



O Efeito Seebeck Acústico na Água

Anelle Cristine Brasileiro Valença¹, Carlos Eduardo Parente Ribeiro¹, Luiz G. Guimarães*¹

LGG@peno.coppe.ufrj.br

¹COPPE-UFRJ

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper addresses an approach for modeling underwater sirens. Besides, an investigation upon an underwater siren was made with the purpose of verify its behavior as an underwater sound source. To this end, an experiment was conducted in a water tank, at IEAPM (*Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira*) installations, using a prototype of a rotating propeller with a hydrophone recording the sound radiated by the underwater siren. The present results strongly suggest that underwater siren effect can occur.

Key-Words: Underwater Acoustic, Signal Processing, Siren.

Introdução

É bem conhecido que a intensidade do som ao passar por um objeto em movimento rotatório é alterada por este movimento; por exemplo ao falarmos em frente a um ventilador caseiro percebemos que a nossa voz é "modulada" por frequências distintas daquelas que ocorrem quando o ventilador está desligado; além disso também nota-se que essa "modulação" é sensível a velocidade de rotação das pás do ventilador. Em meados do século XIX, este tipo de efeito foi descrito por Seebeck (Seebeck, 1843) no que ele denominou de "efeito sirene", ou como é conhecido atualmente por "efeito sirene de Seebeck". Neste caso, seus estudos consistiam de observar a passagem de um "jato de ar" na presença de um disco circular girante com furos igualmente espaçados. Nestes experimentos, Seebeck notou que os jatos de ar que atravessavam os orifícios eram modulados em multi-tons sendo a frequência fundamental destes tons o produto do número de orifícios pela velocidade angular de rotação do disco (Seebeck, 1843). Um pouco mais tarde, no início do século passado, Lyman e Webb (Lyman & Webb, 1919) motivados com o aparecimento dos primeiros aviões monomotores estenderam este estudo à acústica área. Eles notaram que também para o caso dos monomotores, o "ruído" característico das pás do hélice eram multi-tons de frequência fundamental igual ao produto do número de pás pela velocidade angular de rotação do hélice. Neste trabalho pretendemos estender essas idéias ao caso do som se propagando na água

gerado por um hélice que não cavita. Para tanto, construímos um hélice impulsionado por um motor elétrico de rotação controlável, bem como desenvolvemos um modelo teórico para esse tipo de fonte. Nas seções seguintes descreveremos esse modelo, nosso aparato experimental bem como discutiremos nossos principais resultados e conclusões.

O modelo teórico

Como mostra a fig(1), a principal hipótese deste trabalho consiste em admitir que um hélice constituído de N pás e período de rotação T_{ROT} possa ser descrito como um sistema de N fontes pontuais que irradiam com amplitude A e distam "a" do eixo de rotação do hélice, o qual supomos que gira com velocidade angular $\omega=2\pi/T_{ROT}$. Adotando um sistema de coordenadas cilíndrico onde o eixo de rotação x é o eixo de simetria e também escrevendo as coordenadas cartesianas respectivamente como $y=rsin(\theta)$ e $z=rcos(\theta)$. Supondo o meio ilimitado e que neste meio o campo acústico ψ se propague com velocidade c , então ψ deve satisfazer a seguinte equação de onda:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\psi = A\delta(x) \sum_{p=0}^{N-1} \delta\left[z - a \cos\left(\omega t + p\frac{2\pi}{N}\right)\right] \delta\left[y - a \sin\left(\omega t + p\frac{2\pi}{N}\right)\right] \quad (1)$$

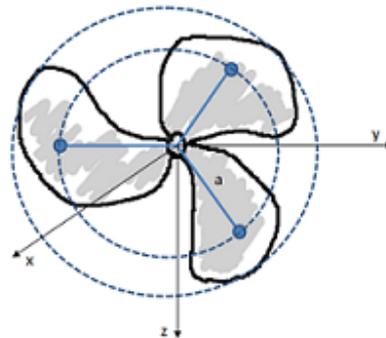


Figura 1 – Esboço do hélice como fontes pontuais que giram.

Usando o método de separação de variáveis, mostra-se que a solução da eq.(1) acima pode ser escrita como a seguinte superposição de modos multi-tons:

$$\psi(\vec{r}, t) \equiv \sum_{\ell} \int dk \hat{\psi}_{\ell} \quad (2)$$

Onde para cada inteiro ℓ o respectivo modo multi-tom é descrito como:

$$\hat{\psi}_\ell \equiv NA a_\ell e^{i[kx+N\ell\theta-N\ell\omega t]} H_{N\ell}^{(1)}(Qr) \quad (3)$$

Onde $H^{(1)}$ é a função de Hankel de primeira espécie, a_r uma constante de normalização apropriada e Q o número de onda generalizado de cada modo multi-ton, sendo este dado por:

$$Q \equiv \sqrt{\left(\frac{N\ell\omega}{c}\right)^2 - k^2} \quad (4)$$

Observamos da eq.(3) que modos associados a tons ℓ e m e com o mesmo número de onda k , podem se superpor temporalmente dando origem a “batimentos” cuja intensidade se magnifica em $N|\ell-m|$ instantes de tempos discretos dados por:

$$t_p^{(\ell,m)} = p \Delta t^{(\ell,m)} ; p = 0, 1, \dots, N |\ell - m| - 1 \quad (5)$$

Onde $\Delta t^{(\ell,m)}$ é o intervalo de tempo entre instantes consecutivos de máxima intensidade e é escrito como:

$$\Delta t^{(\ell,m)} = \frac{T_{ROT}}{N} \frac{1}{|\ell - m|} \quad (6)$$

Portanto, a separação temporal entre esses eventos de máxima intensidade aumenta à medida que ℓ se aproxima de m ou vice-versa, a saber:

$$\Delta t^{(\ell,m)} \leq \Delta t^{(\ell, m = \ell \pm 1)} \equiv \Delta T_N = \frac{T_{ROT}}{N} \quad (7)$$

Assim, quando $\ell=m\pm 1$ esses batimentos entre modos multi-tons consecutivos deve originar N -picos de intensidade máxima separados pelo máximo possível intervalo de tempo ΔT_N , sendo este a razão entre o período de rotação T_{ROT} do hélice pelo número N de pás. Na seção a seguir passamos a descrever qual foi o procedimento experimental por nós feito, em uma tentativa preliminar de verificar tal modelo teórico.

Resultados Experimentais

A figura(2a e b) mostra o nosso protótipo de hélice movido por um motor elétrico bem como o protótipo imerso no tanque junto com o hidrofone. Esse sistema consiste de um hélice de ferro com 19.2cm de diâmetro e 5 pás, sendo este impulsionado por um motor elétrico DC-20v com 1/15HP em rotação máxima de 2200 RPM. O motor é alimentado por uma fonte PS-ICEL 38 5100. Além disso, o hélice é conectado ao motor elétrico por uma correia de borracha e um sistema de polias, uma no motor com um diâmetro de cerca de 3.5cm e a outra no hélice com um diâmetro de aproximadamente 7.5cm. O experimento foi feito usando as facilidades do tanque do IEAPM, que possui as seguintes dimensões: largura de 1.78m, comprimento de 4.56m e altura de 1.07m, porém ao longo de todo o experimento adotamos uma linha de água com profundidade de 0.70m. A captação acústica foi feita utilizando um hidrofone esférico omni-direcional modelo ITC 1001. Em conjunto com o ruído ambiente e possíveis ressonâncias excitadas no tanque, tivemos preocupações com outras vibrações de nosso protótipo

que poderiam se sobrepor ao efeito sirene. Além disso, como mostra a eq.(3), a forte dependência angular de cada modo multi-ton sugere que o hélice irradie direcionalmente. Com isto em mente, nosso procedimento experimental foi dividido nas etapas a seguir.

a)



b)



Figura 2 – a) Protótipo do hélice. b) O hélice junto com o hidrofone imersos no tanque do IAPM.

Para caracterizar essa dependência angular de seu padrão de radiação, o hélice foi posicionado nas direções que nós rotulamos de 0 grau (quando o hélice fica em frente ao hidrofone), 90 graus (para a posição do hélice perpendicular ao hidrofone) e 180 graus (hidrofone atrás do hélice). Para cada uma destas situações, foram feitas gravações durante três minutos para as distâncias de 30cm e 1m entre o hélice e hidrofone. Em todos esses procedimentos, a voltagem da fonte foi ajustada para que se tivesse uma rotação do motor de 257rpm, de modo que a frequência fundamental do efeito sirene (número de pás multiplicado pela frequência de rotação do hélice) ficasse em torno de 10.03Hz. Além disso, observamos que para esta rotação do motor não ocorreu a formação de bolhas na água, inibindo-se assim a presença do ruído de cavitação.

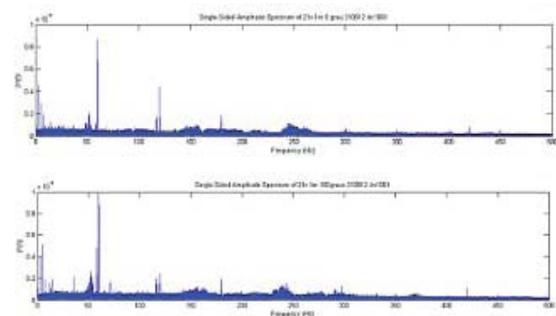


Figura 3 –Espectro do sinal a 1m de distância.

A figura(3) acima mostra em seus painéis superior e inferior respectivamente o espectro do sinal coletado a 1m de distância quando o hidrofone estava em frente e ao lado do hélice. Apesar de teoricamente esperarmos uma sequência inicial de multi-tons do tipo (10.03, 20.06, 30.09, 40.12, 50.15, 60.18, 70.21...), vemos que em ambos os casos, o que nos chama fortemente a atenção é um pico pronunciado na vizinhança de 60Hz, entretanto

acreditamos que isso se deve primeiramente ao acoplamento elétrico do transdutor do hidrofone com a rede elétrica e não a um multi-tom, pois esse pico também apareceu mesmo quando o protótipo estava desligado. Além disso, na fig(3) os picos que aparecem em baixa frequência na faixa de 5-30Hz, nem sempre são “bem resolvidos” pela curva de calibração do hidrofone por nós utilizado e algumas vezes se tornam espúrios. Desta forma, como abordagem inicial procuramos tentar caracterizar o pico que aparece em todas as medidas (0, 90 e 180 graus) e este ocorreu na vizinhança de 50Hz. Para tanto, aumentamos a resolução em frequência nesta faixa, isto é mostrado em maior detalhe na figura(4) em seus painéis superior e inferior. Nesta figura, mostra-se nos painéis superior e inferior respectivamente o comportamento do espectro do sinal coletado a 30cm de distância, nas situações em que o hidrofone estava em frente e ao lado do hélice.

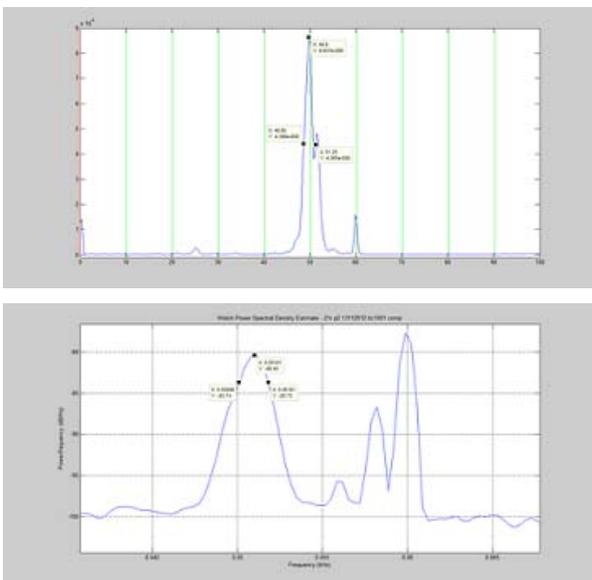


Figura 4 – Espectro do sinal a 0.3m de distância.

Para tentar caracterizar o multi-tom na vizinhança de 50Hz, admitimos que o espectro nesta vizinhança tem um comportamento ressonante tipo “Lorentziano” (veja os pontos salientados na fig.4) com uma incerteza inferior a sua semi-largura.

Distância(cm)	Orientação(°)	$f_{teo}(Hz)$	$f_{exp}(Hz)$
30	90	50.47±1.345	50.15
30	90	51.01±0.860	50.15
30	0	49.80±1.300	50.15
30	180	52.15±1.185	50.15
30	180	51.81±1.160	50.15
100	0	51.81±0.740	50.15
100	180	52.49±1.385	50.15

Tabela 1. Compara os valores teórico e experimental da estimativa de frequência do quinto tom do efeito sirene.

Este procedimento foi repetido para outras medidas em diferentes direções, com hidrofone ora distando 30cm do hélice ora separado de 1m do mesmo. Tais resultados são mostrados na tabela(1) e estes parecem manter coerência com a teoria, bem como também sugerem um papel relevante para a diretividade do padrão irradiado pelo hélice, pois os experimentos realizados com a geometria de 90° se mostraram mais acurados que aqueles em direções diferentes e talvez isso deva-se a maior intensidade do sinal nesta direção que em outras.

Comentários finais

Neste trabalho verificamos com um certo sucesso a existência do efeito Seebeck acústico na água. Para tanto, fizemos um modelo teórico extremamente simplificado onde as pás do hélice (na ausência de cavitação) funcionam como fontes pontuais girantes, bem como construímos um protótipo de hélice que pudesse satisfazer em parte esses critérios aproximativos do modelo. Estes resultados são preliminares, porém são bastante animadores na busca de uma melhor compreensão do ruído natural irradiado pelos diversos tipos de hélice (Carley,1999) nas mais diferentes condições de mar.

Agradecimentos

Agradecemos à Marinha do Brasil e em especial o IEAPM por todo apoio para realização deste trabalho.

Referências

Carley, M., 1999, Propeller noise fields, Journal of Sound and Vibration, v. 233, n. 2, pp. 255-277.
 Seebeck, A., 1843, Ueber die Sirene, Ann. Phys., 136, 449-481.
 Lyman, E. J., Webb, H. A., 1919, Emission of sound by air screws, Aero. Res. Comm.