

ALCANCE SONAR EM ÁGUAS OCEÂNICAS RASAS E SUAS IMPLICAÇÕES  
PARA A GUERRA ANTISUBMARINO NO TERRITÓRIO BRASILEIRO

---

TÍTULO DO ARTIGO

Capitão-Aviador RENAN MIRANDA RICHTER

---

AUTOR

## Sumário

1	Introdução	2
2	Fundamentação teórica	2
2.1	Propagação do som no oceano	3
2.2	Propagação do som em águas rasas	5
3	Modelo de propagação acústica em águas rasas	5
4	Estudo de caso: “Ataque de submarino nuclear inimigo à sede da Esquadra Brasileira”	8
4.1	Simulações	10
5	Conclusão	15

## 1 Introdução

O ambiente marinho é um dos mais complexos e desafiadores de um Teatro de Operações. Neste nicho, o submarino é, sem dúvidas, uma das mais letais e furtivas armas, já que se vale de táticas que aproveitam as especificidades e limitações da propagação do som na água. Assim, detectar e neutralizar estas embarcações torna-se um combate à parte que exige não só táticas extremamente bem delineadas como também elevado conhecimento operacional por parte dos tripulantes, quer sejam de meios navais ou aéreos.

A Guerra Antissubmarino revela-se então extremamente dinâmica e requer antes de tudo o pleno conhecimento do ambiente acústico. Nessa perspectiva, as informações que influenciam a velocidade de propagação do som na água são fundamentais. Temperatura, salinidade e pressão atmosférica são algumas variáveis que acabam por interagir mutuamente e influenciar este comportamento. Ao reunir o máximo de informações possíveis acerca da propagação sonora na água pode-se, com mais precisão, estimar os alcances sonar e incrementar as capacidades de oposição a submarinos.

Ainda nesse contexto, o Subsistema Processador Acústico de Sonoboias (SPAS-32) que equipa a aeronave P-3AM é capaz de realizar a predição dos alcances sonar (ativo e passivo) em tempo real por sonoboias específicas bem como gerenciar as fases de detecção e acompanhamento de submarinos. Ele é capaz de processar 32 sonoboias simultaneamente e é a principal ferramenta de gerenciamento ASW (*Anti-Submarine Warfare*) da Força Aérea Brasileira (FAB).

No entanto, as sonoboias disponíveis no mercado e usadas pelo 1<sup>o</sup>/7<sup>o</sup> GAv, tanto passivas quanto ativas, podem não desempenhar suas funções precípuas em águas rasas. O presente estudo pretende realizar uma análise que prova tal afirmativa, baseado em um modelo de interferência acústica consagrado para demonstrar os efeitos adversos de propagação de ondas sonoras em águas oceânicas rasas. Para isso, o autor desenvolveu um algoritmo que utiliza a teoria de *Bellhop* aplicada a um estudo de caso de detecção de um hipotético submarino nuclear que pretende atacar a sede da Esquadra Brasileira, no Rio de Janeiro. Reunindo as informações de predição acústica do Sistema de Previsão do Ambiente Acústico para o Planejamento das Operações Navais (SISPRES 5.0), o modelo prevê as perdas de transmissão sonora tanto por efeitos de superfície quanto por efeitos do solo oceânico utilizando dados reais da Baía de Guanabara coletados no dia 24 de fevereiro de 2021.

## 2 Fundamentação teórica

O pleno êxito de uma missão ASW é função direta do apuramento da predição do alcance sonar e do conhecimento acerca da propagação dos raios sonoros nas águas do mar [1]. Devido à sua não-homogeneidade, o oceano apresenta tendências extremamente aleatórias que influenciam o comportamento do som, contribuem para seu espalhamento e, por consequência, tornam a localização de submarinos uma tarefa extremamente difícil.

## 2.1 Propagação do som no oceano

É sabido que em meios materiais o som se propaga em velocidades mais elevadas que no ar. Este é o caso da propagação na água, que tem velocidade quatro vezes maior, aproximadamente. O presente estudo considera (1) como referência. Tal expressão foi definida por Medwin [2] como forma de cálculo da velocidade de propagação do som na água limitada à profundidade de 1000 m:

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

Em que  $v_a$  é a velocidade de propagação do som na água,  $T$  é a temperatura da água do mar,  $P$  é a profundidade e  $S$  é a salinidade. A Figura 1 mostra o perfil de velocidade do som para a profundidade de 200 m e para as salinidades de 0, 15, 30 e 40 PSU em função da temperatura:

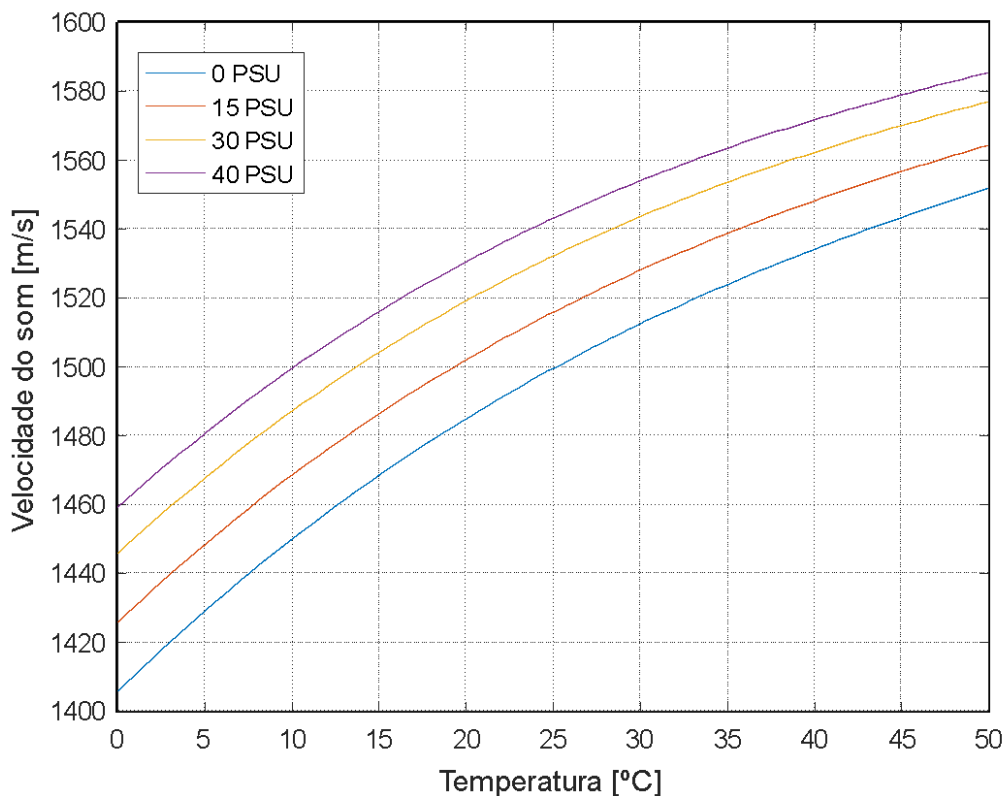


Fig. 1 – Perfil de velocidade do som na água para 200 m de profundidade.

Pela análise da Figura 1, percebe-se que a temperatura da água é o fator que mais influencia na velocidade de propagação do som, já que a salinidade (PSU) varia entre 33 e 37 PSU nos oceanos [3].

Outro ponto de destaque na predição acústica é como a velocidade do som se altera com a profundidade do mar. Estes perfis são obtidos por instrumentos especiais, como sonoboias batitermográficas. A Figura 2 exemplifica um perfil de velocidade sonora:

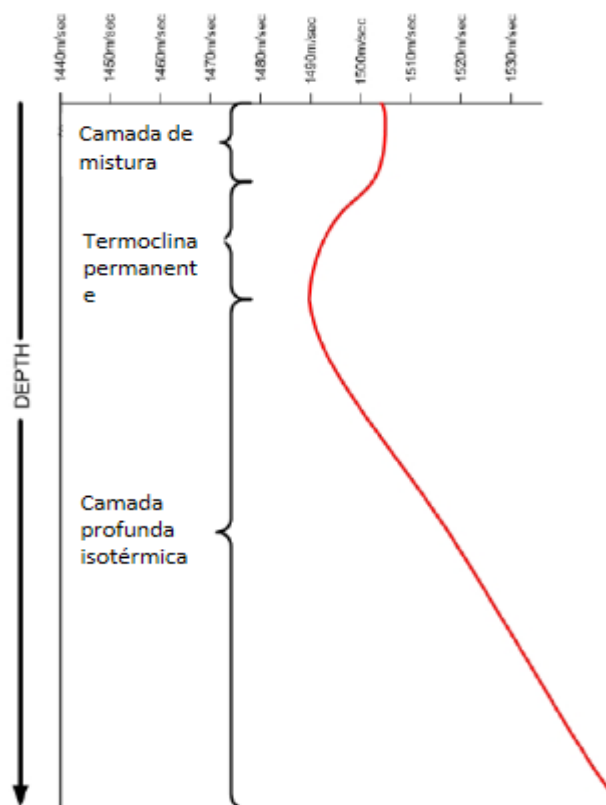


Fig. 2 – Perfil de velocidade sonora.

Percebe-se, pela análise da Figura 2, que o som altera suas velocidades de acordo com a profundidade dos oceanos. Isso se deve ao fato de a energia sonora ser refratada constantemente em sua propagação. Para estudar os caminhos de propagação sonora é conveniente a utilização do conceito de raio sonoro, que pode ser descrito como uma linha cuja direção é a da propagação e que se mantém constantemente perpendicular à frente de onda da energia sonora [4].

Se as condições do oceano fossem tais que a velocidade do som se apresentasse de forma constante, os raios sonoros se propagariam em linhas retas. Porém, a pressão e a densidade da água determinam a velocidade do som de um ponto a outro. A pressão depende da profundidade e a densidade da temperatura e da salinidade. Levando-se em conta que uma frente de onda sonora pode se propagar através de diversas profundidades e densidades, um raio sonoro raramente seguirá um caminho reto para qualquer distância considerada [1].

Assim, o perfil de velocidade sonora é obtido pela interpolação infinitesimal de pequenas porções de profundidade utilizando-se a Lei de Snell (2), traduzida pela Figura 3, em que  $n_1$  é o índice de refração da camada de oceano 1,  $n_2$  é o índice de

refração da camada de oceano 2,  $V_1$  é a velocidade de propagação do som no meio 1,  $V_2$  é a velocidade de propagação do som no meio 2,  $\theta_1$  é o ângulo de incidência do raio sonoro,  $\theta_2$  é o ângulo de refração do raio sonoro [3]:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

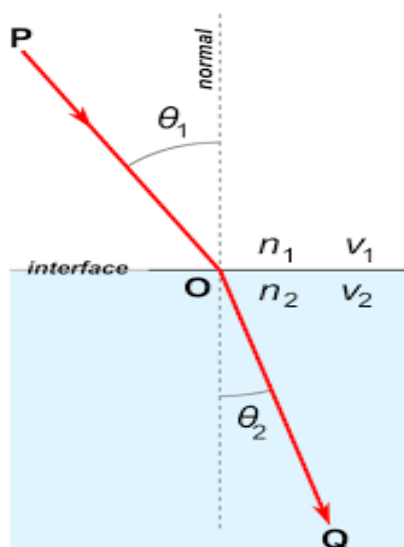


Fig. 3 – Lei de Snell.

## 2.2 Propagação do som em águas rasas

A maioria das dificuldades na modelagem em águas rasas está associada à extrema variabilidade do oceano. O tipo de fundo e o perfil de velocidade do som são inerentemente mais variáveis do que em águas profundas. Os sedimentos de fundo são diferentes em caráter do que aqueles em águas profundas [5]. Em geral, são camadas profundas de areia e lama que sustentam uma série de vida biológica, enquanto os sedimentos de águas profundas costumam ser lodosos sobre o leito rochoso. Os sedimentos de águas rasas têm uma grande variedade de distribuições de tamanho de rugosidade por causa das conchas, areia e lixo que cobrem o fundo [6]. Há mais vida marinha, muitas vezes tornando a força de espalhamento do volume na reverberação maior do que a contribuição da superfície ou do fundo. Há mais atividade de transporte, tornando o ruído ambiente mais alto e colocando mais picos transitórios no campo de ruído.

## 3 Modelo de propagação acústica em águas rasas

O presente estudo se baseia no modelo de propagação acústica *Bellhop* adaptado para o modelamento de propagação em águas rasas. O algoritmo *Bellhop* foi desenvolvido por Porter e Bucker, em 1987. Ele se mostrou um modelo apropriado para definir as perdas de transmissão de fontes acústicas maiores que 1 kHz [7].

O algoritmo adaptado pelo autor para a condição de mar brasileiro foi desenvolvido em MATLAB® e prevê a perda de transmissão sonora de uma fonte para um receptor. O programa calcula a amplitude de pressão em relação à profundidade do oceano e à distância entre fonte sonora e receptor. Baseando-se também no Método das Imagens, o algoritmo define os níveis de interferência de superfície e de fundo do oceano. A Figura 4 elucida graficamente o Método das Imagens:

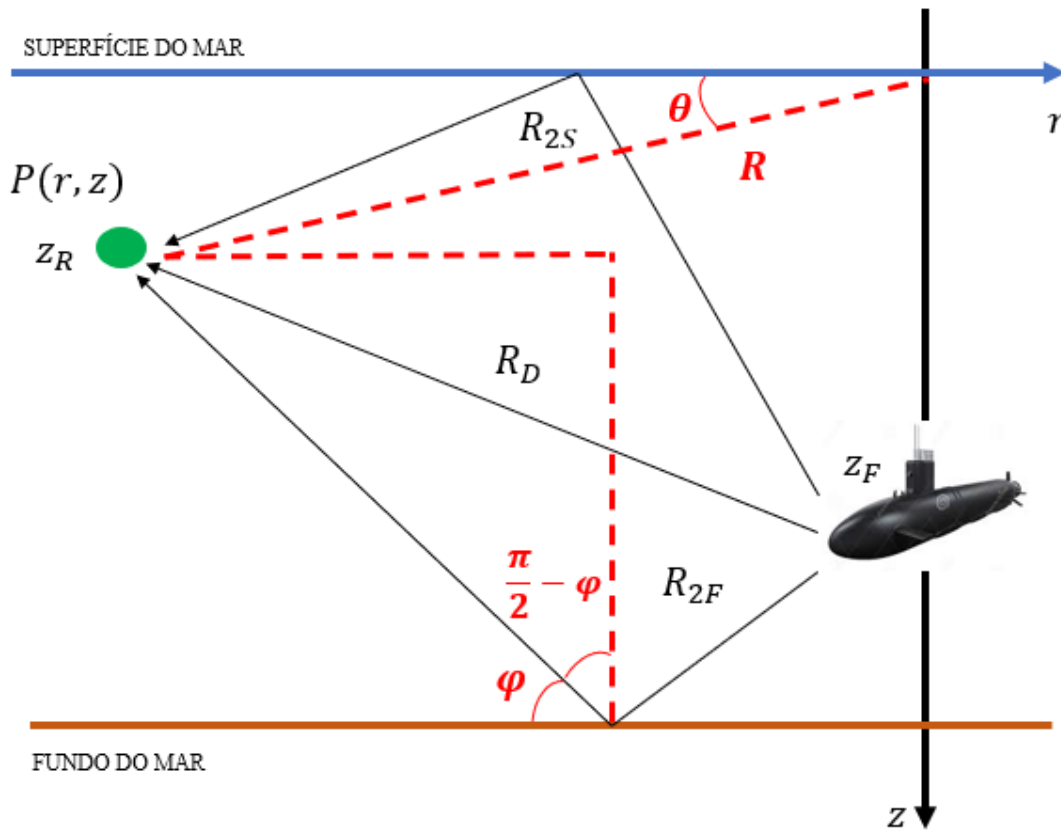


Fig. 4 – Método das imagens (*Lloyd's mirror geometry*) [8].

Em primeira instância, para calcular a pressão relativa a determinadas distância e profundidade, necessita-se descobrir a distância de propagação direta do raio sonoro  $R_D$  e a distância após a reflexão na superfície  $R_{2S}$  fornecidas por (3) e (4):

$$R_D = \sqrt{r^2 + (Z_F - Z_R)^2} \quad (3)$$

$$R_{2S} = \sqrt{r^2 + (Z_F + Z_R)^2} \quad (4)$$

Em que  $r$  é a distância horizontal entre fonte e receptor,  $Z_F$  é a profundidade da fonte e  $Z_R$  é a profundidade do receptor.

O coeficiente de atenuação  $\alpha$  é dado por (5) e é uma variável proporcional à frequência  $f$  da fonte sonora [8]:

$$\alpha = 3,3 \cdot 10^{-3} + \frac{0,11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4.100+f^2} + 0,3 \cdot 10^{-3} f^2 \quad (5)$$

A pressão  $P(r, z)$ , em que  $k$  é o número de onda da fonte sonora, é calculada por (6) [9]:

$$P(r, z) = \frac{\exp(jkR_D) \cdot \exp(-\alpha R_D)}{R_D} - \frac{\exp(jkR_{2s}) \cdot \exp(-\alpha R_{2s})}{R_{2s}} \quad (6)$$

Logo, a perda de transmissão  $TL_{(dB)}$  devido à interferência de superfície é fornecida por (7), em que  $P_{ref} = 1 \mu\text{Pa}$ :

$$TL_{(dB)} = -20 \log \log \left[ \frac{P(r,z)}{P_{ref}} \right] \quad (7)$$

Analogamente, para o cálculo da perda de transmissão por efeitos do fundo de solo oceânico são usadas as mesmas equações para a interferência de superfície. Diferem-se apenas pela substituição da variável  $R_{2s}$  por  $R_{2F}$  e pelo coeficiente de reflexão  $R_R$  que para a superfície foi admitido igual a -1 [8]. O coeficiente de reflexão para o fundo de solo oceânico é dado por (8):

$$R_R = \frac{\rho_2 \gamma_1 - \rho_1 \gamma_2}{\rho_2 \gamma_1 + \rho_1 \gamma_2} \quad (8)$$

Em que  $\rho_1$  é a densidade da água do mar à profundidade de 0 m e  $\rho_2$  é a densidade do solo oceânico. As variáveis  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  são dadas por (9) e (10):



$$\gamma_1 = \frac{\omega}{c_1} \cos \cos \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \quad (9)$$

$$\gamma_2 = \frac{\omega}{c_1} \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \sqrt{\frac{(c_1)^2}{(c_2)^2 \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) - 1}} \quad (10)$$

Em que  $c_1$  é a velocidade do som na superfície,  $c_2$  é a velocidade do som no fundo do oceano e  $\omega$  é a velocidade angular da fonte sonora. Logo,  $\varphi$  é dado por (11):

$$\varphi = \left( \frac{Z_F + Z_R}{r} \right) \quad (11)$$

#### 4 Estudo de caso: “Ataque de submarino nuclear inimigo à sede da Esquadra Brasileira”

Para demonstrar os efeitos da propagação do som em águas oceânicas rasas, foi elaborada uma situação hipotética:

Relato da Inteligência Operacional:

*“No dia 24 de fevereiro de 2021, após informações obtidas pelo Centro de Defesa Cibernética do Ministério da Defesa, foram coletadas comunicações provenientes da Força de Submarinos inimiga. O conteúdo de uma delas previa o aprestamento e o ataque de um submarino nuclear à sede da Esquadra Brasileira”.*

Imediatamente, o Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE) acionou o 1º/7º GAv com o *briefing* da missão. Uma aeronave P-3AM deveria decolar imediatamente e estabelecer uma barreira de sonoboias passivas nas coordenadas 23°00’S 043°07’W, correspondente à entrada da Baía de Guanabara. Sem tempo para lançar sonoboias batitermográficas para a coleta de informações ambientes, o Coordenador Tático (COTAT) decidiu utilizar os dados do software SISPRES 5.0. A Figura 5 traz o perfil de temperatura da água correspondente à coordenada:



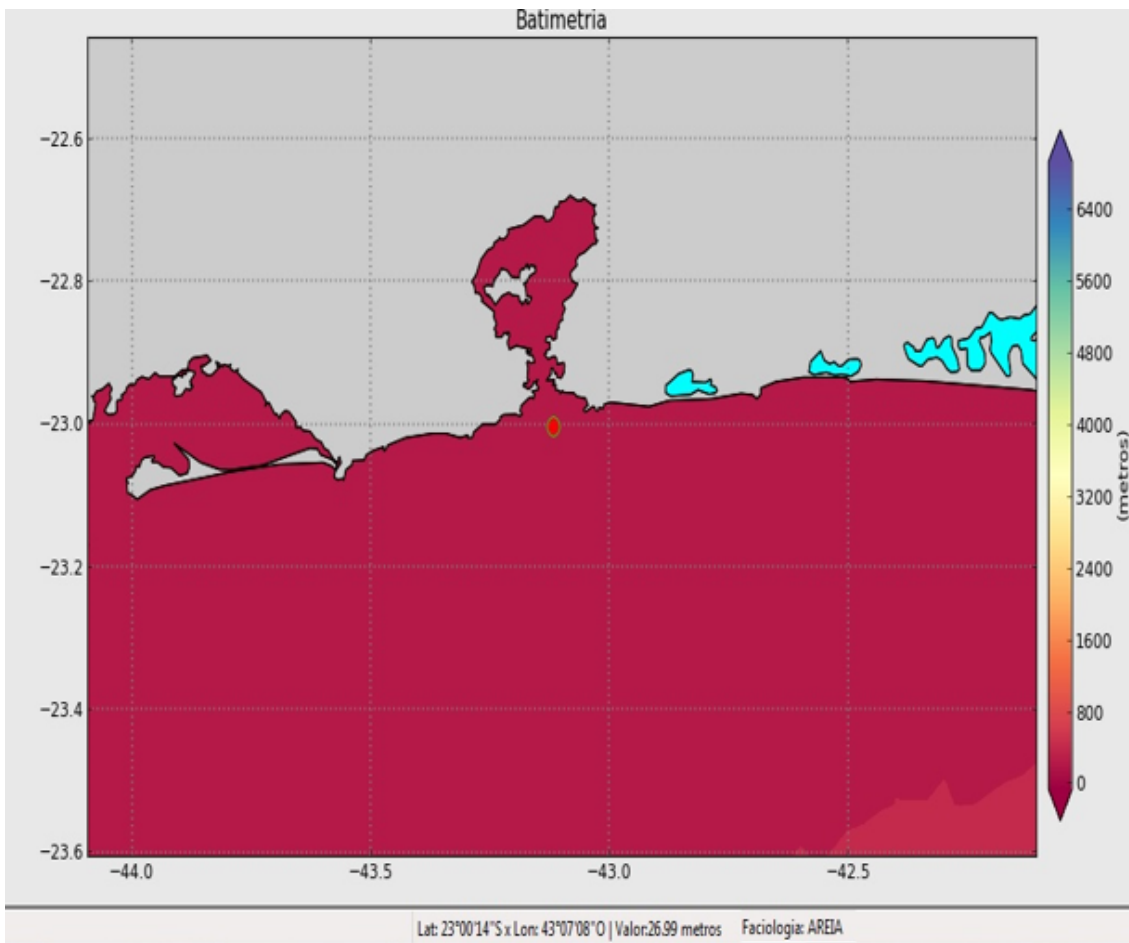


Fig. 6 – Informações de batimetria e fundo de solo da entrada da Baía de Guanabara.

A Figura 7 apresenta o perfil de velocidade do som para a profundidade da Baía de Guanabara:

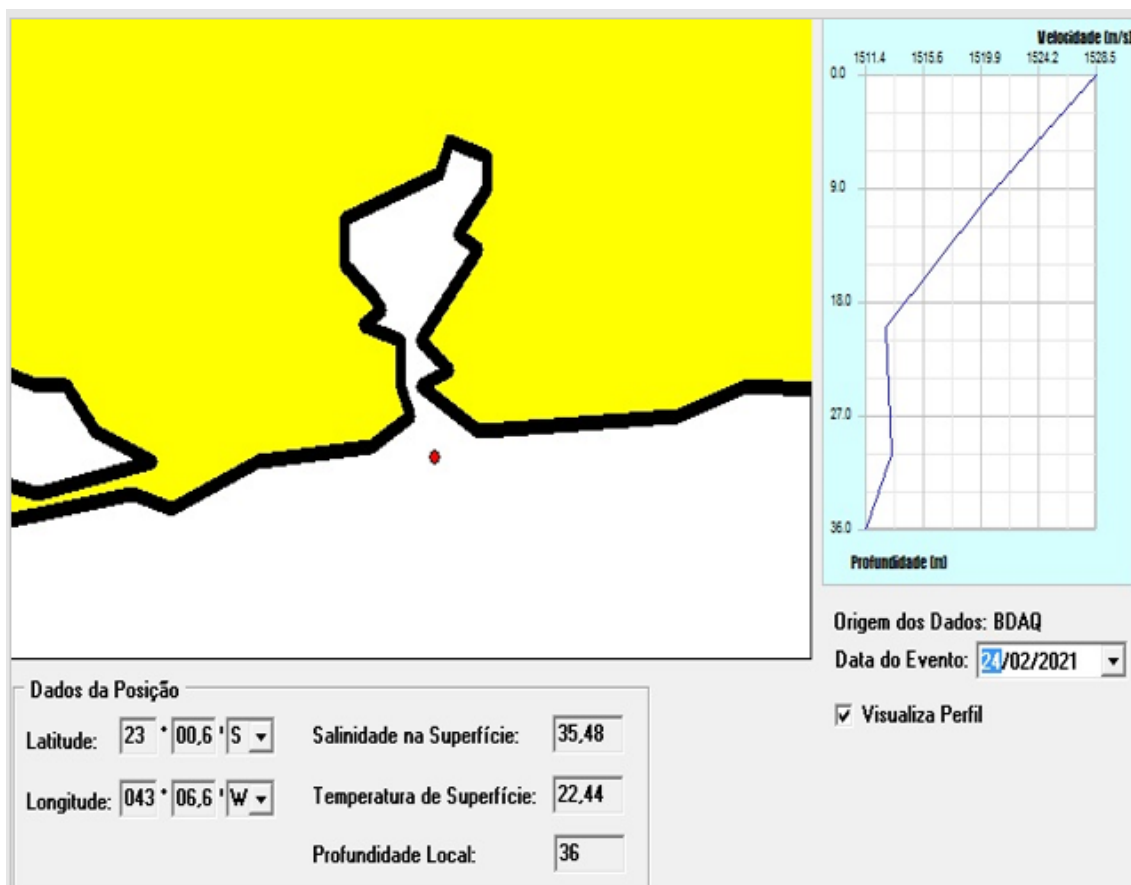


Fig. 7 - Perfil de velocidade e profundidade da Baía de Guanabara.

#### 4.1 Simulações

De posse de todas as informações necessárias para avaliar o comportamento da propagação sonora na entrada da Baía de Guanabara, o Quadro 1 define os *inputs* para a determinação tanto das perdas de transmissão por interferência de superfície quanto por interferência de solo oceânico:

Quadro 1 – Dados de entrada do algoritmo.

<b>Profundidade da linha de sonoboias (<math>Z_R</math>)</b>	10 m
<b>Profundidade do submarino (<math>Z_F</math>)</b>	20 m
<b>Profundidade da entrada da Baía de Guanabara – posição 23°00'S 043°07'W (<math>z</math>)</b>	36 m
<b>Frequência de fluxo do submarino (<math>f</math>)</b>	1,5 kHz
<b>Velocidade do som na superfície (<math>c_1</math>)</b>	1.528 m/s
<b>Velocidade do som no fundo do oceano (<math>c_2</math>)</b>	1.511 m/s

Densidade da água do mar na superfície ( $\rho_1$ )	1.024 kg/m <sup>3</sup> [7]
Densidade do fundo de solo da Baía de Guanabara – areia fina molhada ( $\rho_2$ )	1.800 kg/m <sup>3</sup> [6]

A Figura 8 traz a situação tática do ataque:

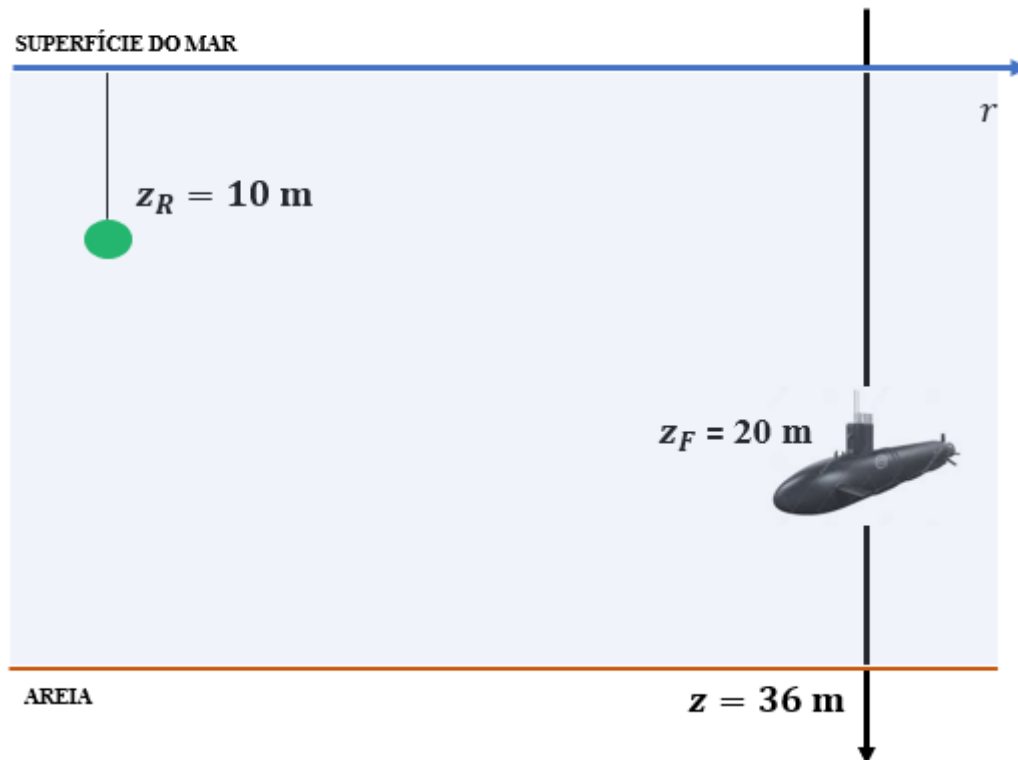


Fig. 8 – Situação tática do ataque submarino.

O algoritmo então produziu seus *outputs* (perdas de transmissão por interferência de superfície e perdas de transmissão por efeitos de solo oceânico). As Figuras 9 e 10 apresentam os dois tipos de perda:

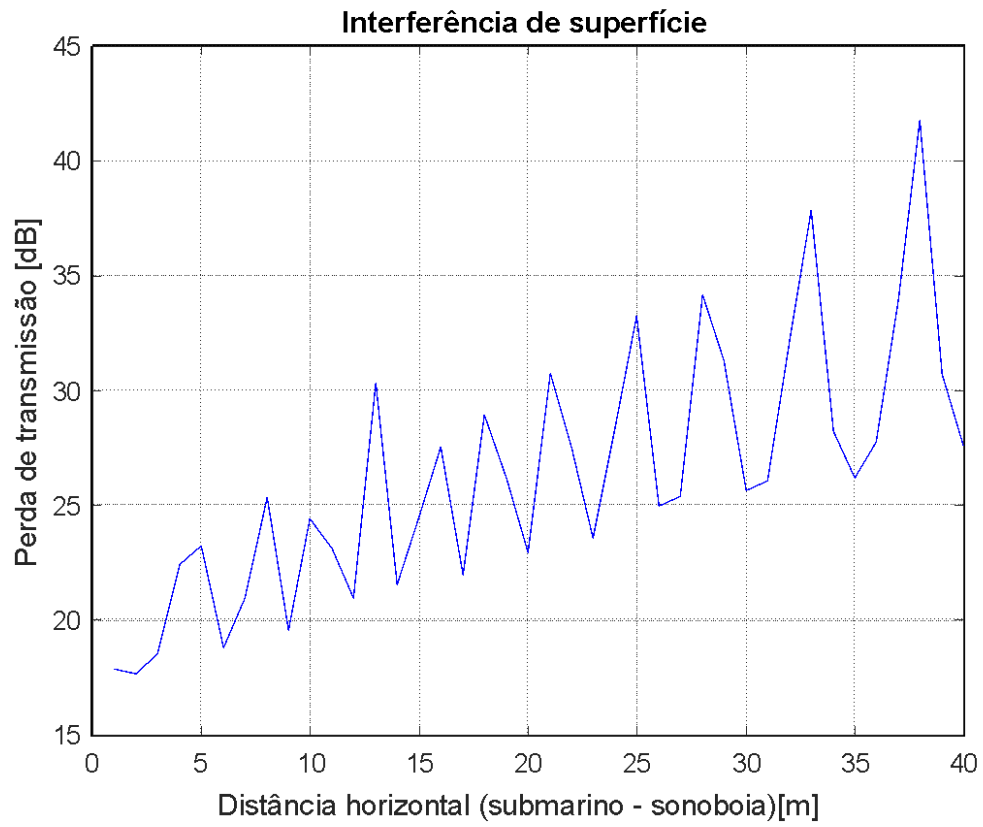


Fig. 9 – Perdas de transmissão por interferência de superfície.

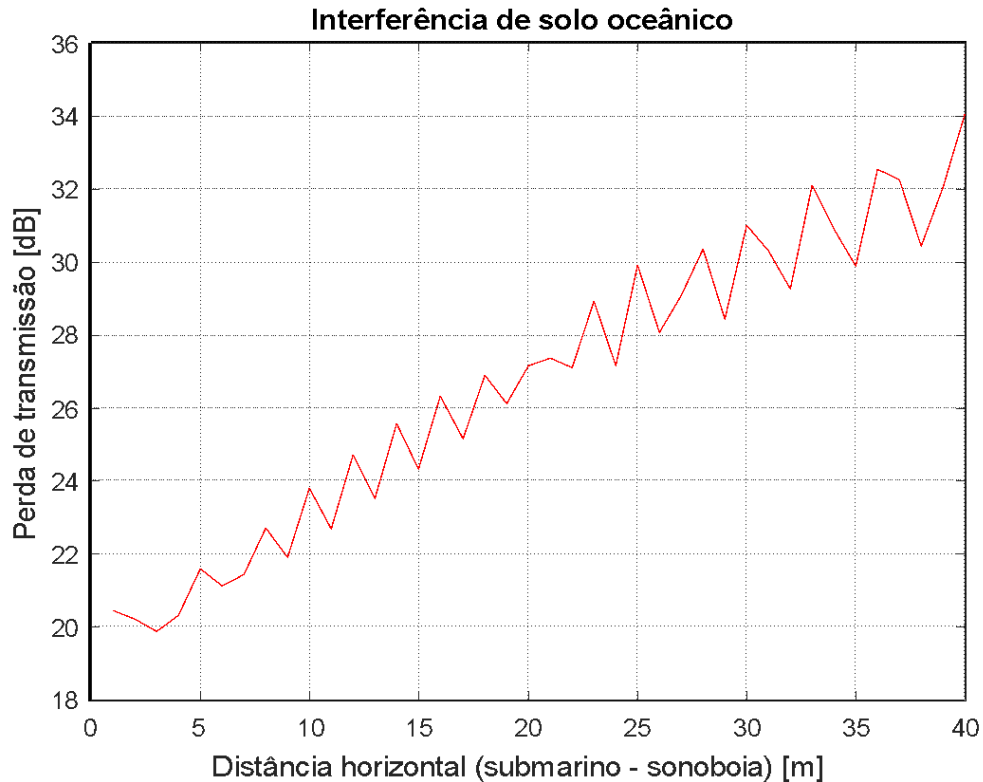


Fig. 10 – Perdas de transmissão por interferência de solo oceânico.

## 4.2 Análise das simulações sob os conceitos da Equação Sonar passivo

A Equação Sonar passivo é aquela que define as variáveis que influenciam a relação sinal-ruído disponível para a detecção do submarino [10]. Ela é definida por (12):

$$SNR_{(dB)} = SL - NL + DI - TL \quad (12)$$

Em que  $SNR_{(dB)}$  é a relação sinal-ruído disponível para detecção,  $SL$  é o nível sonoro da fonte (submarino),  $NL$  é o nível de ruído ambiente (vida marinha, navios mercantes, etc.),  $DI$  é a diretividade da sonoboia e  $TL$  são as perdas de transmissão (efeitos de superfície e solo oceânico).

As informações sobre o nível de ruído ( $SL$ ) dos submarinos nucleares é praticamente inexistente em fontes abertas por se tratar de informação ultrassecreta. No entanto, estima-se que eles sejam 10 dB mais ruidosos que submarinos de propulsão diesel-elétrica sob os mesmos regimes de navegação. Assim, a Figura 11 traz informações acerca do nível de ruído de submarinos diesel-elétricos em relação a determinados regimes de velocidade [11]. Supõe-se, para efeitos do presente estudo, que o submarino nuclear navega a 10 kt, portanto, seu nível de ruído pode ser estimado em

$105 + 10 = 115$  dB para a frequência de fluxo (frequência gerada naturalmente pelo movimento do submarino na água) de 1,5 kHz:

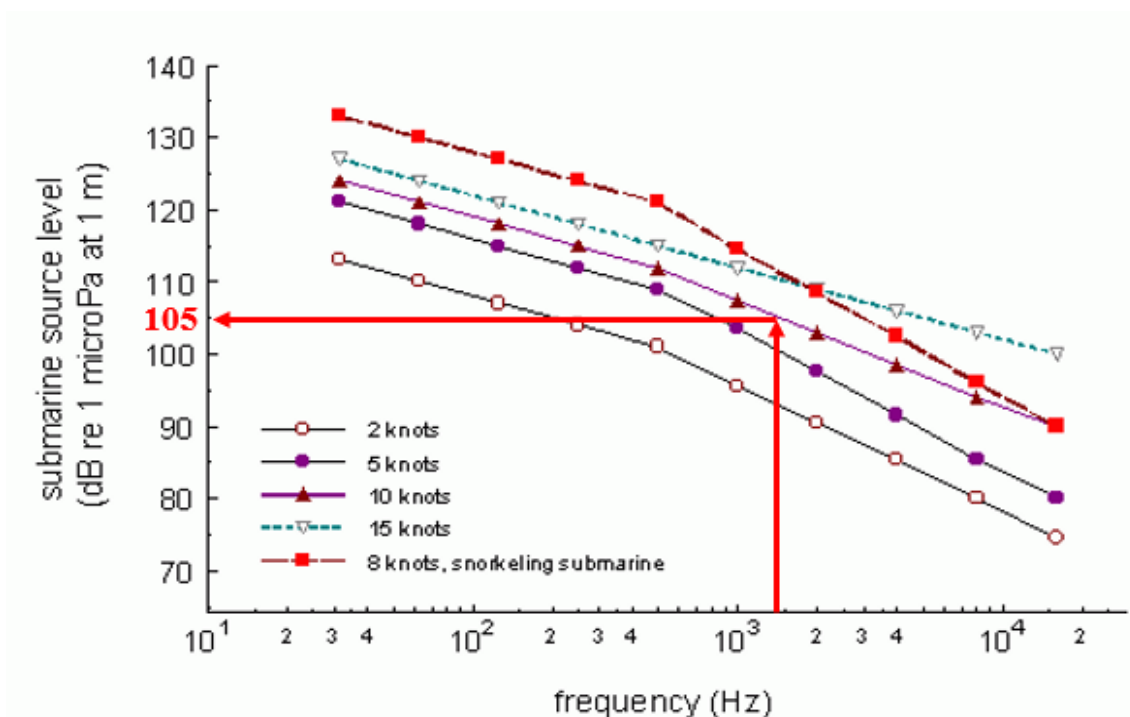


Fig. 11 – Níveis de ruído de submarinos diesel-elétricos sob diferentes regimes de velocidade [11].

Considera-se ainda que a sonoboa passiva é omnidirecional, ou seja, tem diretividade  $DI = 0$  dB e que o ruído ambiente é da ordem de 67 dB [12]. Sabe-se ainda que uma  $SNR_{(dB)} = 0$  representa uma probabilidade de detecção do submarino de 50%, valor usualmente usado como limiar de detecção (*threshold level*), ou seja, valores maiores ou iguais a 0 dB são interpretados como “submarino detectado” [1]:

$$SNR_{(dB)} = SL - NL + DI - TL:$$

$$0 = 115 - 67 + 0 - TL:$$

$$TL = 48 \text{ dB}$$

Assim, para prover a detecção do submarino, as perdas de transmissão do sinal não podem ser maiores que 48 dB. Pela análise das Figuras 12 e 13, infere-se que o submarino somente seria detectado aproximadamente a **10 m** da linha de sonoboias (**24,42 dB** de interferência de superfície + **23,81 dB** de interferência de solo oceânico = **48,23 dB** de interferência total).





Fig. 12 – Perda de transmissão por interferência de superfície a 10 m da linha de sonoboias.

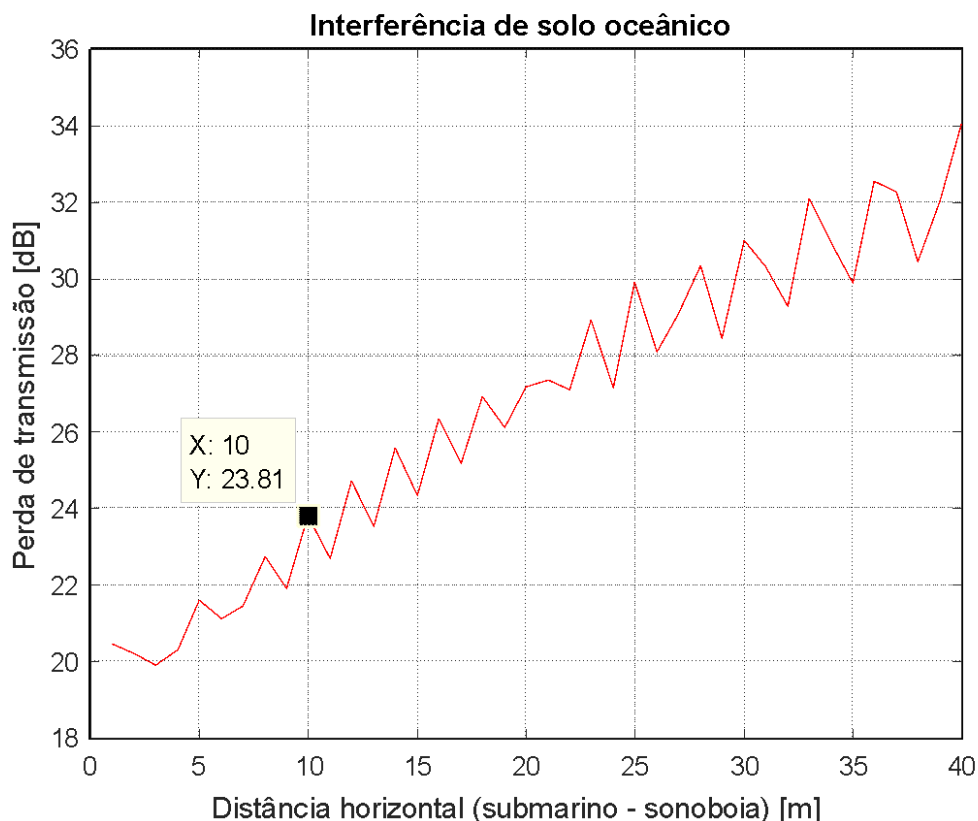


Fig. 13 - Perda de transmissão por interferência de solo oceânico a 10 m da linha de sonoboias.

## 5 Conclusão

Após a análise das simulações sob os conceitos da Equação Sonar passivo, fica evidente que a detecção de submarinos em águas rasas é um grande problema operacional e que devem ser investigadas soluções para tal óbice. Uma detecção a 10 m distância é irrisória, tendo em vista que a embarcação inimiga muito provavelmente já teria engajado seu armamento contra os alvos de interesse, antes mesmo de denunciar sua posição. Apesar de haver discussões acerca da necessidade de calados na ordem de 50 m para um submarino empregar seus torpedos, uma possibilidade de aproximação a 10 m sem detecção é indubitavelmente alarmante. No entanto, existem algumas alternativas que podem reduzir a vantagem do submarino em águas rasas:

- 1) O desenvolvimento de sonoboias específicas para águas rasas e condições ambientes brasileiras. O presente estudo provou que diversos fatores influenciam o comportamento da propagação sonora e que cada porção de oceano possui sua especificidade. Há de se investir em um

programa de nacionalização de sonoboias em detrimento da aquisição de equipamentos estrangeiros, concebidos para diferentes condições de oceano;

- 2) O desenvolvimento de dispositivos piezoelétricos (que transformam energia de compressão e rarefação em energia elétrica) mais sensíveis. Sabe-se que uma frente de onda sonora de 1  $\mu\text{Pa}$  corresponde a uma intensidade de  $0,67 \cdot 10^{-18} \text{ W/m}^2$  em materiais que convertem as energias nas sonoboias [2]. Faz-se mister que sejam desenvolvidos dispositivos capazes de processar frentes de onda sonoras de valores menores, ou seja, que processem sinais menos intensos capazes de gerar detecção;
- 3) O desenvolvimento de sonoboias ativas que emitam pulsos de baixa potência e de elevada largura de banda (baixa probabilidade de interceptação e alta resolução na discriminação de alvos). Existem pesquisas acerca de comunicações ópticas no ambiente submarino, no entanto, o meio aquático ainda é bastante hostil para frequências mais elevadas (THz) devido às inerentes perdas de propagação. Apesar de sonoboias ativas sofrerem com mais perdas de propagação que as passivas, elas apresentam mais alternativas, como o ajuste da frequência de emissão para determinado tipo de alvo.

Alfim, o presente trabalho cria uma maior consciência situacional acerca das condições atuais da Aviação de Patrulha no cumprimento de missões antissubmarino em águas jurisdicionais brasileiras bem como apresenta alternativas de aprimoramento não somente doutrinárias, mas também de pesquisa e desenvolvimento.



## Referências

- [1] CUNHA, A. L. T. **Predição do alcance sonar – Um estudo comparativo entre o Subsistema de Processamento Acústico de Sonoboias (SPAS-32) e o Sistema de Previsão do Ambiente Acústico para Planejamento de Operações Navais (SISPRES 5.0)**. 2015. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (*Lato Sensu*) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [2] MEDWIN, H; CLAY, C.S. **Fundamentals os Acoustical Oceanography**. 1. ed. London: Academy Press, 1998. 712 p
- [3] MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002. 414 p.
- [4] WAITE, A. D. **Sonar for Practising Engineers**. 3. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2002. 324 p
- [5] MCCAMMON, D. F. **Active Sonar Modelling with emphasis on sonar stimulators**. DRDC Atlantic. CR 2004-130. Defence R&D Canada– Atlantique. 2004
- [6] MACEDO, H.; FIGUEIREDO, J; MACHADO, J. Propriedades acústicas (velocidade de propagação e coeficiente de atenuação) de sedimentos marinhos coletados nas proximidades da Ilha do Cabo Frio, RJ. **Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 195-204, jun. 2009.
- [7] TORRES, J. C. **Modeling of High-Frequency Acoustic Propagation in Shallow Water**, M.S. thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 2007.
- [8] JENSEN, F. B.; KUPERMAN, W.A.; PORTER, M.B.; SCHMIDT, H. **Computational Ocean Acoustics**. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 2000.
- [9] BREKHOVSKIKH, L.; LYSANOV, H. **Fundamentals of Ocean Acoustics**. Berlin: Springer-Verlag, 1982.
- [10] KINSLER, L. E.; FREY, A.R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics: Fourth Edition**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [11] VORONIN, G. P. The silence of our submarines annoys not only diletantes. *Krasnaya Zvezda*, Moscow, p.5, jan. 1994.
- [12] NOWACEK, D. et al. Marine seismic surveys and ocean noise: time for coordinated and prudent planning. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13: 378–386, 2015.