

Análise de erros de aproximação geométrica para conformação de feixes em sonares passivos

Luma Rodrigues dos Santos, Fabricio de Abreu Bozzi, Fernando de Souza Pereira Monteiro

Grupo de Sistemas Acústicos Submarinos

Instituto de Pesquisas da Marinha

rds'luma@gmail.com

Resumo: Este artigo apresenta a análise de erro do conformador de feixes atraso-e-soma ao aproximar a geometria de um arranjo de hidrofones em formato de arco elíptico em um arranjo linear. Neste trabalho foram avaliados os *beamforming* no domínio do tempo e da frequência. O estudo utilizou dados reais do sistema de monitoramento passivo (projeto de Vigilância & Informações Passivas em Portos).

Palavras-chave: Arranjo de hidrofones; sonar passivo; conformação de feixes.

Abstract: This article presents the delay-and-sum beamformer error analysis when approaching the elliptical arch hydrophone array into a linear array. In this work the *beamforming* was evaluated at time and frequency domain. The study used real data from the passive monitoring system (VIPP project).

Keywords: Hydrophone array; passive sonar; *beamforming*.

1. Introdução

O projeto VIPP consiste em uma adequação do projeto SONAP (Sonar Passivo Nacional) para desenvolver a área de sonar passivo. No VIPP, um arranjo de hidrofones é fixado em um cais, adquirindo e processando informações em tempo real. O presente trabalho visa aplicar o algoritmo de conformação de feixes, *beamforming* em inglês, em dados coletados do VIPP. Também se propõe a analisar e quantificar os erros de marcação e dispersão da energia na saída do *beamforming*, ao aproximar a geometria verdadeira do arranjo de hidrofones, que consiste em um arco elíptico, em um arranjo linear.

2. Descrição dos Dados

O arranjo de hidrofones utilizado consiste em 32 *staves*, resultando em 32 canais distribuídos em um arco elíptico, o qual se encontra instalado em um cais. Os dados foram coletados utilizando uma frequência de amostragem de 31250 Hz, um filtro passa-baixa *anti-aliasing* de 6,5 kHz e posteriormente foram filtrados com um passa-alta de 100 Hz. O primeiro conjunto de dados analisado é de um navio *offshore* e o segundo é um cruzamento de duas lanchas de pequeno porte que passam pelo cais em alta velocidade.

3. O método da Conformação de Feixes

A conformação de feixes é um filtro espacial que pode ser utilizado para localização de fontes sonoras. O *beamforming* convencional, baseia-se na soma construtiva e destrutiva de sinais atrasados, sendo a resposta máxima do filtro, a indicação da presença de fontes incidentes. Considere uma onda sonora omnidirecional, que possa ser tratada como uma onda plana, proveniente de uma fonte pontual. Um arranjo com M sensores é utilizado para captar o sinal desta fonte. Cada sensor capta o sinal em termos da pressão sonora, que depende do tempo e da posição do sensor no espaço: $f(x, t) = p(x, t)$. Dessa forma, temos um sinal de pressão para cada sensor m , p_m , onde $m = 1, 2, 3, \dots, M$. Tomando o ponto O do arranjo como a referência, temos que cada sensor M está localizado em r_m .

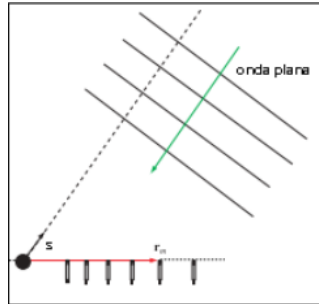


Figura 3.1: Onda plana incidindo sobre arranjo de sensores. Adaptado de [1].

Como indica a figura 3.1, \vec{s} é um vetor unitário na direção de incidência da onda plana sobre o arranjo. A partir disso é possível calcular o atraso relativo, em segundos, entre a referência e cada sensor m , no caso de ondas planas como:

$$\Delta_m(s) = \frac{\vec{r}_m \cdot \vec{s}}{c},$$

onde c é a velocidade do som no meio.

Definimos a equação do *beamforming* no tempo, conhecida como atraso-e-soma, de acordo com [3]:

$$b(s, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m(s)).$$

O termo w_m é o vetor de pesos, que pode ser projetado de forma a maximizar a saída da *beamforming*.

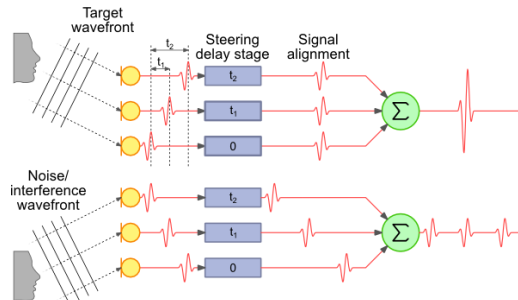


Figura 3.2: Esquema do algoritmo de atraso-e-soma [2].

A figura 3.2 representa esquematicamente o algoritmo atraso-e-soma. O sinal sonoro é captado por cada sensor em um tempo (em relação a referência) Δ_m diferente. A cada sinal é então aplicada sua respectiva ponderação w_m . A seguir, valores de $\Delta_m(s, t)$ são calculados para cada canal referente a direções de varredura do feixe. Para uma dada direção \vec{s} , referente aos ângulos (θ, φ) , cada canal é atrasado em $\Delta_m(\theta, \varphi, t)$. Para este ângulo, M canais são somados e normalizados, obtendo-se então o feixe $b(\theta, \varphi, t)$. A energia para cada feixe $b(\theta, \varphi, t)$ pode ser calculada onde os máximos, de (θ, φ) correspondem a uma estimativa da direção da fonte

sonora. Neste artigo a aproximação em relação à geometria do arranjo será analisada. Inicialmente o arranjo é considerado como um arco elíptico, e será considerada a referência. Posteriormente é considerada a geometria linear com sensores igualmente espaçados. A aproximação linear é útil quando não se tem informação sobre a real posição dos sensores no arranjo ou no caso de haver alguma folga e conseqüentemente algum deslocamento de algum hidrofone, além da bibliografia para arranjos lineares ser facilmente encontrada na literatura de processamento de arranjos. Desta forma, o impacto ao realizar esta aproximação será analisado por meio das dispersões da energia calculada na saída do *beamforming*.

4. Resultados

Para os conjuntos de dados disponibilizados, foram realizadas as comparações em relação a geometria do arranjo (arco elíptico ou linear) no domínio do tempo e no domínio da frequência. Na implementação foi aplicado um filtro passa-faixa de 1500 Hz a 5 kHz, uma vez que a maior intensidade dos sinais foi detectada nessa banda. A análise comparativa foi feita calculando-se as dispersões em torno do valor máximo para cada instante de tempo. Os picos foram calculados e em seguida sua largura angular a meia potência (-3 dB), como exemplificado a figura 4.1.

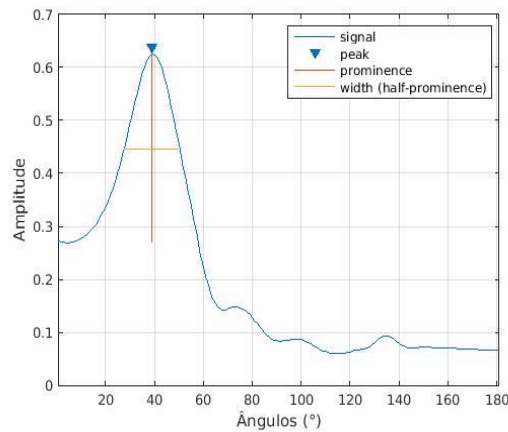


Figura 4.1: Exemplo de um pico em um bloco de tempo, com amplitude, meia potência e largura angular calculadas. A dispersão a meia potência é representada por *width (half prominence)*, em amarelo.

a) Domínio do tempo

a.1) Offshore

Os gráficos abaixo representam, respectivamente: o *beamforming* no tempo para o arranjo em arco elíptico e o arranjo linear:

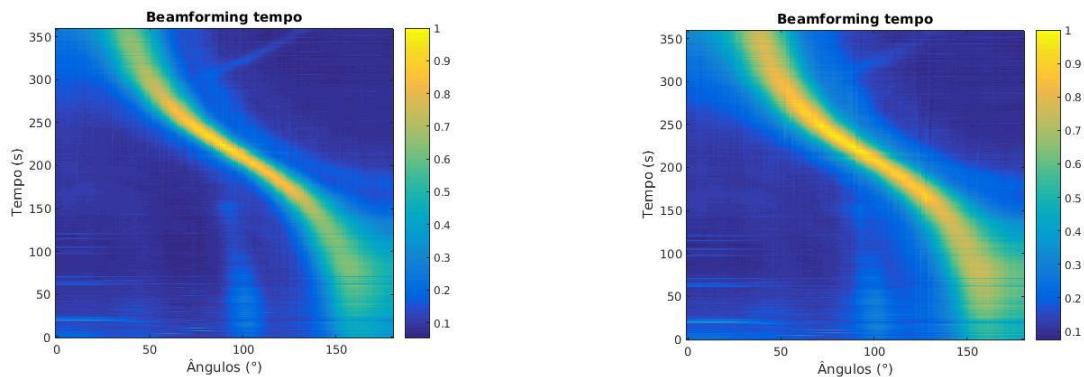


Figura 4.2: *Beamforming* no domínio do tempo: arco elíptico (a esquerda) e arranjo linear (a direita).

Qualitativamente é possível notar um grau de semelhança entre os gráficos, entretanto é necessário realizar uma análise quantitativa. A figura 4.3 mostra as dispersões em torno do valor máximo ao longo do tempo.

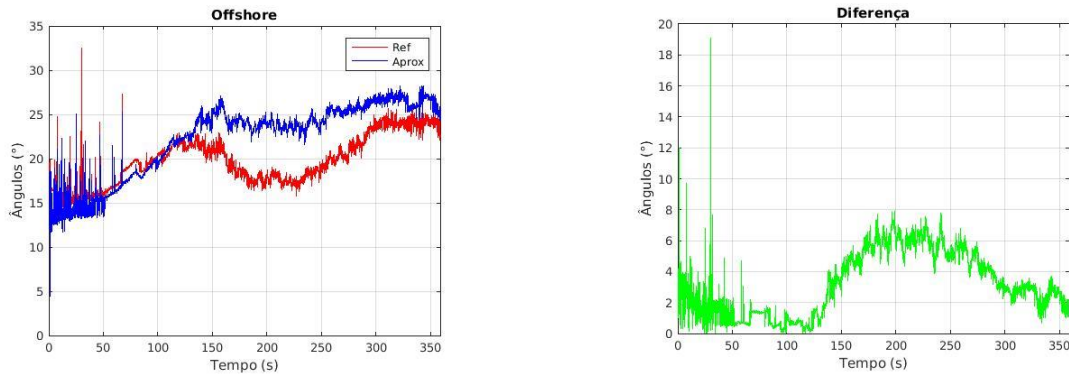


Figura 4.3: Comparação entre as dispersões da referência e da aproximação (a esquerda). Diferença entre as curvas de referência e aproximação.

A curva em azul na figura 4.3 demonstra o comportamento das dispersões considerando o arranjo linear. As dispersões até aproximadamente 75 s variam bastante em relação ao restante dos dados, o que pode ser explicado pela direção do contato ser próxima a borda do arranjo, de 180° a 160° onde arranjos lineares não apresentam boa diretividade. Considerando esse trecho inicial, a máxima diferença obtida entre as dispersões foi de $19,07^\circ$, no entanto, este valor pode ser considerado como um ponto espúrio. Considerando o trecho de interesse apenas após 75s, a máxima diferença obtida foi de $7,91^\circ$, um valor equivalente a 31% da máxima dispersão da referência, que é de $25,65^\circ$. É importante notar que as dispersões da referência (arranjo em arco elíptico) são menores que as dispersões da aproximação (arranjo linear) na maior parte do gráfico.

a.2) Lanchas

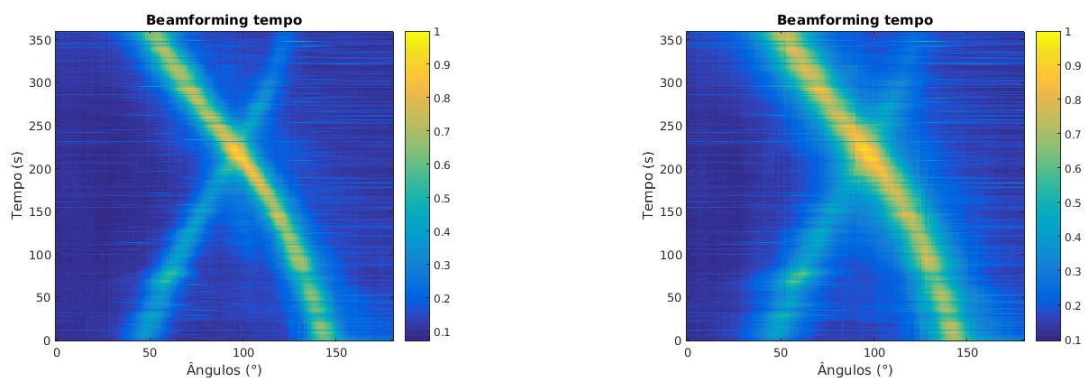


Figura 4.4: *Beamforming* no domínio do tempo: arco elíptico (a esquerda) e arranjo linear (a direita)

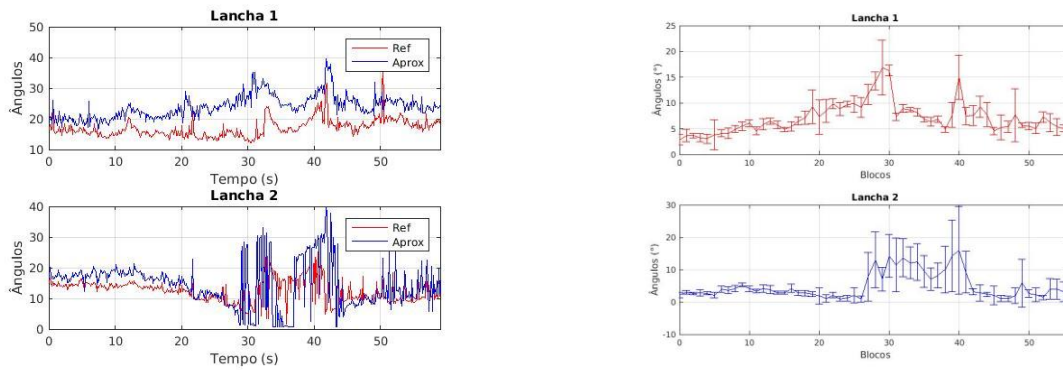


Figura 4.5: a) Comparação entre as dispersões da referência e da aproximação (a esquerda). b) Diferença média e desvios-padrão das lanchas 1 e 2.

Para o caso das lanchas, o cruzamento das mesmas ocorre em torno de 90° , como pode ser visto na figura 4.4. Por serem dois contatos, há um gráfico de dispersão e de diferença para cada um. Nesta situação a análise das diferenças será feita em termos das médias.

As médias calculadas referem-se a 1s de sinal, que para a configuração adotada, consistem em 8 blocos de sinais. Assim, os gráficos da figura 4.5b foram obtidos em relação aos blocos de dados.

Para a Lancha 1, obtém-se uma diferença média máxima entre as dispersões de $16,85^\circ$, enquanto que para a Lancha 2, obtém-se $15,92^\circ$. É importante ressaltar que entre os blocos 26 a 42, as dispersões médias e os desvios-padrão (representados pelas barras de erros) são muito mais altos que no restante dos blocos. Isso pode ser explicado devido ao cruzamento que ocorre entre as duas lanchas nesse trecho, que faz com que a região de análise esteja mais dispersa.

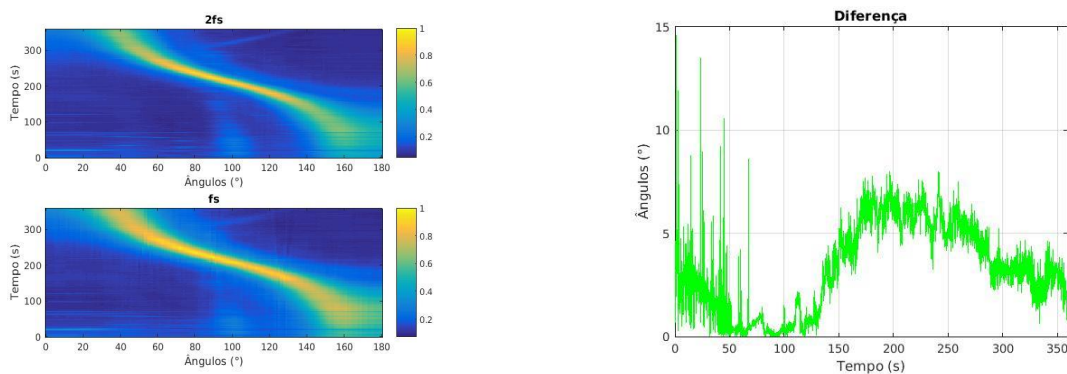


Figura 4.6: *Beamforming* no tempo com $2fs$ (acima, a esquerda), *beamforming* no tempo com fs (abaixo, a esquerda) e diferença entre as dispersões (a direita).

A interpolação foi realizada, considerando uma taxa de amostragem de $2fs$. Baseado em [4], espera-se haver uma diminuição do erro, ou seja, ganho em resolução e aumento do tempo de processamento do algoritmo. Tem-se acima os gráficos do *offshore* e da diferença entre as dispersões (figura 4.6). Nota-se um ganho em resolução no gráfico de $2fs$ em relação ao de fs . O tempo de processamento do *beamforming* no caso sem interpolação (fs) foi apenas 48% do tempo de processamento do caso em que a interpolação foi realizada ($2fs$). A maior diferença entre os casos (após 75 s) foi de $7,97^\circ$. Ainda de acordo com [4], a vantagem de utilizar o domínio da frequência em relação ao domínio do tempo é a minimização de erros devido ao truncamento de amostras do sinal. O domínio do tempo é usado quando há tolerância a erros e possui simples implementação e baixo custo computacional.

b) Domínio da frequência

b.1) Offshore

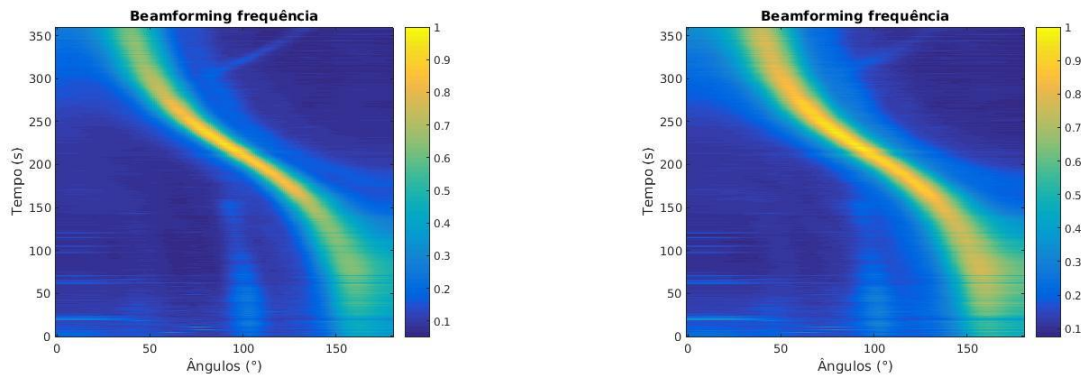


Figura 4.7: *Beamforming* no domínio da frequência: arco elíptico (a esquerda) e arranjo linear (a direita).

Analisando o gráfico das dispersões para o domínio da frequência:

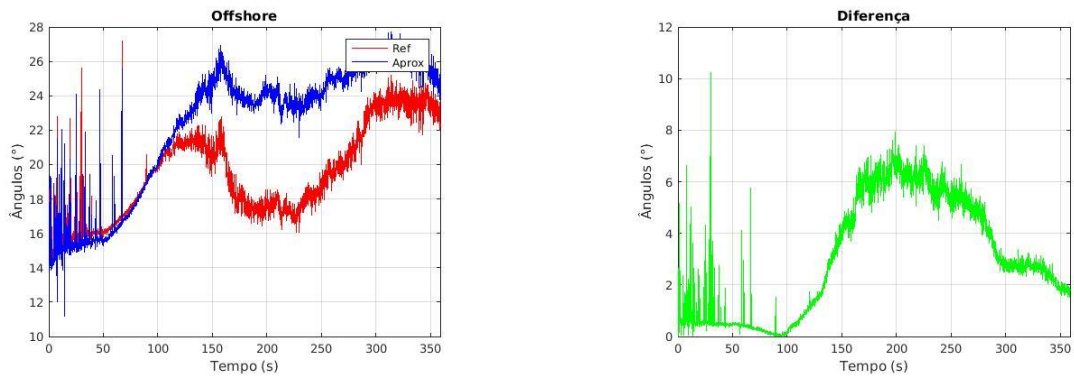


Figura 4.8: Comparação entre as dispersões da referência e da aproximação (a esquerda). Diferença entre as curvas de referência e aproximação.

De acordo com a figura 4.8 (considerando as dispersões a partir de 75 s), a máxima diferença também foi de $7,91^\circ$, cerca de 31% do valor da máxima dispersão de referência, de $25,21^\circ$. Neste caso também é notável o alto grau de semelhança entre os gráficos da figura 4.7.

b.2) Lanchas

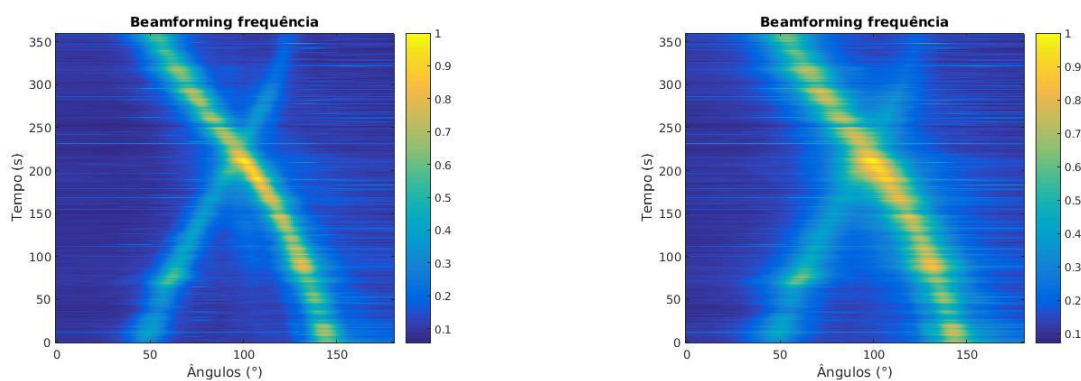


Figura 4.9: *Beamforming* no domínio da frequência: arco elíptico (a esquerda) e arranjo linear (a direita).

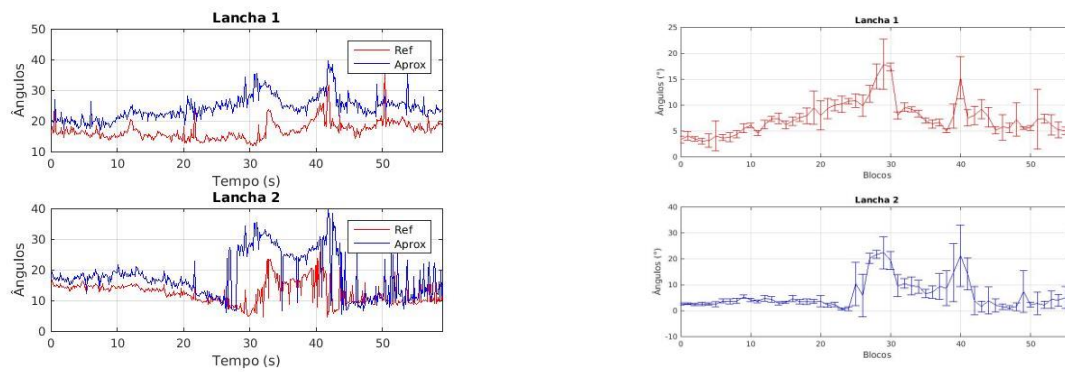


Figura 4.10: a) Comparação entre as dispersões da referência e da aproximação (a esquerda).
b) Diferença média e desvios-padrão das lanchas 1 e 2.

Analisando primeiro a Lancha 1 na figura 4.10b, a diferença média máxima foi de $17,82^\circ$, enquanto para a Lancha 2 foi de $22,20^\circ$. Entretanto, assim como no caso do domínio do tempo, houve uma região (blocos 22 a 42) onde a dispersão foi bem maior que o restante dos blocos. Esta região indica o cruzamento dos contatos, como já explicado anteriormente.

5. Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi comparar a aproximação de um arranjo de 32 hidrofones em arco elíptico em um arranjo completamente linear, tendo sido alcançado. Os resultados do *beamforming* tanto para a condição de referência (arranjo em arco) como para a aproximação (arranjo linear) se mostraram qualitativa e quantitativamente próximos.

Nota-se que as dispersões em torno dos valores máximos de energia para o caso do arranjo considerado linear foram superiores as dispersões para o caso do arranjo em arco. Comparando com os cálculos anteriormente efetuados, das diferenças angulares, verifica-se que estão de acordo com o esperado.

Para caso das lanchas, os dois contatos foram adequadamente representados pelo *beamforming*. Entretanto, somente nas bordas os picos de energia mostraram-se bem discriminados. Na região de cruzamento, entre aproximadamente 85° a 110° , houve interferência entre os máximos, os quais foram somados e ao longo do tempo novamente separados, tornando esta janela de tempo bastante dispersa em relação as demais. Por conta disso, esta região foi a mais crítica para os cálculos e uma estratégia diferente da utilizada para o *offshore* foi adotada: médias ao longo de pequenos blocos de dados.

Na segunda aproximação proposta, a interpolação dos dados, foi demonstrado apenas o *beamforming* com $62,5$ kHz, dobro da frequência de amostragem original. Neste caso apenas o navio *offshore* considerando o arranjo em arco elíptico foi analisado. Como citado anteriormente, o tempo de processamento ao realizar a interpolação dos dados foi muito superior ao tempo de processamento sem a interpolação. Para a situação estudada, o ganho em resolução não foi significativo.

Neste trabalho apenas duas situações serviram como base para o estudo: o deslocamento de um navio *offshore* e o cruzamento de duas lanchas. Em trabalhos futuros seria de grande interesse ter acesso a maiores bases de dados, de forma que fosse possível realizar uma análise estatística mais apurada.

6. Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Instituto de Pesquisas da Marinha por me proporcionar a oportunidade estagiar no Grupo de Sistemas Acústicos Submarinos. Agradeço ao tenente Fabricio Bozzi por me orientar neste estudo. Agradeço também aos engenheiros William e Fernando por todo o conhecimento transmitido na área de processamento de sinais, essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Enfim, agradeço a todo Grupo, que me recebeu muito bem.

7. Referências

[1] BRÜEL & KJÆR, “Techical Review: Beamforming”, Brüel&Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, Denmark, 2004

[2] Delay Sum Beamforming. The Lab Book Pages, 2018. Disponível em: <<http://www.labbookpages.co.uk/audio/beamforming/delaySum.html>>. Acesso em 20 out. 2018.

[3] NIELSEN, R.O., “Sonar Signal Processing”, Norwood, Massachusetts, USA,1991

[4] BOZZI, F. A.; OLIVEIRA, F.; MONTEIRO, F. S. P.; CARDOSO, S. V.; Soares-Filho, W.; BARREIRA, L. M. “Análise comparativa da formação de feixes atraso e soma no domínio do tempo e da frequência para sinais de banda larga”. In: Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina, 2016, Rio de Janeiro. XII Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina, 2016. v.1.