor Nelson, pelas orientações, compreensão e parceria para a realização deste trabalho.

Aos Oficiais de Marinha, Capitães de Fragata Romar e Rubens Carlos, por orientações técnicas objetivas, as quais me levaram a concretizar este trabalho.

Aos meus chefes navais, Capitães de Mar e Guerra Madureira, Posada e Uendel, Capitães de Fragata Berolati, Cláudio Santos, Júlio Bitencourt e Clayson, pelo apoio e compreensão fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Em especial, à minha amada esposa, Hilana, pelos cafezinhos de madrugada, pelos carinhos quando me sentia só, pelas palavras de incentivo quando o desânimo chegava à porta, e pelas muitas horas que precisou abrir mão de minha presença sem uma reclamação sequer. Se é verdade que atrás de cada grande homem existe uma grande mulher, acrescentaria que, às vezes, isso também ocorre quando se trata de homens comuns. Portanto, não há espaço suficiente aqui para expor meus sentimentos e gratidão por ela.

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

## CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA RAIA VIRTUAL DE TIRO DA MARINHA

Leonardo Cesar Cassiles de Souza

Agosto/2019

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Nelson Violante de Carvalho

Programa: Engenharia Oceânica

Atualmente, a Marinha do Brasil vem encontrando dificuldades para a utilização de áreas específicas em seus exercícios de artilharia com munição real. Estes treinamentos de tiro são específicos de Apoio de Fogo Naval e necessitam de determinadas áreas de encostas para aproximá-los da realidade. Tais encostas estão sendo cada vez mais restritas por diversos fatores. Dentre esses fatores, podemos citar a expansão demográfica, o que impossibilita a utilização de encostas no continente e, principalmente, por proteção ambiental, já que o impacto das munições pode causar danos ao meio ambiente.

Como solução para estas restrições, vislumbrou-se um projeto de Raia Virtual de Tiro capaz de substituir as encostas, cada vez mais restritas e proibidas para este fim. Ou seja, a concepção da Raia Virtual de Tiro visa flexibilizar o local de realização do tiro e evitar a utilização de encostas de ilhas, atualmente declaradas reservas ambientais.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo capaz de indicar a localização de uma fonte sonora gerada pelo impacto de um projétil no mar, utilizando um sistema de boias acústicas e descrever as características gerais do projeto da Raia Virtual de Tiro em desenvolvimento. Projeto este de grande contribuição para o crescimento da Indústria de Defesa e o aprimoramento do conhecimento tecnológico da Marinha, e também porque atende à necessidade de uma área-alvo de tiro para a execução de exercícios de Apoio de Fogo Naval.

O desenvolvimento dessa nova tecnologia vai possibilitar a continuidade da realização dos exercícios de tiro, antes realizados somente na ilha de Alcatrazes e, posteriormente, restritos à ilha da Sapata, e sua realização em qualquer ponto das águas jurisdicionais brasileiras, sem restrição temporal.

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

## CONTRIBUTIONS TO THE DEVELOPMENT OF THE VIRTUAL SHOOTING

### LANE PROJECT OF NAVY

Leonardo Cesar Cassiles de Souza

August/2019

Advisors: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Nelson Violante de Carvalho

Department: Ocean Engineering

Currently, the Brazilian Navy is facing difficulties to use specific areas in its real ammunition artillery exercises. These shooting training are specific to Naval Fire Support and require certain slope areas to bring them closer to reality. Such slopes are being increasingly restricted by several factors. Among these factors, we can mention the demographic expansion, which makes the use of slopes on the continent impossible and, mainly, for environmental protection, since the impact of munitions can cause damage to the environment.

As a solution to these restrictions, we envisioned a Virtual Shooting Lane project capable of replacing the increasingly restricted and forbidden slopes for this purpose. That is, the design of the Virtual Shooting Lane aims to make the shooting place more flexible and avoid the use of island slopes, currently declared environmental reserves.

The present work aims to develop an algorithm capable of indicating the location of a sound source generated by the impact of a projectile in the sea, using an acoustic buoy system and describe the general characteristics of the project of the Virtual Shooting Lane under development. This project makes a major contribution to the growth of the Defense Industry and the improving technological knowledge of the Navy, and also because it meets the need for a target shooting area for the execution of Naval Fire Support exercises.

The development of this new technology will allow the continuity of the shooting exercises, previously performed only in Alcatrazes Island and, later, restricted to the Sapata Island, and its accomplishment in any point of the Brazilian jurisdictional waters, without temporal restriction.

# Sumário

1. Introdução .....	1
1.1 Histórico.....	1
1.2 Formulação do problema.....	2
1.3 Objetivos .....	4
1.4 Pesquisa e organização do documento .....	5
2. Revisão Teórica.....	5
2.1 Localização .....	5
2.2 Solução utilizando Linearização por Série de Taylor.....	11
2.3 Solução por Equações Paramétricas.....	12
2.3.1 Translação da Hipérbole.....	13
2.3.2 Rotação da Hipérbole .....	13
2.4 Solução por Máxima Verossimilhança.....	15
2.5 Fatores que influenciam a Localização .....	17
2.5.1 Explosão .....	18
2.5.2 Onda de Choque .....	20
2.5.3 Splash .....	22
2.5.4 Influência da Trajetória do Projétil .....	28
2.5.5 Efeito Lloyd Mirror .....	29
3. Metodologia .....	32
3.1 Raia Virtual de Tiro (RVT).....	32
3.2 Planejamento do Experimento .....	34
3.3 Especificação Técnica .....	35
3.4 Aplicação do Método .....	42
3.4.1 Equações Hiperbólicas Paramétricas.....	43
3.4.2 Máxima Verossimilhança.....	43
4. Resultados e Discussão .....	44
4.1 Experimento 1 .....	44
4.2 Experimento 2 .....	49
5. Conclusões e Sugestões.....	57

## Lista de Figuras

Figura 1	Antiga raia de tiros da Marinha.....	3
Figura 2	Esquema do projeto da Raia Virtual de Tiro.....	4
Figura 3	Dois sinais de entrada e sua correlação cruzada.....	6
Figura 4	Deslocamento dos vetores para o cálculo de correlação cruzada...7	
Figura 5	Exemplificação de um cenário de captura com 2 hidrofones.....	8
Figura 6	Hipérbole e seus pontos notáveis.....	9
Figura 7	Interseção das hipérbolas e localização da fonte.....	10
Figura 8	Hipérbole e pontos para parametrização.....	12
Figura 9	Hipérbole deslocada da origem.....	13
Figura 10	Esquema para deduzir a rotação.....	13
Figura 11	Hipérbole rotacionada.....	14
Figura 12	Esquema do muzzle blast que será captado pelos hidrofones.....	19
Figura 13	Um projétil com velocidade igual à velocidade do som.....	20
Figura 14	Um projétil com velocidade superior à velocidade do som.....	21
Figura 15	Forma de onda gerada por um projétil supersônico.....	22
Figura 16	Forma de onda de um splash.....	23
Figura 17	Modelo simples de propagação.....	24
Figura 18	Tempo de propagação estimado pelo modelo simples.....	24
Figura 19	Sinal recebido a uma determinada distância em função do tempo de propagação.....	25
Figura 20	Raios previstos pelo Bellhop, até uma distância de 1600 m.....	26
Figura 21	Eigenrays, para o hidrofone a várias distâncias.....	26
Figura 22	Sinal recebido em função da distância usando o modelo de raio Ctraceo.....	27
Figura 23	Efeito Lloyd Mirror.....	29
Figura 24	Exemplo numérico do efeito Lloyd Mirror.....	31
Figura 25	Raia Virtual de Tiro.....	33
Figura 26	Esquema do projeto da RVT.....	34
Figura 27	Arquitetura do projeto da RVT.....	35
Figura 28	Hidrofone Sparton (modelo PHOD-1) e sua resposta em frequência.....	35
Figura 29	GPS Garmin, antena GA 38.....	36
Figura 30	Unidade de processamento ASRock, AD525PV3.....	36

Figura 31	Bateria 12V GetPower, GP 12 20 L.....	36
Figura 32	Capacidade de recepção e transmissão de dados via rádio e antena.....	37
Figura 33	Componentes da boia da primeira versão.....	38
Figura 34	Versão da boia aprovada.....	38
Figura 35	Gerenciador de janelas.....	39
Figura 36	Teste da boia na restinga da Marambaia.....	40
Figura 37	Gravação de hidrofone durante teste na Marambaia.....	40
Figura 38	Resgate de uma boia na Marambaia.....	41
Figura 39	Triangulação com dados simulados utilizando equações hiperbólicas.....	43
Figura 40	Triangulação com dados simulados utilizando máxima verossimilhança.....	43
Figura 41	Geometria da experiência realizada na restinga de Marambaia. Fonte: IEAPM.....	44
Figura 42	Série temporal e respectivos espectogramas de sinais adquiridos na boia 1.....	45
Figura 43	Detalhe da assinatura do disparo três. Em cima, a onda que se propaga pela água. Em baixo, uma possível réplica do contato do projétil com a água.....	46
Figura 44	Splash e respectivo espectograma.....	47
Figura 45	Função de autocorrelação do splash.....	47
Figura 46	Correlação cruzada entre o splash do sinal “sp_1” e o sinal “s_1”.....	48
Figura 47	Experimento realizado na Baía de Guanabara.....	49
Figura 48	Posicionamento do experimento na Baía de Guanabara.....	49
Figura 49	Sinal do splash 1 triangulado por equações paramétricas.....	50
Figura 50	Sinal do splash 1 triangulado por máxima verossimilhança.....	50
Figura 51	Sinal do splash 2 triangulado por equações paramétricas.....	51
Figura 52	Sinal do splash 2 triangulado por máxima verossimilhança.....	52
Figura 53	Sinal do splash 3 triangulado por equações paramétricas.....	53
Figura 54	Sinal do splash 3 triangulado por máxima verossimilhança.....	53
Figura 55	Sinal do splash 4 triangulado por equações paramétricas.....	54
Figura 56	Sinal do splash 4 triangulado por máxima verossimilhança.....	54
Figura 57	Sinal do splash 5 triangulado por equações paramétricas.....	55
Figura 58	Sinal do splash 5 triangulado por máxima verossimilhança.....	55

## Lista de Abreviaturas

AFN	Apoio de Fogo Naval
BNRJ	Base Naval do Rio de Janeiro
CASOP	Centro de Apoio a Sistemas Operativos
ComOpNav	Comando de Operações Navais
CPU	Central Processing Unit (Unidade Central de Processamento)
EMA	Estado-Maior da Armada
FA	Força Armada
FAJCMC	Fábrica Almirante Jurandyr da Costa Muller de Campos
GPS	Global Positioning System
IEAPM	Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
MASS	Mobile Acoustic Scoring System
MB	Marinha do Brasil
MD	Ministério da Defesa
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PN	Poder Naval
RF	Radio Frequency
RAN	Royal Australian Navy
RNZN	Royal New Zealand Navy
RVT	Raia Virtual de Tiro
TDOA	Time Diference of Arrival

# 1. Introdução

## 1.1 Histórico

A Acústica Submarina é o estudo da propagação do som na água, bem como da interação das ondas mecânicas do som com a água. Tal interação tem sido utilizada pelos animais marinhos há milhares de anos. Já nos primeiros meses de vida, diversas espécies desenvolvem a habilidade de percepção sonora, de grande importância para a sobrevivência de muitas delas. A percepção sonora, e conseqüentemente a localização das fontes, ajuda estas espécies na sua sobrevivência e interação ou, genericamente, as ajuda a se beneficiar e reagir melhor no ambiente onde estão inseridas. Esta habilidade biológica foi se aprimorando ao longo dos anos, decorrência de uma evolução natural, o que, por si só, é o suficiente para mostrar a grande importância desta habilidade para as espécies. Contudo, o homem começou a desvendar os segredos da hidroacústica a partir do século XVI, com Isaac Newton, através do primeiro tratado do som.

Ao longo dos anos, foram realizados estudos e experimentos e, em 1877, Lord Rayleigh escreveu a “Teoria do Som”, estabelecendo a teoria da moderna acústica. Porém, somente no século XX o estudo da acústica submarina foi extremamente impulsionado com o naufrágio do navio de passageiros Titanic, em 1912, e o início da Primeira Guerra Mundial. Logo foram desenvolvidos sistemas de escuta anti-submarinos. Também, nesta época, foram desenvolvidos os sonares ativos e passivos, além das minas acústicas.

É perceptível, portanto, através da história, a crescente importância de se conhecer o comportamento do som na água, haja vista o extenso número de campos de estudo, como o sonar, processamento do sinal acústico, acústica oceanográfica, bioacústica, dentre outros.

Outro fator predominante para o desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos baseados em sinais sonoros foi o crescimento das técnicas de processamento de sinais. Muitos algoritmos foram desenvolvidos e muitas experiências têm sido realizadas nesse sentido. Entretanto, o avanço nos conhecimentos de propagação acústica em águas rasas e no desenvolvimento e validação de conhecidos e novos modelos de processamento de sinais depende de grande esforço e experimentos no mar.

Esta pesquisa pretende contribuir com esse esforço através do desenvolvimento de um algoritmo capaz de indicar a localização de uma fonte sonora no mar, utilizando um sistema de boias acústicas desenvolvido pelo Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP). Este sistema é denominado Raia Virtual de Tiro.

## 1.2 Formulação do problema

Toda nação pacífica que se propõe a ser respeitada na sua totalidade deve contar com Forças Armadas (FAs) preparadas não apenas para responder a agressões à altura, mas também para se antecipar ao conflito, evitando-o através de seu poder dissuasório. Este poder pode ocorrer pela simples demonstração do poder de força no preparo contínuo e progressivo das unidades militares, evidenciando a possibilidade de usá-lo com eficácia.

Assim, o poder dissuasório pode manifestar-se ora por efeito de desestimular ameaças ou se contrapor às hostilidades, ora pela atuação violenta do poder militar nacional para neutralizá-las.

Nas duas vertentes de emprego, as FAs devem estar preparadas em termos de material e na respectiva manipulação dos equipamentos por meio de constante adestramento.

Este preparo advém da Estratégia Militar que pode ser subdividida em Estratégia Terrestre, Naval e Aérea, conforme os elementos materiais e o emprego do poder predominantemente em terra, no mar e no ar, respectivamente.

Segundo Clausewitz, a guerra pode ser dividida em dois níveis: o tático e o estratégico. O nível tático corresponde ao planejamento e execução das FAs no engajamento, enquanto que o nível estratégico se refere ao uso ou coordenação dos engajamentos para a consecução dos objetivos da guerra. (CAMINHA, 1983, p.51)

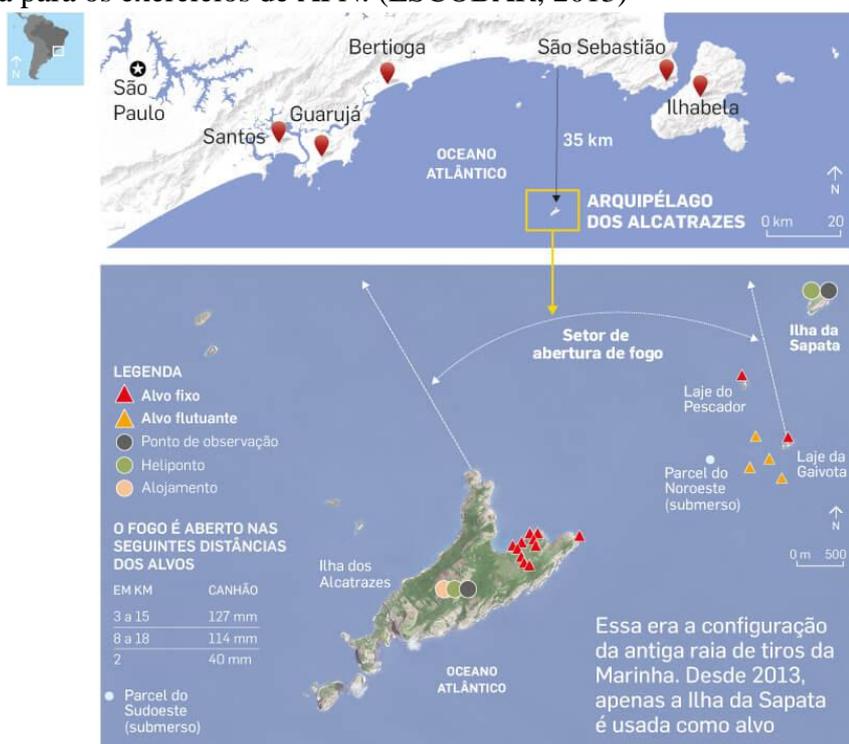
Para a Marinha do Brasil (MB) ter efetivamente maior confiança na eficácia das ações táticas de suas forças, faz-se necessário o aprimoramento tecnológico de seu quadro operativo, permitindo aos comandos as melhores condições para o planejamento e execução das operações navais. Daí decorre a necessidade de alta disponibilidade dos sistemas e adestramento das unidades, aspectos em que as modernas técnicas digitais vêm prestando cada vez maior contribuição, de forma a atender ao aprestamento dos meios, inclusive na artilharia naval.

Cabe ressaltar que a doutrina da MB estipula o emprego do Poder Naval (PN) em quatro tarefas básicas: controle de área marítima, negação do uso do mar, projetar poder sobre terra e contribuir para a dissuasão. Na penúltima delas, em especial no que toca às operações anfíbias, é essencial a capacidade de realizar Apoio de Fogo Naval (AFN), modalidade de apoio por navios de guerra, que visa diminuir resistência inimiga ao avanço de tropas, através de tiros em alvos de terra. (BRASIL, 2003)

Assim, dentro do quadro de preparação do setor operativo, a MB efetuou seus exercícios de adestramento de Apoio de Fogo Naval (AFN), através de tiros em alvos de terra, ao longo de anos, em um ponto bem específico do litoral paulista, a Ilha de Alcatrazes, situada no Arquipélago de Alcatrazes.

A MB, porém, como outras Marinhas, enfrenta problemas para conseguir áreas necessárias à sua infraestrutura, seja devido ao crescimento populacional, ao aumento imobiliário nas orlas marítimas e/ou à preservação ambiental.

Em 2013, houve a transformação do Arquipélago de Alcatrazes e seu entorno com 13 ilhas, ilhotas e lajes, em um santuário ecológico. Foi delimitada uma área de preservação ambiental, proibida a pesca, não podendo mais a MB utilizar o paredão de rochas da Ilha de Alcatrazes como raia de tiros em exercícios (Figura 1). Somente a Ilha da Sapata, que fica na parte mais externa do arquipélago, em período determinado, ficou liberada para os exercícios de AFN. (ESCOBAR, 2013)



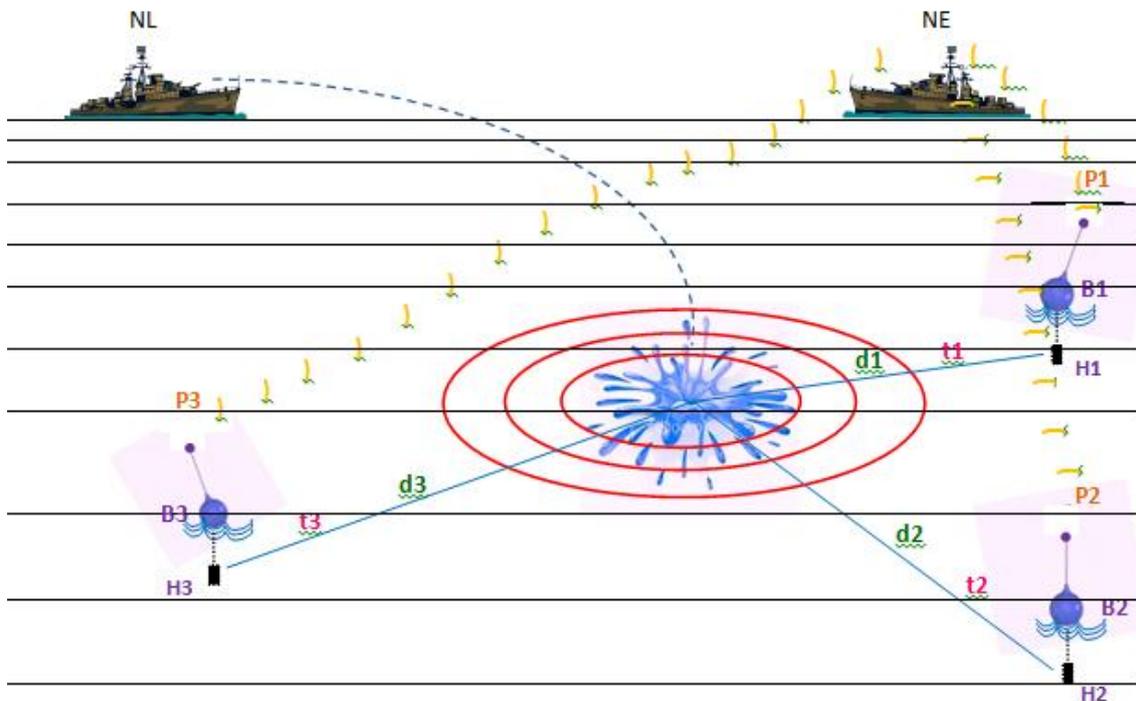
**Figura 1: Antiga raia de tiros da Marinha.**

**Fonte: <https://infograficos.estadao.com.br/especiais/alcatrazes/historia>.**

Desta forma foi criada uma grande restrição à MB para o adestramento de tiro, privando-a de uma área especialmente conveniente por estar próxima ao Rio de Janeiro, sede da Esquadra, onde era possível realizar tais exercícios com pouco gasto de combustível, ensejando a busca de soluções para o problema.

Como uma das soluções a essa restrição, o CASOP tem se empenhado no desenvolvimento do projeto Raia Virtual de Tiro (RVT) para atender à Cláusula 7, alínea B do Termo de Compromisso (BRASIL, 2008, p.3-4) entre o Ministério da Defesa (MD) e Ministério do Meio Ambiente (MMA) nº 711000/2008-001/00 (“Reestudar a possibilidade de substituição de alvos empregados para aferimento inicial dos armamentos, por alvos artificiais”) e item 3 do Ofício nº 40-45 (BRASIL, 2011, p.1) do Comando-em-Chefe da Esquadra ao Comando de Operações Navais (“Considerando a importância crescente da preservação do ecossistema da Ilha de Alcatrazes, o CASOP

iniciou estudo visando à implementação de um sistema de espotagem eletrônica de tiro, RAIA VIRTUAL, que possibilitará a realização de adestramento de AFN com maior frequência, em qualquer ponto das águas jurisdicionais brasileiras.”).



**Figura 2: Esquema do projeto da Raia Virtual de Tiro.**

$d$  → distância entre splash e as bóias

$t$  → tempo de propagação do som do splash entre o ponto de queda e as bóias de monitoração

$V_s$  → velocidade do som na água

$P$  → posição (lat/long) das bóias de monitoração

$B$  → bóias de monitoração

$NE$  → navio de espotagem

$NL$  → navio de lançamento

$H$  → Hidrofones

Com esse viés, este trabalho pretende contribuir com o desenvolvimento do projeto denominado Raia Virtual de Tiro (RVT) da Marinha, um sistema de triangulação acústica que permite determinar a localização geográfica do impacto de um projétil no mar.

### 1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo contribuir com o projeto RVT em desenvolvimento na MB, engendrando um algoritmo capaz de detectar a localização de sinais sonoros provocados pelo impacto de projetis no mar, conhecido como *splash*, por

meio de uma triangulação acústica submarina, o que contribui para o crescimento da Indústria de Defesa e o aprimoramento do conhecimento tecnológico da MB.

## 1.4 Pesquisa e organização do documento

Esta Dissertação será estruturada de forma que o Capítulo 1 apresenta o histórico, o problema a ser trabalhado, bem como os objetivos que norteiam o trabalho.

O Capítulo 2 contempla uma revisão teórica sobre técnicas de processamento de sinais, especificamente a que será utilizada na Dissertação. A partir desse capítulo, são desenvolvidos os procedimentos matemáticos referentes à localização da fonte sonora.

O Capítulo 3 explica, detalhadamente, o projeto da Raia Virtual de Tiro, incluindo as características principais dos equipamentos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos experimentos reais, utilizando a Raia Virtual de Tiro e suas conclusões.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre os experimentos e propostas para trabalhos futuros.

## 2. Revisão Teórica

### 2.1 Localização

A localização passiva de fontes acústicas é um segmento da área de processamento de sinais que tem por objetivo determinar a posição geográfica de uma fonte de sinal através da captura de suas emissões acústicas. Para isto, o sinal da fonte precisa ser recebido por sensores acústicos, cujas posições necessariamente têm que ser conhecidas pelo sistema de localização.

Um dos grandes desafios da área é que o sistema de localização de fontes deve apresentar a estimação da posição da fonte de forma rápida, em tempo real, com robustez e com o menor erro de precisão possível.

Uma fonte acústica pode ser qualquer objeto ou ser vivo que emita sinais como, por exemplo, um carro, uma pessoa, um navio ou mesmo um projétil caindo na água (splash). Os sensores são circuitos eletrônicos, dotados de microfones ou hidrofones omnidirecionais, ou seja, que permitem a captura do som de qualquer direção.

Na literatura, existem várias famílias de técnicas de localização de fontes utilizando arranjos de hidrofones, dentre as quais as mais utilizadas são baseadas na

diferença de tempo de chegada (TDOA) (BENESTY, 2008) e em técnicas de conformação de feixe, mais conhecida na literatura como beamforming (BRANDSTEIN, 2001).

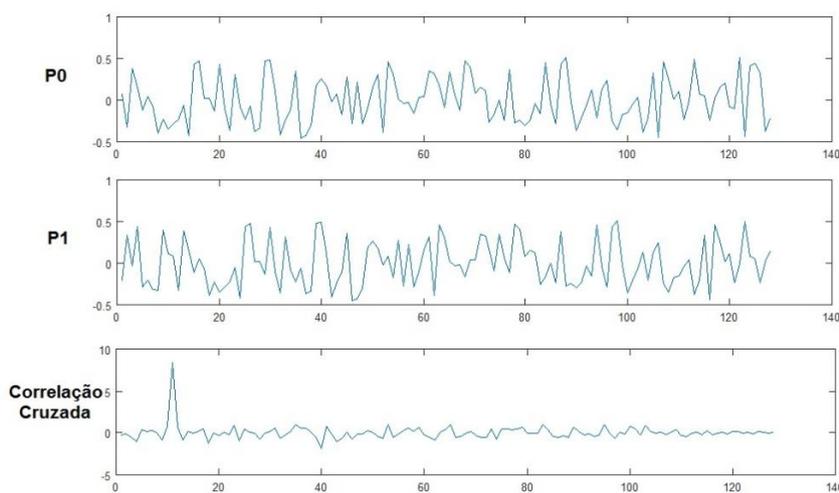
Independente da técnica adotada, a localização de fontes acústicas deve compreender duas etapas. Na primeira, estima-se o atraso na chegada do sinal aos sensores, de acordo com o método de localização empregado. Na segunda, localiza-se a posição geográfica da fonte acústica propriamente dita.

A localização se dará da seguinte forma: os sinais acústicos se propagam no mar com uma velocidade conhecida “c”. Com isso, dois hidrofones que se encontrem a distâncias distintas em relação a uma determinada fonte de sinal receberão suas emissões acústicas em instantes diferentes. Conhecendo-se a posição relativa entre os hidrofones, é possível estimar esta diferença de tempo, que é conhecida como retardo ou atraso temporal. Mediante a combinação da estimação do retardo e a posição dos hidrofones, é possível, em um segundo momento, localizar geograficamente a posição da fonte.

A estimação do retardo temporal é realizada por meio de um par de sensores, sendo o principal método de obtenção deste retardo a função de correlação cruzada dos sinais recebidos em cada sensor. O valor máximo desta função ocorre exatamente no intervalo correspondente ao retardo temporal que se deseja estimar.

De acordo com SCHIESSER (2009, p. 1), correlação cruzada em processamento de sinais é a medição de similaridade entre dois sinais, normalmente utilizada para achar características de um sinal desconhecido comparando com um conhecido. É uma função do tempo relativo entre dois sinais.

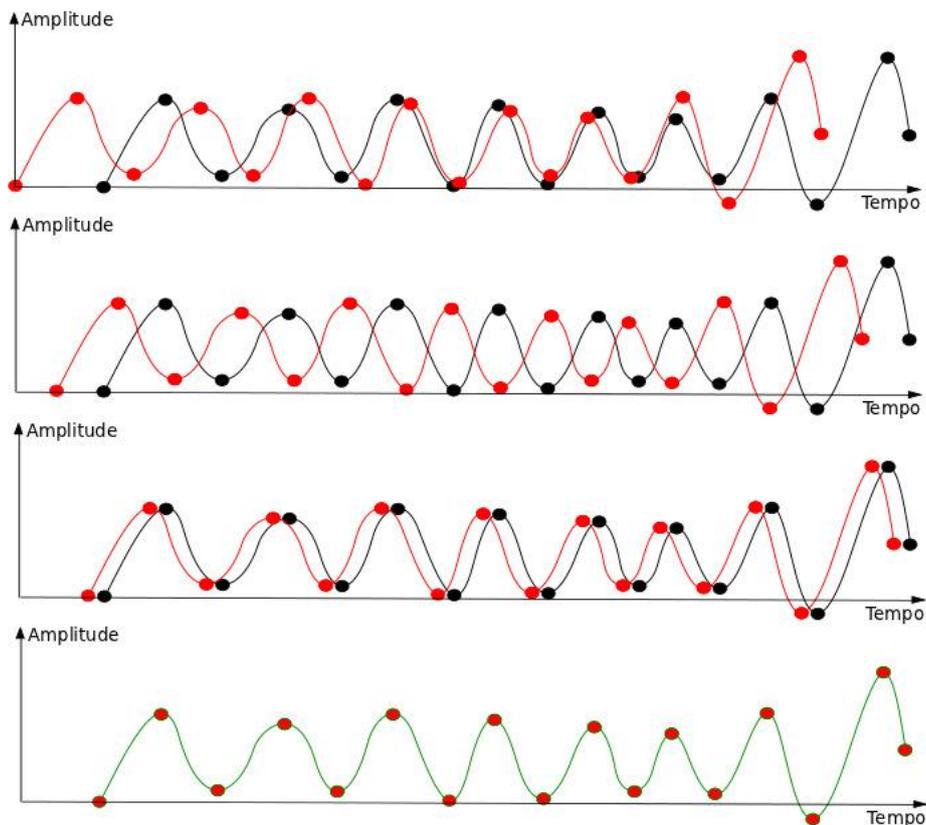
Um exemplo de correlação cruzada pode ser visto na Figura 3.



**Figura 3 - Dois sinais de entrada e sua correlação cruzada.**

Na correlação cruzada, um sinal “atravessa” o outro gerando um coeficiente para cada instante desta passagem. Na Figura 3, através da correlação cruzada entre os sinais P0 e P1, percebemos que, apesar de grande parte de um sinal ser formado por grande parte do outro, o comportamento aleatório de ambos prevalece, evidenciando pouca relação entre eles. Observando a correlação cruzada gerada, verifica-se que o instante que tem o maior pico (parte do sinal mais perto do topo do gráfico) é o instante em que os sinais têm maior similaridade. Portanto, o pico indica a defasagem de um em relação ao outro.

Para melhor entendimento desta técnica considere a Figura 4.



**Figura 4 - Deslocamento dos vetores para o cálculo de correlação cruzada.**

As quatro faixas representadas na Figura 4 são os mesmos sinais sendo comparados via correlação cruzada, mas em passos distintos da correlação e na ordem de comparação.

O sinal representado em vermelho varia pelo tempo passando pelo sinal representado em preto. Para cada instante desta passagem é calculado o produto dos sinais para saber o quão similar as ondas são naquele instante.

A maior correlação entre os sinais representados em preto e vermelho acontece no instante representado pela última faixa, no qual os dois sinais passam a ser

representados por um único sinal, mas com a cor verde, para indicar que são iguais naquele instante.

Este cálculo do produto é conhecido como “dot product” ou produto escalar, que é representado pela fórmula:

$$X \cdot Y = \sum_i X_i * Y_i \quad (2.1)$$

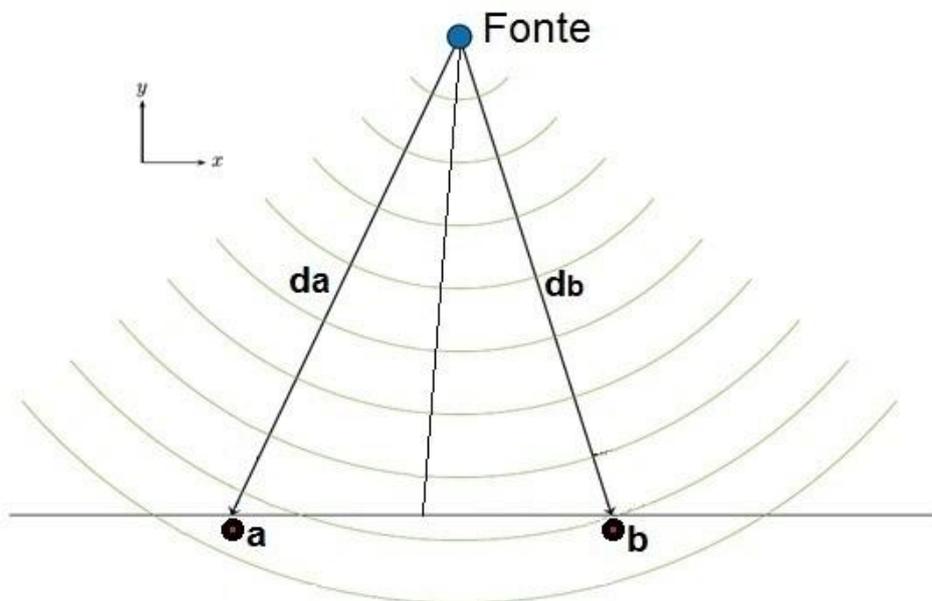
Através do cálculo do *dot product* consegue-se uma razão de similaridade para cada atraso, desta forma compara-se a similaridade de cada atraso. O atraso que possuir o maior *dot product* é o atraso de chegada da onda sonora nos hidrofones.

Exemplificando: seja uma fonte acústica, com localização dada pelo vetor  $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s)$ . Um sensor  $\mathbf{i}$ , com coordenadas  $(x_i, y_i)$ , representado pelo vetor  $\mathbf{r}_i$  receberá o sinal da fonte com um retardo de tempo dado por:

$$\tau_i = \frac{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_i|}{c}, \quad (2.2)$$

onde  $c$  representa a velocidade de propagação do som no mar. Para um par de hidrofones  $a$  e  $b$ , pode-se determinar o retardo temporal relativo entre eles,  $\tau_{ab} = \tau_a - \tau_b$ . Logo,

$$\tau_{ab} = \frac{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_a|}{c} - \frac{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_b|}{c} \quad (2.3)$$



**Figura 5 – Exemplificação de um cenário de captura com 2 hidrofones.**

O modelo de captura representado pela Figura 5 mostra o som emitido por uma fonte sonora chegando aos dois hidrofones em momentos diferentes.

Vamos chamar o sinal capturado pelo hidrofone **a** de  $S_a$  e pelo hidrofone **b** de  $S_b$ . Desta forma, aplicamos a correlação cruzada para o par de sinais capturados pelos hidrofones.

$$\text{Cross-correlation}(S_a, S_b)$$

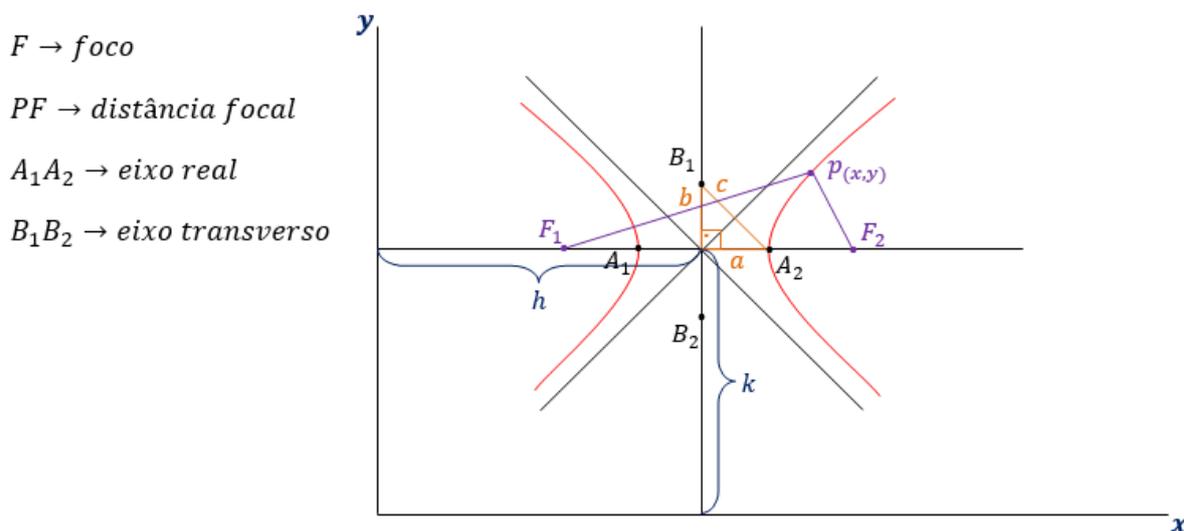
Com isso, conseguimos estimar o tempo de diferença entre os sinais captados pelos dois hidrofones ( $\tau_{ab}$ ).

O atraso calculado está no domínio de tempo. Como o objetivo é estimar a localização de uma fonte sonora, a localização é relativa à posição, portanto, no domínio do espaço.

$$d_a - d_b = c \cdot \tau_{ab} \quad (2.4)$$

O cálculo do retardo entre dois hidrofones especifica uma região hiperbólica de pontos sobre os quais a fonte sonora correspondente está localizada.

Uma hipérbole  $H$  é o lugar geométrico dos pontos do plano cujo módulo da diferença das distâncias a dois pontos fixos  $F_1$  e  $F_2$  é uma constante igual a  $2a$ .

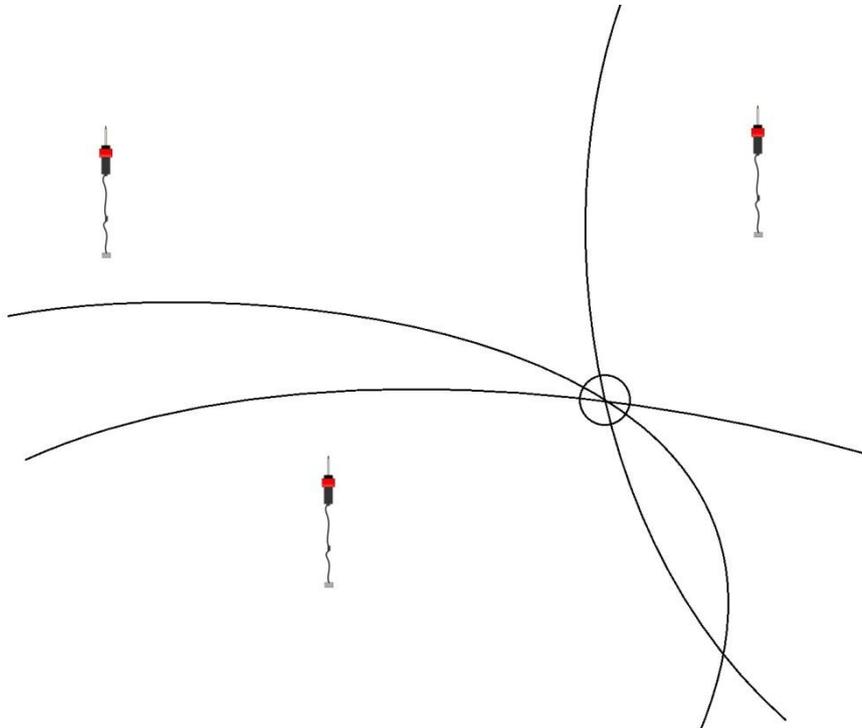


**Figura 6 – Hipérbole e seus pontos notáveis.**

Equação da hipérbole de abertura leste-oeste, fora do centro e no plano cartesiano:

$$\frac{(x-h)^2}{a^2} - \frac{(y-k)^2}{b^2} = 1 \quad (2.5)$$

A motivação do uso da hipérbole no projeto é justamente devido à sua característica plana, cujo módulo da diferença das distâncias focais para cada ponto P é constante. A partir das diferenças de distância assim obtidas, é possível escrever um conjunto de equações hiperbólicas cuja solução fornecerá a estimativa de posição da fonte.



**Figura 7 – Interseção das hipérbolas e localização da fonte.**

Os algoritmos propostos na literatura técnica para resolver este conjunto de equações não lineares possuem diferenças de complexidade e desempenho.

A formulação geral para solução do problema assume um cenário composto por uma fonte, que é o splash, ou seja, o som emitido por ocasião do impacto do projétil no mar e M hidrofones. Tomando como referência um hidrofone designado pelo índice 1, define-se o vetor  $d = [d_{21}, d_{31}, \dots, d_{M1}]^T$  que tem como componentes as diferenças entre os tempos de chegada do sinal ao hidrofone de referência e a cada um dos M-1 hidrofones restantes, ou seja,  $d_{i1} = d_i - d_1$ ,  $i = 2, \dots, M$ .

Sejam  $(x, y)$  as coordenadas do splash e  $(X_i, Y_i)$  as coordenadas do i-ésimo hidrofone. A distância entre o splash e o i-ésimo hidrofone será dada por:

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (2.6)$$

A diferença entre as distâncias do splash ao i-ésimo hidrofone e ao hidrofone de referência é, portanto:

$$R_{i1} = cd_{i1} = R_i - R_1 = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \quad (2.7)$$

Onde  $c$  é a velocidade de propagação do som no mar e  $R_1$  é a distância entre o splash e o primeiro hidrofone. Assim, a expressão acima define um conjunto de  $M-1$  equações hiperbólicas não lineares cuja solução fornece a posição  $(x, y)$  do splash.

## 2.2 Solução utilizando Linearização por Série de Taylor

Para a solução do conjunto de equações obtido, FOY (1976) utilizou o método de linearização por série de Taylor, finalizando com um método iterativo, o qual começa com uma estimativa inicial e melhora a estimativa em cada iteração, determinando a solução por mínimos quadrados. Com um conjunto de estimativas de TDOA, o método começa com uma estimativa inicial  $(x_0, y_0)$  e calcula os desvios  $(\Delta x, \Delta y)^T$  da estimativa de localização da posição.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{h}$$

Onde,

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} R_{2,1} - (R_2 - R_1) \\ R_{3,1} - (R_3 - R_1) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{X_1 - x}{R_1} - \frac{X_2 - x}{R_2} & \frac{Y_1 - y}{R_1} - \frac{Y_2 - y}{R_2} \\ \frac{X_1 - x}{R_1} - \frac{X_3 - x}{R_3} & \frac{Y_1 - y}{R_1} - \frac{Y_3 - y}{R_3} \end{bmatrix}$$

Os valores de  $R_1$  e  $R_2$  são dados por

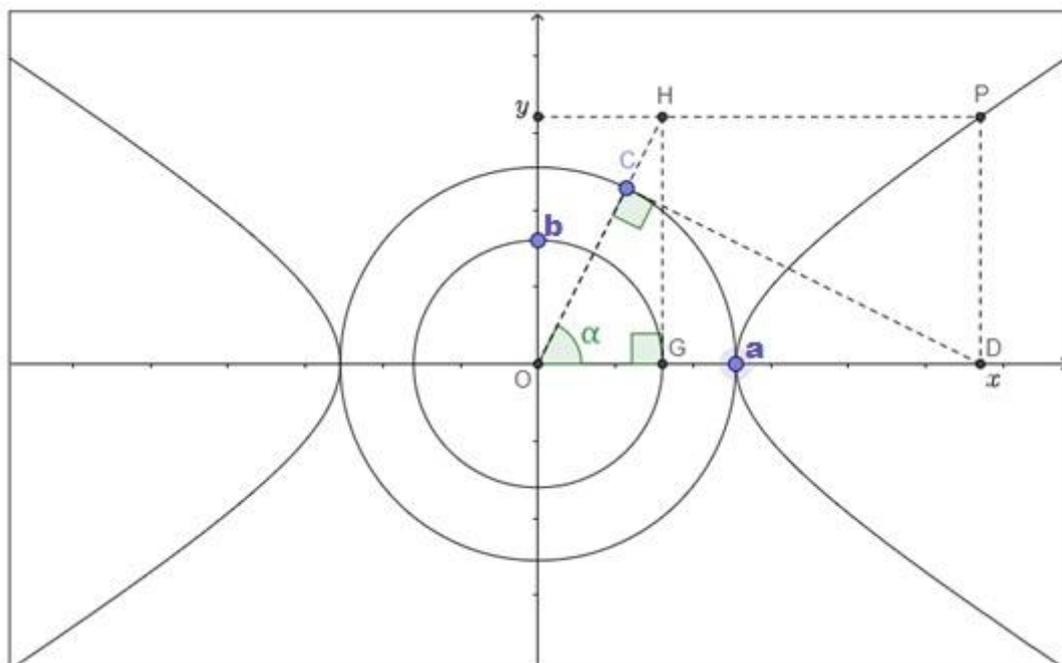
$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (2.8)$$

Onde  $x = x_0$  e  $y = y_0$ .

Na próxima iteração,  $x_0$  e  $y_0$  são ajustados para  $x_0 + \Delta x$  e  $y_0 + \Delta y$ .

Todo o processo é repetido até que  $\Delta x$  e  $\Delta y$  sejam suficientemente pequenos, inferiores à tolerância ao erro de precisão do tiro, resultando na posição estimada do splash  $(x, y)$ .

## 2.3 Solução por Equações Paramétricas



**Figura 8 – Hipérbole e pontos para parametrização.**

Seja a hipérbole da Figura 8 de equação  $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$ .

Note que no triângulo retângulo  $ODC$ , temos que:

$$\cos \alpha = \frac{OC}{OD} = \frac{a}{x}$$

Como  $\sec \alpha = \frac{1}{\cos \alpha}$ , temos que:

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \frac{x}{a} \Leftrightarrow \sec \alpha = \frac{x}{a} \Leftrightarrow x = a \sec \alpha$$

Por outro lado, note que no triângulo retângulo  $OGH$ , temos que:

$$\tan \alpha = \frac{GH}{OG} \Leftrightarrow \tan \alpha = \frac{y}{b} \Leftrightarrow y = b \tan \alpha$$

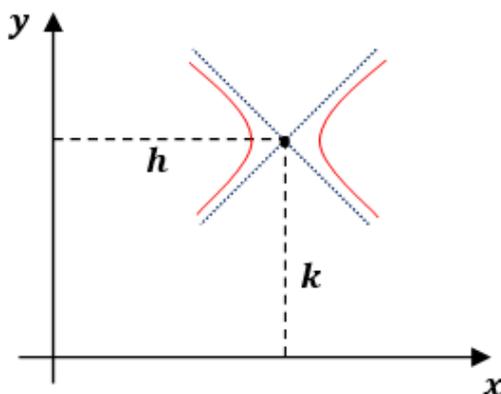
Portanto, a fim de facilitar a implementação computacional da equação da hipérbole, as variáveis cartesianas foram alteradas para funções dependentes do parâmetro “ $\alpha$ ” da seguinte forma:

$$f_1: x = f(\alpha) \tag{2.9}$$

$$f_2: y = f(\alpha) \tag{2.10}$$

### 2.3.1 Translação da Hipérbole

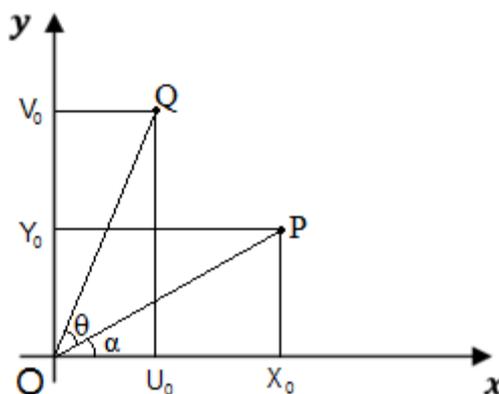
A translação da hipérbole é definida pelos parâmetros “h” e “k” de deslocamento em “x” e “y” respectivamente, no plano cartesiano.



**Figura 9 – Hipérbole deslocada da origem.**

$$\begin{cases} x = a \cdot \sec \alpha + h \\ y = b \cdot \tan \alpha + k \end{cases} \quad (2.11)$$

### 2.3.2 Rotação da Hipérbole



**Figura 10 – Esquema para deduzir a rotação.**

Consideremos que uma rotação de um ângulo  $\theta$ , no sentido anti-horário, leve um ponto  $P=(x_0, y_0)$  num ponto  $Q=(u_0, v_0)$ . Note que uma rotação preserva a distância de cada ponto à origem. Assim,  $|OP|=|OQ|=r$ . Aplicando as leis de senos e cossenos, temos:

$$x_0 = r \cos \alpha \quad (2.12)$$

$$y_0 = r \sin \alpha \quad (2.13)$$

$$u_0 = r \cos(\alpha + \theta) = r \cos \alpha \cdot \cos \theta - r \sin \alpha \cdot \sin \theta \quad (2.14)$$

$$v_0 = r \sin(\alpha + \theta) = r \sin \alpha \cdot \cos \theta + r \cos \alpha \cdot \sin \theta \quad (2.15)$$

Assim,

$$u_0 = x_0 \cos \theta - y_0 \sin \theta \quad (2.16)$$

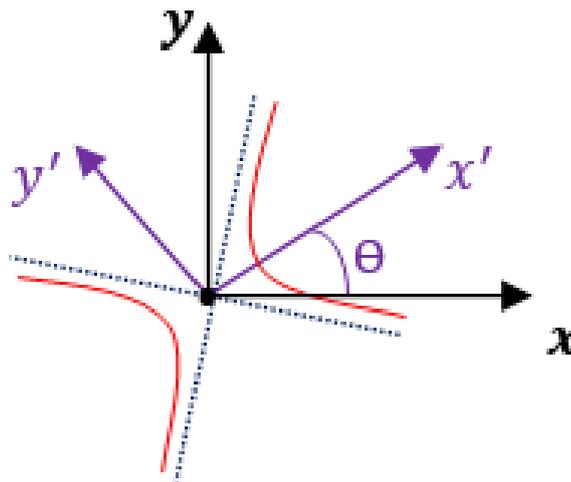
$$v_0 = y_0 \cos \theta + x_0 \sin \theta \quad (2.17)$$

Logo, uma rotação de um ângulo  $\theta$ , no sentido anti-horário, pode ser pensado como a rotação dos eixos de um ângulo  $\theta$ , no sentido horário, produzindo um novo sistema de coordenadas  $uv$  onde valem as relações:

$$u = x \cos \theta - y \sin \theta \quad (2.18)$$

$$v = y \cos \theta + x \sin \theta \quad (2.19)$$

Considerando as equações da hipérbole no sistema  $\{x',y'\}$ , suponhamos um novo sistema de coordenadas  $\{x,y\}$  (Figura 11).



**Figura 11 – Hipérbole rotacionada.**

Portanto,

$$\begin{cases} x' = a \cdot \sec \alpha \\ y' = b \cdot \tan \alpha \end{cases}, e \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} x = x' \cdot \cos \theta - y' \cdot \sin \theta \\ y = x' \cdot \sin \theta + y' \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (2.21)$$

Reescrevendo a equação da hipérbole, considerando a rotação e translação:

$$x = a \cdot \cos \theta \cdot \sec \alpha - b \sin \theta \cdot \tan \alpha + h \quad (2.22)$$

$$y = a \cdot \sin \theta \cdot \sec \alpha + b \cdot \cos \theta \cdot \tan \alpha + k \quad (2.23)$$

Sendo assim, definimos as equações paramétricas das coordenadas de “X” para um conjunto de três boias com hidrofones:

$$\left. \begin{aligned} a_{12} \cdot \cos(\theta_{12}) \cdot \sec(\alpha) - b_{12} \cdot \text{sen}(\theta_{12}) \cdot \tan(\alpha) + h_{12} &= X_{12} \\ a_{13} \cdot \cos(\theta_{13}) \cdot \sec(\alpha) - b_{13} \cdot \text{sen}(\theta_{13}) \cdot \tan(\alpha) + h_{13} &= X_{13} \\ &\dots \\ a_{1n} \cdot \cos(\theta_{1n}) \cdot \sec(\alpha) - b_{1n} \cdot \text{sen}(\theta_{1n}) \cdot \tan(\alpha) + h_{1n} &= X_{1n} \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Analogamente, para as coordenadas de “Y”:

$$\left. \begin{aligned} a_{12} \cdot \text{sen}(\theta_{12}) \cdot \sec(\alpha) + b_{12} \cdot \cos(\theta_{12}) \cdot \tan(\alpha) + k_{12} &= Y_{12} \\ a_{13} \cdot \text{sen}(\theta_{13}) \cdot \sec(\alpha) + b_{13} \cdot \cos(\theta_{13}) \cdot \tan(\alpha) + k_{13} &= Y_{13} \\ &\dots \\ a_{1n} \cdot \text{sen}(\theta_{1n}) \cdot \sec(\alpha) + b_{1n} \cdot \cos(\theta_{1n}) \cdot \tan(\alpha) + k_{1n} &= Y_{1n} \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

$\alpha \rightarrow$  Parâmetro gerador das curvas

$\theta \rightarrow$  Ângulo de inclinação do eixo principal das hipérbolas (Coeficiente de rotação)

$h \rightarrow$  Coeficiente de translação em X

$k \rightarrow$  Coeficiente de translação em Y

## 2.4 Solução por Máxima Verossimilhança

Esta solução emprega conceitos de Estatística, os quais fornecem estratégias para verificar, dentre inúmeras possibilidades, se os valores apresentados em um determinado conjunto estão dispersos ou não com relação a um valor médio.

BRANDSTEIN e WARD (2001) descrevem o método de máxima verossimilhança, o qual mostra uma maneira de se encontrar um ponto no espaço que possui os TDOAs que mais se assemelham com os TDOAs estimados. A ideia básica do método consiste em dividir a área de estudo em uma grade de pontos P (X,Y) , onde cada ponto da grade é considerado pelo algoritmo como uma possível posição de fonte. A partir disso, são avaliados, para cada ponto P da grade criada, seus TDOAs correspondentes a cada par de hidrofones. Definindo o erro de TDOA do n-ésimo par de hidrofones como:

$$e_n(P) = \tau_n(P) - \tau_n \quad (2.26)$$

Realiza-se, então, uma busca para avaliar qual ponto da grade possui a menor média de erro, aproximando-se do verdadeiro splash. Para tanto, o conceito de variância e desvio padrão foram utilizados.

A variância é uma das medidas de dispersão mais importantes. É a média aritmética dos quadrados dos desvios de cada valor de um conjunto em relação à média dos valores: proporciona uma mensuração da dispersão dos dados em torno da média. Ou seja, quanto menor é a variância, mais próximos os valores estão da média; mas quanto maior ela é, mais os valores estão distantes da média.

Segundo AZEVEDO (1981), obtemos a variância pela equação:

$$S^2 = [(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2]/n \quad (2.27)$$

Onde: \_

$\bar{X}$  = média dos desvios (erros em questão)

$S^2$  = variância

$n$  = número de elementos

Para se ter uma medida de variabilidade com a mesma unidade do conjunto utiliza-se a raiz quadrada da variância, que é denominada de desvio padrão ( $DP$ ). Assim a expressão para o desvio é:

$$DP = \sqrt{S^2} \quad (2.28)$$

Criamos, então, a grade (XY) com vários pontos a serem comparados com o ponto de queda do projétil (splash). Essa comparação é feita levando-se em consideração o tempo que o som percorre a partir desses pontos até as boias com hidrofones utilizadas para a triangulação. Para cada ponto, comparamos esse tempo de percurso com o tempo de percurso do som do splash até as boias.

A partir do tempo em que o som do splash chega às boias, conseguimos obter a diferença entre esse tempo e o tempo de percurso do som de cada ponto da grade criada até as boias.

Seja  $P = [X, Y]$  o ponto da grade criada, sendo X e Y suas coordenadas.

A distância entre P e a boia é dada por:

$$dP1 = \sqrt{((Y - lati1)^2 + (X - long1)^2)} \quad (2.29)$$

$$dP2 = \sqrt{((Y - lati2)^2 + (X - long2)^2)} \quad (2.30)$$

$$dPn = \sqrt{((Y - latin)^2 + (X - longn)^2)} \quad (2.31)$$

Onde:

$n$  = número de boias

$lati1$  = latitude da boia 1

$long1 = \text{longitude da boia 1}$

A partir destas distâncias definidas e, considerando a velocidade do som na água  $c$ , definimos o tempo de propagação do som de P até a boia como:

$$dt1 = dP1/c \quad (2.32)$$

$$dt2 = dP2/c \quad (2.33)$$

$$\dots$$
$$dtn = dPn/c \quad (2.34)$$

Logo:

$$dt12 = dt2 - dt1 \quad (2.35)$$

$$dt13 = dt3 - dt1 \quad (2.36)$$

$$\dots$$
$$dt1n = dtn - dt1 \quad (2.37)$$

A diferença entre o tempo do splash até as boias e o tempo de propagação do som do ponto P até as boias é:

$$TS1 = |t12 - dt12| \quad (2.38)$$

$$TS2 = |t13 - dt13| \quad (2.39)$$

$$\dots$$
$$TSn = |t1n - dt1n| \quad (2.40)$$

Onde:

$t12 =$  diferença entre o tempo de propagação do som do splash até a boia 2 e o tempo de propagação do som do splash até a boia 1

Calculadas essas diferenças de tempo, é possível definir qual é o desvio padrão da diferença entre o tempo de propagação do som de cada ponto da grade gerada até as boias e o tempo de propagação do som do splash até as boias. De maneira que, quanto menor for o valor do desvio padrão, mais próximo o ponto da grade gerada estará do splash.

## 2.5 Fatores que influenciam a Localização

A presença de ruídos acústicos é um grande desafio para a acurácia dos sistemas de localização. Outros fatores, como a amostragem e a discretização do sinal e, ainda, os modelos empregados para a estimação da posição da fonte podem afetar a determinação da posição correta da fonte. Devido à dificuldade de se caracterizar todos os distintos tipos de ruídos nos modelos de localização de fonte, é usual que se considere nos modelos de localização de fontes, que o ruído seja decorrelacionado da fonte de sinal, ou seja, um ruído gaussiano branco. Porém, várias pesquisas mostram que os ruídos acústicos reais não são gaussianos ou brancos (WEBSTER, 1993), (MING, 2007),

(ZÃÃO, 2012). Assim, é esperado que as posições de fontes obtidas em um sistema de localização com distorções representadas por um ruído gaussiano branco, sejam muito diferentes quando submetidas a um ambiente onde há presença de ruído acústico real.

Somado a isto, devido ao fato de que os sinais e ruídos são originados pelos mais variados tipos de fontes acústicas, como, no caso em estudo, a explosão provocada no momento do disparo do canhão, a onda de choque que acompanha o projétil em sua trajetória, o comportamento do som do splash propriamente dito, o ruído de outros navios, dentre outros, possuem distintas características espectrais e temporais, sendo não-estacionários e não-gaussianos. A correlação entre os ruídos e as fontes acústicas a serem localizadas, pode afetar o desempenho da estimação real da posição espacial ou geográfica destas fontes. Surge então a necessidade de conhecer cada uma dessas influências sonoras que chegará aos hidrofones, de forma a permitir uma melhor localização:

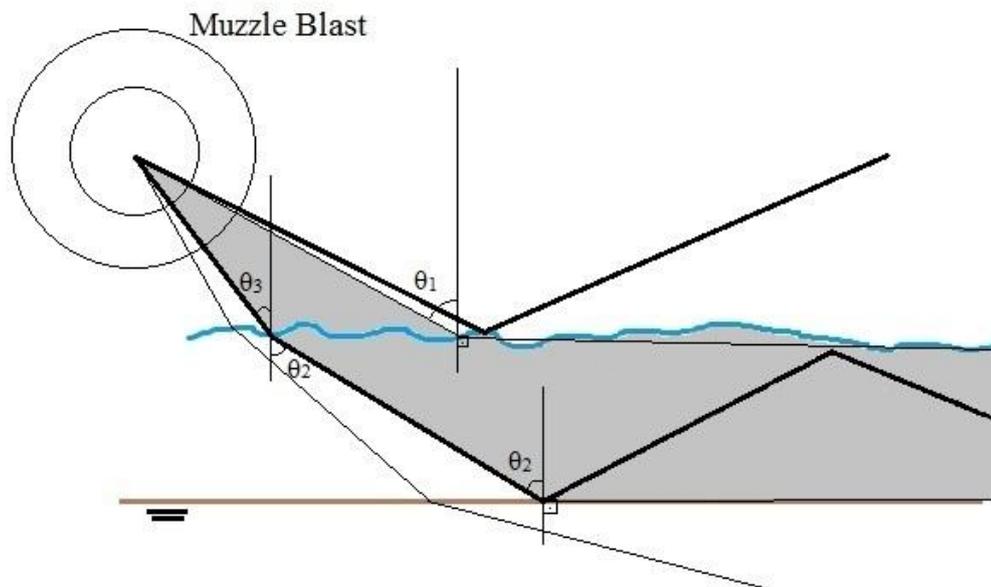
### 2.5.1 Explosão

As armas de fogo usam uma carga explosiva confinada para expulsar o projétil, o qual passará por um tubo raiado cilíndrico para guiar a sua trajetória. Os gases que se expandem rapidamente na área confinada resultam em explosão acústica que viaja na velocidade do som. No caso estudado, esta explosão acústica é chamada de “muzzle blast” e possui uma característica como o som de um estalo de chicote (DAMARLA, 2016).

A intensidade do sinal de muzzle blast é proporcional a  $\frac{P_0}{d}$ , onde  $P_0$  é a força do sinal na origem (no canhão) e  $d$  é a distância ao hidrofone, levando em consideração que o sinal também sofrerá atenuação na medida em que penetra e se propaga na água.

Além disso, o muzzle blast captado pelos hidrofones será refratado de acordo com a Lei de Snell (CLAY, 1977), compreendido na região cinza da Figura 12.

$$\frac{\sin\theta a}{Ca} = \frac{\sin\theta b}{Cb} \quad (2.41)$$



**Figura 12 – Esquema do muzzle blast que será captado pelos hidrofones.**

Considerando a passagem do ar para a água:

$$\frac{\sin\theta_1}{C_{ar}} = \frac{\sin(90)}{C_{\acute{a}gua}} \quad (2.42)$$

O ângulo limite para que haja refração é aproximadamente 13°. Os ângulos acima de 13° irão refletir na superfície do mar, não chegando aos hidrofones.

Considerando a passagem da água para o fundo:

$$\frac{\sin\theta_2}{C_{\acute{a}gua}} = \frac{\sin(90)}{C_{fundo}} \quad (2.43)$$

Neste caso, consideramos a velocidade do som no fundo marinho para a área estudada como 1.750 m/s (MACEDO, 2009).

O ângulo limite para que haja reflexão no fundo é aproximadamente 59°. Os ângulos abaixo de 59° irão penetrar no solo marinho, não chegando aos hidrofones.

A partir de  $\theta_2$ , conseguimos achar o  $\theta_3$ .

$$\frac{\sin\theta_3}{C_{ar}} = \frac{\sin\theta_2}{C_{\acute{a}gua}} \quad (2.44)$$

Portanto,  $\theta_3$  equivale a 11°, aproximadamente.

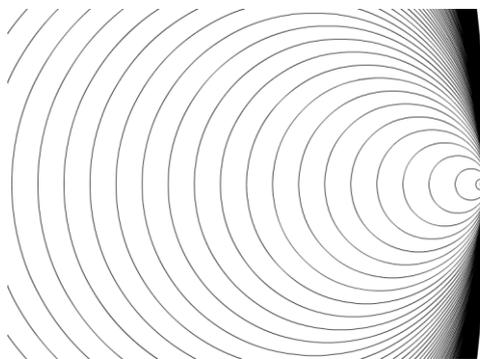
Conseqüentemente, o setor de propagação da muzzle blast que penetrará na água do mar e chegará aos hidrofones é de 2°. Ou seja, para que o raio sonoro penetre no mar

e chegue aos hidrofones, ele precisa formar com a normal à superfície do mar de 11 a 13°.

A influência sonora provocada pelo muzzle blast na localização do splash está sendo estudada nesta dissertação. O comportamento dessa onda sonora pode ser visualizado na Figura 12.

### 2.5.2 Onda de Choque

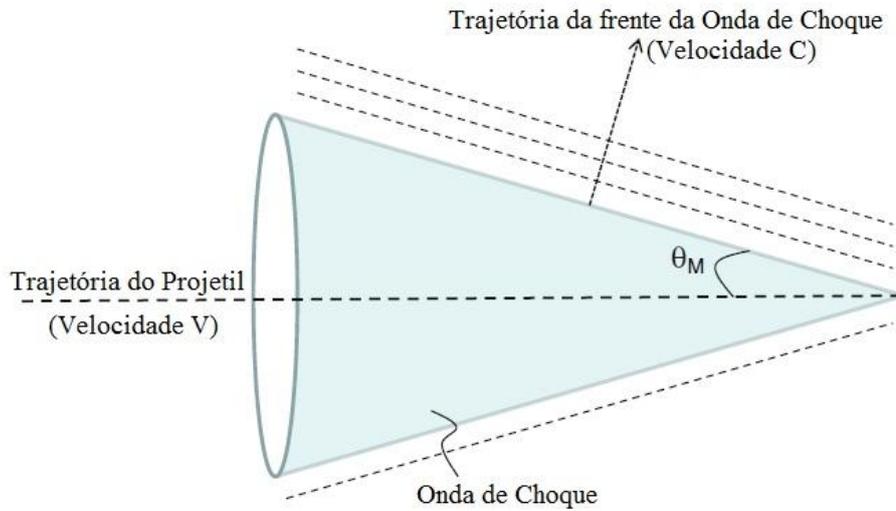
Quando a velocidade de um projétil é igual à velocidade do som ( $v = c$ ), as frentes de onda não podem escapar do projétil. O conjunto resultante de ondas forma uma “barreira de som” de grande amplitude.



**Figura 13 – Um projétil com velocidade igual à velocidade do som.**

**Fonte: DAMARLA, 2016.**

Quando a velocidade de um projétil excede a velocidade do som ( $v > c$ ), as frentes de onda ficam atrás do projétil em uma região com formato de cone com a fonte no seu vértice. A borda do cone forma uma frente de onda, que viaja em direção normal à superfície do cone com velocidade  $c$ , chamada “onda de choque”, como ilustrado na Figura 13. Quando uma onda de choque atinge um observador, um “boom sonoro” é ouvido (DAMARLA, 2016).



**Figura 14 – Um projétil com velocidade superior à velocidade do som.**

O cone da onda de choque tem um ângulo interno:

$$\theta_M = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right) \quad (2.45)$$

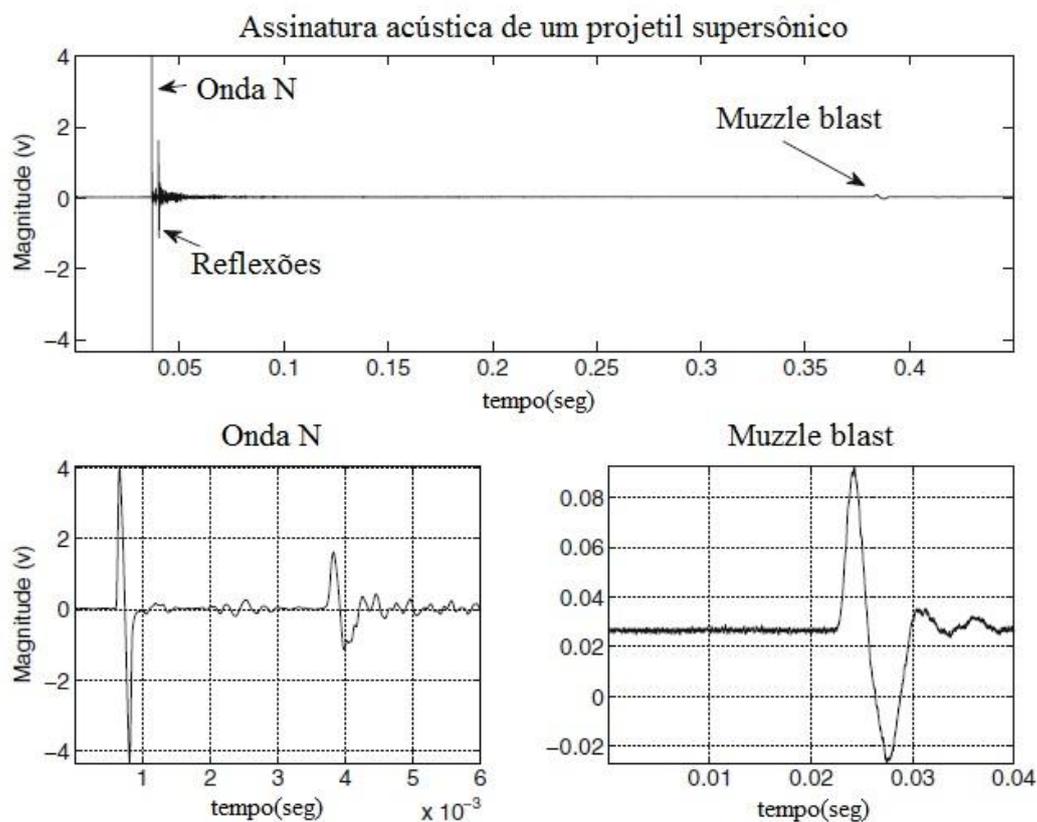
Onde M é o número de Mach:

$$M = \left(\frac{v}{c}\right) \quad (2.46)$$

A onda de choque sofrerá reflexões no fundo e na superfície do mar até chegar aos hidrofones. A intensidade desse sinal irá depender do coeficiente de absorção do fundo.

A onda de choque de um projétil tem um aumento muito rápido até chegar num valor máximo de pressão, seguido de um mínimo correspondente. Na medida em que a onda de choque se propaga, o comportamento não linear do meio faz com que o distúrbio de pressão forme uma onda em forma de "N". O intervalo de tempo da onda "N" entre a pressão máxima e a mínima é proporcional ao tamanho do projétil.

O sinal atípico gerado por um projétil supersônico é mostrado na Figura 15. A assinatura possui três características distintas, a saber: (a) uma onda N grande devido à onda de choque, (b) um sinal devido às reflexões da onda de choque e (c) um sinal devido ao *muzzle blast*. Observamos também que as intensidades são diferentes para cada sinal.



**Figura 15 – Forma de onda gerada por um projétil supersônico.**

**Fonte: DAMARLA, 2016.**

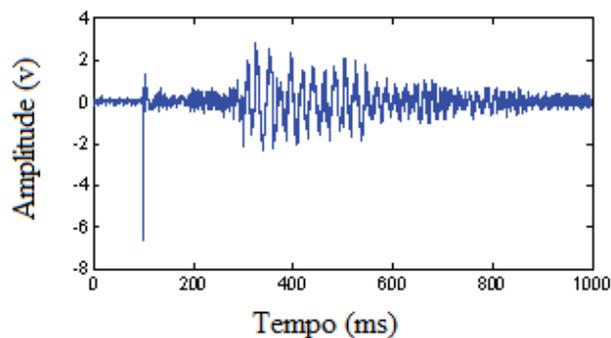
A influência sonora provocada pela onda de choque na localização do splash está sendo estudada nesta dissertação.

### 2.5.3 Splash

No momento do impacto do projétil na água, a água na superfície é forçada a abrir caminho, deslocando-se para baixo e para fora. Isso resulta em uma cortina de água radial conhecida como splash. Então, o ar é arrastado atrás do projétil à medida que ele desce, criando uma cavidade de ar abaixo da superfície da água. Em seguida, as forças hidrostáticas começam a fechar a cavidade e forçam a separação da cavidade em uma parte superior e inferior. O fechamento da cavidade superior continua e um jato de água é formado, o qual viaja através da cavidade superior e além da superfície da água, formando oscilações em forma de bolha.

A forma típica do som do impacto do projétil na água é um pulso de choque não simétrico com uma borda de ataque íngreme e uma borda de fuga amortecida, com

duração de menos de um segundo. A Figura 16 ilustra as características dessa forma de onda (Li, 2010).

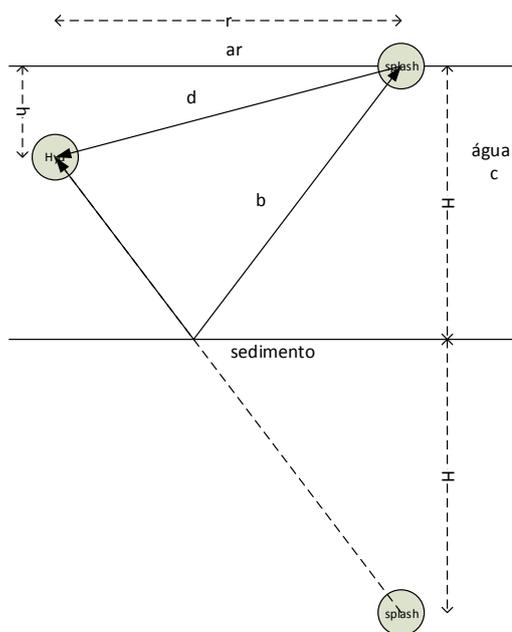


**Figura 16 – Forma de onda de um splash.**

O splash é o foco desta dissertação. Conhecer a sua localização exata é o nosso desafio. Para tanto, não basta conhecermos as características de um splash, mas saber todas as influências no sinal sonoro que chegará aos hidrofones, as quais poderão interferir ou até mascarar o sinal do splash.

Simulamos a propagação de um splash utilizando um modelo simples (modelo das imagens) e um modelo de raios (Bellhop e Ctraceo), e um modelo de modos normais (Kraken). Estes modelos são de uso generalizado para a simulação de fontes pontuais submersas.

### Modelo Simples



**Figura 17: Modelo simples de propagação.**

Para efeitos de simulação vamos considerar uma profundidade da coluna d'água de 200 m, com um fundo de areia. Consideraremos ainda um perfil de som na coluna de água, com uma camada de mistura, onde a velocidade do som é constante e uma termoclina, que provoca a refração do som para o fundo. A distância máxima em consideração é de 1,5 km. O hidrofone está a 10 m abaixo da superfície.

No modelo simples considera-se que a velocidade do som é constante na coluna d'água e que a fonte está na superfície (0 m).

Neste modelo, o tempo de propagação do raio direto é dado por:

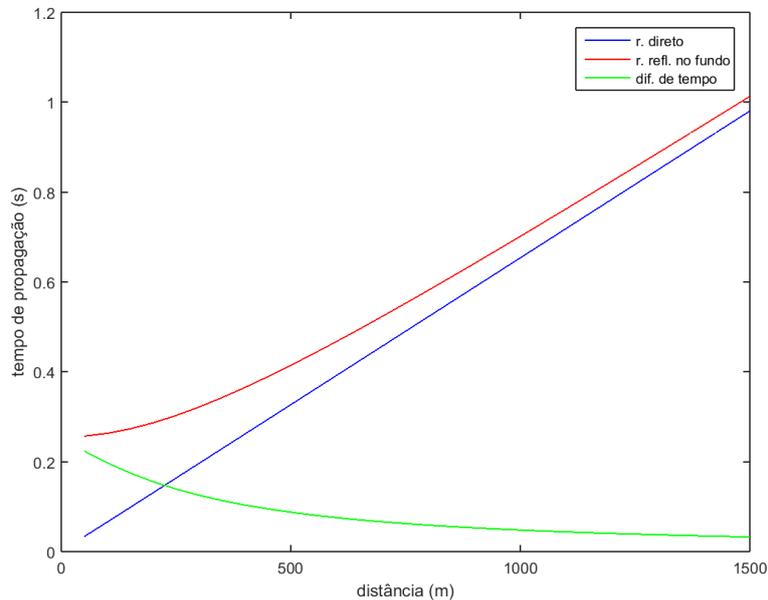
$$td = \frac{\sqrt{r^2+h^2}}{c}, \quad (2.47)$$

E o tempo de propagação do raio refletido pelo fundo por:

$$tb = \frac{\sqrt{r^2+(2H-h)^2}}{c}, \quad (2.48)$$

Onde  $r$  é a distância radial entre o hidrofone e o splash,  $h$  é a profundidade do hidrofone,  $H$  é a altura da coluna de água, e  $c$  é a velocidade do som na água.

A Figura 18 mostra os tempos de propagação do raio direto (azul), do raio refletido no fundo (vermelho) e a diferença entre os dois tempos de propagação (verde).



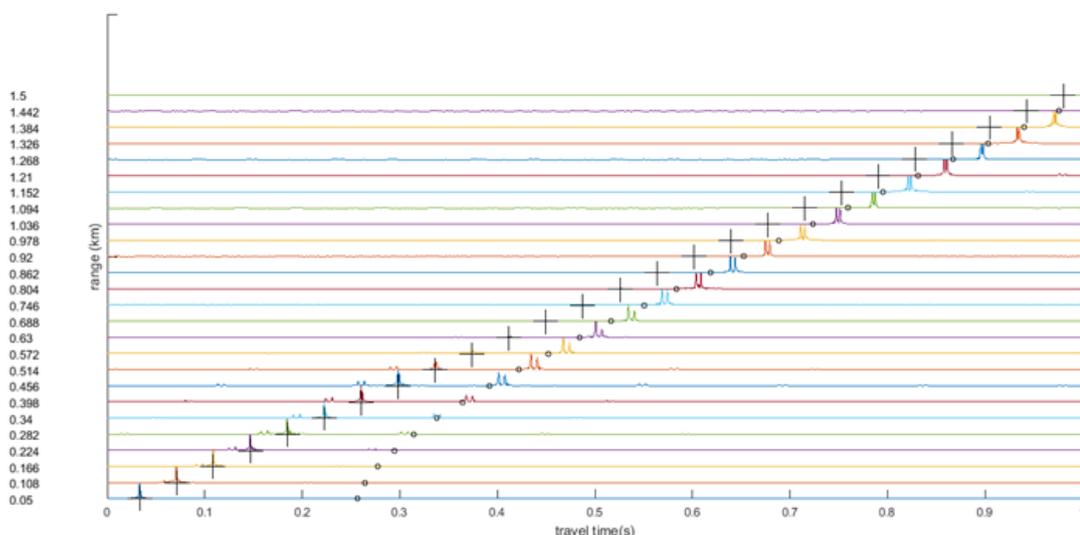
**Figura 18: Tempo de propagação estimado pelo modelo simples.**

Note que uma separação superior a 100 ms ocorre até cerca dos 400 m, ou seja, tendo em vista a largura temporal dos splash verificados nos dados apresentados anteriormente, a partir dessas distâncias espera-se sobreposição das chegadas. Para alturas da coluna d'água superiores, essa distância aumentará, e vice-versa, se a altura

da coluna d'água for inferior, a sobreposição ocorrerá a distâncias mais curtas. Para as profundidades onde foi realizada a experiência (aproximadamente 20 m), há sobreposição nas chegadas.

### Modelo de Modos Normais (Kraken)

A figura 19 mostra o sinal recebido no hidrofone, estimado pelo modelo de modos normais, considerando como fonte um chirp de 200-1200 Hz.

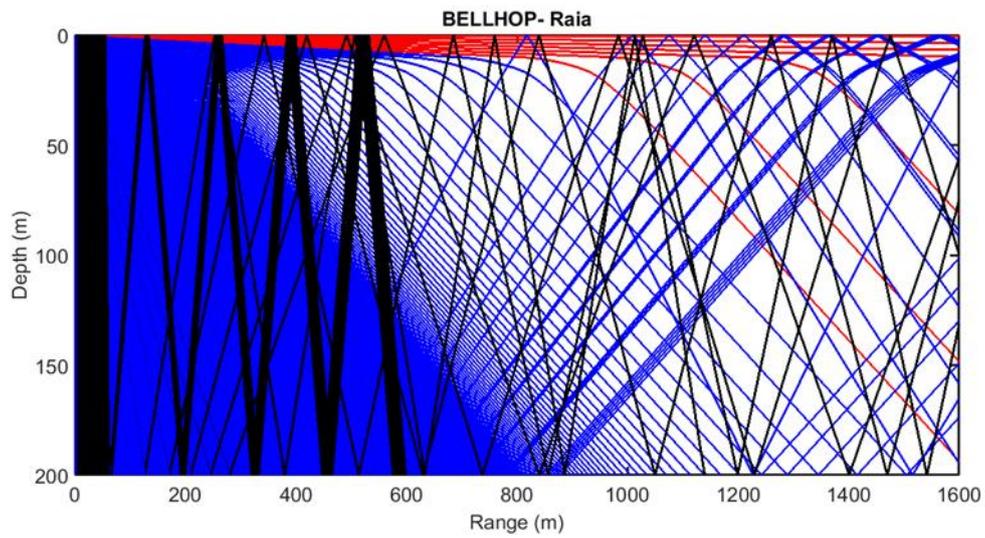


**Figura 19: Sinal recebido a uma determinada distância em função do tempo de propagação.**

A cruz representa o tempo de chegada do raio direto estimado pelo modelo simples, e o círculo representa o tempo de chegada, estimado pelo mesmo modelo, do raio refletido no fundo. Observa-se que a chegada direta desaparece após um determinado tempo. Este fato se deve ao modelo considerar também uma chegada refletida na superfície, o que, após um tempo se anula com a chegada direta. Ao fim desse tempo só se observa a chegada refletida no fundo. Por esta razão, este modelo não é adequado para estimar a propagação entre o splash e o hidrofone.

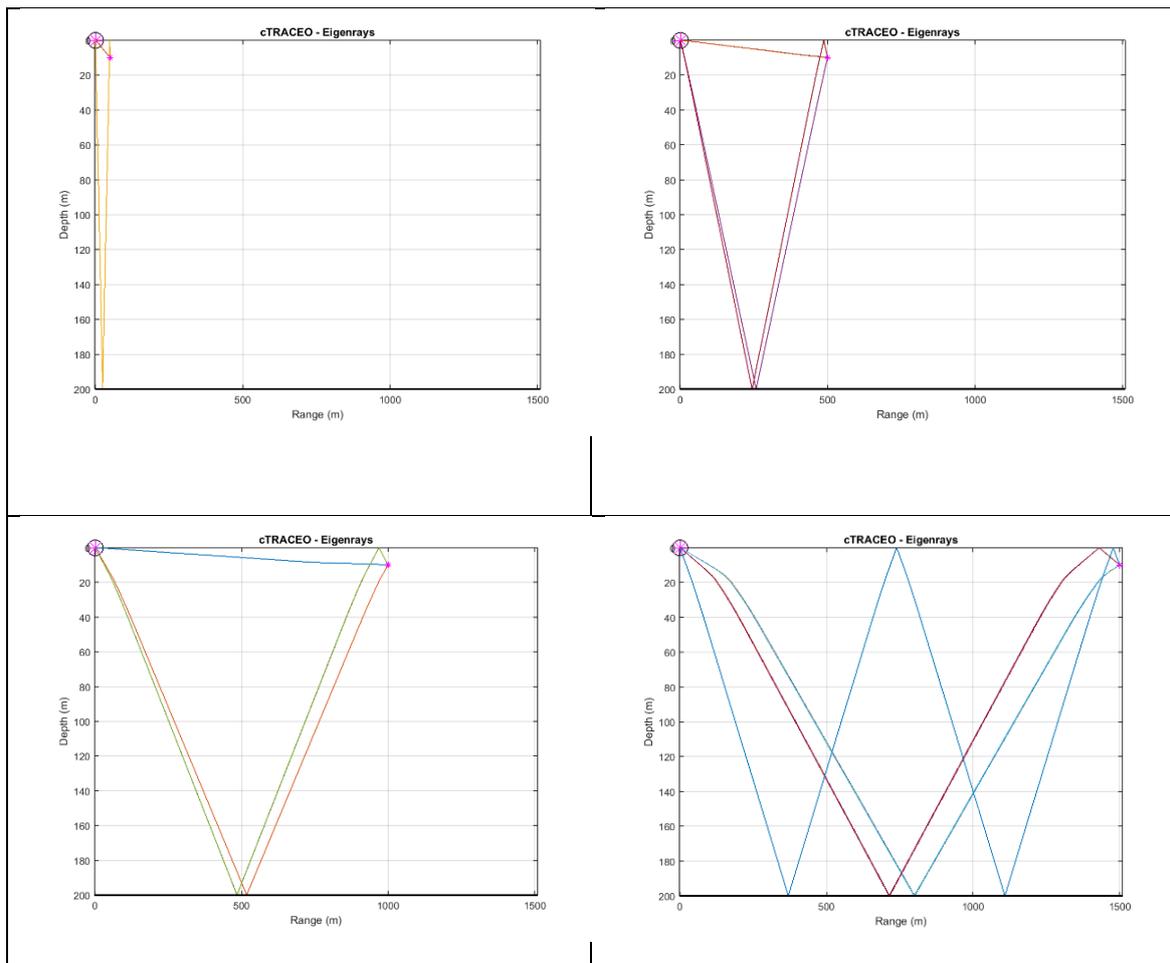
### Modelo de Raios (Bellhop e Ctraceo)

A figura 20 nos dá uma ideia de como se propagam os raios até uma distância de aproximadamente 1.6 km da fonte (splash).



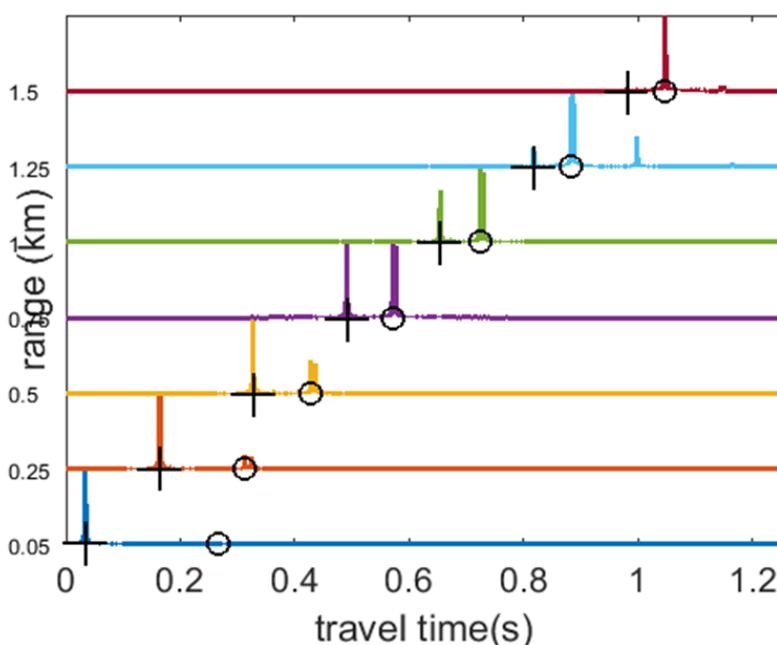
**Figura 20: Raios previstos pelo Bellhop, até uma distância de 1600 m.**

Na Figura 21 mostramos, para 4 distâncias (50m, 500m, 1000m e 1500m), os eigenrays, isto é, os raios que ligam a fonte ao hidrofone.



**Figura 21: Eigenrays, para o hidrofone a várias distâncias.**

Verificamos que, para os casos de 50, 500 1000m observa-se um raio direto e dois raios com uma reflexão no fundo, sendo que desses, um tem também uma reflexão na superfície. No hidrofone que se encontra a 1500m, devido à refração, não se observa nenhum raio direto. Esta situação gera consequências no processamento, pois o tempo de chegada refere-se a um caminho de propagação bem maior do que se existisse raio direto.



**Figura 22: Sinal recebido em função da distância usando o modelo de raios Ctraceo.**

Assim como na Figura 19, aos símbolos “+” e “O” na Figura 22 representam o tempo de propagação do raio direto e do raio refletido no fundo, dados pelo modelo simples. Neste caso para o tempo de propagação do raio refletido no fundo utilizou-se a velocidade média ao longo da coluna d’água, o que justifica a menor diferença entre o tempo estimado pelo modelo de raios e modelo simples, quando comparado com o caso correspondente representado na Figura 19. Comparando as figuras 19 e 22, verifica-se que as chegadas diretas a partir de distâncias médias previstas pelo modelo de raios não são canceladas, como acontecia com o modelo de modos normais. Tal fato acontece porque no modelo de raios se eliminou (por parametrização do modelo) o raio imediatamente refletido na superfície, o qual, a partir de certas distâncias, somava-se destrutivamente ao raio direto devido à sua chegada praticamente simultânea com o raio direto, mas em oposição de fase. Por outro lado, verifica-se que, a partir de certas distâncias, não há chegada direta (no caso de 1500m), devido à refração induzida pelo perfil de velocidade.

Percebe-se que a amplitude relativa das chegadas com interação com o fundo em relação à chegada direta é maior para maiores distâncias. Esta relação tem a ver com o

tipo de fundo. Quanto mais refletivo este for, maior será a amplitude da chegada refletida pelo fundo. Percebe-se que, para distâncias mais curtas, o ângulo de incidência com o fundo é maior que o ângulo crítico (medido em relação à horizontal) da interface água-sedimento e a maioria da energia é transmitida para o sedimento. Por fim, as condições de propagação podem interferir significativamente na complexidade do sistema.

## 2.5.4 Influência da Trajetória do Projétil

O conhecimento da trajetória do projétil é fundamental para a determinação da posição dos hidrofones na água. Para o cálculo dessa trajetória e definição das posições dos hidrofones, utilizamos as tábuas de tiro do canhão de 4,5". Por se tratar de um documento classificado com determinado grau de sigilo, não abordaremos tais cálculos. Contudo, é de suma importância entendermos a trajetória para entender a sua influência no sinal captado pelos hidrofones.

O projétil, lançado a partir do canhão, faz um ângulo com a horizontal. Sabe-se que, além da força da gravidade, está sujeito a uma força de resistência do ar que atua na direção oposta ao seu movimento e cuja magnitude é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade instantânea. Como consequência da atuação dessa força, a velocidade do projétil irá diminuir ao longo do percurso até o impacto na água.

De acordo com o fabricante do projétil de 4,5", utilizado pela Marinha, a velocidade inicial do tiro é de 870 m/s, o equivalente a 2,5M (número de Mach). A partir do momento do disparo, essa velocidade só vai diminuir devido à resistência do ar.

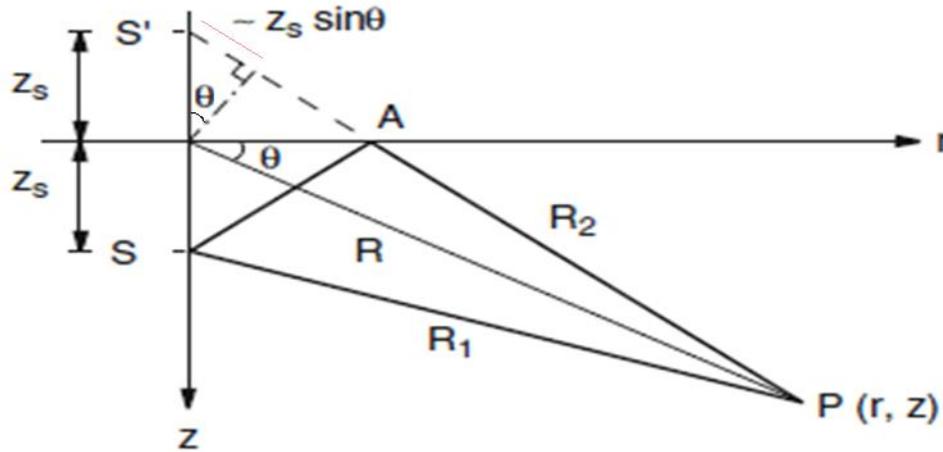
Como vimos no item 2.2.2, o ângulo do cone formado pela onda de choque pode ser dado por :

$$\theta M = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right) \quad (2.49)$$

Portanto, seu valor inicial é 23°. Como o valor desse ângulo tende a aumentar durante o percurso até a queda do projétil, e no item 2.2.1 vimos que os ângulos acima de 13° não irão penetrar na superfície do mar, podemos afirmar que a influência sonora provocada pela onda de choque não irá afetar a determinação da localização do splash, ou seja, seu sinal não será captado pelos hidrofones.

### 2.5.5 Efeito Lloyd Mirror

Outro fator que pode influenciar na determinação da posição do splash é a consideração do Efeito Lloyd Mirror (JENSEN, 2011). A Figura 23 é utilizada para explicar melhor o efeito.



**Figura 23: Efeito Lloyd Mirror.**  
**Fonte: JENSEN, 2011**

A Figura 23 apresenta padrões de campo característicos em águas profundas considerando o padrão de interferência acústica criado por uma fonte pontual colocada perto de uma suave e perfeitamente refletora superfície do mar. S indica a posição da fonte a uma profundidade  $z_s$  abaixo da superfície do mar ( $z = 0$ ).

Para qualquer ponto de campo  $P(r, z)$ , 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 parece originar da fonte de imagem  $S'$ .

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

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{ikR_2}}{R_2} \quad (2.50)$$

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

$$R_1 = \sqrt{(r^2 + (z - z_s)^2)}, \quad R_2 = \sqrt{(r^2 + (z + z_s)^2)} \quad (2.51)$$

Os níveis da fonte são normalizados para dar amplitude unitária a 1 m de distância da fonte.

A equação do campo total representa um padrão de interferência bastante complexo, para o qual pode-se derivar 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:

$$R_1 \approx R - Z_s \sin\theta; \text{ e} \quad (2.52)$$

$$R_2 \approx R + Z_s \sin\theta; \quad (2.53)$$

Assumindo ainda que as distâncias que aparecem nos denominadores de ambos os termos podem ser substituídas simplesmente pela distância inclinada R e, sabendo-se que, as amplitudes decaem lentamente com o alcance, obtemos:

$$p(r, z) \approx \frac{1}{R} [e^{ik(R - Z_s \sin\theta)} - e^{ik(R + Z_s \sin\theta)}] \quad (2.54)$$

$$= \frac{e^{ikR}}{R} [e^{-ik Z_s \sin\theta} - e^{ik Z_s \sin\theta}] \quad (2.55)$$

Em seguida substituímos as duas exponenciais por uma função trigonométrica para obter:

$$p(r, z) = -\frac{2i}{R} \sin(kz_s \sin\theta) e^{ikR} \quad (2.56)$$

O que significa que a variação da amplitude assume a seguinte forma:

$$|p| = \frac{2}{R} |\sin(kz_s \sin\theta)| \quad (2.57)$$

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

$$|p|_{\max} = \frac{2}{R} \text{ para } \sin\theta = \frac{(2m-1)\pi}{2kz_s} \text{ onde } m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.58)$$

$$|p|_{\min} = 0 \text{ para } \sin\theta = \frac{m\pi}{kz_s} \text{ onde } m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.59)$$

Esta é a clássica imagem de superfície ou o padrão de interferência do espelho Lloyd. Observe que o máximo de pressão é o dobro de uma única fonte (interferência construtiva) enquanto que o mínimo de pressão é zero (interferência destrutiva). O número M de feixes de Lloyd é finito e pode ser determinado para satisfazer:

$$\frac{(2m-1)\pi}{2kz_s} \leq 1 \text{ Ou } M = \text{int} \left\{ \frac{2z_s}{\lambda} \right\} + 0.5 \quad (2.60)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda acústico. Assim, o número de feixes é diretamente proporcional à distância da fonte da superfície em termos de comprimentos de onda.

Na acústica submarina, a dependência da pressão sonora em relação à distância a uma profundidade fixa  $z_r$  é de grande importância. Introduzindo  $\sin\theta = Z_r/R$  obtemos:

$$|p| = \frac{2}{\sqrt{r^2 + z_r^2}} \left| \sin \left( \frac{kz_s z_r}{\sqrt{r^2 + z_r^2}} \right) \right| \quad (2.61)$$

Que novamente é uma expressão demonstrando os máximos e mínimos intermitentes da amplitude de pressão em relação à distância.

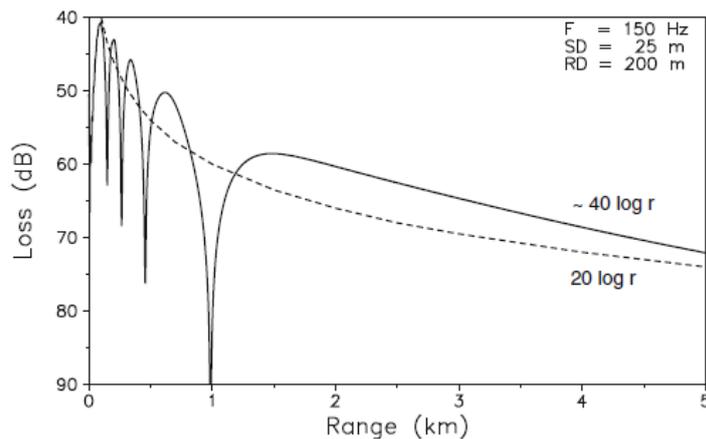
Contudo, para grandes distâncias ( $r \gg z_r$ ,  $\sin\theta \approx \theta$ ). A expressão acima pode ser simplificada obtendo-se:

$$|p| \approx \frac{2kz_s z_r}{r^2} \quad (2.62)$$

Demonstrando que o decaimento do campo eventualmente se torna monotônico. Um decaimento de amplitude de pressão proporcional a  $r^{-2}$  é equivalente a uma perda de transmissão (TL), correspondendo ao dobro da perda associada ao espalhamento esférico:

$$TL = 40 \log(r) \quad (2.63)$$

Cabe ressaltar que esse forte decaimento de campo é inteiramente devido a um efeito de interferência.



**Figura 24: Exemplo numérico do efeito Lloyd Mirror.**

**Fonte: JENSEN, 2011**

Na Figura 24 vemos um exemplo numérico onde uma fonte de 150 Hz é colocada 25 m abaixo da superfície do mar em uma coluna de água homogênea de extensão infinita e com uma velocidade do som de 1500 m/s.

Como o comprimento de onda acústico é 10 m, encontramos o número de feixes devido ao efeito Lloyd Mirror ( $M = 5$ ). A perda de transmissão versus alcance para um receptor a 200 m de profundidade como computada a partir da solução exata de campo é dada por:

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{ikR_2}}{R_2} \quad (2.64)$$

Observe a estrutura do campo oscilante com cinco picos e um decaimento de campo proporcional a  $40 \log r$ .

O padrão de interferência do efeito Lloyd Mirror é um traço característico da propagação em águas profundas. Cabe ressaltar que, a exata solução de campo para um meio homogêneo pode ser prontamente avaliada, tornando a solução de imagem bem adaptada como um resultado de referência para a verificação de soluções da equação de onda numericamente implementadas, permitindo sua aplicação em prol da aferição de sistemas acústicos como sonares e raias de medição de ruído.

Contudo, para a aplicabilidade na localização de um splash, é necessário obtermos as características do sinal sonoro do projétil a partir do momento de sua entrada no mar. Tais características são, dentre outras, a velocidade de entrada no mar e a velocidade a uma determinada distância percorrida após a sua entrada. Para esta dissertação, não foi possível obter tais características.

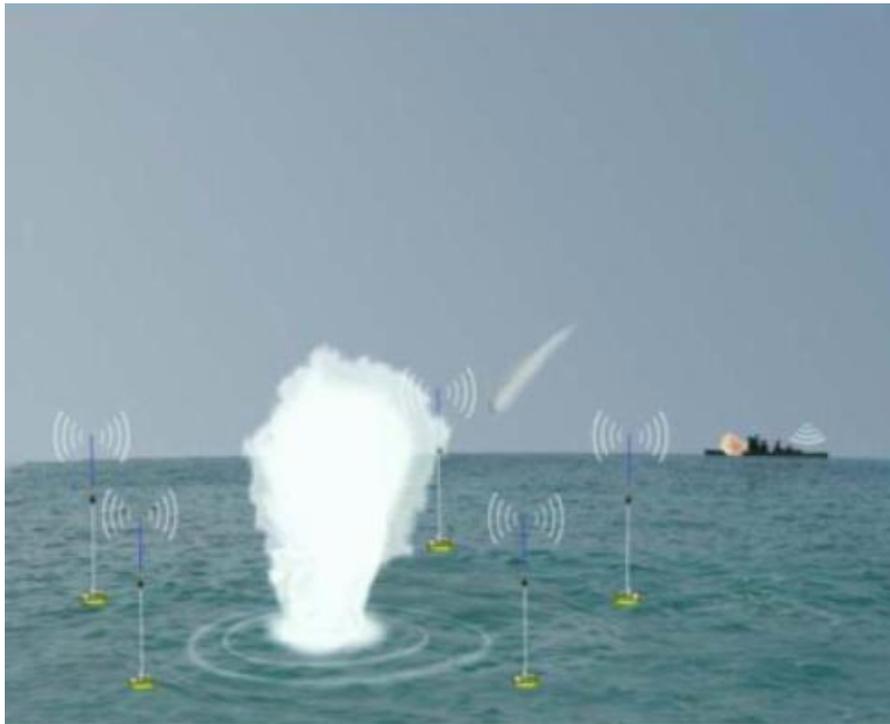
### 3. Metodologia

#### 3.1 Raia Virtual de Tiro (RVT)

Os sistemas de RVT já existem na U.S. Navy, Royal New Zealand Navy (RNZN) e Royal Australian Navy (RAN), entre outras Marinhas. São sistemas portáteis empregados como soluções de treinamento e avaliação de treinamento do AFN, no mar, que utiliza alvos virtuais em tempo real, substituindo os tradicionais alvos terrestres.

Em geral, as RVT apresentam uma arquitetura de hardware bem semelhantes, podendo destacar o sistema Mobile Acoustic Scoring System (MASS) pela acurácia do sistema, desenvolvido pela empresa canadense MetOcean. (METOCEAN, 2006).

O MASS consiste de um conjunto de três ou mais boias (Figura 25). Normalmente são utilizadas entre cinco e sete, dotadas, cada uma, de Receptor GPS (Global Positioning System), Sistema de Rádio, Sistema de Análise Acústico (hidrofone e microprocessador), refletor RADAR e BEACON.



**Figura 25: Raia Virtual de Tiro.**  
**Fonte: METOCEAN.**

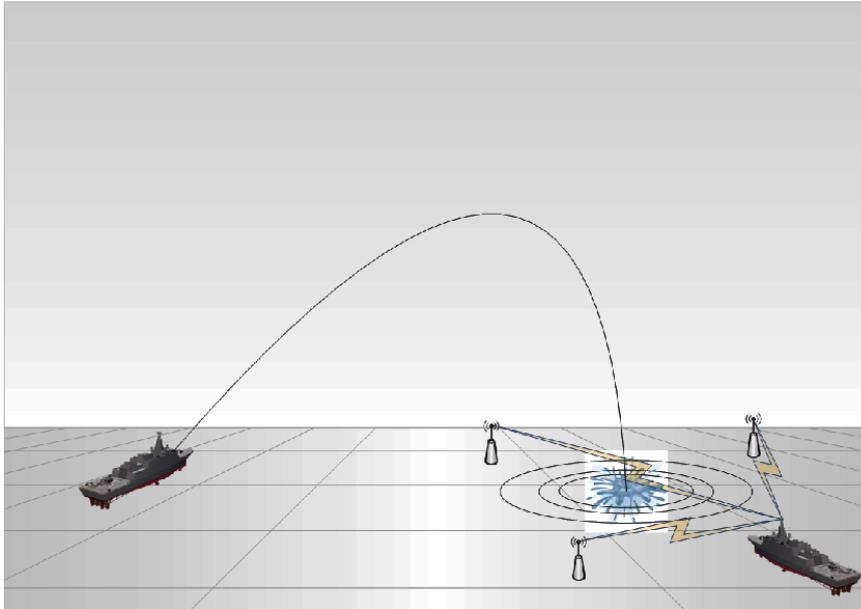
As boias devem ser lançadas do navio e devem permanecer a uma distância entre 300 a 1000 metros entre elas. A distância entre a estação controladora e as boias deve ser de no máximo de 20 km. Ocorrido o impacto do projétil na água (splash), é gerado um sinal acústico que sensibiliza o hidrofone de cada boia que, na sequência, após cálculo em CPU embarcada, transmite para a estação controladora a própria posição e o instante estimado do ponto de queda. Desta forma, todas as boias devem estar sincronizadas com boa resolução temporal para diminuir o erro na estimativa do ruído do splash e reduzir a fonte de erro. Portanto, antes da realização do exercício de tiro é fundamental que se deva fazer o sincronismo das boias pela estação controladora. Por fim, a estação controladora, através de triangulação, calcula o ponto de queda conjugado (METOCEAN, 2006).

Dentre as várias vantagens enumeradas pela METOCEAN, as de relevância são:

- a) Acessibilidade em qualquer lugar e a qualquer hora;
- b) Maior precisão em relação aos sistemas visuais;
- c) Avaliação em tempo real da avaliação do tiro;
- d) Redução dos problemas de segurança de alcance;
- e) Preservação ambiental e considerações políticas; e
- f) Redução dos custos operacionais.

## 3.2 Planejamento do Experimento

A MARINHA desenvolve um projeto chamado Raia Virtual de Tiro (RVT), para determinar, com precisão, os pontos de queda (impacto) dos tiros de canhões 4.5'' em uma área-alvo, contendo alvos virtuais localizados no oceano para os exercícios de AFN pelo método indireto.



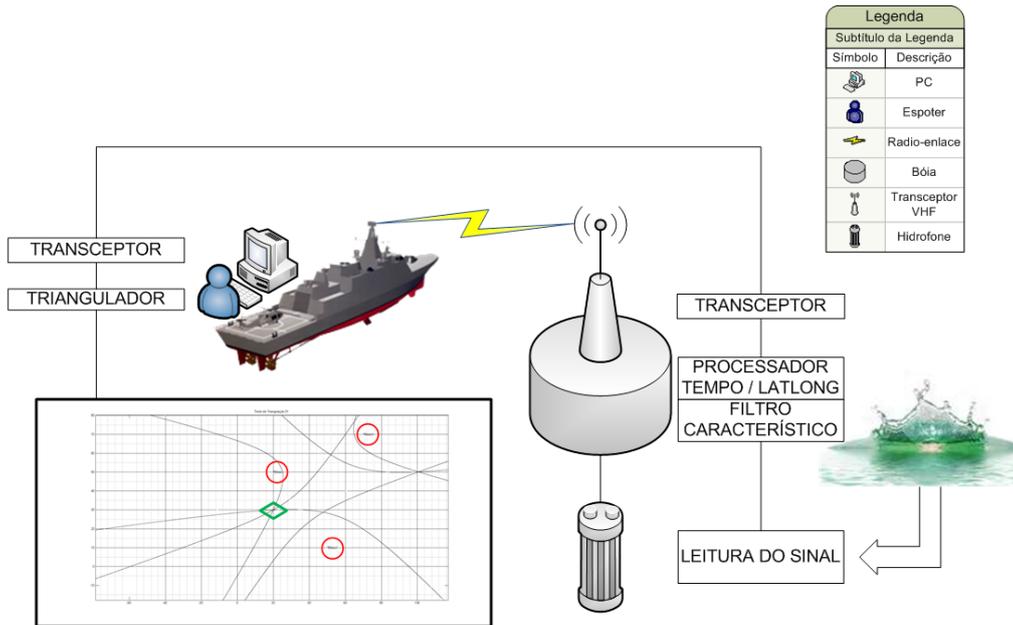
**Figura 26 – Esquema do projeto da RVT.**

As boias devem ser posicionadas em uma área de mar aberto, a uma distância padrão entre elas para registrarem os sons dos pontos de queda dos projéteis na água (splash) e devem transmitir suas posições para um navio assistente (Estação de Controle) nas proximidades. A Estação de Controle é um microcomputador em rede com as boias, que contém o software de comando e controle da rede, e também de tratamento dos dados enviados pelas boias. Um alvo virtual deve ser estabelecido no interior dessa área e suas coordenadas passadas ao navio atirador. O projétil, ao atingir a superfície da água, deve emitir um ruído devido ao splash, cujo ruído deve ser captado pelos hidrofones localizados nas boias e transmitido o tempo do início do ruído por enlace de rádio ao navio assistente. Essas informações devem ser interpretadas por um software, que pela diferença de tempo entre os instantes de recepção dos ruídos deve poder calcular o ponto de queda da salva.

Os softwares embarcados nas boias devem estar aptos para determinar o tempo de início do ruído que se originou e, então, o software da Estação Controladora, por

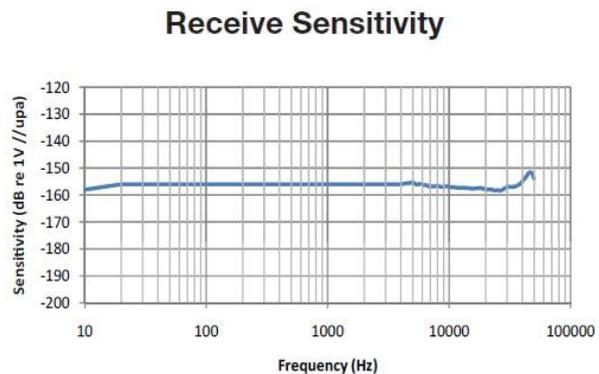
triangulação acústica, deve estimar o ponto de impacto com precisão, preferencialmente igual ou inferior a 50 jardas (45,72 metros) conforme a tabela de HIT (CASOP, 1998).

### 3.3 Especificação Técnica



**Figura 27: Arquitetura do projeto da RVT.**

A RVT deve ser composta por um conjunto de três ou mais boias, podendo ficar à deriva, dotadas dos seguintes equipamentos:



**Figura 28: Hidrofone Sparton (modelo PHOD-1) e sua resposta em frequência.**



**Figura 29: GPS Garmin, antena GA 38.**



**Figura 30: Unidade de processamento ASRock, AD525PV3.**



**Figura 31: Bateria 12V GetPower, GP 12 20 L.**



**Figura 32: Capacidade de recepção e transmissão de dados via rádio e antena.**

O projeto da RVT está sendo desenvolvido por prototipação evolucionária, quando um protótipo inicial deve ser produzido e refinado através de vários estágios até atingir o sistema final, tanto para o hardware como para o software.

O desenvolvimento do primeiro protótipo da RVT, incluindo hardware e software, foi realizado pelo CASOP (Figura 33) para verificação da estanqueidade das boias e, posteriormente, para testar a filtragem de ruídos acústicos submarinos em um ambiente controlado – piscina da BNRJ, onde gradativamente foram simuladas perturbações na água.



**Figura 33: Componentes da boia da primeira versão.**  
**Fonte: CASOP.**

Após alguns testes de estabilidade e estanqueidade na piscina da BNRJ, a versão da boia apresentada na Figura 34 foi aprovada e mais duas outras boias idênticas foram produzidas para os testes de avaliação dos softwares nelas embarcados. Estes softwares têm o propósito de gravar e enviar os dados (ruídos acústicos submarinos) detectados pelo hidrofone à Estação Controladora (microcomputador).



**Figura 34: Versão da boia aprovada.**

### Fonte: CASOP.

O sistema operacional embarcado nas boias é o Linux openSUSE. O sistema embarcado, em modo produção, estará operando em modo texto e, desta forma, não se faz necessário um ambiente de “Desktop” completo. Então, foi instalada apenas uma interface pequena e leve para permitir a execução de algumas tarefas básicas de configuração e depuração.



**Figura 35: Gerenciador de janelas.**

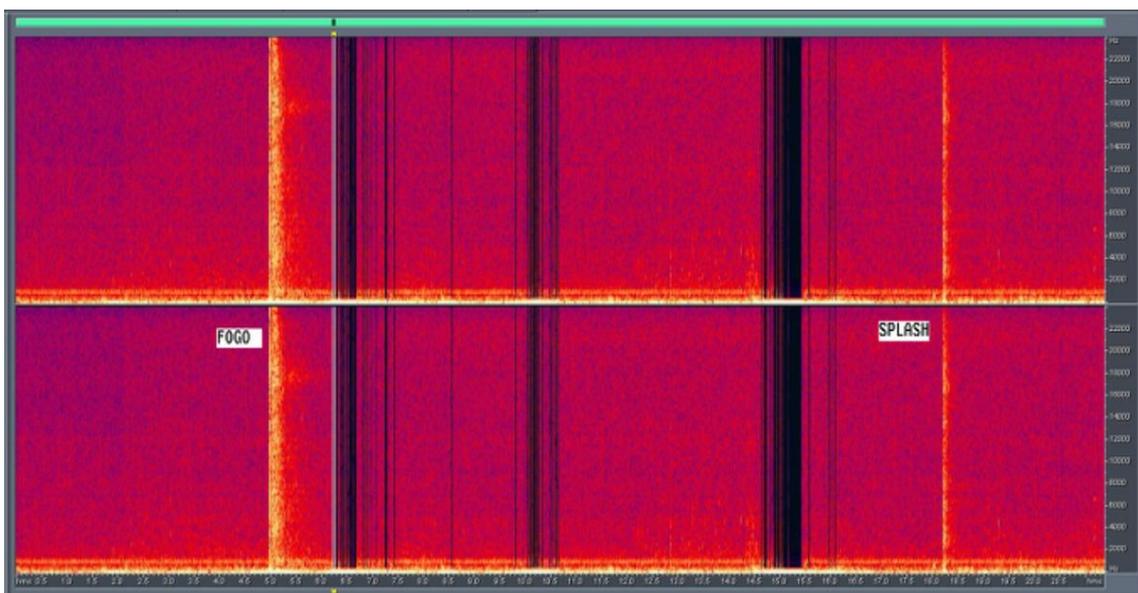
Para permitir algum tipo de depuração e verificação dos sons gravados pelos hidrofones de forma local, na própria boia, é necessário um aplicativo capaz de interpretar os arquivos de áudio gerados nas capturas. O aplicativo utilizado neste projeto foi o Audacity, que é uma boa alternativa para ler e interpretar o áudio capturado e gravado em formato raw e também para convertê-lo para um formato conhecido, como wave. A biblioteca de áudio utilizada pelo software da boia é o ALSA.

Os testes preliminares dos softwares embarcados nas boias realizados na piscina da BNRJ puderam constatar a exequibilidade do projeto da RVT, utilizando hidrofones pré-amplificados de baixa potência que detectam mudanças mínimas de temperatura e pressão hidrostática, com 10 metros de cabos e operam em banda larga.

Para esta versão da RVT, foram realizados testes de estabilidade e estanqueidade no mar, na área da restinga da Marambaia da cidade do Rio de Janeiro (Figura 36), além dos testes de detecção da salva de tiro. Todos os testes tiveram resultados satisfatórios, ratificando a viabilidade do projeto da RVT. Para esses testes, foi utilizado o canhão de 4.5'' da Marambaia com três boias equidistantes de 1 km, tendo o centro da área-alvo uma distância de 9 mil jardas (8229,6 metros) até o canhão. Pelas gravações dos hidrofones foi verificado que a diferença de tempo quando do disparo do canhão até o momento do splash da salva foi de 13,5 segundos, apresentada pela Figura 30, confirmando o tempo de voo da Tabela de Tiro de Superfície das munições fornecidas pela Fábrica de Munição da Marinha (FAJCMC).

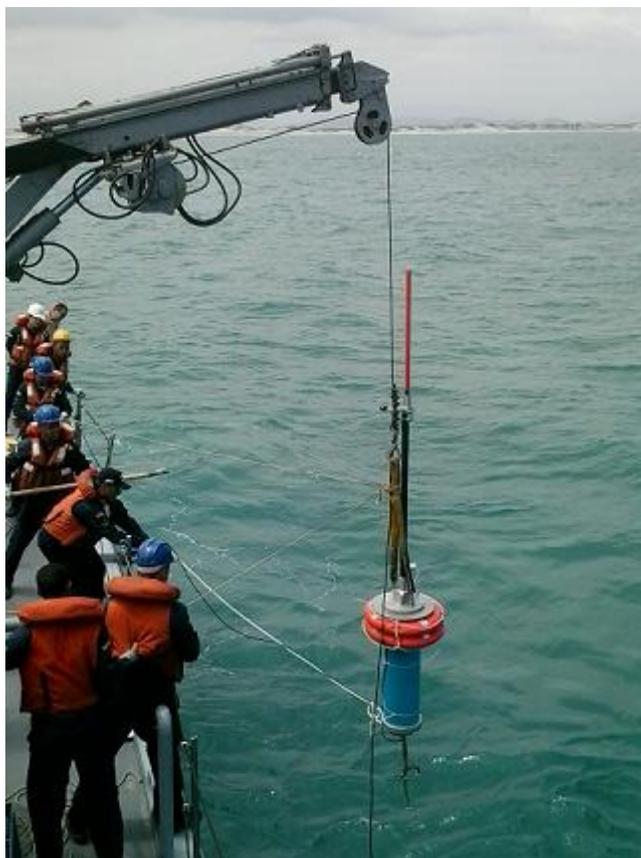


**Figura 36: Teste da boia na restinga da Marambaia.  
Fonte: CASOP.**



**Figura 37: Gravação de hidrofone durante teste na Marambaia.  
Fonte: CASOP.**

Na Figura 38, é apresentado o resgate de uma das boias dos testes realizados na Marambaia, constatando o sucesso do desenvolvimento do projeto RVT.



**Figura 38: Resgate de uma boia na Marambaia.**  
**Fonte: CASOP.**

Pelos resultados desses protótipos, já se pode observar algumas vantagens que a RVT deverá fornecer à MB: flexibilidade de área-alvo, preservação ambiental, independência temporal para realização do exercício de AFN, avaliação em tempo real da qualidade do tiro, redução dos problemas de segurança de alcance e redução dos custos operacionais.

Contudo, não se pretende abordar todas as áreas atuantes da RVT. Como descrito no Capítulo 1, o foco deste trabalho é, por meio de conhecimentos de acústica submarina e processamento de sinais, desenvolver um algoritmo capaz de detectar a localização do *splash* do projétil disparado pelo canhão utilizado no experimento, por meio de uma triangulação acústica submarina.

O Software empregado nesse estudo é o MATLAB.

### 3.4 Aplicação do Método

Simulamos o splash e o posicionamento de três boias a fim de testar os métodos de triangulação. Os dados simulados foram:

Velocidade do som na água ( $v_s$ ) = 1500m/s

Posição do Splash: Latitude ( $latiS$ ) = 40; Longitude ( $longS$ ) = 30

Posição das boias:

Boia 1: Latitude ( $lati1$ ) = 10; Longitude ( $long1$ ) = 10

Boia 2: Latitude ( $lati2$ ) = 60; Longitude ( $long2$ ) = 40

Boia 3: Latitude ( $lati3$ ) = 20; Longitude ( $long3$ ) = 80

Distância do Splash para as boias:

$$d1 = \sqrt{(latiS - lati1)^2 + (longS - long1)^2}$$

$$d2 = \sqrt{(latiS - lati2)^2 + (longS - long2)^2}$$

$$d3 = \sqrt{(latiS - lati3)^2 + (longS - long3)^2}$$

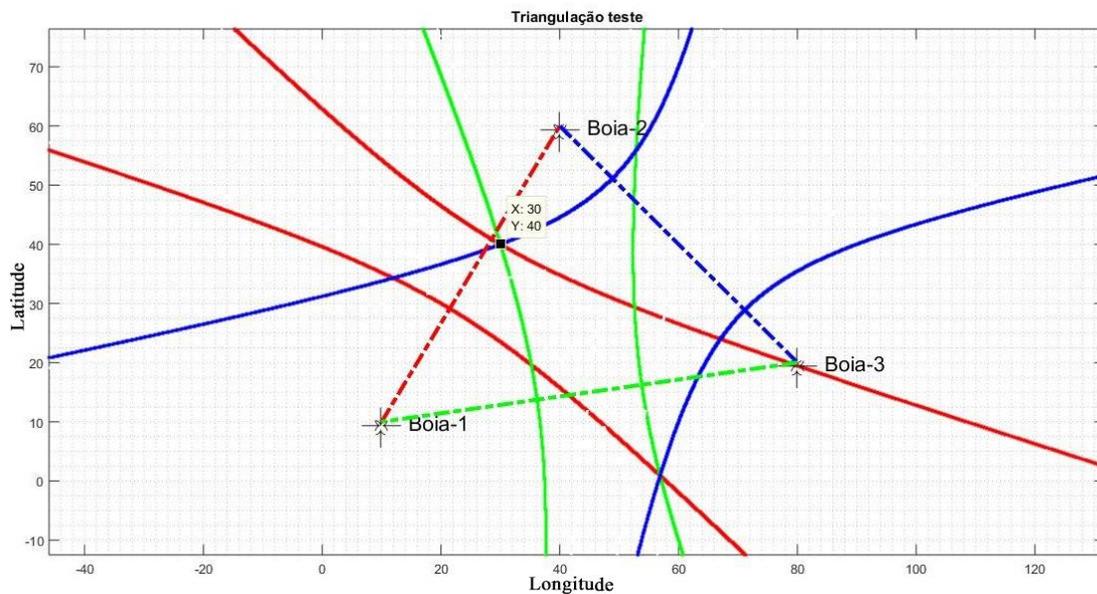
Tempos de propagação do som escutado pelas boias:

$$t1 = d1/v_s; t2 = d2/v_s; t3 = d3/v_s;$$

$$t12 = t2 - t1; t13 = t3 - t1; t23 = t3 - t2;$$

Seguem os resultados dos testes para cada método aplicado.

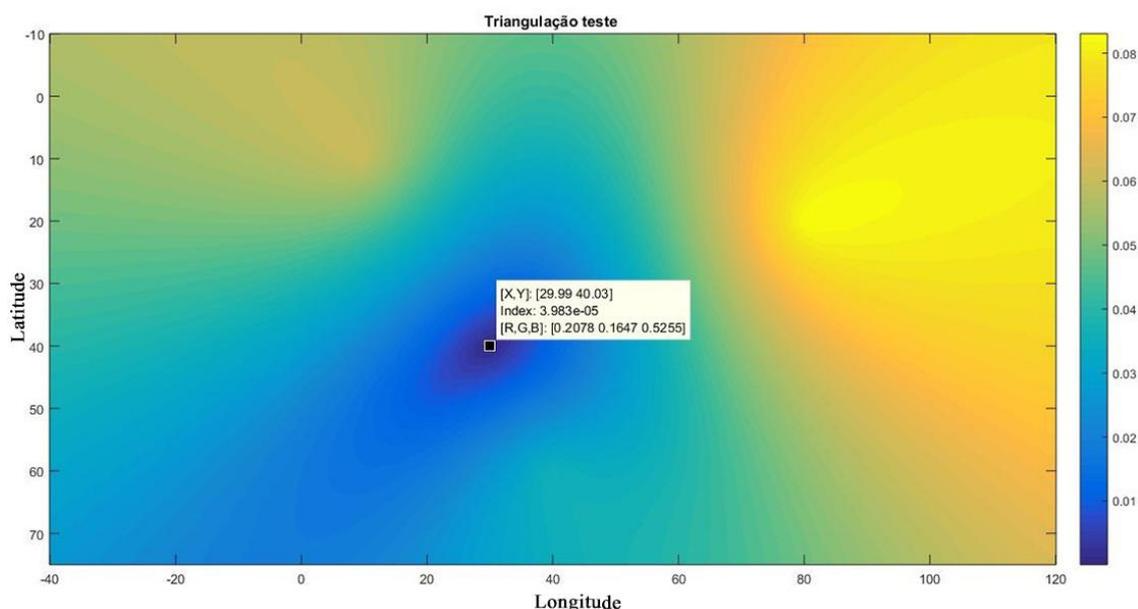
### 3.4.1 Equações Hiperbólicas Paramétricas



**Figura 39: Triangulação com dados simulados utilizando equações hiperbólicas.**

A figura 39 apresenta o resultado da triangulação do sinal simulado a partir da diferença de tempo de chegada do sinal aos três hidrofones, utilizando as equações paramétricas da hipérbole. O método triangulou o sinal no ponto P (30,40), de mesmas coordenadas do splash simulado, comprovando a sua eficácia.

### 3.4.2 Máxima Verossimilhança



**Figura 40: Triangulação com dados simulados utilizando máxima verossimilhança.**

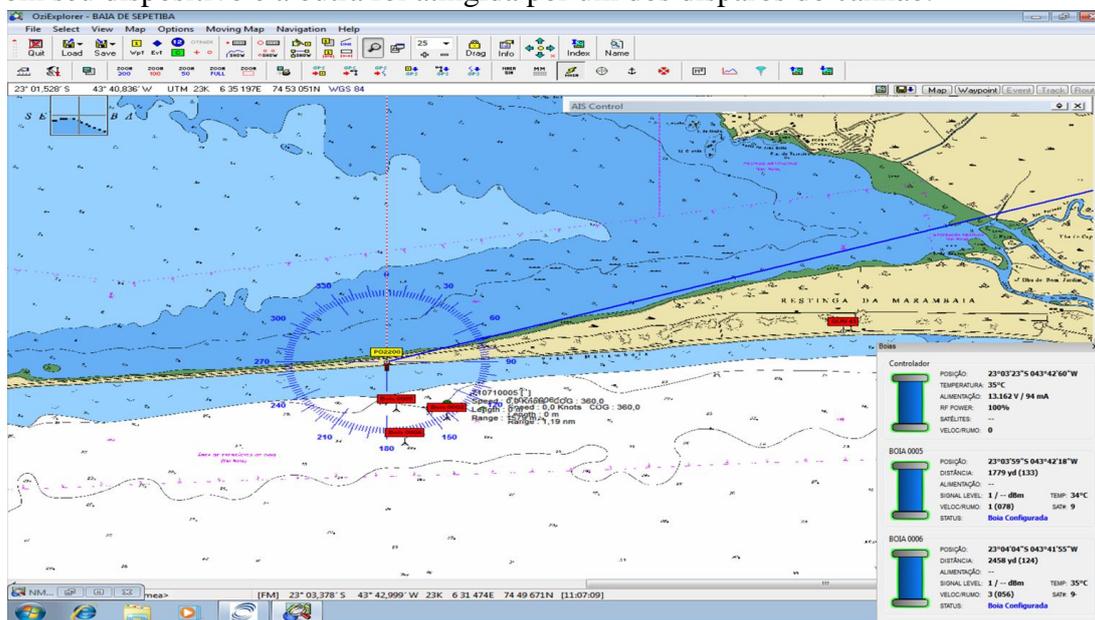
A figura 40 apresenta o resultado da triangulação do sinal simulado a partir da diferença de tempo de chegada do sinal aos três hidrofones, utilizando a máxima verossimilhança. O método triangulou o sinal no ponto P (30,40) como o ponto de maior probabilidade de que tenha ocorrido o splash. Como o splash simulado possui as mesmas coordenadas do ponto P, comprovamos a eficácia do método.

## 4. Resultados e Discussão

Nos Capítulos 2 e 3 foram apresentados os métodos de localização de fontes sonoras, bem como sua aplicabilidade e eficácia, respectivamente, testados com dados simulados. Neste capítulo, abordaremos tais métodos sendo utilizados em experimentos reais.

### 4.1 Experimento 1

O primeiro teste foi realizado na restinga de Marambaia (Figura 41), com disparo de terra a cerca de 9 km das boias acústicas posicionadas em águas com profundidade de aproximadamente 20m. Neste experimento, conseguimos gravação de apenas um hidrofone, instalado a 10m de profundidade, pois uma boia não funcionou com seu dispositivo e a outra foi atingida por um dos disparos do canhão.



**Figura 41: Geometria da experiência realizada na restinga de Marambaia.**

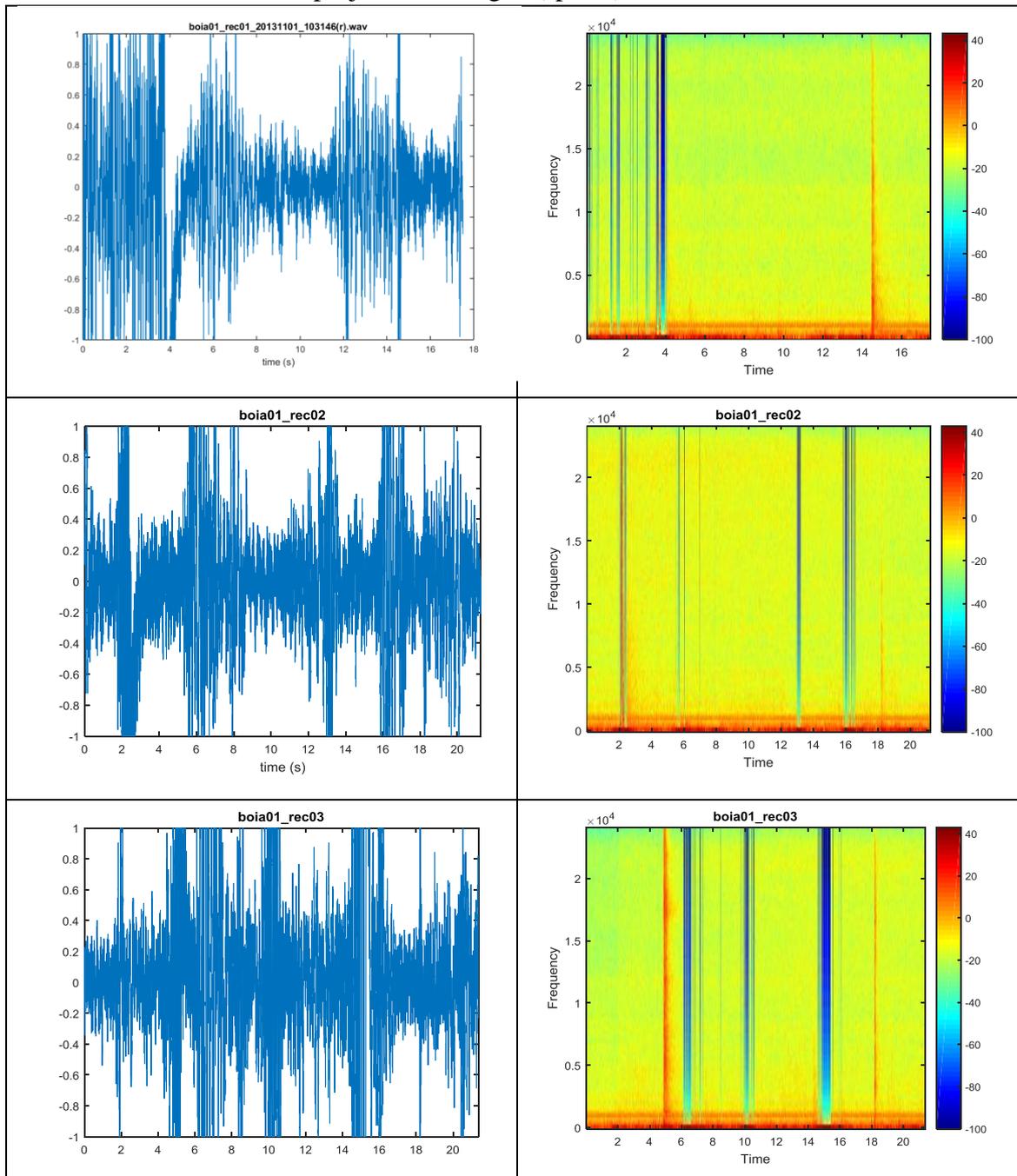
**Fonte: IEAPM.**

A Figura 42 apresenta os sinais no tempo e respectivos espectrogramas, que analisam dinamicamente a densidade espectral de energia, para cada um dos diferentes disparos. A partir da observação dos sinais, pode-se verificar que ocorre muitas vezes saturação no hidrofone. Esta situação deve-se, provavelmente, a um ganho excessivo na

aquisição do sinal. Verificam-se, também, componentes de baixa frequência, provavelmente devido a navios próximos ao hidrofone.

As assinaturas no hidrofone devidas ao disparo são do tipo impulsivo e provavelmente resultam de dois fenômenos distintos:

1. Propagação pela água da onda de choque devido ao disparo. Essa onda deverá se propagar à velocidade do som na água (aproximadamente 1500 m/s); e
2. Contato do projétil com a água (splash).

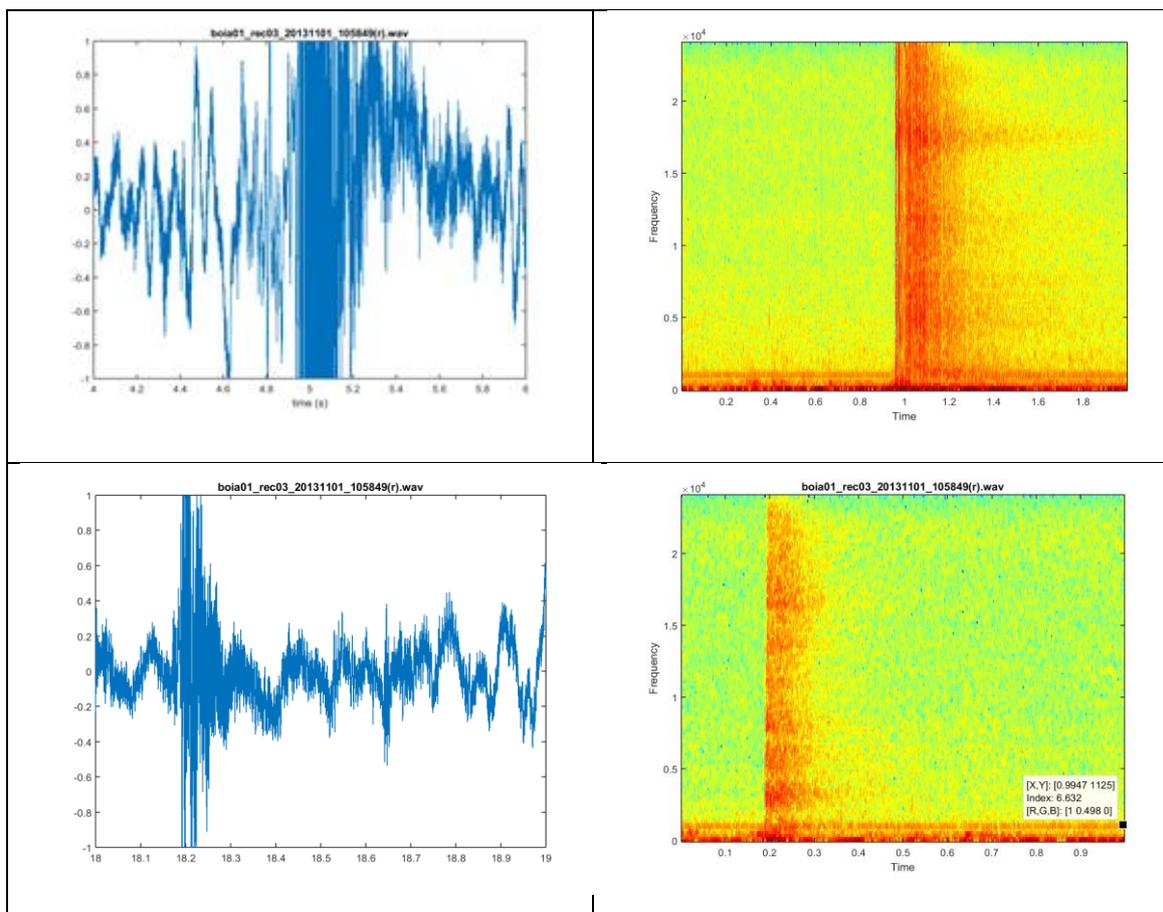


**Figura 42: Série temporal e respectivos espectrogramas de sinais adquiridos na boia 1.**

A diferença de tempo em que ocorrem essas assinaturas estão relacionadas com as distâncias do hidrofone ao local do disparo e com a velocidade do tiro.

Na 1ª coluna da Figura 43 é possível identificar ambas as assinaturas, apesar da saturação que ocorre no hidrofone. A assinatura da onda de choque que se propaga pela água ocorre em cerca de 4s, enquanto que o splash ocorre um pouco depois dos 14s. Considerando que a velocidade de disparo é da ordem de 800 m/s, o ângulo de disparo é próximo de 45°, então os 10s que separam as duas assinaturas são plausíveis.

Note que estas assinaturas podem depender das condições ambientais, e não são visíveis em todas as amostras disponíveis.



**Figura 43: Detalhe da assinatura do disparo três. Em cima, a onda que se propaga pela água. Em baixo, uma possível réplica do contato do projétil com a água.**

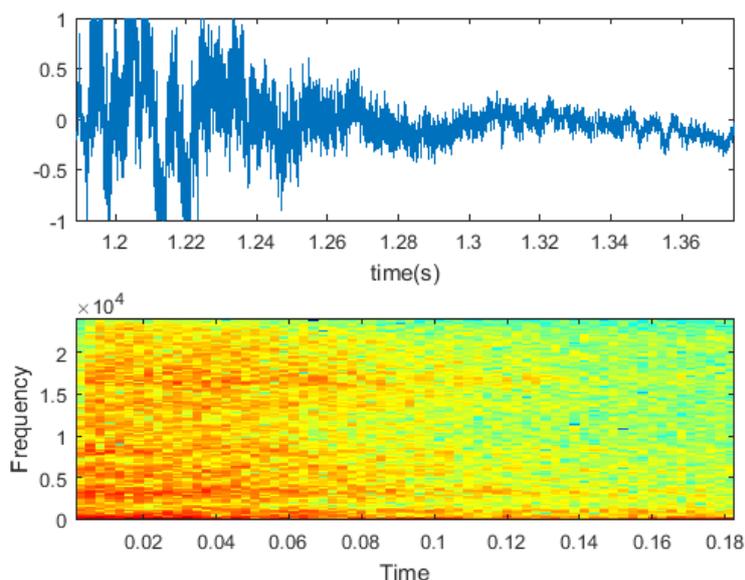
Tendo como referência os detalhes do disparo 3 apresentados na Figura 41, podemos observar que a duração do impulso é da ordem de várias centenas de milissegundo.

Em relação ao mesmo disparo, é provável que as zonas de saturação correspondam a outras assinaturas do impacto do projétil com a água.

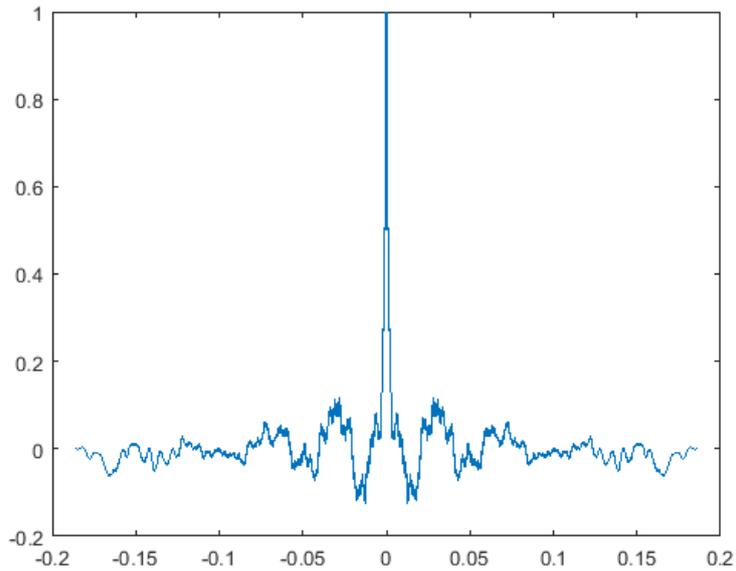
O próximo passo é fazer a correlação cruzada entre os sinais captados pelos hidrofones das diferentes boias. Contudo, no experimento realizado só foi possível a captação de gravações de uma única boia. Diante disso, utilizamos a função de autocorrelação, que é a correlação cruzada de um sinal com o ele próprio. Trata-se de uma ferramenta matemática para encontrar padrões de repetição, tal como a presença de um sinal periódico obscurecido pelo ruído. Portanto, essa função indica o quanto um processo está relacionado com ele próprio em instantes de tempo diferentes. Ela permite que se analise o grau de irregularidade de um sinal.

Sabe-se que a largura dos picos de correlação dos processadores indica a sua capacidade de resolução, sendo considerada como uma medida de sua qualidade (NARARSIRNHAN e KROLIK, 1995). Então, busca-se sempre uma função com seu pico bem definido e estreito, para que não haja dúvida sobre a posição de seu máximo. Para que isso seja possível, é desejável que a função de autocorrelação do sinal a ser correlacionado também possua pico bem definido e estreito, indicando sua característica predominantemente aleatória.

Realizamos, então, a análise da autocorrelação do sinal “sp\_1”. O comprimento do splash foi selecionado (Figura 44), enquanto a sua função de autocorrelação é apresentada na Figura 45.



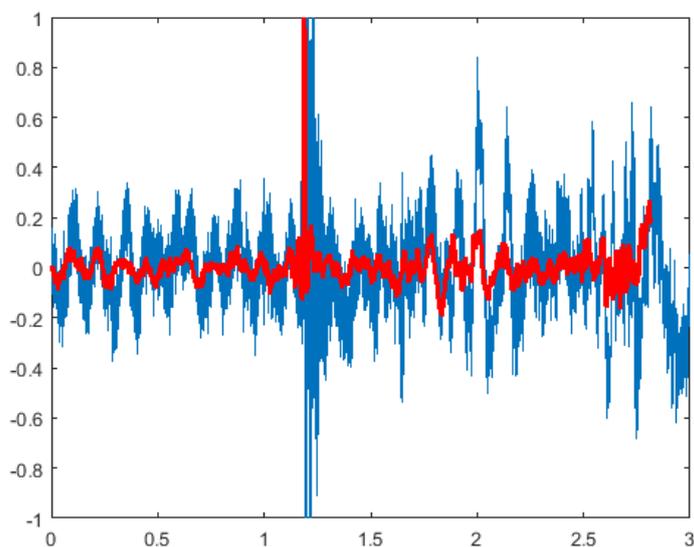
**Figura 44: Splash e respectivo espectograma.**



**Figura 45: Função de autocorrelação do splash.**

Observa-se que a função de autocorrelação é estreita, sendo favorável à correlação cruzada.

A Figura 46 representa a correlação cruzada entre todo o sinal “s\_1” e o splash do sinal “sp\_1”.



**Figura 46: Correlação cruzada entre o splash do sinal “sp\_1” e o sinal "s\_1".**

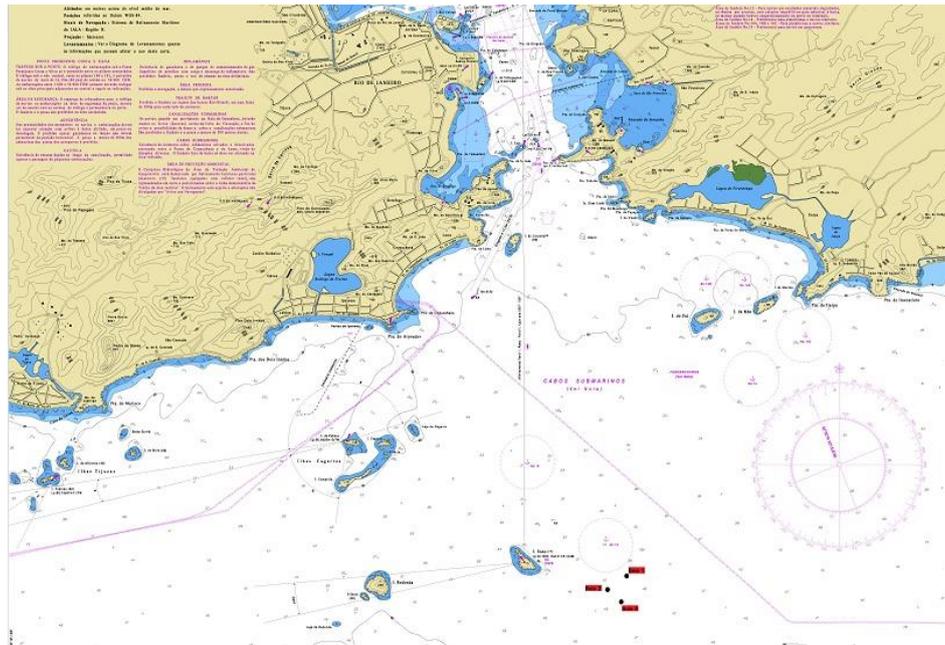
Como esperado, a correlação cruzada (vermelho) tem o pico na posição correspondente ao splash.

A assinatura do splash tem uma função de autocorrelação estreita o que é uma condição necessária para encontrar uma boa estimativa dos tempos de propagação.

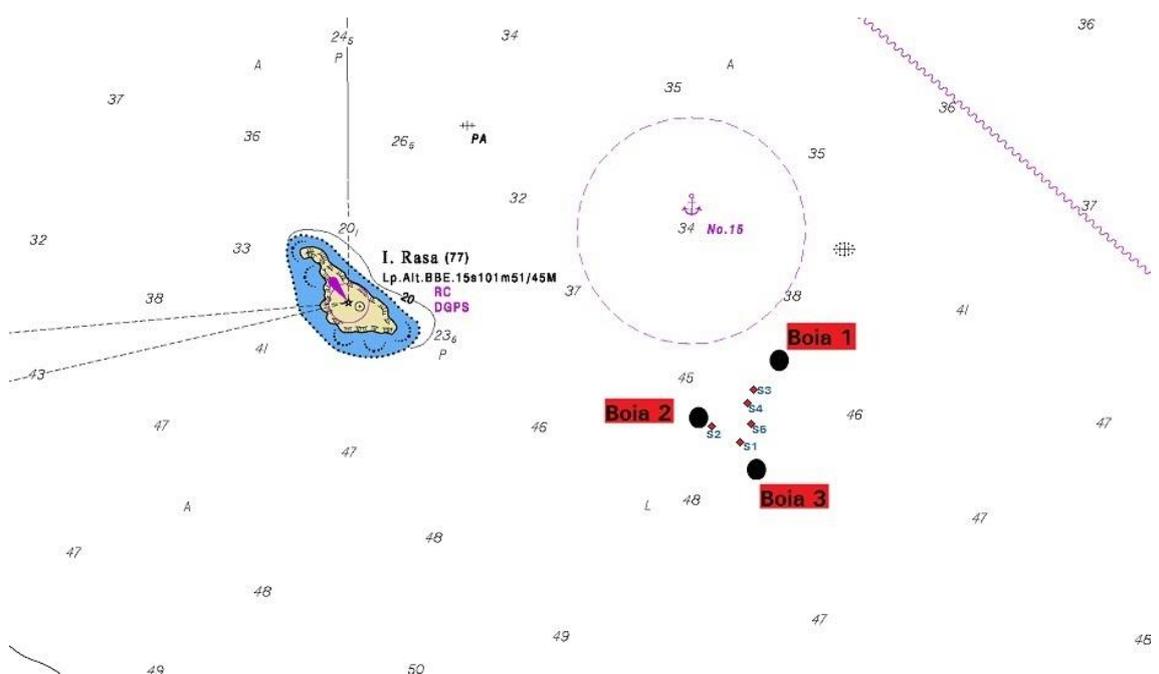
Todavia, os dados obtidos foram contaminados por várias fontes de ruído, dentre eles, ruído do navio e resultantes da saturação dos hidrofones. Espera-se corrigir essas dificuldades para os próximos experimentos.

## 4.2 Experimento 2

O segundo experimento foi realizado na Baía de Guanabara, nas proximidades da Ilha Rasa.



**Figura 47: Experimento realizado na Baía de Guanabara.**

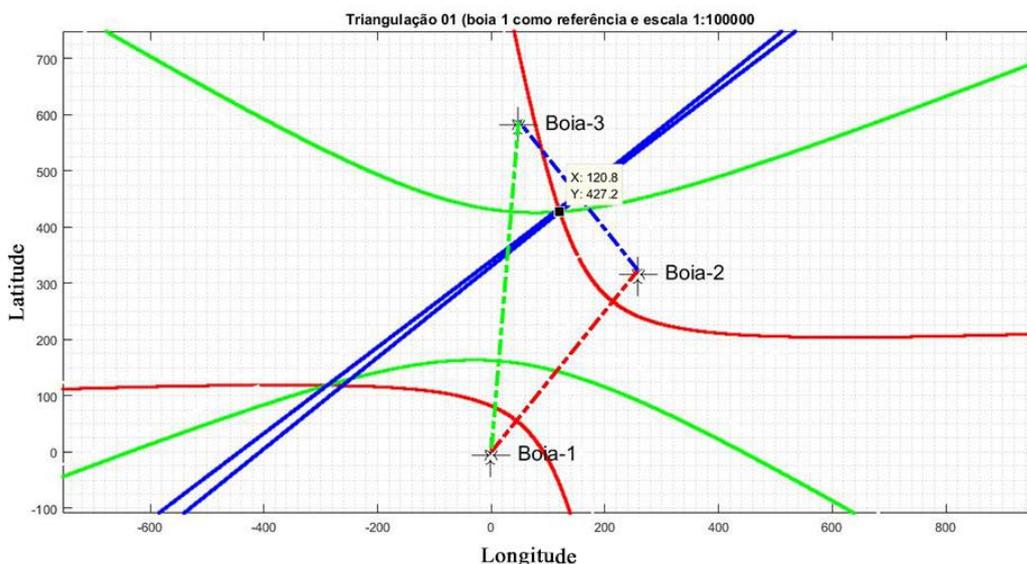


**Figura 48: Posicionamento do experimento na Baía de Guanabara.**

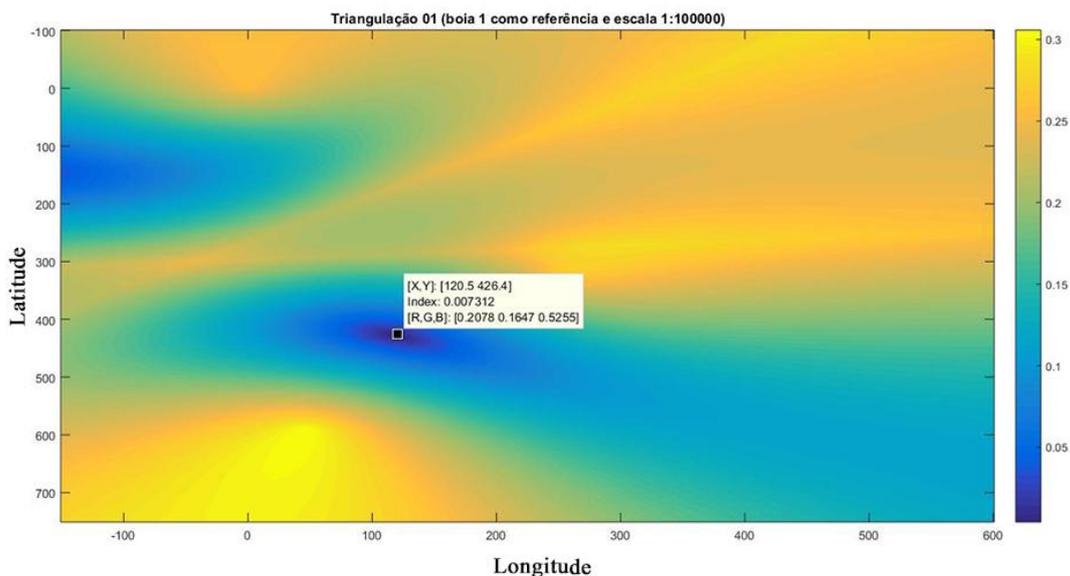
Para esse experimento, contamos com uma embarcação de apoio – Embarcação de Desembarque de Carga Geral (EDCG) “Marambaia” – e de um destacamento de Mergulhadores de Combate.

A fim de simular o splash, os mergulhadores de combate lançaram granadas pela borda da embarcação de apoio. O som das explosões foi captado pelo conjunto de três boias. Com isso, foi possível triangular os sinais recebidos em cinco momentos.

O primeiro sinal foi processado e triangulado, como mostrado nas Figuras 49 e 50.



**Figura 49: Sinal do splash 1 triangulado por equações paramétricas.**



**Figura 50: Sinal do splash 1 triangulado por máxima verossimilhança.**

Após o processamento pelo algoritmo utilizando as equações paramétricas, a posição do primeiro splash ocorreu na coordenada 120,8 em X e 427,2 em Y, levando-se em consideração a referência e a escala. Esse valor corresponde à seguinte coordenada: Latitude 23,07452 S / Longitude 43,114128 W.

A triangulação da posição por máxima verossimilhança correspondeu à coordenada: Latitude 23,074044 S / Longitude 43,114125 W.

A diferença entre as posições estabelecidas pelos dois métodos foi de aproximadamente 52 metros.

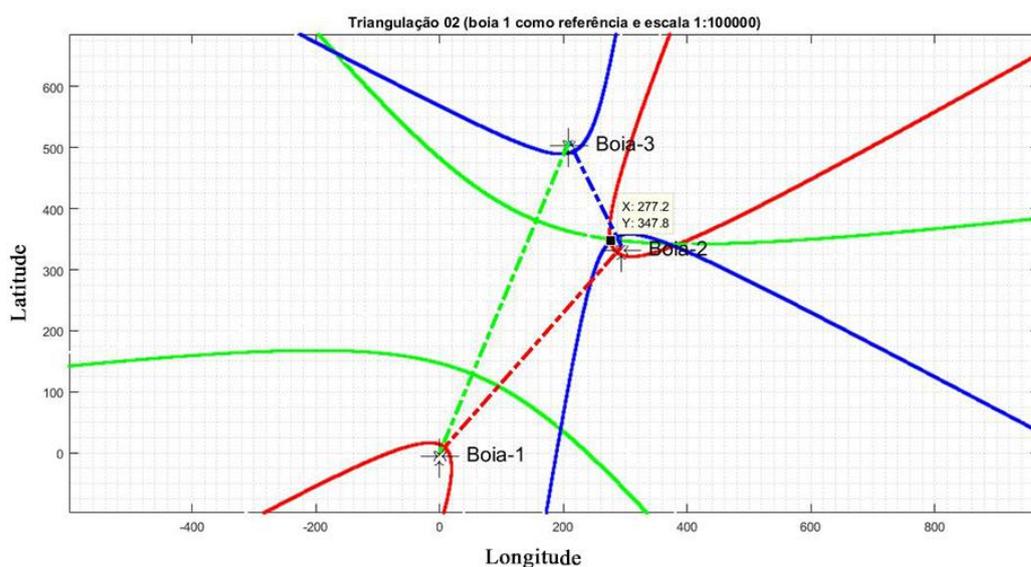
Tendo em vista que, no momento em que a primeira granada foi lançada, a embarcação de apoio se encontrava na posição 23,07290 S / 43,11329 W, podemos calcular a distância entre a embarcação de apoio e a posição triangulada, sendo considerada, portanto, a distância entre a posição real do splash e a posição estimada pela triangulação.

Utilizando o método das equações paramétricas, a posição triangulada foi estimada em uma distância de, aproximadamente, 202 metros da posição real

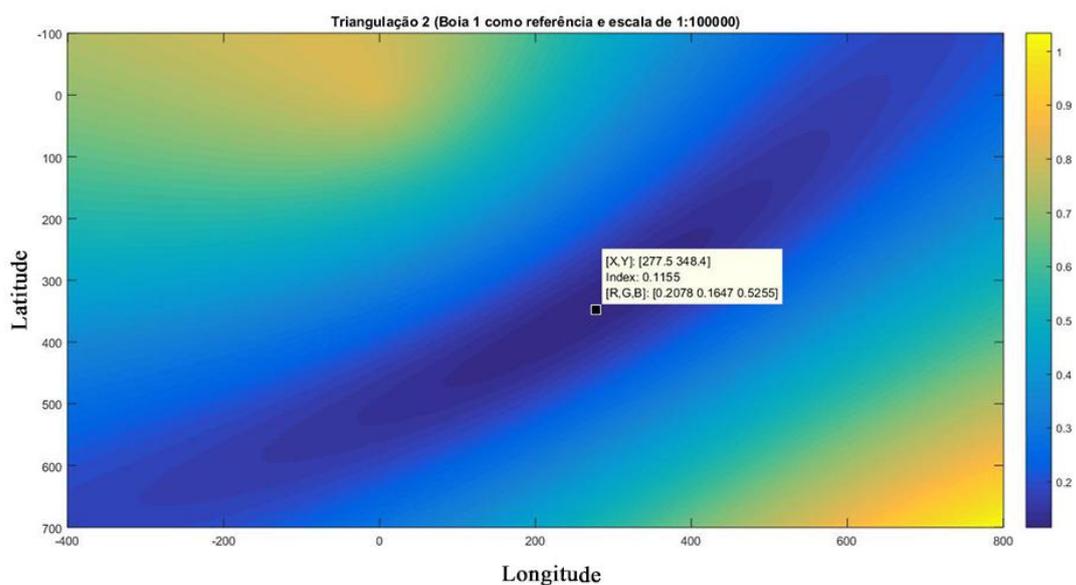
Utilizando o método da máxima verossimilhança, a posição triangulada foi estimada em uma distância de, aproximadamente, 157 metros da posição real.

Portanto, para o primeiro splash, o método da máxima verossimilhança se mostrou mais preciso. Sua precisão foi considerada boa, conforme estabelecido pela tabela de HIT (CASOP, 1998), enquanto que, pela triangulação pelo método das equações paramétricas, foi considerada regular, de acordo com a mesma tabela.

A mesma análise foi realizada para os demais sinais de splash.



**Figura 51: Sinal do splash 2 triangulado por equações paramétricas.**



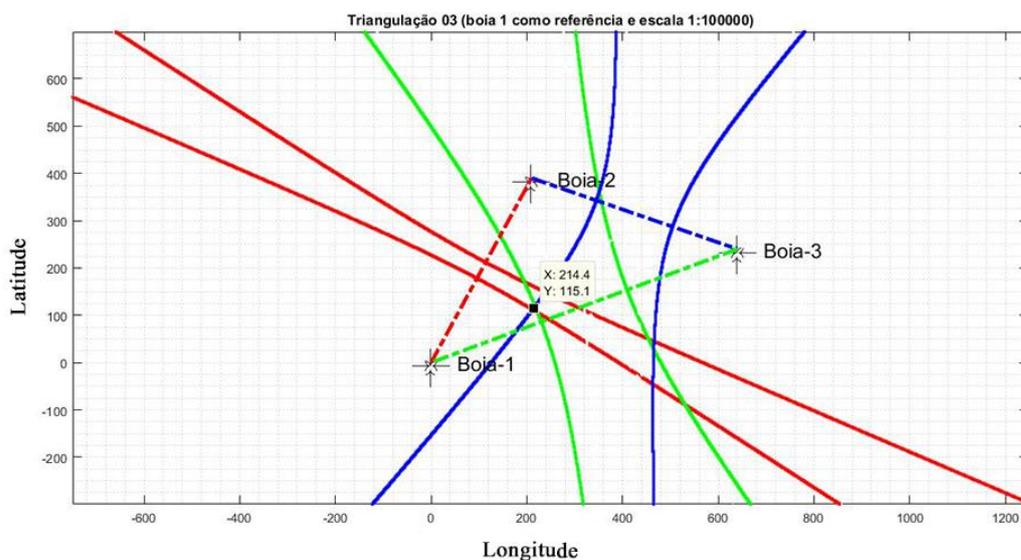
**Figura 52: Sinal do splash 2 triangulado por máxima verossimilhança.**

Para o sinal do segundo splash, a diferença entre as posições estabelecidas pelos dois métodos foi de aproximadamente 25 centímetros. Ou seja, consideramos que os dois métodos estimaram a mesma posição.

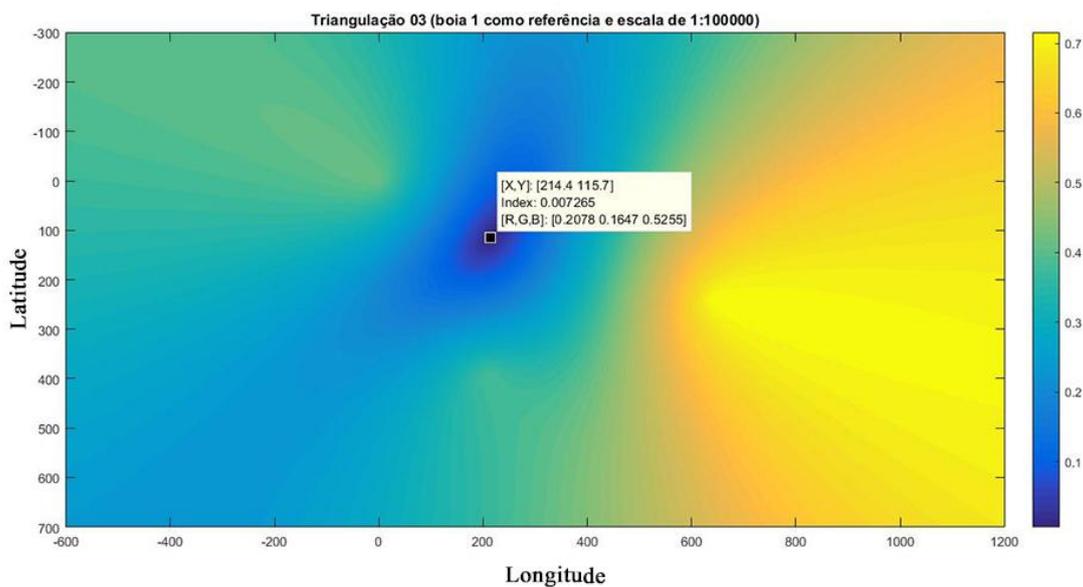
No momento em que a segunda granada foi lançada a embarcação de apoio se encontrava na posição 23,07284 S / 43,11216 W.

Para os dois métodos de triangulação, a distância entre a posição real do splash e a posição estimada foi de, aproximadamente, 238 metros.

Portanto, para o segundo splash a precisão da triangulação foi considerada regular, de acordo com a tabela supracitada.



**Figura 53: Sinal do splash 3 triangulado por equações paramétricas.**



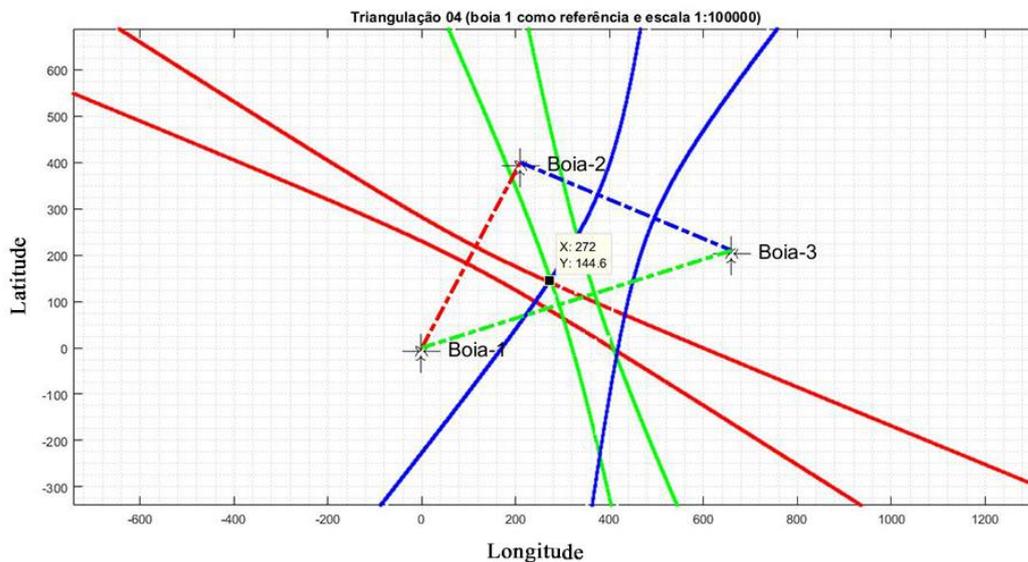
**Figura 54: Sinal do splash 3 triangulado por máxima verossimilhança.**

Para o sinal do terceiro splash, a diferença entre as posições estabelecidas pelos dois métodos foi de aproximadamente 60 centímetros. Ou seja, consideramos que os dois métodos estimaram a mesma posição.

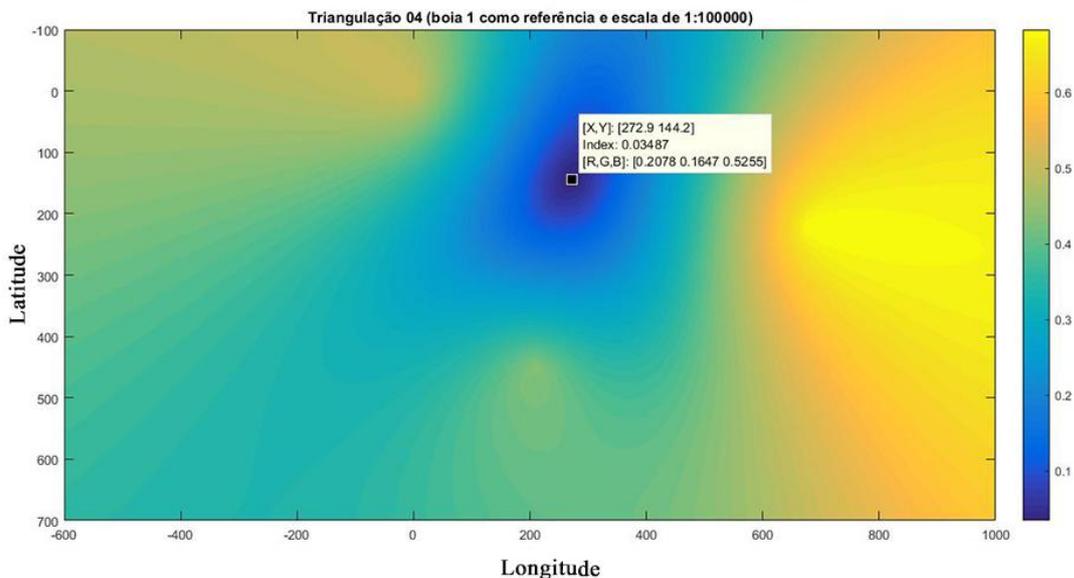
No momento em que a terceira granada foi lançada a embarcação de apoio se encontrava na posição 23,07066 S / 43,10951 W.

Para os dois métodos de triangulação, a distância entre a posição real do splash e a posição estimada foi de aproximadamente 67 metros. Apesar de ser um valor

relativamente baixo, ainda não chegamos na precisão ideal para a finalidade da RVT. Contudo, tal precisão foi considerada muito boa, de acordo com a tabela supracitada.



**Figura 55: Sinal do splash 4 triangulado por equações paramétricas.**

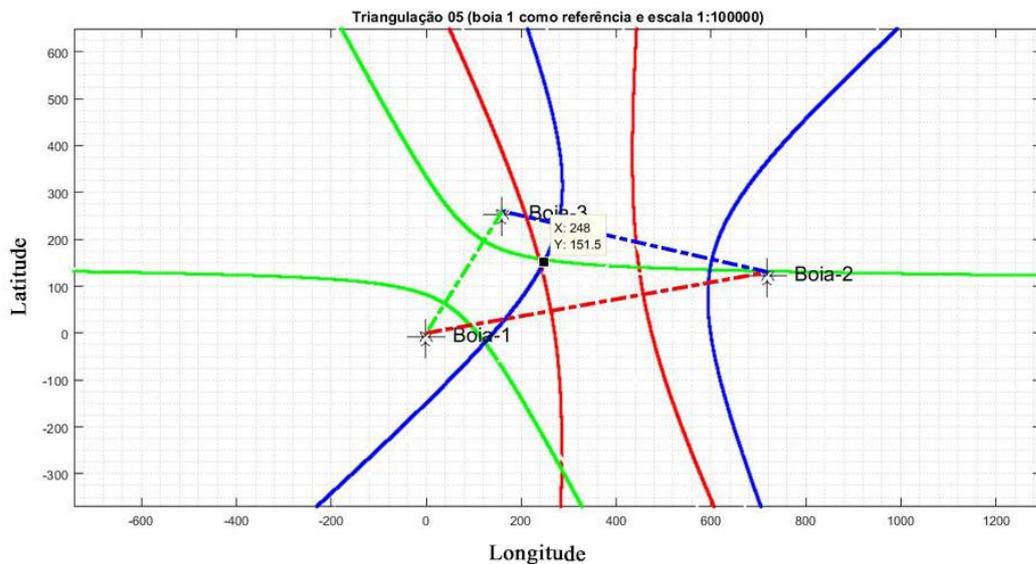


**Figura 56: Sinal do splash 4 triangulado por máxima verossimilhança.**

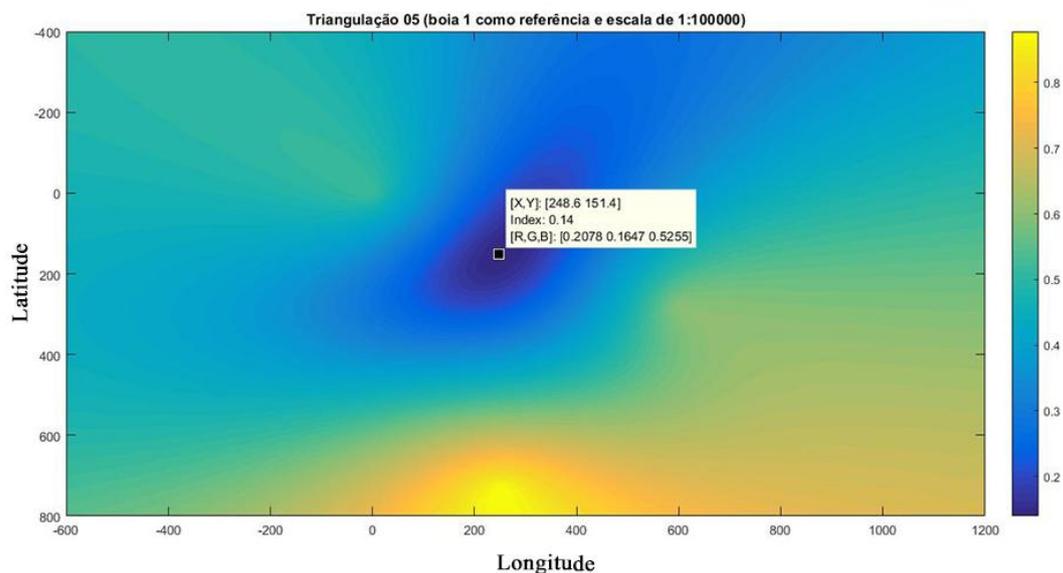
Para o sinal do quarto splash, a diferença entre as posições estabelecidas pelos dois métodos foi de aproximadamente 1 metro. Ou seja, consideramos que os dois métodos estimaram a mesma posição.

No momento em que a quarta granada foi lançada a embarcação de apoio se encontrava na posição 23,07072 S / 43,10926 W.

Para os dois métodos de triangulação, a distância entre a posição real do splash e a posição estimada foi de, aproximadamente, 24 metros. Esse resultado foi considerado excelente pois atende a distância mínima estabelecida pela tabela de HIT (CASOP, 1998), que estabelece um limite de 45,72 metros de precisão.



**Figura 57: Sinal do splash 5 triangulado por equações paramétricas.**



**Figura 58: Sinal do splash 5 triangulado por máxima verossimilhança.**

Para o sinal do quinto splash, a diferença entre as posições estabelecidas pelos dois métodos foi de aproximadamente 152 metros.

No momento em que a quinta granada foi lançada a embarcação de apoio se encontrava na posição 23,07284 S / 43,10871 W.

Utilizando o método das equações paramétricas, a posição triangulada foi estimada em uma distância de, aproximadamente, 202 metros da posição real

Utilizando o método da máxima verossimilhança, a posição triangulada foi estimada em uma distância de, aproximadamente, 227 metros da posição real.

Portanto, para o quinto splash, o método das equações paramétricas se mostrou mais preciso. No entanto, sua precisão, bem como a precisão utilizando o método da máxima verossimilhança, foi considerada regular, conforme estabelecido pela tabela de HIT (CASOP, 1998).

Neste segundo experimento, dentre os cinco sinais captados pelo sistema da RVT, apenas um foi considerado excelente e nenhum foi considerado insatisfatório. Contudo, mesmo com os resultados regulares, ficaram dentro do esperado para o estudo, levando-se em consideração as condições climáticas bem adversas para esse experimento, e a velocidade do som no mar constante. Diante disso, tudo leva a crer que estamos no caminho certo para aprimorar a técnica de triangulação de sinais acústicos submarinos.

## 5. Conclusões e Sugestões

Quanto maior a paz, maior deve ser a preocupação Nacional com a defesa do Brasil. A principal preocupação deve ser o poder dissuasório, face aos mais de duzentos milhões de habitantes do país, a quem se deve proteger. Portanto, faz-se necessário o treinamento contínuo dos sistemas operativos de artilharia naval, além da manutenção destes sistemas.

Desta forma, o projeto da RVT é considerado de extrema importância para a manutenção do nível de adestramento da Esquadra Brasileira em relação à precisão dos exercícios de tiro. Outro fator relevante é o aumento da flexibilidade relacionado ao local do exercício, pois com esse sistema os eventos podem ser realizados em qualquer ponto da costa brasileira. Além disso, a RVT vai permitir avaliação mais rápida e precisa dos canhões para seu aferimento e alinhamento.

Outra vantagem apresentada é que a RVT pode ser de grande apoio no desenvolvimento de munições da FAJCMC, quando utilizando as facilidades da Linha de Tiro da Marambaia: nos testes de qualidade fabril das munições e na confirmação de peso das munições.

Questões ambientais também serão mitigadas com a utilização do sistema, visto que os exercícios no Arquipélago de Alcatrazes estão permitidos apenas nos alvos da Ilha da Sapata e em determinado período do ano. Com a RVT, o exercício de Apoio de Fogo Naval poderá ser realizado em qualquer época do ano.

Espera-se, através deste estudo, permitir um melhor conhecimento dos processos envolvidos no Projeto da Raia Virtual de Tiro da Marinha, e contribuir com a missão de estimar o ponto de queda de um projétil no mar. Contudo, ressalta-se que fatores que afetam a determinação da posição geográfica do splash não foram considerados neste estudo, tais como o erro de precisão do GPS, a influência gerada pela onda sonora da explosão do momento do disparo do projétil, a onda de choque decorrente da velocidade supersônica do projétil, dentre outras.

Futuramente, sugere-se aproveitar os conhecimentos obtidos com o projeto da RVT, aliados à consideração de possíveis fontes de erro, bem como estudo aprofundado sobre as influências do sinal, além da qualificação acadêmica nas áreas de matemática aplicada, acústica submarina, eletrônica, processamento de sinais, programação de computadores para ambientes heterogêneos, entendimento das possibilidades e limitações do emprego de sistemas de posicionamento global para inovações tecnológicas, realidade virtual em 3D, dentre outras, contribuindo de forma significativa para o aperfeiçoamento das forças navais e, sobretudo, para o desenvolvimento do país.

## Referências Bibliográficas

- AZEVEDO, Amilcar Gomes de; CAMPOS, Paulo Henrique Borges de. Estatística básica. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1981.
- BENESTY, J., CHEN, J., HUANG, Y., *Microphone Array Signal Processing*. Berlin, Germany, Springer, 2008.
- BRANDSTEIN, M., WARD, D., *Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications*. Berlin, Germany, Springer, 2001.
- BRASIL. Defesa Aérea Naval: Marinha encerra treinos de tiros na ilha de Alcatrazes. Disponível em: <<http://www.defesaaereanaval.com.br/marinha-encerra-treinos-de-tiros-na-ilha-de-alcatrazes>>. Acessado em: 21 fev. 2018.
- BRASIL. Comando-em-Chefe da Esquadra ao Comando de Operações Navais. *Ofício nº 40-45*, de 30 de setembro de 2011. Relatório GT Alcatrazes. Rio de Janeiro, 2011.
- BRASIL. Marinha do Brasil. Termo de Compromisso nº 711000/2008-001/00, de 03 de setembro de 2008. Adoção de medidas que possibilitam conciliar os interesses da Defesa Nacional e a preservação dos ecossistemas, processos ecológicos e espécies no Arquipélago de Alcatrazes-SP. Brasília, DF, 2008.
- BRASIL. Marinha do Brasil, Comando de Operações Navais, *COMOPNAV Nº 300: Manual de Adestramento*. 14ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- BRASIL. Marinha do Brasil. Centro de Apoio a Sistemas Operativos. *NorCasop40-01: Avaliação do Exercício de Apoio de Fogo Naval*. 1ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- BRASIL. Estado-Maior da Armada. EMA-400 Manual de Logística de Marinha. 2. rev. Brasília, DF, 2003.
- BURDEA, G.; COIFFET, P. *Virtual Reality Technology*. John Wiley & Sons, 1994.
- CLAY, Clarence Samuel; MEDWIN, Herman. *Acoustical oceanography: principles and applications*. 1977.
- DAMARLA, Thyagaraju. *Battlefield Acoustics*. Springer, 2016.
- ESCOBAR, Herton. JORNAL ESTADÃO. Marinha muda posição e abre caminho para criação de Parque Nacional no Arquipélago dos Alcatrazes, 18 jun. 2013. Disponível em: <<http://ciencia.estadao.com.br/blogs/herton-escobar/marinha-muda-posicao-e-abre-caminho-para-criacao-de-parque-nacional-no-arquipelago-dos-alcatrazes/>>. Acessado em: 21 fev. 2018.

- FOY, Wade H. Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, n. 2, p. 187-194,1976.
- GOODRIDGE, Steven G. Multimedia sensor fusion for intelligent camera control and human-computer interaction. Raleigh, 1997. Disponível em: <<http://www4.ncsu.edu/~kay/msf/sound.htm>>. Acesso em: 21 fev. 2018.
- JENSEN, Finn B. et al. Computational Ocean Acoustics. Springer Science & Business Media, 2011.
- KIRNER, C. Realidade Virtual e Aumentada. 2010. Disponível em: <<http://www.realidadevirtual.com.br>>. Acessado em: 21 fev. 2018.
- Li, Si-chun, De-sen Yang, and Yang Lu. "Splash sound feature research based on empirical mode decomposition and Hilbert-Huang spectrum." Information and Automation (ICIA), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010.
- MACEDO, Helber Carvalho; FIGUEIREDO JR, Alberto Garcia de; MACHADO, João Carlos. Propriedades acústicas (velocidade de propagação e coeficiente de atenuação) de sedimentos marinhos coletados nas proximidades da Ilha do Cabo Frio, RJ. Revista Brasileira de Geofísica, 2009.
- METOCEAN. MASS. 2017. Disponível em: <<http://www.METOCEAN.com/product/naval-systems-mass/>>. Acessado em: 21 fev. 2018.
- MING, J., HAZEN, T., GLASS, J. e REYNOLDS, D. Robust speaker recognition in noisy conditions. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2007.
- NARASIRNHAN, S. e KROLIK, J.L., "Fundamental Limits on Acoustic Source Range Estimation Performance in Uncertain Ocean Channels", Journal of Acoustical Society of America, v. 97, n. 1, pp. 215-226, 1995.
- SCHIESSER, Georg. GNU/Linux based TDOA localization using COTS hardware. Mistellbach, 2009. Disponível em: <<http://www.opentech.at/papers/tdoa.pdf>>. Acessado em: 21 fev. 2018.
- WEBSTER, R. Ambient noise statistics. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993.
- ZÃO, L. e COELHO, R. Generation of coloured acoustic noise samples with non gaussian distribution. IET Signal Processing, 2012.