

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

UM MODELO MATEMÁTICO PARA A SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA E SEUS POSSÍVEIS IMPACTOS NOS MAMÍFEROS MARINHOS

Fabiano Marcos de Lima¹ - fabianomarcos1@hotmail.com

Claudia Mazza Dias¹ - mazzacaudia@gmail.com

Carlos Andres Reyna Vera Tudela¹ - carlos.reyna.veratudela@gmail.com

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Seropédica, RJ, Brazil

Programa de Pós Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - PPGMMC

Resumo. *Uma das características mais importantes dos mamíferos marinhos é sua capacidade de transmitir e perceber som no ambiente submarino. Essa habilidade torna-se fundamental para sua sobrevivência no habitat natural. Atividades como comunicação, caça, fuga de predadores, orientação, acasalamento entre outros fatores, são usadas como subsistência e dependem em grande parte de sua capacidade de emitir e receber sons ao seu redor. A poluição sonora causada pelas ações humanas, pode interferir diretamente na vida desses animais. O presente trabalho trata de um modelo matemático e computacional para simular e avaliar a intensidade da propagação do som em um ambiente submarino a partir de ações humanas e avaliar os possíveis impactos na vida dos mamíferos marinhos.*

Palavras-chaves: *Propagação Acústica, Mamíferos Marinhos, Poluição Sonora, Ruídos Subaquáticos.*

1. INTRODUÇÃO

Em diversos ramos da ciência e tecnologia, existe uma grande demanda em estudar e compreender melhor os fenômenos naturais e situações reais. Estudos relacionados à física, química, biologia, economia, engenharia, entre outras áreas, buscam constantemente respostas e soluções para seus problemas de uma forma mais rápida e com baixo custo relativo. Sendo assim, a modelagem matemática e computacional vem ganhando espaço auxiliando na resolução desses problemas devido a ampla aplicabilidade de seus métodos. A modelagem matemática torna possível a simulação de sistemas reais a fim de prever seus resultados e comportamentos. Como é o caso da propagação acústica submarina, que obteve uma considerável evolução de seus estudos devido aos eventos ocorridos no último século como as primeiras e segundas guerras e a guerra fria, por exemplo. A acústica submarina foi um dos campos de pesquisas que mais cresceram durante esse período, devido a diversos eventos de escala mundial que estimularam seu estudo e desenvolvimento. Segundo Bjorno (2003), na primeira e segunda guerras

mundiais, houve considerável evolução da compreensão dos fenômenos acústicos nos oceanos para a utilização de submarinos da guerra em seus conflitos. Já no período compreendido como guerra fria¹, houve um grande desenvolvimento da tecnologia da computação que possibilitou ainda mais a evolução dos estudos em acústica submarina por tornar possível a utilização de computadores nos estudos.

Atualmente com a crescente demanda das atividades econômica nos oceanos, tem aumentado o tráfego de navios e embarcações e conseqüentemente o nível sonoro nos oceanos. Os ruídos subaquáticos gerados pelas atividades de navios e embarcações, vem causando uma crescente preocupação com os potenciais impactos na vida dos mamíferos e dos ecossistemas marinhos nas regiões de intensa atividade humana (Jesus *et al.*, 2010). Mamífero marinho é um termo utilizado pela maioria dos pesquisadores para referenciar diferentes grupos e espécies de mamíferos aquáticos. São classificados e definidos em cinco grupos de acordo com seus membros e espécies: cetáceos (baleias, golfinhos e botos), sirênios (peixe-boi e o dugongo), pinípedes (leões marinhos, morsas e focas), urso polar e outras espécies de outras famílias (Jefferson *et al.*, 1993). Devido a grande variedade de mamíferos marinhos, neste trabalho serão abordados apenas alguns animais de dois grupos de mamíferos marinhos da ordem dos cetáceos listados nas Tabelas 1 e 2.

O objetivo principal deste trabalho, é a utilização de um modelo matemático tendo como base a equação da onda, com uma ou mais fontes sonoras, capaz de simular a intensidade da propagação acústica em *dB* (Decibéis) de um ambiente submarino, utilizando no sinal acústico das fontes, as mesmas frequências de vocalização perceptíveis aos mamíferos marinhos estudados. Desta forma, será possível analisar a intensidade dos ruídos produzidos pelas ações humanas, de uma ou mais fontes sonoras, que são submetidos a esses animais que habitam nos oceanos.

2. MAMÍFEROS MARINHOS

Todos os mamíferos marinhos são capazes de emitir algum tipo de som que são característicos de sua ordem, espécie e de sua família. O som que é produzido por esses animais tem diversas finalidades que abrange desde atividades de caça, comunicação, fuga de predadores até mesmo para o acasalamento (Erbe, 2011).

2.1 Ordem dos Cetáceos

São conhecidos cerca de 68 espécies da ordem dos cetáceos que são divididos em duas subordens: odontocetos e mysticetos. A estrutura dos ouvidos desses animais são divididas basicamente em três partes (Ketten, 1997): canal do ouvido externo, Ouvido médio e ouvido interno.

Os cetáceos, assim como a maioria das espécies de mamíferos marinhos, possuem determinadas preferências quanto a região oceânica onde habitam. Pouco se sabe sobre os fatores que levam esses animais a determinar seu local de moradia, porém certas espécies são encontradas agrupadas em regiões características o que levar a pensar que suas escolhas estão relacionadas a profundidade, faixa de temperatura, caça, entre outras condições oceanográficas (Jefferson *et al.*, 1993).

¹Período compreendido entre 1945 a 1991.

Subordem Odontocetos: A subordem dos odontocetos é composta pelos cetáceos que representam as espécies dos mamíferos marinhos que possuem dentes. Os odontocetos em grupos separados por espécies e seus membros mais conhecidos são os da família *Delphinidae* por apresentarem a maior variedade de espécies nesta subordem. Os *Delphinidae* compreendem basicamente todas as espécies de golfinhos, botos, cachalote, narval entre outros cetáceos que possuem dentes.

Misticetos: A subordem dos misticetos é composta pelos cetáceos que representam as espécies dos mamíferos marinhos que não possuem dentes. Os misticetos não apresentam tanta variedade quanto os odontocetos porém suas espécies são bem características. A espécie que possui maior variedade de membros são os da família *Balaenopteridae*. Dentre as espécies mais conhecidas de misticetos estão: baleia jubarte, baleia azul, baleia minke, baleia fin, entre outras baleias em geral desta subordem (Au & Hastings, 2008). Os membros das subordens dos odontocetos e misticetos apresentam vocalizações características em várias faixas de frequência de acordo com cada espécie. As Tabelas 1 e 2 mostram algumas espécies e as faixas de frequência de vocalização de cada uma delas (Ketten, 1997).

Tabela 1- Frequências de vocalização de algumas espécies de Odontocetos [Adaptadas de Ketten (1997)]

Odontocetos		
Espécies	Nome Popular	Faixa de Frequência (kHz)
<i>Inia geoffrensis</i>	Boto	25-200
<i>Phocoena phocoena</i>	Toninha	100-160
<i>Delphinus delphis</i>	Golfinho	0.2 -150
<i>Orcinus orca</i>	Orca	0.25-35
<i>Stenella longirostris</i>	Bico longo	1-160
<i>Tursiops truncatus</i>	Golfinho nariz de garrafa	0.2-150
<i>Physeter catodon</i>	Baleia esperma	16-30

Os golfinhos, por exemplo, apresentam boa sensibilidade para frequências na faixa 15 à 110 kHz, tendo uma maior percepção na frequência em torno de 50 kHz e intensidade de aproximadamente 42 dB. Para a maioria dos odontocetos, esta sensibilidade se dá na faixa de 15 a 20 dB (Johnson, 1967; Au & Hastings, 2008).

Tabela 2- Frequências de vocalização de algumas espécies de Misticetos [Adaptada de Ketten (1997)]

Misticetos		
Espécies	Nome Popular	Faixa de Frequência (kHz)
<i>Eschrichtius robustus</i>	Baleia cinza	0.1-1.5
<i>Balaenoptera musculus</i>	Baleia azul	0.1-0.20
<i>Balaenoptera physalus</i>	Baleia comum	0.16-0.75
<i>Balaena mysticetus</i>	Baleia cabeça branca	0.1-0.580
<i>Eubalaena glacialis</i>	Baleia Franca	0.200
<i>Megaptera novaeangliae</i>	Jubarte	0.05-10.0

Já para os misticetos, a Baleia cinza por exemplo, nota-se que estes apresentam boa sensibilidade para frequências na faixa de 100 à 1500 Hz, com maior percepção na frequência entre 100 e 300 Hz, e intensidade em torno de 152 dB (Au & Hastings, 2008).

3. ONDA

Onda é um movimento provocado por uma perturbação oscilante que se propaga através do espaço ou através de um meio (Graff, 1991). São classificadas como ondas de natureza mecânica ou ondas de natureza eletromagnética, e sua velocidade de propagação depende das propriedades do meio em que se propaga. Uma característica que as ondas dessas duas naturezas tem em comum é que, elas são capazes de transportar energia através do meio em que se propagam, mas não são capazes de transportar matéria. Em outras palavras, na propagação das ondas é possível transmitir energia mas não há transmissão de massa (Graff, 1991). A partir da natureza da onda, são consideradas as seguintes propriedades. Ondas Mecânicas: são caracterizadas por necessitarem de um meio material para sua propagação. Em suas perturbações, são envolvidos o transporte de energia cinética e de energia potencial o que faz depender diretamente da elasticidade e outras propriedades do meio material. Como para se propagar depende necessariamente de um meio físico, essa natureza de onda não é capaz de propagar-se no vácuo. Alguns exemplos onde são encontradas ondas dessa natureza: em cordas, molas, som, ondas sísmicas, etc. Ondas Eletromagnéticas: são pulsos energéticos resultado das combinações de campos elétricos e campos magnéticos. Diferente das ondas mecânicas, as ondas eletromagnéticas não dependem de um meio material para se propagar. Alguns exemplos de ondas eletromagnéticas são: micro-ondas, ondas de rádio, ondas de radar, radiação infravermelha, etc. Como para este trabalho será tratada apenas a propagação acústica, o tipo de onda aplicada a esse processo é a onda mecânica.

3.1 Acústica Submarina

O som é uma onda mecânica capaz de se propagar em um ambiente subaquático. Nos oceanos os sons são produzidos basicamente pelas atividades ambientais, ou seja, ruídos gerados por algum fator da natureza como sísmicas, movimentos das marés, chuvas, entre outros. Os ruídos são gerados também pelas atividades dos animais marinhos, como comunicação, caça, mastigação, deslocamento, entre outras, e pela ação antropogênica, que são ruídos gerados pelas atividades de produção humana, como pescas e atividades de produção industrial, por exemplo (Finn *et al.*, 2011). Nos últimos anos com o aumento da população e da tecnologia, atividades humanas dentro ou perto da água, vem crescendo consideravelmente e assim contribuindo em uma parcela maior para o ruído subaquático. Deve-se, então, voltar as atenções à quantidade de ruídos produzidos pelas ações humana, de forma que, esses ruídos não venham interferir na vida dos mamíferos marinhos (Slabbekoorn *et al.*, 2010). A acústica é o ramo da física que estuda as propriedades e características da propagação do som em diferentes estados físicos da matéria. Diversos fenômenos de características oscilatórias como o som, por exemplo, podem ser representados pela Eq. (1) que é conhecida como a equação da onda em uma dimensão (Pujol, 2003).

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

onde x é a variável de posição, t é o tempo, $u(x, t)$ representa amplitude da onda na posição x e no tempo t e c é uma constante positiva que representa a velocidade de propagação que depende do meio físico. O som é caracterizado por uma perturbação na pressão que se propaga através de um meio compressível seja ele sólido ou fluido. A onda é capaz de se propagar através de pressões elásticas que envolvem as propriedades de compressão e expansão do meio.

São diversas unidades de medidas que podem ser utilizadas para descrever uma onda sonora (Robinson *et al.*, 2014) porém, na acústica submarina, a Eq. (1) é frequentemente representadas em termos da pressão acústica onde, ∇^2 é o operador Laplaciano e p é a pressão acústica.

Na propagação acústica submarina são definidos alguns parâmetros que definem as propriedades da intensidade sonora das fontes acústicas e do meio de propagação (Erbe, 2011). A Eq. (2) é a equação da onda acústica com uma função $f(t)$ que representa a intensidade sonora de um sinal emitido por uma fonte.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = f(t) \quad (2)$$

3.2 Representação Matemática de um Sinal Acústico

Um sinal acústico pode ser representado matematicamente por uma função senoidal (ou cossenoidal) $s(t)$ (Sodré, 2002):

$$s(t) = B + A_1 \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (3)$$

onde B é a posição do sinal em relação ao eixos das abscissas, A_1 a amplitude do sinal, ω é a frequência angular em rad/s , t é o tempo e θ é o ângulo de fase do sinal.

3.3 Intensidade da Fonte

A intensidade da fonte ou SL (*Source Level*), é o parâmetro que determina o quanto de energia acústica é emitida por um dispositivo ou fonte em uma determinada profundidade. A intensidade de uma fonte é medida em escala de dB (*Decibel*) e, em geral, é definida pela seguinte equação (Au & Hastings, 2008):

$$SL = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (4)$$

onde I é a intensidade da potência da fonte e I_0 é a intensidade de referência de uma onda com pressão de μPa em baixo da água.

3.4 Perda de Transmissão

A perda de transmissão ou TL (*Transmission Loss*), é o parâmetro que descreve a diminuição de intensidade de propagação do som no mar. A perda de transmissão é medida em escala de dB (*Decibel*) e, em geral, é definida pela a seguinte equação (Au & Hastings, 2008):

$$TL = -10 \log \frac{I}{I_0} (\text{dB}) \quad (5)$$

onde I é a intensidade da potência da fonte e I_0 é a intensidade de referência de uma onda com pressão de $I_0 = 1\mu\text{Pa}$ em baixo da água.

3.5 Perda por Espalhamento Esférico

O espalhamento esférico descreve a perda do nível sonoro a medida que a onda se afasta de sua fonte de origem. Essa perda é dada por uma distância, em metros, que é definida por um raio r . Quanto maior o valor de r , maior será a perda sonora. Para esse tipo de espalhamento, considera-se que a onda se propaga uniformemente em todas as direções a partir de sua fonte. Considerando a Eq. (5) que representa a TL, e dado um raio r , em metros, tem-se que a intensidade da perda de propagação é (Au & Hastings, 2008):

$$TL = -10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log(r^2) = 20 \log(r) \quad (6)$$

A Tabela 3 mostra os valores de intensidade relativa, e a perda de transmissão por espalhamento esférico para diversos valores de r .

Tabela 3- Perda de Transmissão por Espalhamento Esférico (Au & Hastings, 2008)

Raio (metros)	Intensidade Rel. I / I_0	TL(dB)
1	1	0
10	1/100	20
100	1 / 10.000	40
1000	1 / 1.000.000	60

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para resolução das equações diferenciais descritas na seção anterior, será utilizado o método de diferenças finitas (MDF). O método de diferenças finitas é uma das várias técnicas numéricas aplicadas para diferenciação de uma função contínua e diferenciável em termos discretos. É um método muito eficaz e seu algoritmo não apresenta muitas dificuldades de implementação. Possui um baixo custo computacional quando comparado a outros métodos para resolução de equações diferenciais (Burden & Faires, 2010).

4.1 Discretização da Equação da Onda pelo MDF

Considerando-se a simplificação da equação Eq. (2) para o caso bi-dimensional,

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial p}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (7)$$

Será utilizado o método de diferenças progressivas na derivada do tempo e diferenças centradas nas derivadas espaciais, de modo a obter a seguinte expressão para uma aproximação das derivadas de segunda ordem (Burden & Faires, 2010):

$$p^{n+1}(i, j) = 2p^n(i, j) - p^{n-1}(i, j) + \left(c \frac{dt}{dx dy}\right) (p^n(i+1, j) + p^n(i-1, j) + p^n(i, j+1) + p^n(i, j-1) - 4p^n(i, j)) \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, n_x \quad j = 1, \dots, n_y$$

onde n_x é o número total de pontos no eixo x , n_y é o número total de pontos no eixo y , n representa a aproximação dos intervalos de tempo, $x_i = i, \dots, n_x$ e $y_j = j, \dots, n_y$ é a variação de x e y respectivamente, e que compõe uma malha regular com passo h .

4.2 Resolução do Modelo

A Eq. (8) é resolvida por diferenças finitas através de código desenvolvido no ambiente *Matlab*®. Foram realizadas simulação obtendo diversos campos acústicos. As simulações foram feitas considerando a assinatura acústica de um Navio *Container* levando em consideração as intensidades acústicas nos valores 180 dB, 177 dB, 175 dB, 174 dB, 176 dB e 170 dB encontradas em Mc Kenna *et al.* (2012). A partir da assinatura acústica do Navio *Container*, foi possível obter as amplitudes para cada valor de intensidade e aplicar na Eq. (3) formando assim um sinal composto com esses valores de intensidade. A grade de diferenças finitas utilizadas foi regular, simulando um ambiente de testes marinho de 500 metros de profundidade e 1000 metros de extensão, com passo $h = 1$ metro. Os valores de frequências utilizados para compor o sinal emitido pela fonte, são os mesmos valores listados nas Tabelas 1 e 2, realizando testes distintos para as subclasses de odontocetos e mysticetos. A perda de transmissão utilizada foi a perda por espalhamento esférico, consideradas as definições dadas nas Eq. (5) e (6), e também de acordo com a Tabela 3. A velocidade de propagação c foi considerada constante em todo domínio, assumindo o valor de propagação 1500m/s que é a velocidade do som na água. Foi considerada a emissão do sinal pelo tempo de 60s.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figuras 1 mostra a variação de intensidade sonora com valores mínimos de aproximadamente 80 dB e máximos de 180 dB para a simulação com as frequências dos odontocetos listadas na Tabela 1. Já a Tabela 4 mostra a TL por espalhamento esférico em dB em função do raio r .

Tabela 4- TL por Espalhamento Esférico Frequência dos Odontocetos

Raio (metros)	Intensidade Rel. I / I_0	TL(dB)	Intensidade Simulada	
			180 dB (Máx)	80 dB (Min.)
1	1	0	180	80
10	1/100	20	160	60
100	1 / 10.000	40	140	40
1000	1 / 1.000.000	60	120	20

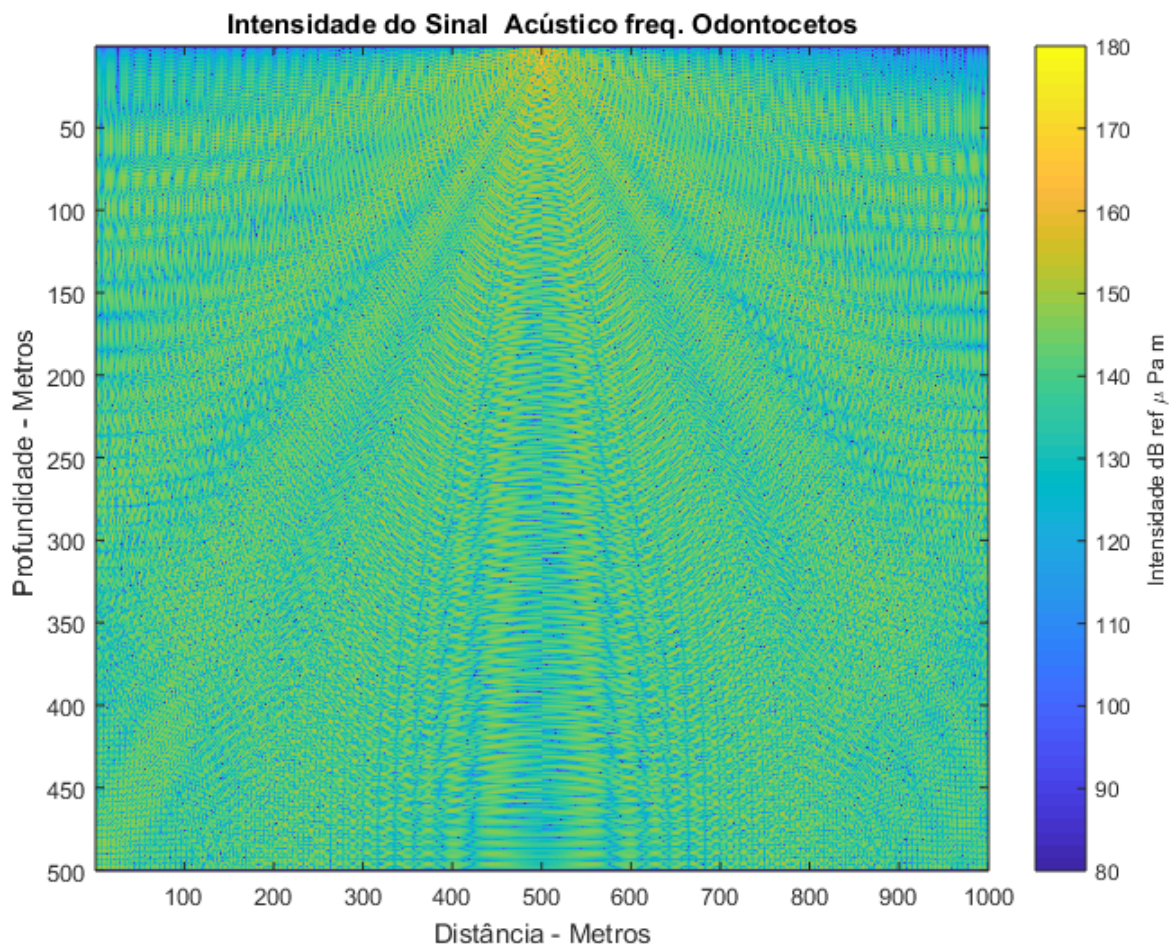


Figura 1- Simulação da Intensidade Acústica dos Odontocetos

A Figura 2 mostra a variação de intensidade sonora com valores mínimos de aproximadamente 60 dB e máximos de 160 dB para a simulação com as frequências dos misticetos listadas na Tabela 2. Já a Tabela 5 mostra a TL por espalhamento esférico em dB em função do raio r .

Tabela 5- TL por Espalhamento Esférico freq. dos Misticetos

Raio (metros)	Intensidade Rel. I / I_0	TL(dB)	Intensidade Simulada	
			160 dB	60 dB
1	1	0	160	60
10	1/100	20	140	40
100	1 / 10.000	40	120	20
1000	1 / 1.000.000	60	100	0

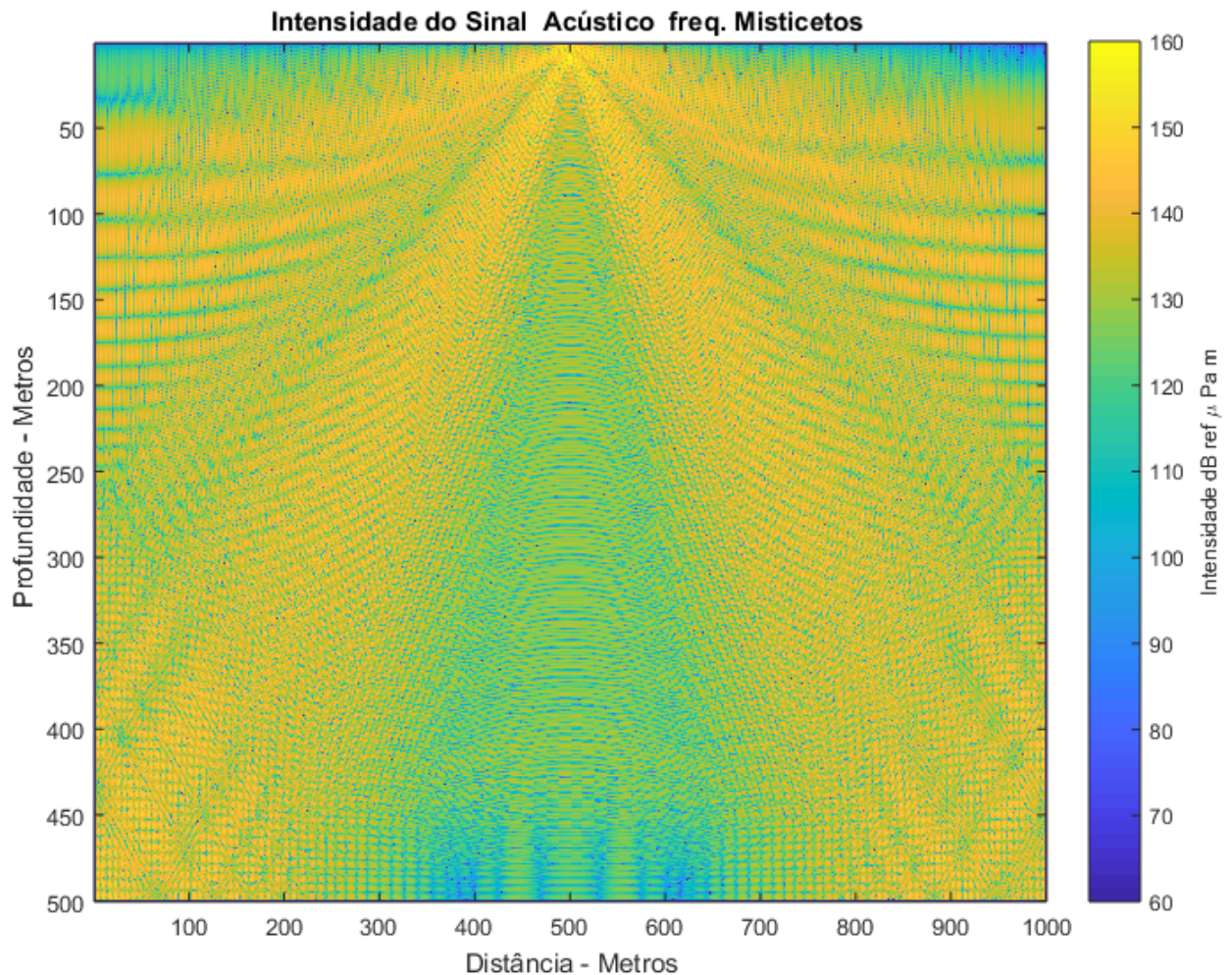


Figura 2- Simulação da Intensidade Acústica frequências dos Mistocetos

Analisando a intensidade sonora (mínimas e máximas) apresentadas nas Figuras 1 e 2, assim como as Tabelas 4 e 5, que apresentam a relação da intensidade com a perda por espalhamento esférico para alguns valores de r , nota-se que para uma determinada distância, os animais marinhos ficam expostos aos níveis de ruídos gerados a partir da simulação com frequências sensíveis a esses animais.

6. CONCLUSÕES

O aumento dos ruídos nos oceanos, sobretudo os ruídos gerados pelas atividades antropogênicas com a evolução das atividades produtivas, justifica o desenvolvimento de pesquisas científicas voltadas para estratégias de controle da poluição sonora nos oceanos e avaliar o impacto na natureza. Dentro deste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal simular a propagação de ruído submarino utilizando um modelo matemático e analisar os possíveis impactos na vida dos mamíferos marinhos. De acordo com a análise dos resultados, considerando a simulação da intensidade de propagação gerada por uma única fonte e, utilizando frequências perceptíveis aos dois grupos de mamíferos marinhos, foi possível verificar que a intensidade dos ruídos gerados pela ação humana, torna-se perceptível a esses animais em um raio de apro-

ximadamente 1000 metros, com a possibilidade de adição de mais fontes sonoras, o que poderá afetar de forma significativa as atividades básicas na rotina desses animais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES).

Referências

- Au, W. W. L., Hastings, M. C. (2003), *Features of underwater acoustics from Aristotle to our time*. Acoustical Physics Springe, New York.
- Burden, R. L., Faires, J. D. (2010), *Numerical Analysis, Ninth Edition*. Cengage Learning, Farmington Hills.
- Bjorno, L. (2003), *Principles of marine bioacoustics*. Springe, New York.
- Erbe, C. (2011), *Underwater acoustics: noise and the effects on marine mammals A pocket handbook 3rd edn*. JASCO Appl Sci, Victoria, Canada.
- Finn B. J., Michael, B. P., William, A. K, e Henrik S. (2011), *Computational Ocean Acoustics Second Edition*. Springer, New York.
- Graff, K. F. (1991), *Wave motion in elastic solids*. Oxford University, Reino Unido.
- Jefferson, T. A., Leatherwood S. e Webber M. A. (1993), *Marine Mammals of the World*. United Nations Environment Programme Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Jesus, S. M., Soares, C., Zabel, F., Silva, A. (2010), *Marine Strategy Framework Directive*. CINTAL- Universidade do Algarve e Marsensing, Faro.
- Johnson, C S. (1967), *MSound detection thresholds in marine mammals*. Marine bioacoustics, Washington.
- Ketten, D. R. (1997), *Structure and function in whale ears*. The International Journal of Animal Sound and its Recording, Vol.8, 103-135, Oxford.
- McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M. e Hildebrand, J. A. (2012), *Underwater radiated noise from modern commercial ships*. The Journal of the Acoustical Society of America, New York.
- Pujol, J. (2003), *Computational Ocean Acoustics Second Edition*. Cambridge University Press, New York.
- Robinson, S.P., Lepper, P. A., Hazelwood, R.A. (2014), *Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement*. National Measurement Office, The Crown Estate.
- Slabbekoorn, H., Bouton, N., Opzeeland, I., et all. (2010), *A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish*. Elsevier, College Park.
- Sodré, U. (2002), *Transformada de Fourier*. COPPE UFRJ, Rio de Janeiro.

A MATHEMATICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF SUBMARINE ACOUSTIC PROPAGATION AND POSSIBLE IMPACTS ON MARINE MAMMALS

Abstract. *One of the most characteristics of marine mammals is their ability to transmit and receive sound in the underwater. Their ability to emit and receive sounds becomes fundamental for their survival in natural habitat. Activities such as communication, hunting, escape from predators, guidance, mating among other factors, are used as livelihoods and depend largely on their ability to emit and receive sounds around them. The noise pollution caused by human actions, can interfere directly in the the life of these animals. The present work presents a mathematical and computational model to simulate and evaluate the intensity of the sound propagation underwater from human actions and to evaluate all possibles impacts on the life of the marine mammals.*

keywords: *Acoustic Propagation, Marine Mammals, Noise Pollution, Underwater Noise.*