



SIMULAÇÃO ACÚSTICA SUBAQUÁTICA

Underwater Acoustic Simulation

Emerson de Sousa Costa (1)

(1) Dr. Prof. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis-MG, Brasil.

Email para Correspondência: emerson@cefetmg.br; (P) Apresentador

Resumo: O estudo de parâmetros hidrológicos em rios, canais e outros cursos de água tem sido objeto de estudo, dada a importância econômica destes elementos geográficos que ocorrem naturalmente ou em função de intervenção humana. Entretanto, a utilização de parâmetros acústicos para o estudo de fenômenos físicos em meio aquático é muito recente e necessita ainda de esforço considerável em pesquisa. Além disso, a maioria das pesquisas têm sido direcionadas principalmente para aplicações oceânicas, e em particular, para a indústria do petróleo ou aplicações militares. Para que se possa obter bons resultados no estudo dos parâmetros hidrológicos, é necessário o estudo de métodos de propagação subaquáticos, a partir de simulações numéricas. Este trabalho apresenta um estudo dos principais métodos de propagação acústica subaquática, bem como a simulação computacional dos mesmos, a fim de se obter uma comparação para a escolha de um método adequado para que se tenham bons resultados no estudo de parâmetros hidrológicos.

Palavras chaves: simulação; acústica; subaquática.

Abstract: The study of hydrological parameters in rivers, canals and other watercourses has been object of study, given the economic importance of these geographic elements that occur naturally or in function of human intervention. However, the use of acoustic parameters for the study of physical phenomena in aquatic environments is very recent and still requires considerable research effort. In addition, most of the research has been directed primarily to ocean applications, and to the oil industry or military applications. To obtain good results in the study of hydrological parameters, it is necessary to study underwater propagation methods from numerical simulations. This work presents a study of the main methods of underwater acoustic propagation, as well as the computational simulation of them, to obtain a comparison to choose a suitable method to have good results in the study of hydrological parameters.

Keywords: simulation; acoustic; underwater.



1 INTRODUÇÃO

A acústica subaquática oceânica é a ciência do som no mar e abrange não somente o estudo da propagação do som, mas também o seu mascaramento pelos fenômenos acústicos de interferência (MAIA, 2010). Muitos dos conceitos aplicados para o ambiente marítimo podem ser aplicados também para o ambiente de rios.

Uma das propriedades mais importantes dos oceanos, como meio de propagação de ondas sonoras, reside na sua alta sensibilidade à propagação de sinais acústicos com frequências na faixa de 1 Hz a 20 kHz que, diferentemente dos tipos de radiação eletromagnética, permitem reunir uma quantidade significativa de informação sobre o meio marinho (RODRÍGUEZ, 1995). Outra razão para o interesse prático na propagação acústica no oceano é a distância que o som pode se propagar, chegando a várias centenas de quilômetros.

Algumas propriedades do fundo do mar, tais como as velocidades e as atenuações das ondas compressoriais, densidades, entre outras, contribuem para a propagação em águas rasas de forma significativa, instigando o interesse em realizar a estimativa quantitativa de seus valores.

Os modelos acústicos subaquáticos têm como objetivo fundamental simular, numa grande variedade de casos, a propagação da onda acústica, possibilitando assim a predição das características mais importantes deste fenômeno. Esses modelos possuem, no entanto, uma série de limitações que podem estar relacionadas à descrição do meio em questão (variação da profundidade, caracterização dos meios em duas ou três dimensões, etc.) ou à descrição da dispersão, a qual pode ser originada por diversas razões (irregularidades na superfície, presença de substâncias de origem natural ou artificial, etc.).

2 PROPAGAÇÃO ACÚSTICA SUBAQUÁTICA: UM BREVE HISTÓRICO

Um ambiente é considerado de águas rasas quando existem numerosos encontros dos raios acústicos com a superfície e o fundo. Esse ambiente é fortemente dependente



da frequência, pois uma parte da energia acústica permanece efetivamente presa no “duto” de águas rasas.

Após a 2ª Guerra Mundial, várias pesquisas na área de acústica em águas rasas foram e continuam sendo desenvolvidas até os dias atuais. As pesquisas iniciais foram bastante motivadas por recursos oriundos da área militar, principalmente da área de defesa naval (KATSNELSON, 2012). Mas o desenvolvimento de equipamentos de defesa, maior aplicação para acústica em águas rasas, não é a única, questões relacionadas a ciências básicas de pesquisa em biologia (mamíferos marinhos e peixes), geologia (propriedades do leito e mapeamento), e oceanografia física (temperatura e outras medições) também são realizadas a partir de usos de técnicas de acústica em águas rasas. Além disso, aplicações comerciais e industriais (navegações e explorações petrolíferas) também utilizam os conceitos de propagação sonora subaquática em águas rasas.

O início dos estudos da área de acústica em águas rasas, como uma subárea da acústica oceânica, ocorreu em 1948, de acordo com diversos pesquisadores, com a publicação do artigo de Pekeris sobre um modelo matemático para propagação sonora em águas rasas: o método dos Modos Normais. Porém essa informação pode não ser muito correta, uma vez que o artigo de Pekeris é na verdade, a junção de vários trabalhos previamente classificados que foram realizados durante a segunda guerra mundial.

O surgimento real da acústica em águas rasas ocorreu no início da segunda guerra mundial, quando engenheiros de sonares descobriram que bandas de sinais em águas rasas, tais como as provenientes de explosões, tinham uma estranha curva de dispersão de frequências (as baixas frequências chegavam primeiro, seguidas pelas altas e médias frequências) e que eles não poderiam desenvolver um modelo “bem comportado” para essa dispersão de bandas de sinais, fazendo-se uso da teoria de raios.

Além do modelo apresentado por Pekeris, havia apenas uma pequena quantidade de trabalhos que apresentavam unicamente estudos para a área de acústica de águas rasas, no período logo após a segunda guerra mundial até 1970 (KATSNELSON, 2012). As técnicas de medição e as tecnologias utilizadas foram basicamente as mesmas usadas em estudos para águas profundas, alterando-se apenas os conceitos usados, para diferentes profundidades.



Até meados de 1970, praticamente toda a coleta de dados oceanográficos era feita localmente (in situ). Essa técnica se caracteriza pela aquisição de dados por meio de instrumentos mecânicos (garrafas de Niskin, batitermógrafos) ou eletrônicos (termistores, ADCPs), que eram presos a um cabo, e desciam, por força da gravidade, adquirindo uma série de medidas (dados) verticais, em cada ponto de parada do navio (POLITO et al, 2003). Após essa época, com a revolução dos satélites, surge então a oceanografia via satélite, que utiliza os radares SAR (Radar de abertura sintética) acoplados a aeronaves ou a outros satélites para adquirir dados que eram utilizados com o objetivo de localizar alvos, realizar medições, etc. Além disso, passaram a serem utilizados Satélites Altimétricos e de dispersão métrica que forneciam imagens de temperatura da superfície do oceano, correntes, ondas e redemoinhos. Em geral, esses avanços tecnológicos ajudaram bastante no desenvolvimento da acústica oceânica.

No início dos anos 70, já existiam programas que utilizavam o método de raios e método dos modos normais, que tiveram melhorias a partir do uso dos computadores pessoais. Experimentalmente, iniciou-se a aplicação de malhas contendo um grande número de hidrofones. Foram realizadas também pesquisas na área de geologia do fundo do oceano, contribuindo na área de acústica com a descrição dos perfis de sedimentos contidos no leito oceânico.

A partir do desenvolvimento de computadores mais rápidos e o desenvolvimento de tecnologias baseadas em FFT (Transformada rápida de Fourier), foram desenvolvidas novas técnicas computacionais mais apuradas. O programa de campo rápido "Fast Field program", desenvolvido pela Kutschale (1973) e, mais tarde melhorado nos códigos de integração com o número de onda, SAFARI/OASIS Schmidt (1988), forneceu uma forma de onda completa extremamente rápida, capaz de calcular campos acústicos em camadas onde os meios continham complicações, isto é, camadas que incluíam nos meios a rugosidade e o cisalhamento. Outra abordagem teórica revolucionária, incluindo um código de cálculo desenvolvido por Tappert (1977) na década de 1970, foi o algoritmo baseado em equações parabólicas (PE), que propicia a solução completa da equação da onda considerando a dependência da refratividade com a distância e as irregularidades do meio. A Equação Parabólica é uma aproximação de onda que modela a propagação



de energia em um cone centrado em uma direção preferida e foi inicialmente usada para tratar o problema da difração de ondas eletromagnéticas.

Esta abordagem utiliza a FFT para encontrar uma solução inicial para várias medidas em um tempo muito curto e fazer cálculos tridimensionais por meio de uma série de cortes em 2D (os chamados N por 2D). Os programas de campo rápido, que são uma avaliação da transformada integral de Hankel do número de onda, foram imediatamente utilizados para águas rasas. As equações parabólicas (PE), que consideravam apenas ângulos pequenos, eram primeiramente usadas em águas profundas. No entanto, algumas aproximações com ângulos maiores, estenderam rapidamente a técnica para uma grande variedade de ângulos, necessários para a acústica de águas rasas. Dentre essas aproximações destaca-se a classe dos aproximantes de Padé, ou aproximação de Padé, que é a representação aproximada de uma função por funções racionais. Com efeito, as equações parabólicas podem acomodar o modo de acoplamento, difração, e muitos outros efeitos de espalhamento complexos e, além disso, é uma das ferramentas de computação mais utilizada em campo acústica de águas rasas. Também na década de 1970 foi desenvolvida outra ferramenta computacional 3D: os "modos verticais e raios horizontais" técnica de Barridge e Weinberg (1977). No entanto, como os cálculos 3D surgiram um pouco à frente de seu tempo, na década de 1970, esta ferramenta foi ignorada durante muitos anos, mas atualmente é uma ferramenta comum para os pesquisadores.

Além do desenvolvimento de softwares acústicos, alguns modelos regionais avançados de oceanografia física também foram desenvolvidos, com a promessa de fornecer entradas de dados ambientais cruciais para a acústica. A solução das equações não-lineares de Navier-Stokes com condições de contorno complicadas tem sido um desafio técnico por vários anos. Os modelos de águas rasas no oceano eram muitas vezes integrados com a profundidade e, portanto, não eram realmente úteis para a acústica marítima, mas indicaram um começo para os estudos, que seguiam na direção certa.

Por volta de 1985, ambos os eventos políticos e técnicos ocorridos, mudaram o foco das pesquisas em acústica submarina, tornando a pesquisa em águas rasas mais intensa. Com a diminuição da força da Guerra Fria, as pesquisas em águas profundas diminuíram nos EUA, Rússia e China, aumentando com isso, a pesquisa em águas rasas.



Durante esse período, os pesquisadores chineses realizaram uma quantidade significativa de pesquisa no Mar Amarelo, com especial atenção para a influência da dinâmica oceânica. Estes experimentos anunciaram o início global de um período bastante intenso de experimentação em águas rasas que se concentrou em não apenas na questão da oceanografia específica mencionada acima, mas também na interação inferior e inversão de processamento de sinais em águas rasas, e até mesmo na biologia marinha. Este período foi caracterizado não só pela sua atividade, mas também por sua natureza intensamente interdisciplinar, uma evolução positiva, que permitiu o uso da acústica de águas rasas para explicar as causas de estruturas observadas nos dados acústicos, e não apenas para relatá-las e catalogá-las.

A Rússia continuou realizando alguns experimentos, embora em menor número do que durante a Guerra Fria, com ênfase em pesquisa da onda interna, e se concentrando na área de baixo modo de propagação acústica, em determinadas áreas do Mar de Barents e em camadas no Mar do Japão.

A interação com o fundo tem sido sempre uma preocupação primordial para a acústica de águas rasas e a área de águas rasas com "inversão de fundo", tem recebido muita atenção por parte de pesquisadores norte-americanos e europeus. Alguns experimentos demonstraram novos métodos para obtenção das propriedades do fundo com base em dados acústicos.

Os estudos experimentais desempenham um papel crucial, assim como em outros ramos da acústica e na física como um todo. Em muitos aspectos, isso é causado pela variabilidade muito forte do meio na plataforma continental e suas margens. Quantificar o meio fortemente anisotrópico, não homogêneo, e variáveis no tempo que a acústica em águas rasas envolve, é um grande desafio.

3 CONCEITOS DE ACÚSTICA SUBAQUÁTICA

A propagação do som deve-se à pressão que este exerce sobre o meio, ou seja, o fluido apresenta uma resistência contra o movimento do som. A resistência a este movimento pode ser comparada a um pistão mover-se contra um fluido para gerar energia acústica. Na terminologia acústica, essa resistência é chamada de impedância acústica



específica. A resistência a este movimento, no ar, é muito pequena, ou seja, a força para gerar grandes deslocamentos no ar é muito baixa.

O som carrega energia mecânica. Nesse processo há também energia cinética das partículas em movimento e energia potencial, referente às tensões que ocorrem no deslocamento de partículas em meio elástico. Na propagação da onda, grande quantidade de energia atravessa a unidade de área e essa potência por unidade de área pode descrever a intensidade da onda em questão.

Ou seja, através de um fluido de densidade ρ , a pressão envolvida P é relacionada com a velocidade u e a densidade da seguinte forma:

$$P = \rho \cdot c \cdot u. \quad (1)$$

A intensidade instantânea relaciona a pressão acústica da seguinte forma:

$$I(t) = \frac{P(t)^2}{\rho \cdot c}. \quad (2)$$

A intensidade é um vetor normal à unidade de área, se a orientação é dada pela unidade de área, semelhantemente a teoria de propagação eletromagnética.

Na transmissão de sinais há ocorrência de obstáculos e para isso é necessário usar-se o conceito de densidade de fluxo de energia de onda acústica E , representado pela Equação 3.

$$E = \int_0^\infty I(t) dt = \frac{1}{\rho \cdot c} \int_0^\infty P(t)^2 dt. \quad (3)$$

Sua unidade pode ser representada como a intensidade de uma onda plana tendo uma pressão de $1\mu P$ ou $10^{-5} \text{ dyne/cm}^2$. A pressão $1\mu P$ serve como referência para definição de decibel aplicado em acústica subaquática.

3.1 Perdas por Transmissão

A perda de transmissão é definida como:

$$TL = 10 \log \left(\frac{I(1)}{I(r)} \right) = 20 \log \left(\frac{P(1)}{P(r)} \right). \quad (4)$$



Sendo:

$P(r)$ e $P(1)$ as amplitudes de pressão medidas na horizontal a uma distância r e $1m$ da fonte sonora.

A perda de transmissão em propagação esférica com absorção pode ser escrita:

$$TL = 20 \log(r) + ar. \quad (5)$$

Sendo

$a = 0,87\alpha$ o coeficiente de absorção dado em decibel por metro [dB/m].

O coeficiente a para as ondas sonoras em águas cuja temperatura é perto dos $5^\circ C$ e cuja pressão é $1atm$, profundidade zero, corresponde a $a = 0,00006[dB/m]$ em $1kHz$, $a = 0,0008[dB/m]$ em $10kHz$ e $a = 0,013[dB/m]$ em $50kHz$.

Para o som quando tomado entre duas superfícies paralelas, que são perfeitamente refletivas, a perda de transmissão com absorção pode ser escrita na forma:

$$TL = 10 \log(r) + ar. \quad (6)$$

É conveniente separar a perda de transmissão em duas partes para melhor entendimento:

$$TL = TL(geom) + TL(losses). \quad (7)$$

Dessa forma pode-se referir às perdas por transmissão através da soma do fator $TL(geom)$, que diz a respeito de perdas referentes à geometria, e $TL(losses)$, que refere à absorção, dispersão e outros fenômenos não geométricos.

Pode-se escrever a relação entre o coeficiente de absorção e a frequência, que estão sob efeito de mesma temperatura e pressão, da seguinte forma:

$$\frac{a}{f^2} = \frac{8 \times 10^{-5}}{0,7 + f^2} + \frac{0,04}{6000 + f^2} + 4 \times 10^{-7} [(dB/km)/(kHz)^2]. \quad (8)$$

Sendo:

f a frequência em kHz .

A perda de transmissão em propagação esférica com absorção em função da distância r pode ser representada pela Figura 1.

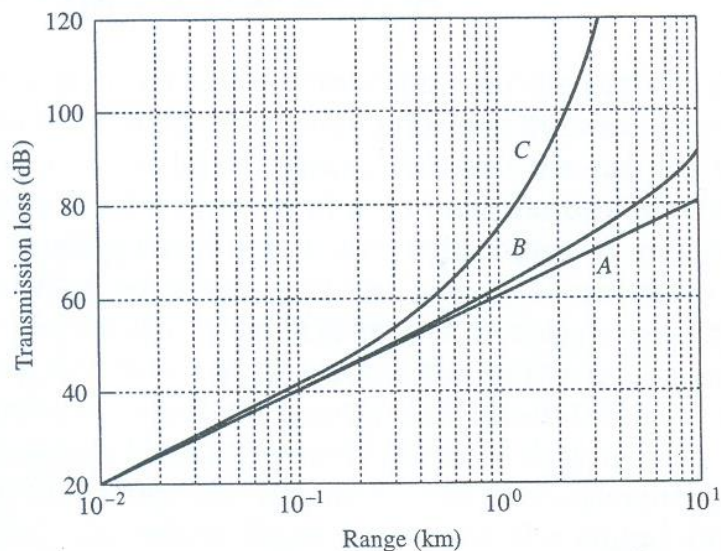


Figura 1 – Perda de transmissão para uma superfície esférica em águas marinhas com absorção. Curva A para 1 kHz, curva B para 10 kHz e C para 50 kHz. [KINSLER, 2000]

Para curtos alcances, a perda de transmissão é linearmente crescente. A partir do aumento da frequência e do alcance as curvas B e C na figura 1 apontam que a perda por absorção é bastante significativa. Com isso, fica claro que para grandes distâncias são necessárias frequências relativamente baixas para que as perdas por transmissão sejam menores.

Há fatores que limitam a transmissão do som pela água, mas deve ser notado que neste ambiente as ondas sonoras representam uma melhor opção na transmissão de energia que as ondas eletromagnéticas. Há alguns desvios, quando experimentos são realizados em oceanos, como: efeitos geométricos devido à divergência ou convergências causadas pela refração ou interferência construtiva ou interferência destrutiva associados a múltiplas ondas se propagando, incluindo reflexões de superfície e do fundo do mar; aumento da atenuação de difração e dispersão causadas pela não homogeneidade da água.



4 MODELOS ACÚSTICOS NO OCEANO

As teorias mais utilizadas atualmente para descrever a propagação acústica e dispersão em águas marítimas são: modos normais, traçado de raios, equação parabólica, integração do número de onda e o modo de raios vertical-horizontal híbrido usado para trabalhos em 3D. Cada um destes métodos foi melhorado e aperfeiçoado para aplicações em águas rasas.

A Teoria dos modos normais foi melhorada com a introdução da "teoria do modo normal acoplado", que permite lidar com a dependência da faixa do meio em uma fatia entre fonte e receptor, e até mesmo efeitos 3D (Pierce 1965; Milder 1969). Este fato representou a extensão do modelo básico 1D Pekeris a 2D e 3D, e permitiu a teoria abranger todo o oceano e o fundo do mar. Efeitos de meios elásticos (cisalhamento) também foram incluídos, mas não se tornaram populares.

A Teoria de Raios, muitas vezes ignorada em águas rasas para frequências inferiores a 1.000 Hz, ainda é uma ferramenta muito útil para a compreensão da física do som em águas rasas. Nesta teoria, se incluem os efeitos de deslocamento do feixe de onda que pode muitas vezes se aproximar dos resultados dos modos normais para a onda completa. (Tindle e Weston, 1980). Um dos desenvolvimentos mais interessantes na teoria de raios foi a correspondência da imagem do modo de raios, que mostrou como se poderia ir de uma imagem para a outra usando a interferência construtiva de modos para criar raios e vice-versa. Isto foi especialmente útil na modelagem das chegadas de sinais de banda larga, onde as chegadas anteriores, em águas rasas, seriam frequentemente realizadas por modos, enquanto as chegadas mais tardias seriam por raios (Munk e Wunsch, 1983).

A equação parabólica, uma vez que foi estendida para o regime de alto ângulo, era um "clássico instantâneo", em águas rasas, e de fato é, provavelmente, o código mais usado para a criação de representações de campo acústico atualmente. Inicialmente, as equações parabólicas eram criticadas como "não fornecendo uma visão física, apenas uma resposta", mas ao longo das décadas verificou-se que também se poderia projetar modos e raios do campo de equações parabólicas, e assim acabou por ter uma velocidade, precisão de onda completa, e compreensão física, todos de um modelo.

A Técnica de integração do número de ondas, com base na representação da

transformada de Hankel do campo acústico, produz tanto o campo de pressão e a função de Green dependente da profundidade para fins acústicos de baixa profundidade. Enquanto este método é intrinsecamente menos adequado para problemas dependentes da distância, é excelente e supera outros métodos, incluindo efeitos de cisalhamento e de rugosidade de contorno.

Finalmente, chegamos à técnica de modos verticais e raios horizontais, que foi desenvolvido por Weinberg e Burridge, e que foram prontamente ignoradas durante várias décadas. Este modelo perspicaz de propagação totalmente 3D estava muito à frente do fluxo de dados em águas rasas, o que só recentemente incluiu oceanografia, bem como refração batimétrica e reflexão.

4.1 O Modelo de Pekeris

Uma vez definida a equação característica para meios estratificados genéricos, aplica-se a mesma ao modelo físico de Pekeris, composto de um meio homogêneo líquido sobreposto a uma camada sedimentar não consolidada (absorvedora) e estratificada, com as interfaces planas e paralelas. O conhecimento da solução para esse modelo, ilustrado na Figura 4.13, constitui a base para a modelagem de ambientes mais complexos.

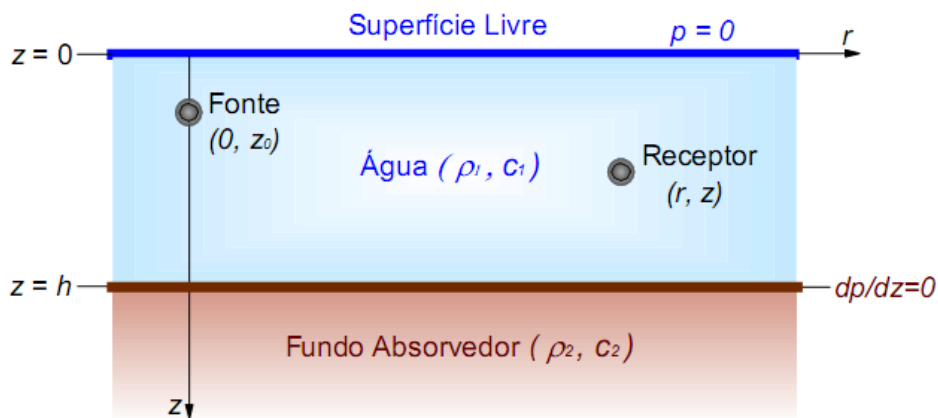


Figura 2 – Modelo Físico de Pekeris

Neste modelo, a equação final para o campo de pressão é dada pela seguinte equação (Xavier, B. C., 2005):

$$p = \rho \exp\left(i \frac{\pi}{4}\right) r^{-1/2} \sum_m q_m S_m(z_0) S_m(z) \exp(-\delta_m r - ik_m r) \quad (9)$$



onde m é o número total de modos, k é o número de onda horizontal, S_m são as auto funções, q_m é a taxa de modos de excitação e δ_m é o termo de atenuação estimado pela calibração com dados experimentais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Simulação Computacional

A simulação computacional realizada neste trabalho foi feita utilizando-se o modelo de propagação da Teoria dos Modos Normais, e implementada usando o algoritmo KRAKEN, que faz parte do pacote ACTUP 1 α Toolbox v2.2 – Acoustic Toolbox do Matlab R2006a – Mathworks, do Centro de Ciência e Tecnologia Marinha, da Universidade de Tecnologia Curtin, na Austrália.

As hipótese principais adotadas são as seguintes:

- A Perda por Transmissão (TL) está ligada aos modos discretos, ou seja, aos associados a perdas resultantes de reflexão total;
- O meio aquático é modelado como tendo uma camada de fluido onde o som tem um perfil de velocidades uniforme em um semi-plano finito arbitrário;
- No modelo simulado adota-se uma camada de água com 23 metros de espessura (profundidade) com velocidade constante, sobreposta a uma camada de sedimentos em um semi-plano infinito, com velocidade de propagação do som constante e densidade também constante;
- A fonte é pontual contínua e de amplitude arbitrária.

O modelo dos testes tem as seguintes características:

- Velocidade de propagação do som na água: $c_1 = 1508$ m/s;
- Velocidade de propagação do som no fundo: $c_2 = 1689$ m/s;
- Densidade da água: $\rho_1 = 1033$ g/m³;
- Densidade do fundo: $\rho_2 = 2066$ g/m³;
- Frequência da fonte harmônica: 147,8 Hz;
- Profundidade da coluna d'água: $h = 23$ m;
- Profundidade da fonte: $z_0 = 10$ m; e
- Profundidade do receptor: $z_r = 20$ m.

A figura abaixo mostra a perda de transmissão em função da distância horizontal do modelo descrito acima. Esta primeira simulação foi realizada utilizando o modelo KRAKEN.

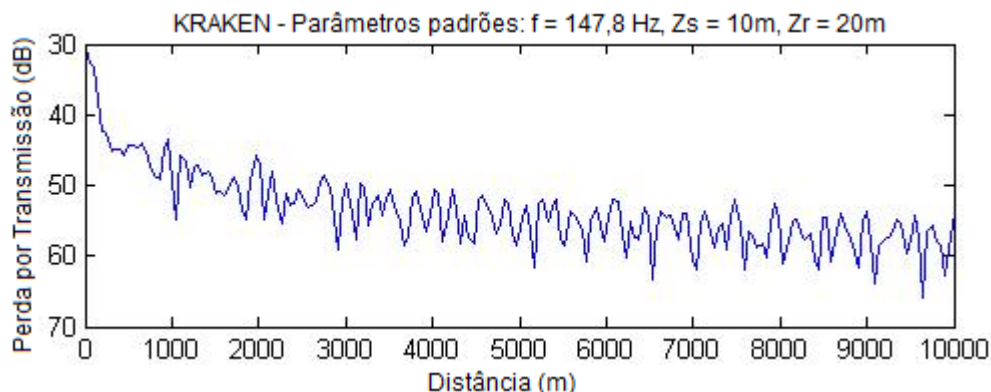


Figura 3 – Curvas da perda por transmissão pela distância, obtida pelo modelo KRAKEN

Outros testes foram realizados com outros modelos. Eles usam o método de equações parabólicas (PE), a partir do desenvolvimento da aproximação de Padé, cuja exatidão aumenta com o número de termos na série. As figuras a seguir mostram os resultados obtidos com o método de BELLHOPE, simulados neste trabalho, e os resultados obtidos por (Xavier, 2005) utilizando o método de RAM.

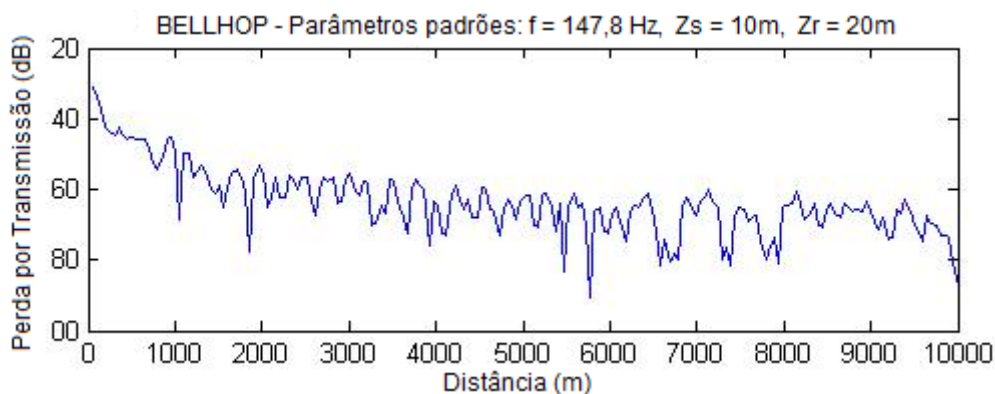


Figura 4 – Curvas da perda por transmissão pela distância, obtida pelo modelo BELLHOP

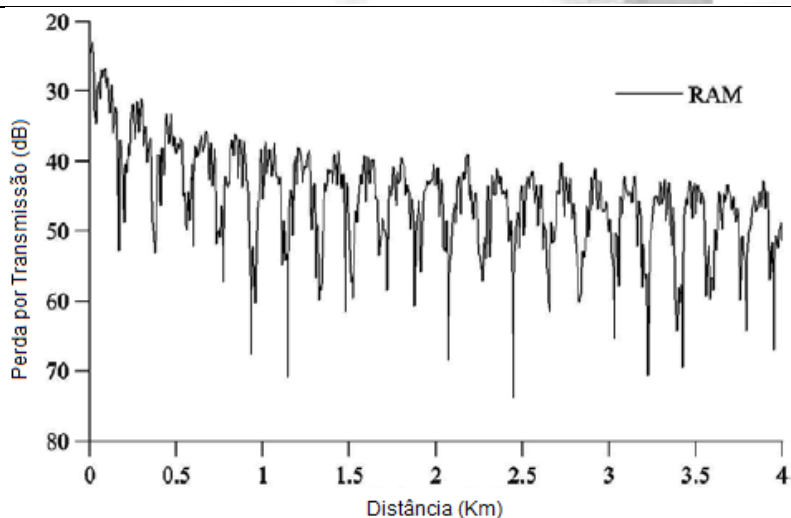


Figura 5 – Curvas da perda por transmissão pela distância, obtida pelo modelo RAM (Xavier, 2005).

Os resultados obtidos com os métodos KRAKEN e BELLHOP são muito próximos e seguem um padrão de perda de transmissão de acordo com a distância horizontal. O método KRAKEN usa o Método dos Modos Normais, enquanto o método BELLHOP usa o Método dos Elementos de Contorno para obter a perda de transmissão. Apesar de métodos diferentes, os resultados seguem um padrão semelhante. O método de RAM, usado em (Xavier, 2005), baseia-se na aproximação das Equações Parabólicas (PE) e utiliza a abordagem pelos termos da série de Padé. Por este método, a escala do valor foi aumentada para avaliar o comportamento de perda de transmissão de até uma distância de 4 km.

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um histórico do estudo de acústica subaquática em águas rasas. Apresentou também a simulação de alguns dos métodos de propagação conhecidos e a partir dos resultados obtidos, observa-se que as conclusões deste estudo são próximas aos resultados obtidos na literatura.



AGRADECIMENTOS

Agradeço o suporte dado no desenvolvimento do projeto e o apoio financeiro do CEFET-MG para a participação no evento.

REFERÊNCIAS

Katsnelson, B. G., et al., 2012. *Fundamentals of Shallow Water Acoustics*. London, Springer Science+ Business Media, LLC.

Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V., 1982. *Fundamentals of Acoustics*. New York: John Wiley & Sons.

Maia, L. P., 2010. *Inversão geoacústica e localização passiva de fontes em águas rasas*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ.

Rodríguez, O. C., 1995. *Modelos de Propagação Acústica Submarina: Comparação de Resultados com a solução Analítica do problema de 3 camadas*. Laboratório de Processamento de Sinais, Universidade do Algarve.

Xavier, B. C., 2005. *Modelos de Propagação Acústica em Águas Rasas*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ.