

ANÁLISE DO NÚMERO DE SENSORES UTILIZADOS EM UM ARRANJO CILÍNDRICO DE HIDROFONES UTILIZANDO A RELAÇÃO SINAL RUÍDO.

FABRICIO DE ABREU BOZZI

INSTITUTO DE PESQUISAS DA MARINHA

RUA IPIRU, N 02, CACUIA, ILHA DO GOVERNADOR, RIO DE JANEIRO

BOZZI@IPQM.MAR.MIL.BR

NATANAEL NUNES DE MOURA

COPPE-UFRJ

AVENIDA HORÁCIO MACEDO, 2030, CIDADE UNIVERSITÁRIA, RIO DE JANEIRO

NATMOURA@LPS.UFRJ.BR

THIADO CIODARO XAVIER

COPPE-UFRJ

AVENIDA HORÁCIO MACEDO, 2030, CIDADE UNIVERSITÁRIA, RIO DE JANEIRO

XAVIER@LPS.UFRJ.BR

LEONARDO MARTINS BARREIRA

INSTITUTO DE PESQUISAS DA MARINHA

RUA IPIRU, N 02, CACUIA, ILHA DO GOVERNADOR, RIO DE JANEIRO

BARREIRA@IPQM.MAR.MIL.BR

JOSÉ MANOEL DE SEIXAS

AVENIDA HORÁCIO MACEDO, 2030, CIDADE UNIVERSITÁRIA, RIO DE JANEIRO

SEIXAS@LPS.UFRJ.BR

WILLIAM SOARES FILHO

INSTITUTO DE PESQUISAS DA MARINHA

RUA IPIRU, N 02, CACUIA, ILHA DO GOVERNADOR, RIO DE JANEIRO

WILLIAM@IPQM.MAR.MIL.BR*

Abstract— This paper presents studies to optimize the beamforming. The signals acquisition from a cylindrical array of 32 sensors was made synchronously, continuously and without loss of data. From the signal to noise ratio (SNR) obtained with experimental data, an estimate of the optimum number of sensors to be used in delay-and-sum beamforming technique was made.

Keywords— Signal Acquisition, Sonar, Beamforming, Hydrophone Array.

Resumo— Este trabalho apresenta estudos para a otimização na conformação de feixes. Foi feita a aquisição de sinais de um arranjo cilíndrico de 32 sensores de forma sincronizada, ininterrupta e sem perda de dados. A partir da relação sinal ruído (Signal Noise Ratio - SNR), obtida com dados experimentais, foi feita uma estimação do número ótimo de sensores a ser utilizado, considerando a técnica de formação de feixes atraso e soma.

Keywords— Aquisição de Sinais, Sonar, Conformação de feixes, Arranjo de Hidrofones.

1 O Sistema Sonar Passivo

O sistema SONAR (*Sound Navigation and Ranging*), presente nos submarinos, é parte fundamental para a operação destes. O sonar passivo é um sistema de monitoramento do cenário acústico submarino devendo apresentar suas informações de modo claro, rápido, preciso e da forma mais automática possível (Li, 2012).

O desenvolvimento de um sistema sonar passivo pode ser dividido, basicamente, em duas áreas: desenvolvimento de elementos hidroacústicos (hidrofones, transdutores e *staves*), sendo referida como parte molhada do sonar; e desenvolvimento do processamento de sinais (formação de feixes, tratamento de sinais, apresentação e análises), chamada de parte seca. A aquisição de sinais é considerada o “elo” entre a parte molhada e a parte seca. A Figura 1 apresenta os processos de um sonar passivo, desde a incidência de uma onda acústica até as análises utilizadas para detecção, acompanhamento e classificação de uma fonte sonora.

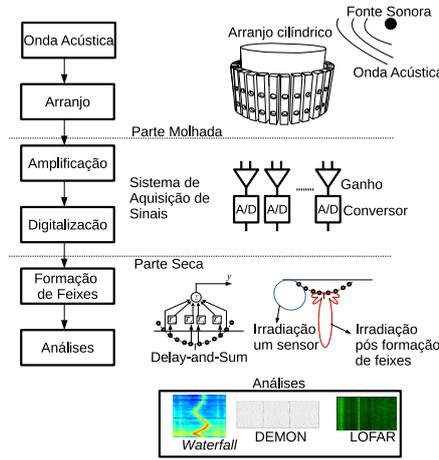


Figura 1: Processos de um sonar passivo.

1.1 Arranjo Cilíndrico de Hidrofones

O *Cylindrical Hydrophone Array* (CHA), consiste em um arranjo de *staves* (barrotes), agrupados de forma circular. O chamado *stave* é a estrutura em que residem hidrofones (sensores passivos, para captação de sinais acústicos submarinos) em resinas isolantes, minimizando os riscos de perda de suas propriedades elétricas e mecânicas e protegendo-os do contato direto com a água salgada. Além disso, são projetados de forma a abafar um dos lados dos hidrofones, com o objetivo de dar diretividade a cada sensor.

No presente estudo, os *staves* do CHA são compostos por três hidrofones ligados em série, de forma que apenas um sinal está disponível por *stave*. Assim, o CHA será considerado um arranjo circular uniforme (*Uniform Circular Array - UCA*).

1.2 Sistema de Aquisição de Sinais

O condicionamento dos sinais recebidos pelos *staves* consiste na amplificação e na digitalização do sinal. O dado coletado do sistema de aquisição é resultante de uma combinação de ruídos eletrônicos do sistema de aquisição, ruídos acústicos produzidos pela flutuação de pressão do mar no local do sensor além de fontes sonoras, quando existentes (Burdic, 1991). Para um sistema sonar composto de um arranjo de sensores, é necessário que a digitalização seja feita de maneira síncrona.

1.3 Formação de Feixes

A formação de feixes (*Beamforming*, em inglês) é a parte central do processamento dos sinais de arranjos de sensores. Sendo considerado um filtro espacial, ele permite aceitar o sinal de determinada direção e rejeitar interferências e ruídos de outras. Ou seja, apresenta a capacidade de focar a recepção em uma direção específica.

A técnica convencional de *beamforming* é o filtro de atraso-e-soma (*delay-and-sum*) (Van Trees, 2004). Esta técnica se baseia no conceito de interferência construtiva e destrutiva de ondas: sinais desalinhados no tempo tendem a se anular quando somados. Assim, a soma desses sinais será maior quanto melhor for o alinhamento temporal entre eles. O ângulo cujo atraso maximiza a energia na saída do filtro corresponde ao ângulo de incidência da frente de onda.

O UCA é comumente utilizado em aplicações cujo interesse é obter uma resposta direcional uniforme para todo ângulo de azimute (Jackson et al., 2015). A Figura 2 apresenta um modelo de UCA, de raio r e com 4 sensores espaçados por d , proposto por (Jackson et al., 2015). São assumidos D sinais incidentes, que coincidem com o plano do arranjo.

A saída do UCA é dada por:

$$y(k) = w^H x(k), \quad (1)$$

onde k é o índice da k -ésima amostra, w é o vetor peso $w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_N]^T$ e $x(k)$ é o sinal recebido nos elementos:

$$\begin{aligned}
x(k) &= [v(\phi_1) \ v(\phi_2) \ \dots \ v(\phi_D)] \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \\ \vdots \\ s_D(k) \end{bmatrix} + \eta(k) \\
&= \mathbf{V}s(k) + \eta(k).
\end{aligned} \tag{2}$$

Na Equação 2, $v(\phi)$ é o vetor resposta do arranjo (*Array Response Vector - ARV*), ou seja, \mathbf{V} é uma matriz $N \times D$ (*Array Manifold*), e s_n é o sinal complexo analítico que representa a frente de onda da direção n . O ruído é representado por η . Para o UCA, o ARV é dado por

$$v(\phi) = \begin{bmatrix} g_0(\phi)e^{-j\kappa p_0} \\ g_1(\phi)e^{-j\kappa p_1} \\ \vdots \\ g_{N-1}(\phi)e^{-j\kappa p_{N-1}} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

onde κ é obtido por:

$$\kappa = -\frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \sin(\theta) \cos(\phi) \\ \sin(\theta) \sin(\phi) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix} = -\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{u}. \tag{4}$$

Quando se assume $\theta = 90^\circ$ (todos elementos no mesmo plano), $\kappa = -\frac{2\pi}{\lambda} [\cos(\phi) \sin(\phi) \ 0]^T = \beta [\cos(\phi) \sin(\phi) \ 0]^T$. Os ganhos $g_0(\phi), g_1(\phi), \dots, g_{N-1}(\phi)$ são números reais, representando a resposta de cada sensor para cada direção ϕ (ganhos direcionais dos sensores).

Para a posição do n -ésimo elemento, temos $p_n = [r \cos(\phi_n) \ r \sin(\phi_n) \ 0]^T$, onde $\phi_n = \frac{2\pi n}{N}$ para $n = 0, \dots, N-1$. No caso de elementos isotrópicos, $g_0(\phi) = g_1(\phi) = \dots = g_{N-1}(\phi) = 1$. Considerando a variação dos ganhos de acordo com os ângulos, a Equação 3 pode ser reescrita por

$$v(\phi) = \begin{bmatrix} g(\phi)e^{-j\beta r \cos(\phi)} \\ g\left(\phi - \frac{2\pi}{N}\right) e^{-j\beta r \cos\left(\phi - \frac{2\pi}{N}\right)} \\ \vdots \\ g\left(\phi - \frac{2(N-1)\pi}{N}\right) e^{-j\beta r \cos\left(\phi - \frac{2(N-1)\pi}{N}\right)} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

onde assume-se que os N sensores têm ganho máximo na direção radial, para fora do centro do arranjo. Assim, a função de diretividade ou (*beam pattern*) para esta geometria é dada por

$$\begin{aligned}
D(\phi) &= w^H v(\phi) \\
&= \sum_{n=0}^{N-1} w_n g_n(\phi - \phi_n) e^{j\beta r \cos(\phi - \phi_n)}.
\end{aligned} \tag{6}$$

A função de diretividade para o arranjo circular com ganhos direcionais não possui equacionamento fechado. Aproximações pela função de Bessel podem ser aplicadas em casos de elementos omnidirecionais, como apresentado em (Van Trees, 2004). Como os sensores estudados são direcionais, estas aproximações não serão tratadas aqui.

O processo de implementação do *delay-and-sum* no arranjo circular é explicado com auxílio da Figura 3. Esta figura ilustra um arranjo com geometria circular, e uma frente de onda chegando de

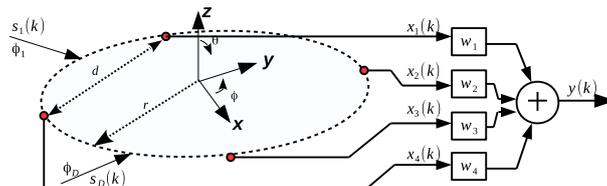


Figura 2: Arranjo circular uniforme de raio r e com 4 sensores espaçados por d .

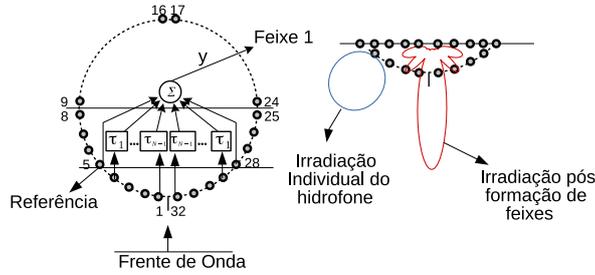


Figura 3: Diagrama de implementação do *beamforming* para o arranjo circular.

determinada direção. Utiliza-se um setor do arranjo contendo um número específico de elementos (K) para formar o feixe da direção referente à frente de onda (no caso ilustrado, utilizam-se os elementos 1 a 5 e 28 a 32)¹. Com esta seção escolhida, aplicam-se os atrasos nos elementos de forma a compensar os diferentes percursos da frente de onda até um elemento de referência.

O procedimento de atrasar (τ_n) é uma forma de “sincronizar” os sinais e equivale a transformar o arco do arranjo circular em um arranjo em linha desigualmente espaçado. Este fato também pode ser interpretado como uma projeção dos sinais em uma corda (arranjo em linha equivalente). Após aplicados os respectivos atrasos, somam-se os sinais deste setor, o que resulta em um feixe referente à direção *broadside*, perpendicular ao arranjo em linha equivalente. Este procedimento é repetido utilizando-se elementos adjacentes. Assim, obtêm-se S feixes formados, onde S é o número de sensores. Devido à geometria circular do arranjo, os atrasos são fixos, mudando-se apenas os elementos a serem utilizados na projeção.

2 Estimação do Número de Sensores Utilizando a Razão Sinal Ruído

Neste estudo, desenvolveu-se um método para determinar o número de elementos a ser utilizado no arco do arranjo circular, baseado na razão sinal ruído, levando em consideração a análise estatística de sinais experimentais.

Primeiramente, assume-se a hipótese de representação de um cenário que de ruído ambiente, ou seja, sem a presença de uma fonte identificável. Posteriormente, um outro cenário representa o sinal (por exemplo, uma embarcação gerando ruído de cavitação), sabidamente em meio a ruído, e em direção conhecida do arranjo. A SNR é dada por (Li, 2012)

$$SNR = \frac{E[s^2]}{E[n^2]}, \quad (7)$$

onde s representa o sinal e n o ruído. A SNR para K sensores formando o arco, assumindo independência dos canais, é dada por

$$SNR = \frac{E[s^2]}{E[n^2]} = \frac{\sigma'^2}{\sum_{i=1}^K \sigma_{n_i}^2} - 1 \quad (8)$$

onde $\sigma_{n_i}^2$ é a variância do i -ésimo canal coletado sem presença de fonte (ruído ambiente), e σ'^2 é a variância coletada com a presença de uma fonte sonora após a formação de feixes (utilizando o feixe na direção a fonte).

3 Simulação para um Sinal Determinístico

Com objetivo de verificar o comportamento da relação sinal ruído, de acordo com o número de sensores utilizados no arco, é proposta a realização de uma simulação com um sinal determinístico. Esta simulação consiste em gerar uma série temporal para um arranjo circular com 32 canais e raio 0,6 metros, supondo uma frente de onda incidindo no arranjo.

Um modelo de arranjo circular considerando sensores diretivos foi proposto em (Jackson et al., 2015) e será utilizado aqui. Foi gerado um sinal senoidal com componentes de $1kHz$, $3kHz$ e $7kHz$ em meio a ruído Gaussiano. Foi considerado que a frente de onda incidia na direção 180° , o que equivale ao sensor 16 (a razão sinal ruído para este canal de referência foi de 9,7dB). Este sinal foi então propagado para os sensores de acordo com a Equação 2.

¹Para este arco, dizemos que o feixe é centrado aos canais 1 e 32, assumindo a simetria par.

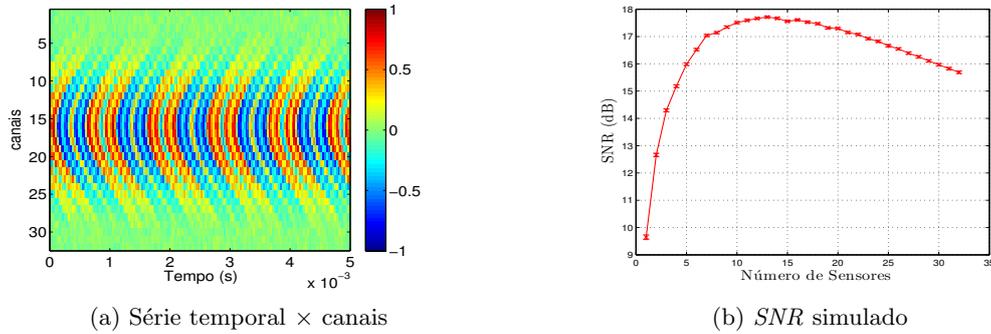


Figura 4: Característica da SNR com dados simulados.

A Figura 4a mostra as amplitudes dos sinais recebidos em cada um dos 32 sensores do arranjo. Percebe-se que os elementos opostos ao canal 16 recebem o sinal bastante atenuado devido aos elementos serem direcionais.

A Figura 4b mostra a SNR em função do número de sensores utilizados no arco. Percebe-se que a SNR aumenta na medida que utilizamos mais sensores, atingindo um valor máximo seguido de uma queda. A queda da SNR é devida à soma dos sinais da parte oposta do arranjo conter uma parcela de ruído preponderante.

4 Experimento com um Arranjo Cilíndrico de Hidrofones em uma Enseada

Com o objetivo de coletar dados, monitorar o ambiente marinho e avaliar os processos envolvidos em um sistema de sonar passivo, foi construído um arranjo cilíndrico de hidrofones e realizado um experimento com este arranjo fixado em um cais de uma enseada.

4.1 Tecnologia Empregada para Coleta de Dados

Para a aquisição de dados utilizou-se o arranjo CHA descrito na Seção 1.1. O arranjo construído é composto de 32 *staves* e tem 1 metro de diâmetro. A Figura 5 apresenta o arranjo de hidrofones.



Figura 5: Arranjo Cilíndrico de Hidrofones.

O sistema de aquisição é composto por um amplificador de sinais, uma placa digitalizadora e um computador. Utilizou-se um amplificador de sinais de 32 canais e para os sinais coletados no experimento, utilizou-se um ganho de $60dB$.

Após o condicionamento, foi realizada a digitalização do sinal. Utilizou-se uma placa digitalizadora de 32 canais, que utiliza um conversor AD do tipo *Sigma-Delta ADC*, 24 – bits e digitaliza simultaneamente todos os canais a uma taxa de 31,25kHz. As entradas são diferenciais para reduzir ruídos de modo comum. A resposta em frequência do sistema de aquisição é mostrado na Figura 6 onde ressalta-se a utilização de um filtro *anti-aliasing* em $-3dB$ em 8kHz.

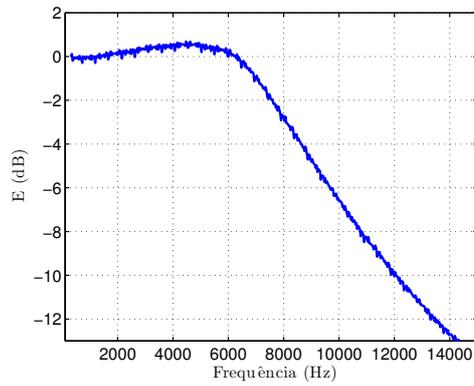


Figura 6: Resposta em frequência do sistema de aquisição.

4.2 Local da Coleta

Com o arranjo instalado no cais, posicionou-se um bote a uma distância de cerca de 30 metros. Efetuou-se uma gravação com o motor do bote desligado, o que foi considerado o cenário de ruído ambiente. Em seguida, foi dada a partida no motor do bote e o mesmo se afastou mantendo velocidade aproximadamente constante. Este cenário é considerado como o trecho de sinal. Um croqui do local de instalação e o referencial dos sensores são apresentados na Figura 7.

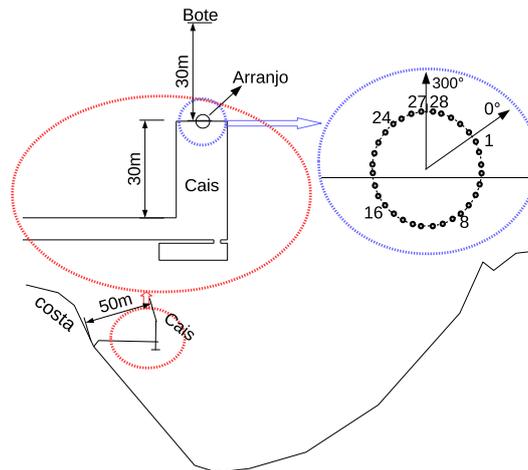


Figura 7: Croqui do local de instalação e referencial dos sensores.

A Figura 8 mostra um gráfico de evolução temporal da energia do sinal (após a formação de feixes) em função da marcação, chamado *Waterfall*. Sendo os trechos de ruído e sinal, mencionados acima, indicados nesta figura.

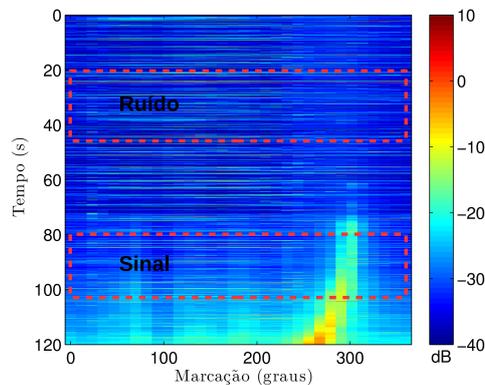


Figura 8: *Waterfall* do trecho de sinal e ruído ambiente.

A análise da densidade espectral de potência (*Power Spectral Density - PSD*) é utilizada para estimar as características do espectro de potência dos dados experimentais, sendo aqui utilizado a técnica de periodograma (Diniz et al., 2014). A Figura 9 apresenta a diferença entre o espectro do trecho de sinal e do trecho de ruído ambiente. Esta estimativa indica quais canais recebem energia da embarcação e quais frequências são características do bote.

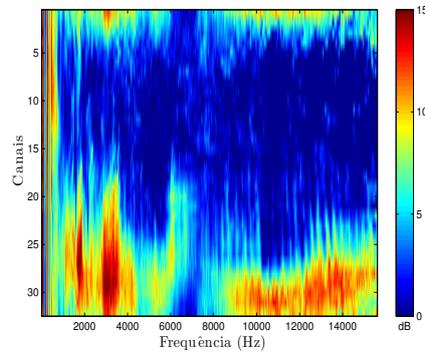


Figura 9: PSD(dB/Hz) da diferença entre sinal e ruído ambiente

Nota-se na Figura 9 que existe uma quantidade de energia maior na direção em que a embarcação está presente (canais 22 a 32) e que sua intensidade é maior entre $3kHz$ e $4kHz$.

O ruído ambiente foi considerado uma variável aleatória, o que foi comprovado experimentalmente. A Figura 10 apresenta o histograma para dois canais do arranjo. Percebeu-se também que os valores de variância dos canais voltados para a costa são maiores.

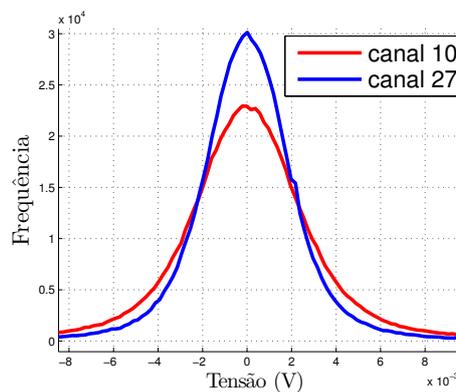


Figura 10: Histograma para dois canais do trecho de coleta de ruído ambiente.

O sinal gerado por uma embarcação é composto, principalmente, por fontes de ruído acústico irradiado pelo sistema de propulsão (ruído de cavitação) e os efeitos hidrodinâmico da interação com água. Desta forma, o sinal recebido em um sistema passivo é tipicamente uma função aleatória e será considerado neste estudo como um processo estocástico. A distribuição das variâncias são apresentadas no *boxplot* da Figura 11 para o intervalo de integração de $32ms$.

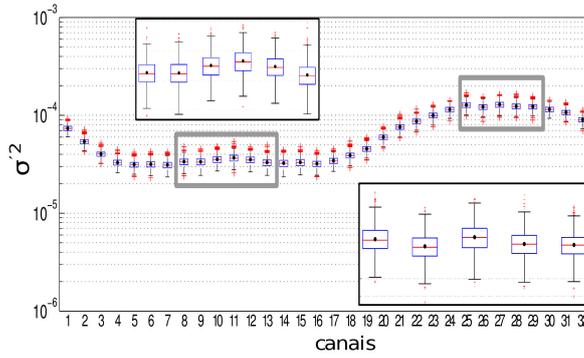


Figura 11: Distribuição das variâncias \times canais para o intervalo de integração de $32ms$

O *boxplot* apresentado na Figura 11 enfatiza a característica de maior energia proveniente dos canais direcionados para a embarcação (canais 22 ao 32). Percebe-se que a média das variâncias se aproxima do valor da mediana, de forma que σ^2 , utilizado no cálculo da SNR, será realizado utilizando o valor médio das variâncias.

5 Resultados

A determinação do número de sensores a ser utilizado no arco do arranjo é baseado na avaliação da SNR. Analisando a Figura 9, nota-se que a embarcação apresenta ruído de cavitação com maior intensidade entre as frequências de $3kHz$ e $4kHz$. Assim, filtrou-se o sinal nesta banda de interesse com o objetivo de trabalhar em uma faixa de frequência onde a SNR seja maior.

A Figura 12 indica que o número de elementos a ser utilizado no arco, o qual otimiza a SNR, varia entre 10 e 14 elementos. Como a análise feita neste estudo avalia unicamente a SNR, em um primeiro momento poderia ser vantajosa a utilização de uma menor quantidade de sensores visando um custo computacional menor. Por outro lado, ao utilizar mais sensores o *beam pattern* tem resolução espacial mais acurada (devido a quantidade de informação ser maior e o comprimento do arranjo em linha equivalente ser maior).

A comparação com os dados simulados mostram uma queda mais acentuada na SNR com o aumento excessivo de sensores. Este fato pode estar associado à quantidade de ruído nos canais voltados para a costa serem mais intensos, assim, a utilização destes canais para a formação de feixes não geram uma vantagem. Desta forma é possível notar que a flutuação canal-canal é inserida no cálculo da SNR, não sendo os sensores considerados idênticos como na simulação.

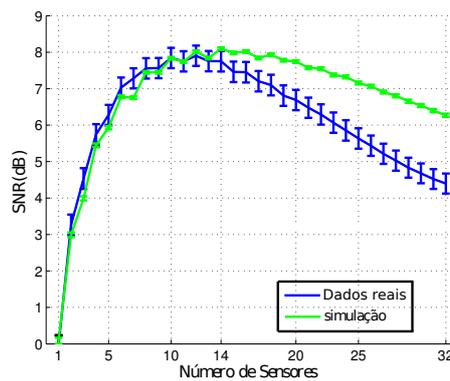


Figura 12: SNR \times Número de sensores para 3 janelas propostas.

6 Conclusão

Este trabalho abordou uma visão da tecnologia de um sistema sonar e apresentou um método baseado na avaliação da razão sinal ruído para a determinação do número de elementos a serem empregados na formação de feixes em arranjo cilíndrico de hidrofones. Os sinais utilizados foram coletados de um experimento no mar usando como fonte um bote motorizado. Os resultados mostraram que para este

arranjo de 32 sensores o uso de 10 a 14 canais otimiza a SNR. Vale ressaltar que neste modelo, a SNR é calculada levando em consideração a flutuação canal-canal existente.

A técnica aqui utilizada pode ser empregada para outros arranjos, desde que se tenha acesso aos seus sinais em situações de ruído ambiente e com a presença de uma fonte.

Referências

- Burdic, W. (1991). *Underwater acoustic system analysis*, Prentice Hall signal processing series, Prentice Hall.
- Diniz, P., da Silva, E. and Netto, S. (2014). *Processamento Digital de Sinais - 2.ed.: Projeto e Análise de Sistemas*, Bookman Editora.
- Jackson, B., Rajan, S., Liao, B. and Wang, S. (2015). Direction of arrival estimation using directive antennas in uniform circular arrays, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* **63**(2): 736–747.
- Li, Q. (2012). *Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications*, Advanced Topics in Science and Technology in China, Springer Berlin Heidelberg.
- Van Trees, H. (2004). *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Optimum Array Processing*, Detection, Estimation, and Modulation Theory, Wiley.