

A Importância dos Parâmetros Ambientais na Propagação Acústica

CF Antonio Hugo Saroldi Chaves: Grupo de Geologia e Geofísica Marinhas - IEAPM.

Prof. Dr. Luiz Gallisa Guimarães: Lab. de Instrumentação Oceanográfica - COPPE/UFRJ.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Parente: Lab. de Instrumentação Oceanográfica - COPPE/UFRJ.

Msc. Izabel Christina Martins Nogueira: Lab. Instrumentação Oceanográfica - COPPE/UFRJ.

CF Sandro Vianna Paixão: Grupo de Oceanografia Física - IEAPM.

CF Benevides Colella Xavier: Divisão de Processamento de Sinais - IEAPM.

Acústica submarina é o estudo da propagação do som na água e as interações dessa onda mecânica com o fundo e suas fronteiras [1]. A abrangência de seu estudo estende-se à pesquisa em diversas áreas tais como sonares, transdutores, processamento de sinais, oceanografia, bioacústica e física acústica [2].

A onda sonora é um importante instrumento de sondagem no mar, pois esta se propaga a longas distâncias na água, ao passo que outras ondas, como a eletromagnética (em frequências que variam na faixa de micro-ondas ao laser) são rapidamente dissipadas pelo fato de água do mar ser boa condutora elétrica [3]. Por outro lado, as frequências associadas às ondas acústicas estão entre 10 Hz e 1 MHz [4], isto permite utilizar o som no oceano para diversas aplicações. Para entender a propagação do som na água, é necessário saber que existe uma onda mecânica que transporta energia através de um meio elástico, e é definida através de uma quantidade de repetições, a frequência, que identifica o sinal de uma onda.

A primeira medida de velocidade do som na água foi registrada em 1827 no Lago de Geneva por Daniel Colladon e Charles Sturm [5]. No entanto, a ideia de ouvir navios antes de sua che-

gada, por exemplo, muito utilizada na 1ª Guerra Mundial, foi estabelecida alguns séculos antes por Leonardo da Vinci [5].

A 1ª Guerra Mundial trouxe à tona a necessidade de se conhecer meios mais eficazes para detecção de alvos de superfície e submarinos. Registra-se desta época o desenvolvimento dos primeiros arranjos rebocados, de modo a afastar o conjunto de sensores das fontes de ruído próprio, além dos sistemas ativos de escuta [6].

Durante a 2ª Guerra Mundial, diversos estudos foram realizados no campo da acústica submarina, de forma que muitos dos conceitos atuais são originados desse período. O sonar (*Sound navigation and ranging*), por exemplo, que é uma técnica usada para navegar, detectar e comunicar, foi desenvolvido durante a 2ª Guerra [6]. Desde aquela época, o sonar vem sendo aplicado para aprimorar o conhecimento do oceano e para aplicações militares.

Um sonar digital usa a teoria e técnicas de processamento de sinais digitais para entender as informações recebidas. Um sonar digital moderno não depende somente da teoria do processamento de sinais em acústica submarina, mas também do conhecimento do ambiente submarino, incluindo o ruído ambiental, o canal acús-

tico, as características e propriedades do fundo marinho e da superfície [3].

A acústica submarina em águas rasas é uma área de estudo muito importante, uma vez que a sondagem e monitoramento das plataformas continentais e taludes possuem grande importância econômica, social e militar [6]. Uma das principais características da propagação do som em águas rasas é a possibilidade de propagação a longas distâncias por multi-reflexões através de interações com o fundo e a superfície. Esses ambientes ditos águas rasas são encontrados nas plataformas continentais com profundidades menores de 200 metros [7].

Diferentemente da acústica aérea a baixas altitudes, onde efeitos dispersivos na propagação não são significativos, na acústica submarina em águas rasas, a dispersão da energia sonora tem um papel fundamental ao longo de sua propagação [6], principalmente a longas distâncias. Isto foi observado ainda durante a 2ª Guerra Mundial, quando cientistas perceberam que sinais de banda larga, como os de explosões, tinham uma curva de dispersão em frequência, mais especificamente, as frequências mais baixas chegavam primeiro, seguida das altas e médias frequências, e não se podia modelar esses sinais de banda larga usando-se apenas teorias assintóticas como a teoria de raios. Terminada a guerra, relatórios mostravam claramente as curvas de dispersão e o uso da teoria dos modos normais para explicar as curvas.

Em dias atuais, a acústica submarina tornou-se a ferramenta fundamental em várias áreas de pesquisa militar tanto quanto civil [8] [9], a saber:

- Detecção tanto ativa quanto passiva (Figura 1) de navios, submarinos, minas e outros alvos;
- Sondagem e perfilagem sísmica e imageamento de alta resolução;
- Tomografia Acústica do ambiente marinho

e estimativas de condições meteo-oceano-gráficas; e

- Transmissão a longas distâncias através do oceano em baixas frequências para monitoramento de mudanças climáticas globais ao longo do tempo.

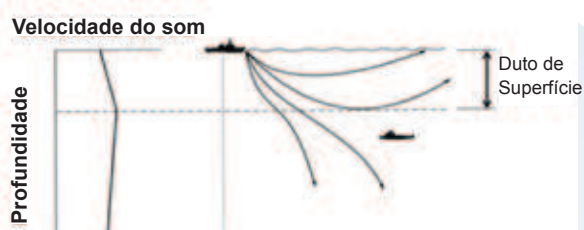


Figura 1: Exemplo de propagação sonora em duto de superfície.

No que diz respeito à detecção ativa e passiva, a identificação de objetos no interior da massa líquida que constitui os oceanos é uma tarefa complexa. O problema se amplia conforme a distância ao objeto aumenta em relação ao ponto a partir do qual se deseja fazer a identificação. Como comentado antes, a utilização da faixa de frequência que abrange os espectros visível e eletromagnético é proibitiva em virtude da intensa absorção. Em uma primeira análise, uma opção viável passa a ser a utilização de frequências menores, na faixa que compreende o espectro acústico.

Outros métodos tradicionais costumam se basear em teorias assintóticas como por exemplo a de raios, na qual a frente de onda é sempre assumida como ortogonal à direção de propagação da energia acústica. Esta teoria funciona muito bem para comprimentos de onda muito menores que a profundidade do local [8] onde ocorre a propagação, como no caso de águas profundas, porém no caso de águas rasas a sua aplicabilidade é bastante restringida.

Por outro lado, em águas rasas a onda acústica passa a se refletir consecutivamente no fundo e na superfície, que neste caso de propagação por

multi-reflexões, limitam as fronteiras espaciais do que denomina-se na literatura um guia de ondas [4]. Nesta situação, a teoria que mais se adequa para o estudo da propagação sonora é a teoria dos modos normais, que apresenta como solução para uma equação de onda no domínio da frequência denominada de Equação de *Helmholtz*. Entretanto, a complexidade do ambiente acústico associado à uniformidades do perfil de velocidade do som, rugosidade da superfície e do fundo, a estratificação do fundo, a existência de ondas internas, meandros e vórtices, influenciam na solução da equação da onda.

Portanto, muitos fatores ambientais podem influenciar na propagação do som, tais como geológicos (tipo de sedimento, velocidade de ondas compressivas e cisalhantes, densidade, porosidade, distribuição horizontal) e, meteo-oceanográficos (vento, ondas, correntes, temperatura, salinidade, distribuição horizontal de temperatura).

A Base de Dados Qualificada (BDAQ) do SISPRES possui informações de parâmetros ambientais, esses parâmetros podem ser usados para calcular o campo sonoro a longas distâncias. Para visualização desses parâmetros ambientais, o SISPRES possui um módulo denominado Sistema Tático Ambiental (STA). (Figura 2)

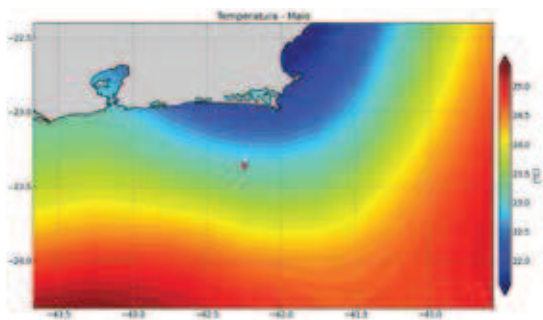


Figura 2: Temperatura da superfície do mar.

Um exemplo de parâmetro da BDAQ que pode ser utilizado é o perfil de velocidade do som (Figura 3), que para a propagação acústica tem o mesmo papel que o índice de refração em ótica [4].

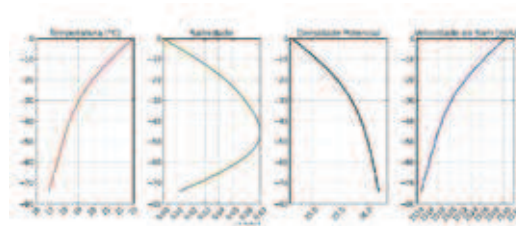


Figura 3: Temperatura, salinidade, densidade potencial e perfil de temperatura.

A velocidade do som está relacionada com a densidade e a compressibilidade. No oceano, a densidade está relacionada à pressão estática, salinidade e temperatura.

A velocidade do som no oceano, portanto, é uma função crescente da temperatura, salinidade e pressão. Normalmente a velocidade do som c é expressa como uma função empírica de 3 variáveis independentes:

1. Temperatura (T), em graus centígrados;
2. Salinidade (S), medida em partes por mil; e
3. Profundidade (z), medida em metros.

Uma expressão simplificada [1] dessa dependência pode ser descrita por:

$$c(T, S, z) = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z \quad (1)$$



Figura 4: Perfil da velocidade do som em águas profundas (Munk). Adaptado de JENSEN *et al.* [4]

Na maioria dos casos, a Equação (1) tem uma acurácia suficiente, porém em alguns casos onde são necessários resultados mais acurados diferentes fórmulas podem ser usadas [10] [11].

Os perfis de velocidade do som podem apresentar variações em sua estrutura, tanto vertical como horizontal, dependendo da região (região polar, águas profunda, águas rasas), como exemplificado na Figura 4. Essas variações da velocidade nos perfis influem na propagação do som que podem gerar incertezas nas previsões de alcance a longas distâncias. A Figura 1 é uma representação da propagação sonora causada por um duto de superfície.

Para mostrar a importância dos perfis de velocidade do som em águas rasas foram utilizados perfis de velocidade do som extraídos da BDAQ que foram coletados na região de plataforma no litoral do Estado do Rio de Janeiro. Na Figura 5 são apresentados os perfis de velocidade do som nessa região, separados por estação do ano. Vê-se um padrão bem definido para os meses de verão (JAN, FEV, MAR) e inverno (JUL, AGO, SET) e perfis de transição para o outono (ABR, MAI, JUN) e primavera (OUT, NOV e DEZ).

Este comportamento fica mais evidente separando os perfis por mês de ocorrência, como mostrado na Figura 6. Evidencia-se claramente dois padrões predominantes, um associado aos perfis de JUL, AGO, SET, OUT e NOV denominados como inverno; outro associado aos perfis de DEZ, JAN, FEV, MAR, ABR e MAI denominados verão.

No caso específico da região de interesse, essas variações nos perfis de velocidade, com dois padrões típicos, estão associadas às mudanças no regime de vento ao longo do ano e, por conseguinte, à variação das condições termohalinas.

Em resumo, pode-se dizer que as condições meteorológicas, da região estudada, são caracterizadas pela presença do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que, principalmente nos meses de verão, ocasiona o predomínio de ventos dos quadrantes Norte e Nordeste. Com a chegada do inverno, o ASAS começa a perder força e

acarreta um aumento do número de frentes frias que atinge o litoral sudeste. Com isso, o padrão de vento começa a mudar de Nordeste para Sudeste. Por consequência, mudam as características termohalinas da coluna d'água na região, o que influi diretamente nos perfis de velocidade, como pode ser visto na Figura 6.

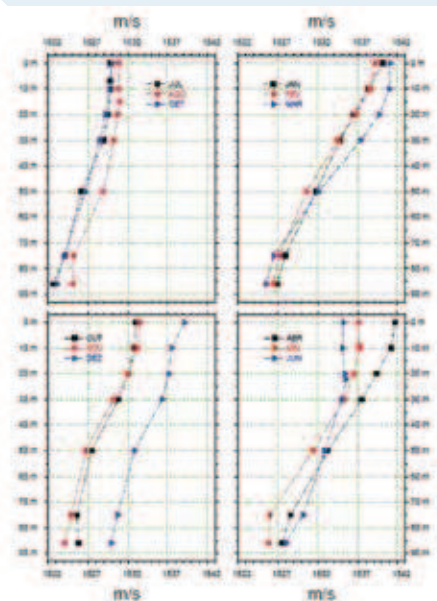


Figura 5: Perfis de velocidade do som nas diferentes estações do ano. Retirado de CHAVES [12]

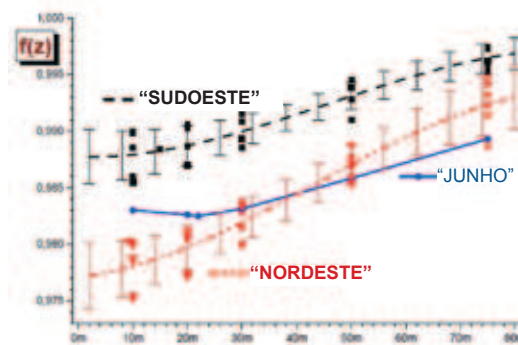


Figura 6: Perfis de velocidade do som relacionados ao regime de ventos.

Isto posto, vê-se como o perfil de velocidade do som em regiões costeiras pode ter comportamentos diferentes, que variam de acordo com a época do ano e que também irão variar de região para região.



Portanto, as condições de propagação acústica são fortemente influenciadas pelas condições descritas acima, mudando de acordo com as características do ambiente. Dado isso, vê-se a im-

portância de se caracterizar detalhadamente as condições meteo-oceanográficas nos ambientes de interesse para o estudo da propagação sonora.

Referências Bibliográficas

- 1 H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of acoustical oceanography* (Academic Press) (1997).
- 2 R. J. Urick, *Principles of underwater sound, volume 3* (McGraw-Hill New York) (1983).
- 3 Q. Li, *Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications* (Springer) (2012).
- 4 F. Jensen, W. Kuperman, M. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics, Modern Acoustics and Signal Processing* (Springer) (2011).
- 5 R. T. Beyer, *Sounds of our times: two hundred years of acoustics* (Springer Science & Business Media) (1999).
- 6 B. G. Katsnelson, V. G. Petnikov, and J. F. Lynch, "Shallow water acoustics", *The Journal of the Acoustical Society of America* 112, 2502 (2002).
- 7 P. Etter, "Underwater acoustic modeling and simulation. 2003".
- 8 M. J. Buckingham, *Ocean-acoustic propagation models (EUR-OP)* (1992).
- 9 M. G. Brown and I. A. Udovydchenkov, "Underwater communication using weakly dispersive modal pulses", *Acoustical Physics* 59, 533-538 (2013).
- 10 B. D. Dushaw, P. F. Worcester, B. D. Cornuelle, and B. M. Howe, "On equations for the speed of sound in seawater", *The Journal of the Acoustical Society of America* 93, 255-275 (1993).
- 11 P. F. Worcester, B. D. Cornuelle, J. A. Hildebrand, W. S. Hodgkiss Jr, T. F. Duda, J. Boyd, B. M. Howe, J. A. Mercer, and R. C. Spindel, "A comparison of measured and predicted broadband acoustic arrival patterns in travel time-depth coordinates at 1000-km range", *The Journal of the Acoustical Society of America* 95, 3118-3128 (1994).
- 12 A. H. S. Chaves, "Um estudo sobre o padrão de interferência sonora em águas rasas e sua aplicação no aprimoramento da estimativa de distância e velocidade por método passivo", Ph.D. thesis, COPPE - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (2015).

