



AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE UM ARRANJO DE HIDROFONES EM LINHA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA

Fabricio Abreu Bozzi

Instituto de Pesquisas da Marinha

Rua Ipiru, 02, Praia da Bica, Ilha do Governador – Rio de Janeiro – RJ

bozzi@ipqm.mar.mil.br

Carlos Alfredo Orfão Martins

Instituto de Pesquisas da Marinha

Rua Ipiru, 02, Praia da Bica, Ilha do Governador – Rio de Janeiro – RJ

carlos.martins@ipqm.mar.mil.br

Leonardo Martins Barreira

Instituto de Pesquisas da Marinha

Rua Ipiru, 02, Praia da Bica, Ilha do Governador – Rio de Janeiro – RJ

barreira@ipqm.mar.mil.br

Resumo: *Este estudo tem como objetivo avaliar a geometria e a resposta hidroacústica de um arranjo de hidrofones em linha. Num tanque hidroacústico não anecóico posicionou-se dois transdutores, um atuando como projetor, emitindo a 30 kHz, e o outro como receptor. Com o auxílio de uma escala, fixou-se a posição do emissor e variou-se discretamente a posição do receptor a cada 1 centímetro, realizando 150 medidas positivamente controladas e sincronizadas, ou seja, ao longo de 150 centímetros obteve-se a gravação de um mesmo sinal gerado, simulando a resposta de cada hidrofone de um arranjo em linha.*

Palavras-chave: *Hidrofones; Projetores; Arranjos.*

Abstract: *This paper has the main objective evaluate the hydrophone's line array geometry and hydroacoustic response of a linear hydrophone's array. In a non-anechoic hydroacoustic tank was mounted two transducers, the first one acting as a projector in a frequency of 30 kHz, and the second one as a receptor. With the aid of a scale, was fixed the position of the projector and the receiver was slightly varied position of each 1 cm, performing positively controlled and synchronized 150 measurements, i.e., along 150cm obtained recording the same signal generated by simulating the response of each hydrophone's array in a row.*

Keywords: *Hydrophones; Projectors; Array.*



1. Introdução

A pesquisa de arranjos de sensores em linha é fundamental para se adquirir base para estudos de configurações mais complexas de arranjos e seu processamento. Considerando o custo e a logística da operação de arranjos de hidrofones no mar, e por outro lado com a realização de simulações gerarem-se resultados estritamente teóricos, este experimento analisa a resposta de um arranjo de hidrofones num tanque hidroacústico.

Um arranjo linear é formado por elementos transdutores dispostos em linha reta [1]. A Figura 1 apresenta um arranjo linear de hidrofones pontuais igualmente espaçados de d e comprimento total entre o primeiro e último elemento L . O sinal do hidrofone n é aplicado a um multiplicador e sofre, a seguir, um retardo de valor $n\tau$. Todos os sinais assim processados são somados, gerando um sinal de saída $y(t)$. O conjunto formado por multiplicadores, elementos de retardo e somador é denominado um conformador de feixe (*beamformer*) do tipo retarda-e-soma (*delay-sum*) e será utilizado neste estudo.

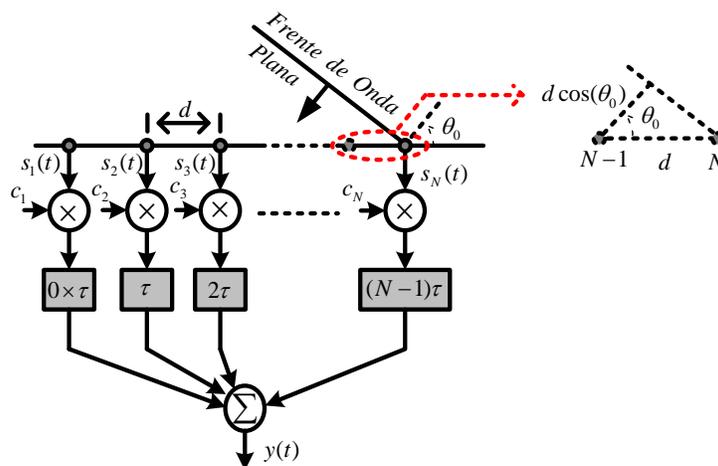


Figura 1- Arranjo Linear e Conformador de Feixe Tipo Retarda-Soma (*delay-sum*).

Um sinal propagando-se como uma onda plana incide no arranjo em uma direção θ_0 . A frente de onda atinge, inicialmente, o hidrofone N e gera o sinal $s_N(t)$. Em seguida, atinge o hidrofone $N-1$ e gera o sinal $s_{N-1}(t)$ e assim por diante. Após atingir o hidrofone n , a frente de onda deve percorrer uma distância $d \cos(\theta_0)$ antes de atingir o hidrofone que se segue, $n-1$. Deste modo, o sinal $s_{n-1}(t)$ será uma versão retardada do sinal $s_n(t)$, isto é

$$s_{n-1}(t) = s_n(t - \tau) \quad (1)$$

onde

$$\tau = \frac{d \cos(\theta_0)}{c} \quad (2)$$

é o retardo entre sinais e c é a velocidade do som.



Para que a saída do somador seja máxima é preciso que os retardos decorrentes da direção de propagação sejam compensados, de modo que os sinais a serem somados estejam todos em fase. Esta é a função dos retardadores. No exemplo da Figura 1, o sinal do hidrofone 1 é o mais retardado pela propagação e não sofre retardo adicional no conformador de feixes. O sinal do hidrofone 2 é submetido a um retardo adicional de valor τ , ficando em fase com o primeiro. O sinal do hidrofone 3 sofre um retardo adicional de valor 2τ e também fica em fase com o primeiro, e assim por diante. Obtém-se, deste modo, sinais em fase na entrada do somador, como desejado.

Caso a frente de onda venha de uma direção diferente de θ_0 , os retardos introduzidos pelo conformador já não serão adequados para colocar em fase os sinais dos hidrofones e a amplitude do sinal de saída será reduzida.

O sinal de saída do conformador pode ser representado pela expressão [2]:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N c_n s_n(t - (n-1)\tau) \quad (3)$$

A partir desta expressão pode-se verificar, quando os coeficientes c_n são iguais, que a amplitude do sinal de saída $y(t)$ varia com o ângulo de incidência da onda plana (marcação da fonte sonora) θ_0 de acordo com a expressão

$$|H(\theta)| = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \left(\cos(\theta) - \frac{c\tau}{d}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \left(\cos(\theta) - \frac{c\tau}{d}\right)\right)} \right| \quad (4)$$

onde $|H(\theta)|$ é o fator direcional (normalizado para valor máximo unitário) do arranjo linear, N o número de hidrofones e λ o comprimento de onda. Isso considerando uma onda senoidal com frequência única.

A partir da equação (4) pode-se apresentar as análises básicas para o projeto de um sistema a ser simulado. Nota-se que o parâmetro de ganho direcional depende do número de elementos, distância entre elementos e frequência de operação.

Analisando um caso base com o número de Hidrofones ($N=10$), distância entre sensores ($d=1\text{cm}$), comprimento do arranjo ($L=10\text{cm}$), frequência ($f=30\text{kHz}$) e ângulo de incidência ($\theta_0 = 0$) torna-se possível visualizar os efeitos da variação destes parâmetros.

A Figura 2 (a) mostra o ganho direcional do arranjo para este caso base.

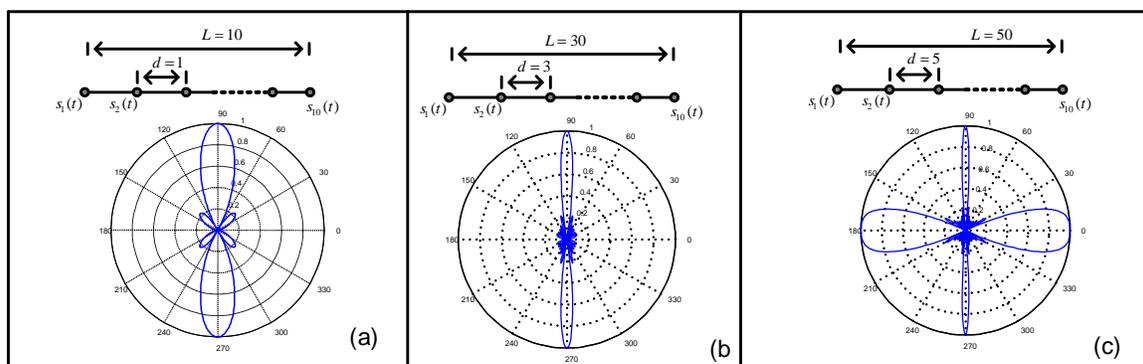


Figura 2- Diagrama de irradiação:

(a) caso base – $L=10/d=1$; (b) aumento de $L=30/d=3$; (c) aumento de $L=50/d=5$.

Observa-se que se o sinal vier na marcação 0 ou 180° , não importa por qual bordo ele será recebido da mesma maneira. Daí dizer-se que o arranjo linear apresenta ambiguidade de marcação. Nos sonares de flanco, um arranjo linear é instalado em cada bordo do submarino, de modo que o casco serve para isolá-los acusticamente. Como consequência, o feixe apontando para o bordo oposto ao qual o arranjo é instalado é atenuado, reduzindo, ou mesmo eliminando, o problema de ambiguidade [1]. Já no caso de um arranjo rebocado isso não ocorre, sendo necessária alguma técnica para sanar o problema da ambiguidade.

Podem-se realizar duas análises a partir do caso base, como mostrado na Figura 2 (b) e (c):

Em (b) Mantém-se a mesma frequência, mesmo número de elementos, mas aumenta-se o tamanho do arranjo, aumentando o espaçamento. Neste caso nota-se a relação entre o tamanho L do *array* e a diretividade.

Em (c) Mantém-se a mesma frequência, aumenta-se ainda mais o tamanho do arranjo. Surgem *gratings (aliasing* espaciais) que estão relacionados com a frequência máxima que o arranjo poderia operar ou o espaçamento máximo entre sensores.

2. Metodologia

O experimento consistiu na montagem de dois transdutores (ambos T-48 da Neptune Sonar) no tanque hidroacústico do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), sendo um a fonte e o outro o receptor. Fixou-se a fonte em uma profundidade de 1,5 metros, operando em uma frequência de 30 kHz. Posicionou-se o receptor na mesma profundidade, e iniciou-se seu deslocamento lateral utilizando-se uma escala graduada em centímetros como apresentado na Figura 3. O ponto de máxima proximidade entre a fonte e o receptor é de 2,6 metros, suficiente para sair do campo próximo e realizar uma aproximação de propagação de onda plana.

Foram realizadas 150 medições ao longo de 150cm, visando simular, numa escala de 1 para 100, uma fonte emitindo um sinal na frequência de 300Hz, e um arranjo linear de hidrofones, com 150 m de comprimento, estando os 150 hidrofones espaçados de 1m.

Desta forma, este experimento possibilita a análise quantitativa e qualitativa de um arranjo de hidrofones em linha utilizando apenas dois hidrofones.

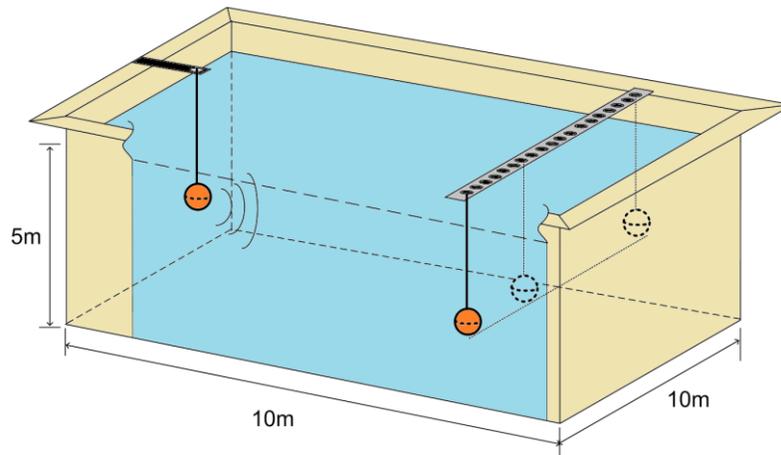


Figura 3 – Posicionamento dos Transdutores no Tanque Hidroacústico.

O sistema computacional utilizado consistiu de um computador, dos *softwares* Matlab®, para processamento dos sinais gravados, e Labview®, para aquisição dos dados da placa da National Instrument® PCI 6115, empregada na digitalização dos sinais adquiridos, além de um amplificador e um filtro para o condicionamento dos sinais.

3. Resultados

a. Frente de Onda

O sinal gerado consistiu de cinco ciclos de ondas senoidais com janelamento de *hanning*. A Figura 4 apresenta graficamente a frente de onda incidente nos 150 hidrofones dispostos no arranjo linear. Assim, visualiza-se o sinal direto e os sinais refletidos pela superfície e pelo fundo.

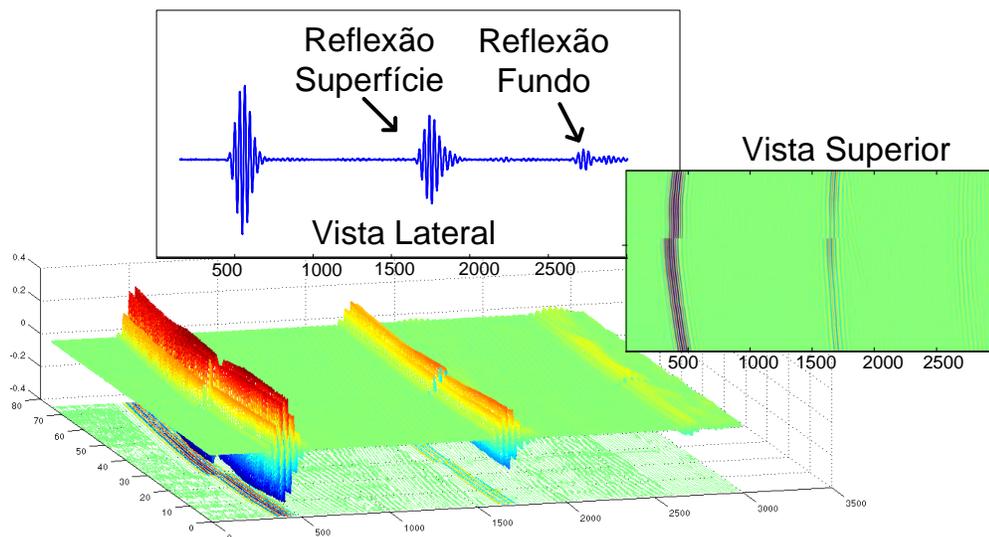


Figura 4 - Frente de Onda - Incidência Direta do Sinal Projetor-Hidrofone e Reflexões.



Nota-se uma descontinuidade na frente de onda na posição do 100º hidrofone causada pelo controle falho do posicionamento do hidrofone dentro do Tanque. Neste ponto da medição ocorreu uma torção do cabo do hidrofone, a partir da qual se iniciou um novo padrão de referência entre projetor e hidrofone.

b. Amostras Fracionárias

Em seguida foi implementado um algoritmo de formação de feixes direcionais por meio da técnica de amostras fracionárias. Sabe-se que o formador de feixes utiliza o atraso em amostras da frente de onda, obtido a partir do atraso calculado inicialmente através da distância e do tempo. Como estas amostras são números inteiros, sua variação é discretizada e pode gerar degraus indesejáveis no processamento direcional dos dados e significativa perda da resolução teórica do arranjo de hidrofones. Empregou-se então a técnica das Amostras Parciais com interpolação *spline* cúbica [3]. O efeito destas técnicas pode ser visualizado na Figura 5.

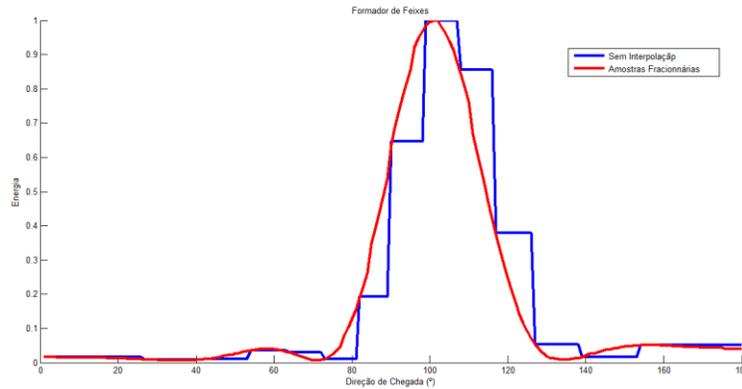


Figura 5 - Formador de Feixes Empregando Amostras Fracionárias.

c. Posicionamento de Fontes Sonoras

Para obtenção do posicionamento da fonte sonora por métodos passivos foram processados os sinais dos hidrofones iniciais e finais do arranjo, onde se obteve a direção de chegada dos sinais. O diagrama de irradiação do arranjo em linha empregando 30 elementos, espaçados de 1cm é apresentado na Figura 6 e utilizado para a obtenção da direção da fonte sonora.

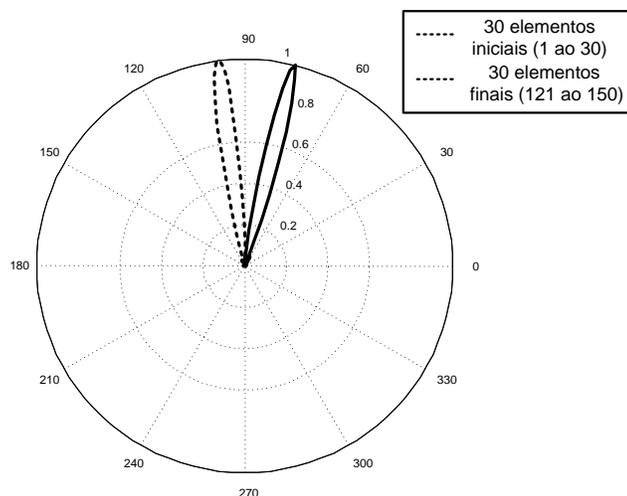


Figura 6 – Diagrama de Irradiação de Arranjos em Linha de 30 Elementos.

Assim a posição da fonte sonora foi calculada a partir das marcações angulares extraídas da extremidade direita e esquerda do arranjo respectivamente. O formador de feixes apresentado na Figura 7a indica a direção de chegada de 75° em relação ao arranjo com os elementos da extremidade esquerda.

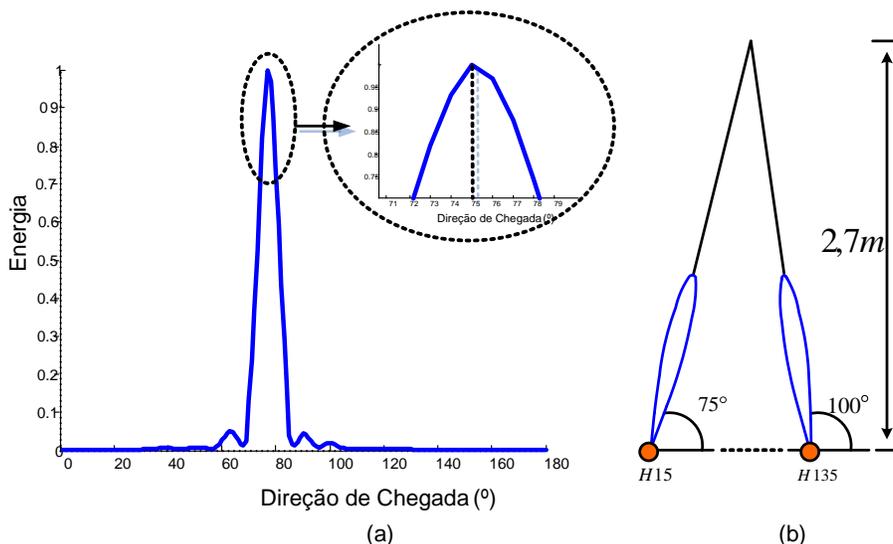


Figura 7 – (a) Direção de Chegada do Formador de Feixes do Arranjo em Linha de 30 Elementos; (b) Determinação da Distância entre o Arranjo e a Fonte.

De forma similar, obteve-se o ângulo de 100° em relação ao arranjo com os elementos da extremidade direita. As marcações obtidas permitem a determinação de duas “linhas de posição” em cuja interseção está localizada a fonte sonora. Daí calcula-se que a menor distância (projeção ortogonal) entre a fonte e o arranjo em linha é de 2,7 metros, conforme ilustra a figura 7b.



d. Diretividade do Arranjo linear

De forma similar à análise da Figura 2 foram reproduzidos os três casos a partir dos dados reais de um arranjo. Estas novas análises são apresentadas na Figura 8:

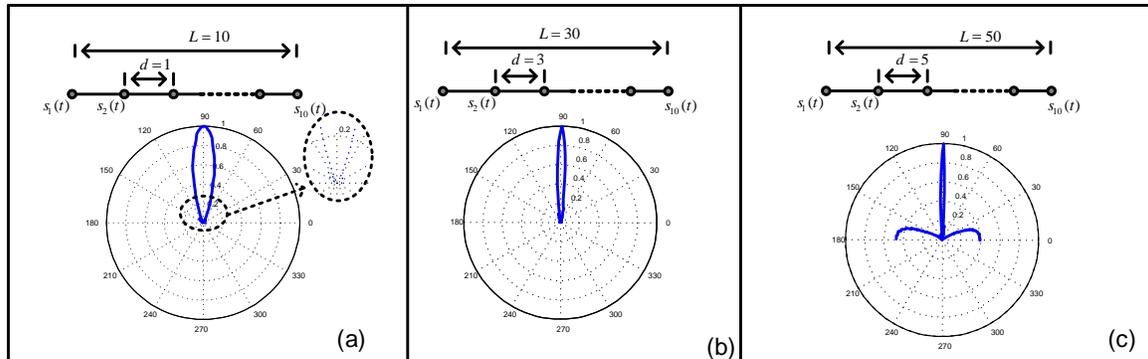


Figura 8- Diagrama de irradiação – Dados Reais:

(a) caso base – $L=10/d=1$; (b) aumento de $L=30/d=3$; (c) aumento de $L=50/d=5$.

Nota-se na Figura 8 que o efeito da ambigüidade não é observado, uma vez que se sabe de antemão o posicionamento da fonte sonora. Novamente realizam-se as duas análises a partir do caso base, como mostrado na Figura 2 (b) e (c):

Em (b) verifica-se a relação entre o tamanho L do *array* e a maior diretividade.

Em (c) nota-se o aparecimento dos *aliasings*.

4. Conclusões

O Tanque Hidroacústico se presta como ferramenta de avaliação de sistemas acústicos voltados para arranjos em escala reduzida, o que permite uma avaliação de ferramentas computacionais de processamento de sinais, com dados realísticos, a muito menor custo se comparado a experimentos em escala real, no mar. Em trabalhos futuros poderão ser realizadas simulações de arranjos cilíndricos de hidrofones (CHA), outras geometrias de arranjos, e sinais de banda larga, simulando ruído de cavitação irradiado por navios.

Este experimento possibilitou a análise de sinais provenientes de arranjos lineares, semelhantes à *arrays* rebocados. Foram aplicadas técnicas usuais para a determinação do posicionamento de fontes sonoras por métodos acústicos passivos, além da análise da sensibilidade destes equipamentos em função de seus comprimentos, espaçamentos entre sensores e números total de hidrofones empregados.

Os resultados teóricos, apresentados nos diagramas de irradiação da Figura 2 serviram de referência para a comparação com os resultados práticos da Figura 8. Os efeitos observados na teoria foram verificados na prática, tais como resolução e surgimento de lóbulos secundários em função da variação dos parâmetros do arranjo.

Demonstrou-se então, que experimentos em escala reduzida, em Tanque, são capazes de reproduzir situações reais num ambiente controlado. Isto permite a avaliação de algoritmos de processamento de sinais sem a necessidade de testes no mar (específicos



para sistemas que já foram testados e possuem maior grau de maturidade) durante a fase de desenvolvimento do projeto.

A defasagem encontrada no comprimento entre a fonte ao receptor (2,6m - real e 2,7m – calculado a partir do processamento de sinais) deve-se a fatores como a resolução do arranjo, incertezas na medição e da descontinuidade no padrão de recepção dos sinais observado a partir do 100° hidrofone, ocasionado pelo controle falho do posicionamento do hidrofone dentro do Tanque.

O emprego de um sistema automático de posicionamento de sensores irá aprimorar a qualidade dos resultados obtidos devido ao aumento na precisão (que tipicamente poderão ser menores que 1mm) e redução significativa do tempo para a realização dos testes.

5. Referências

- [1] Souza, L. A. L., Princípios de Sonar, Documento IPqM-013-0177-ET/97, 1997.
- [2] Rodrigues P. S. M., “Estudo e Análise de Métodos Empregados em Array Cilíndrico Passivo para Determinação da Direção de Fontes Sonoras”, Dissertação Mestrado – COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- [3] Felzky, M. A., Uma Contribuição às Técnicas de Localização de Fontes Sonoras Através de Um Sistema Sonar Passivo Utilizando Filtros Fracionários, Tese de M.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.