



CONFORMAÇÃO DE FEIXE EM SONAR PASSIVO PARA UM ARRANJO CILÍNDRICO DE HIDROFONES

Fabricio de Abreu Bozzi

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: José Manoel de Seixas
Thiago Ciodaro Xavier

Rio de Janeiro
Março de 2016

CONFORMAÇÃO DE FEIXE EM SONAR PASSIVO PARA UM ARRANJO
CILÍNDRICO DE HIDROFONES

Fabricio de Abreu Bozzi

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. José Manoel de Seixas, D.Sc.

Dr. Thiago Ciodaro Xavier, D.Sc.

Prof. Sergio Lima Netto, Ph.D.

Dr. Leonardo Martins Barreira, D.Sc.

Prof. Michel Pompeu Tcheou, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2016

Bozzi, Fabricio de Abreu

Conformação de Feixe em Sonar Passivo para um Arranjo Cilíndrico de Hidrofonos/Fabricio de Abreu Bozzi.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIII, 87 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: José Manoel de Seixas

Thiago Ciodaro Xavier

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 75 – 78.

1. Formação de Feixes. 2. SONAR. 3. Arranjo Cilíndrico. 4. Processamento de Sinais. I. Seixas, José Manoel de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Ao meu avô Honório.

*“If you cause your ship to stop,
and place the head of a long tube
in the water and place the outer
extremity to your ear, you will
hear ships at a great distance
from you”
(Leonardo da Vinci, 1490)*

*“Se você parar seu navio, e introduzir
a extremidade de um longo tubo na
água e colocar o seu ouvido na outra
extremidade do tubo, você ouvirá
navios a grande distância de você.”
(Leonardo da Vinci, 1490)*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente a Deus, que de sua natureza infalível sempre me ajudou e fez com que eu conquistasse tudo que eu desejasse. Obrigado meu Deus.

A minha família, que entendeu minha ausência devido a dedicação exigida no mestrado. A minha esposa Lorana, que me acompanhou durante todo este período.

Ao tenente Goltz, comandantes Carlos Martins, Felzky e Sineiro, por incentivar o início do mestrado. Ao comandante Barreira, por permitir minha atuação na área técnica e prover a realização dos experimentos onde pude me dedicar e aprender muito.

Ao engenheiro William, que com sua experiência, me orientou na área de sonar. Ao pessoal do Grupo de Sistemas Acústicos Submarinos do IPqM, em especial, os engenheiros Fernando Monteiro, Orlando, Fernando Magalhães, Stilson, a estatística Cleide e o técnico Márcio Baptista.

Ao meu orientador, professor Seixas, pelas valiosas discussões no LabSonar, sinalizando sempre que me desviava do método científico, levantando questionamentos instigantes e tecendo críticas construtivas para rever conceitos e pensar de forma diferente. Ao Thiago, que teve a paciência de me ajudar na parte estatística e na primorosa revisão gramatical. Ao Moura, Moura Jr. e Fernando, que participaram e contribuíram para meu aprendizado.

Aos amigos do IPqM, LabSonar e LPS e aos professores do programa de engenharia elétrica e oceânica da COPPE/UFRJ. Por último, tenho certeza de que outras pessoas também contribuíram, deixo este espaço para o seu nome _____ e lhe agradeço da mesma forma!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CONFORMAÇÃO DE FEIXE EM SONAR PASSIVO PARA UM ARRANJO CILÍNDRICO DE HIDROFONES

Fabricio de Abreu Bozzi

Março/2016

Orientadores: José Manoel de Seixas
Thiago Ciodaro Xavier

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta um estudo de conformação de feixes, atraso-e-soma, aplicado a arranjo cilíndrico de hidrofones em sonar passivo. A técnica de projeção em corda é estudada com um viés estatístico para determinação do número de elementos a serem utilizados no arco do círculo, sendo a razão sinal ruído (SNR) o parâmetro em análise para determinação do número de sensores a serem utilizados. A SNR é calculada a partir de dados experimentais do arranjo, coletados em ambiente submarino, em uma enseada. As flutuações canal a canal são inseridas no cálculo da SNR, provendo uma caracterização mais realista do sistema e do local do experimento.

A técnica de compensação de canais eletrônicos ruidosos (*denoising* de canais) é aplicada utilizando o estimador de máxima verossimilhança. Esta estimação é feita com dados coletados em um tanque, o que representará o ruído eletrônico e, devido as características do local do experimento na enseada, aplicou-se a compensação utilizando também o ruído ambiente.

Por fim, dados coletados de um arranjo instalado em um submarino são utilizados com o objetivo de verificar se o método proposto poderia ser aplicado em um caso real, como é no submarino.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

BEAMFORMING IN PASSIVE SONAR FOR A CYLINDRICAL HYDROPHONE ARRAY

Fabricio de Abreu Bozzi

March/2016

Advisors: José Manoel de Seixas

Thiago Ciodaro Xavier

Department: Electrical Engineering

This work presents a study of delay-and-sum beamforming applied to cylindrical hydrophones array in passive sonar. The rope projection technique is studied in a statistical bias for determining the number of elements to be used in the arc of the circle, and the signal to noise ratio (SNR) is the parameter in the analysis to determine the number of sensors to be used. The SNR is calculated from experimental data of the array, collected in underwater environment, in a cove. Thus, the channel to channel fluctuations are inserted into the SNR calculation, providing a more realistic characterization of the system and the experimental site.

The denoising technique is applied using the maximum likelihood estimator. We used the noise collected in a hidroacústic tank to represent electronic noise and because the experiment site characteristics in the cove, was applied the denoising with the ambient noise too.

Finally, data collected from an array installed in a submarine are used in order to determine if the proposed method could be applied in a real case, as in the submarine.

Sumário

Lista de Figuras	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização da Dissertação	4
2 Formação de Feixes em Arranjo de Sensores	5
2.1 Conceitos de Arranjos e Formação de Feixes	6
2.2 Modelo do Arranjo Linear Uniforme	10
2.3 Arranjo Circular Uniforme com Elementos Direcionais	16
2.4 Sensores com Ganho Direcional	18
2.5 Arranjo Circular - Implementação	19
2.6 Determinação do Arco Utilizado no Formador de Feixes	22
2.7 Considerações sobre Erros na Formação de Feixes	22
2.8 Limites de operação	24
3 Método Proposto para Estimação do Número de Sensores Utilizando a Razão Sinal Ruído	27
3.1 Determinação do Número de Sensores do Arco	27
3.2 Simulação da SNR para um Sinal Determinístico	30
3.3 Estimação de Máxima Verossimilhança para <i>Denoising</i> de canais	31
4 Dados de um Arranjo Cilíndrico em Escala Reduzida	33
4.1 Arranjo Cilíndrico	33
4.2 Sistema de Aquisição de Sinais	35
4.3 Local e Coleta dos Dados	36
4.4 Considerações sobre os Dados	39
4.5 Análise do Ruído Ambiente	42
4.6 Análise do Trecho de Sinal	47
4.7 Análise do Ruído Eletrônico	50
4.8 Implementação do Estimador do Número de Sensores	52

5	Dados Coletados em um Submarino da MB	55
5.1	Arranjo Cilíndrico e Aquisição de Sinais	55
5.2	Considerações sobre os Dados	56
5.3	Análise dos Dados	58
6	Resultados	62
6.1	Arranjo Cilíndrico em Escala Reduzida	62
6.2	Dados do Submarino	69
7	Conclusões e Perspectivas Futuras	72
7.1	Realização dos Objetivos	72
7.2	Discussão	73
7.3	Trabalhos Futuros	74
	Referências Bibliográficas	75
A	Análise Estatística de Sinais Aleatórios e Estimadores	79
A.1	Processos Aleatórios	79
A.1.1	Momentos	80
A.1.2	Estacionaridade e Ergodicidade	81
A.2	Estimador de Máxima Verossimilhança	83
A.3	Imputação de Valores em Dados Faltantes	84
B	Trabalhos Publicados	86

Lista de Figuras

1.1	Processos de um sonar passivo.	2
2.1	<i>Beam Pattern</i> em ULA para diferentes ângulos de incidências θ_0	7
2.2	Diagrama do <i>Delay-and-Sum Beamforming</i>	8
2.3	Diagrama do <i>Delay-and-Sum beamforming</i> para o domínio da frequência.	10
2.4	Incidência de onda plana em um arranjo com N sensores.	11
2.5	Arranjo linear com N Sensores.	12
2.6	Diagrama <i>beamforming</i> para arranjo linear com N sensores.	13
2.7	<i>Beam Pattern</i> de um arranjo linear ($ D $) para $d = \lambda/2$ e $N = 11$ nos domínios de ψ , θ e u	14
2.8	Parâmetros do <i>beam pattern</i> em um arranjo linear.	15
2.9	<i>Beam Pattern</i> polar de um ULA para diferentes relações entre o espaçamento de sensores d e o comprimento de onda incidente λ	16
2.10	Arranjo circular uniforme de raio r e com 4 sensores espaçados por d	16
2.11	Diretividade de um Hidrofone segundo Equação 2.34.	18
2.12	Diretividade de um Hidrofone segundo Equação 2.36.	19
2.13	Diagrama de implementação do <i>beamforming</i> para o arranjo circular.	20
2.14	<i>Beamforming</i> e <i>Waterfall Display</i> para estimação de direção de chegada.	21
2.15	<i>Waterfall Display</i> para acompanhamento de uma fonte sonora.	21
2.16	Definição do setor de passagem segundo Equação 2.37.	22
2.17	Setor do arranjo circular projetado em um arranjo em linha (projeção na corda).	23
2.18	Diagrama de interpolação dos dados.	24
2.19	<i>Beam Pattern</i> em diferentes frequências (a) sem ganho e (b) com ganho.	25
2.20	<i>Beam Pattern</i> para $f_{min} = 250Hz$ e $f_{max} = 7650Hz$ de um arranjo circular com 96 sensores e diretividade ($D = 4$).	26
3.1	Método para obtenção da SNR utilizando um sensor.	28
3.2	Método para obtenção da SNR utilizando dois sensores.	29

3.3	Característica da SNR com dados de simulados.	31
3.4	<i>Delay-and-sum beamforming</i> aplicando <i>denoising</i> de canais.	32
4.1	Arranjo Cilíndrico de Hidrofones (CHA) em escala reduzida (32 <i>staves</i> e 1 metro de diâmetro) construído no IPqM.	34
4.2	Diagrama de amplificação utilizando o condicionador DSC 2200.	35
4.3	Rack de amplificação DSC 2200.	35
4.4	Processos de digitalização - <i>ICS</i> – 610.	36
4.5	Resposta em frequência do sistema de aquisição.	36
4.6	Instalação do Arranjo Cilíndrico em um Cais.	37
4.7	Croqui da local de instalação e referencial dos sensores.	37
4.8	Embarcação utilizada no experimento com arranjo cilíndrico.	38
4.9	<i>Waterfall</i> do trecho de sinal e ruído ambiente.	38
4.10	Considerações sobre a modulação e frequência da rede elétrica no experimento.	39
4.11	PSD(dB/Hz) dos canais \times frequência.	40
4.12	Correlação entre canais.	41
4.13	Série temporal e Espectro de um canal (frequência \times tempo) para o ruído ambiente.	43
4.14	Legenda do gráfico <i>boxplot</i>	43
4.15	<i>Boxplot</i> da distribuição das variâncias (σ_n^2) do ruído ambiente.	44
4.16	Efeito da imputação de valores no sinal temporal do trecho de ruído para um canal	45
4.17	Série temporal e Espectro de um canal (frequência \times tempo) do ruído ambiente após imputação de valores.	45
4.18	<i>Boxplot</i> da distribuição das variâncias (σ_n^2) do ruído ambiente após a imputação de valores.	46
4.19	Série temporal e Espectro de um canal (frequência \times tempo) para o trecho de sinal.	47
4.20	<i>Boxplot</i> da distribuição das variâncias (σ'^2) do sinal (em meio a ruído).	48
4.21	Série temporal e Espectro de um canal (frequência \times tempo) para o sinal após imputação.	49
4.22	<i>Boxplot</i> da distribuição das variâncias (σ'^2) do sinal (em meio a ruído) após a imputação de valores.	50
4.23	<i>Boxplot</i> da distribuição das variâncias (σ_{ele}^2) do ruído eletrônico (medição em um tanque hidroacústico).	51
5.1	Arranjo Cilíndrico de Hidrofones (CHA) instalado em um Submarino da Marinha do Brasil e sua referência.	56
5.2	Gráfico de energia <i>Waterfall</i> dos dados coletados no submarino.	57

5.3	Gráfico <i>Waterfall</i> do trecho de dados selecionado para análise.	57
5.4	PSD(dB/Hz) dos canais \times frequência para os dados coletados do arranjo do submarino.	58
5.5	Série temporal (Tensão \times tempo) e espectrograma (frequência \times tempo) para os canais 52 e 28	59
5.6	<i>Boxplot</i> canais para os dados coletados de um submarino da MB. . . .	60
6.1	SNR \times Número de sensores para 3 janelas propostas.	63
6.2	Considerações adicionais para determinação do número de sensores. . .	64
6.3	Pesos MLE ruído eletrônico.	65
6.4	Pesos MLE ruído ambiente.	65
6.5	SNR \times Número de sensores para janela de $32ms$ - com e sem <i>denoising</i> . 66	
6.6	Comparação entre <i>Waterfall</i> com e sem utilização da técnica de <i>de- noising</i>	67
6.7	Considerações adicionais para determinação do número de sensores com a aplicação da técnica de <i>denoising</i> utilizando o ruído ambiente. 67	
6.8	SNR \times Número de sensores para janela de $32ms$ - com e sem <i>denoising</i> para a banda de frequências entre $3kHz$ e $4kHz$	68
6.9	SNR \times Número de sensores para 3 janelas propostas.	69
6.10	SNR \times Número de sensores para 3 janelas propostas para frequência de $2kHz$ à $4kHz$	70

Capítulo 1

Introdução

O sistema SONAR (*Sound Navigation and Ranging*) presente no submarino é parte fundamental para sua operação. Um sonar deve ser desenvolvido para apresentar informações ao operador sonar, responsável pelo monitoramento do cenário acústico submarino, de forma clara, rápida, precisa e mais automática possível. Quando um sonar é desenvolvido para operar apenas em modo de escuta, sem necessidade de emissão, ele é chamado de sonar passivo e é utilizado como um instrumento de monitoramento. O sonar passivo é parte integrante do sistema de combate, assim, um submarino dotado de um eficaz sonar passivo, terá melhor capacidade de defesa e ataque.

Com o interesse em dominar a tecnologia do sonar por parte da Marinha do Brasil (MB), diversos campos científicos, envolvendo sinais provenientes de sistemas acústicos submarinos, são estudados. Com esse propósito, tecnologias nas áreas de elementos¹ hidroacústicos, formação de feixes, detecção, acompanhamento e classificação devem ser desenvolvidas.

O desenvolvimento de um sistema sonar passivo pode ser dividido basicamente em duas áreas [1]: desenvolvimento de elementos hidroacústicos (hidrofonos, transdutores e *staves*) sendo referido aqui como parte molhada do sonar; e desenvolvimento do processamento de sinais (formação de feixes, tratamento de dados, apresentação e análises) chamada de parte seca. A aquisição de sinais é considerada o “elo” entre a parte molhada e seca. A Figura 1.1 exemplifica a cadeia de processos envolvida em um sistema sonar passivo.

Pode-se considerar que toda a cadeia de processos envolvida no sonar passivo tem início quando uma onda mecânica acústica submarina se choca com um hidrofone (sensor passivo utilizado para transformar energia mecânica em elétrica), excitando-o e gerando um sinal elétrico em seus terminais [2]. Um sonar passivo pode ser composto de apenas um hidrofone, mas devido o interesse em localizar

¹Neste trabalho o termo elemento é sinônimo ao termo sensor.

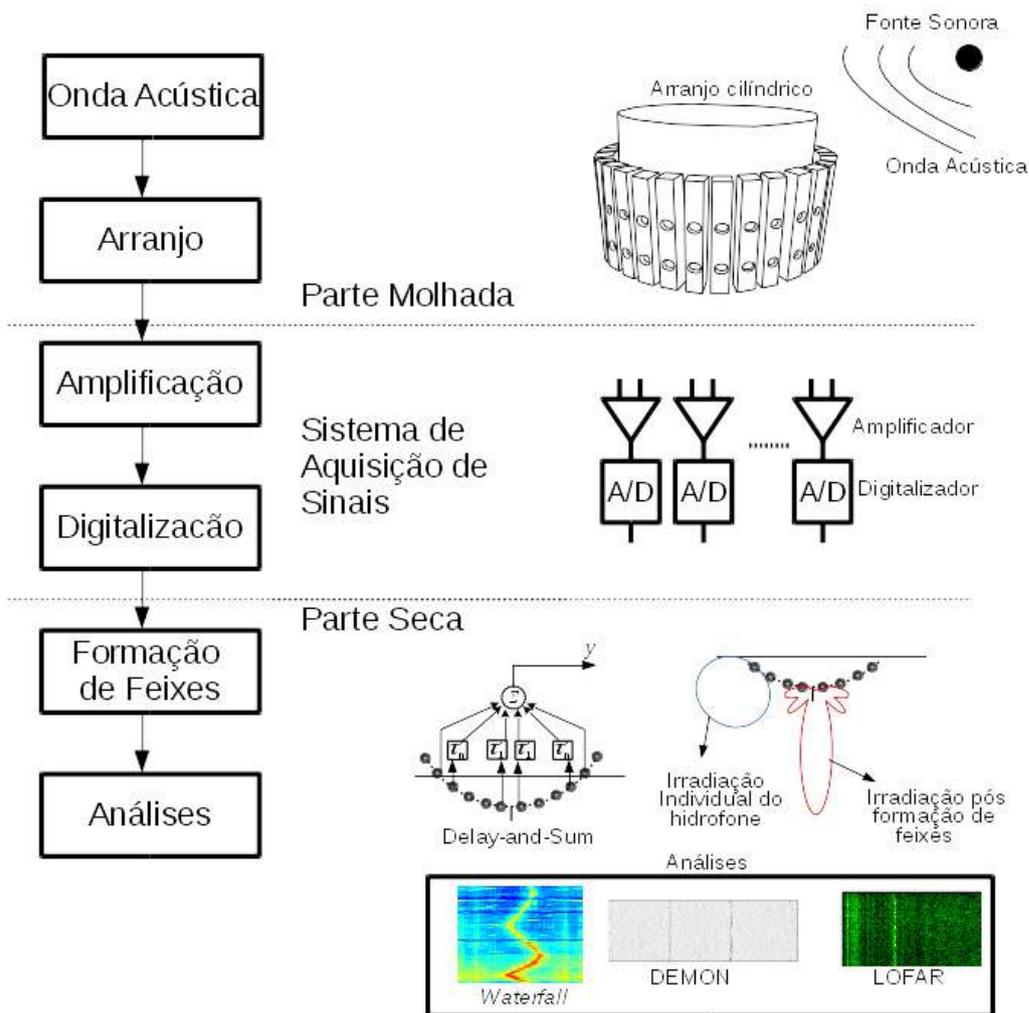


Figura 1.1: Processos de um sonar passivo.

fontes ao redor do submarino, utiliza-se um arranjo de sensores. Estes sinais são processados por um sistema de leitura, chamado aqui de sistema de aquisição de sinais, responsável pelo seu condicionamento e aquisição, normalmente por meio digital.

Partindo-se do ponto em que os dados dos diversos sensores estão chegando de maneira digital e sincronizada inicia-se o processamento dos sinais do arranjo. Considera-se que o arranjo de hidrofones é uma antena e o interesse é, em um primeiro momento, direcionar esta antena para enfatizar sinais vindos de uma dada direção. Isso chama-se formação de feixes.

Dentre diversas técnicas de formação de feixes [3], aqui é estudada o atraso-e-soma (*delay-and-sum*). A partir dos feixes formados, iniciam-se as etapas de análises, onde são realizados processamentos para caracterização e classificação dos sinais.

Não é escopo deste trabalho o estudo de classificação de sinais, no entanto alguns trabalhos nesta área, considerando técnicas LOFAR (*Low Frequency Analysis and Recording*) e DEMON (*Detection of Envelope Modulation on Noise*) utilizados para

classificação, podem ser encontrados em [4] e [5].

1.1 Motivação

Por ser uma tecnologia de defesa, é estratégico que a MB tenha interesse em manter pessoal capacitado em estudos de sonar. Além disso, por ser uma área com poucos pesquisadores no Brasil é fundamental que trabalhos sejam desenvolvidos com objetivo de aperfeiçoar e dar continuidade a pesquisas nesta área.

O projeto e a construção do Submarino com Propulsão Nuclear (SN-BR) fazem parte de um amplo programa estratégico do Estado Brasileiro, denominado de “Programa de Desenvolvimento de Submarinos” (PROSUB). Neste programa é previsto um elevado grau de nacionalização do SN-BR [6]. Assim, deseja-se dominar cada etapa de um sistema sonar, o que é fundamental para desenvolver ou nacionalizar esta ferramenta para o submarino.

A oportunidade de estudar a tecnologia de um sonar, aplicando técnicas que podem melhorar algumas de suas características, motiva a realização deste trabalho. Além disso, neste trabalho poderemos analisar dados experimentais brutos de um arranjo cilíndrico de hidrofones, coletados diretamente dos sensores, onde a aquisição de sinais e o cenário acústico são conhecidos.

1.2 Objetivos

Este trabalho apresenta uma continuidade aos estudos na área de sonar, referentes à formação de feixes para arranjo cilíndrico em sonar passivo, desenvolvidos em [7, 8], utilizando dados experimentais.

Naqueles trabalhos foram estudadas técnicas de formação de feixes baseadas em transformar arcos de um arranjo circular em arranjos lineares (projeção na corda). Neste trabalho, este artifício é melhor avaliado, buscando-se estimar, através da razão sinal ruído, o número de elementos a ser considerado no arco.

Adicionalmente, aplica-se a técnica de *denoising* de canais [9] explorando a estimação da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation - MLE*). Esta técnica é desenvolvida com o intuito de compensar o ruído eletrônico em canais ruidosos, ponderando-se os canais. Para o cálculo da MLE são utilizados os ruídos coletados em um tanque hidroacústico e no mar.

Por fim, dados coletados de um arranjo instalado em um submarino são utilizados com objetivo de verificar se há indícios de que o método proposto poderia ser aplicado em um caso real, como no submarino.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica referente à formação de feixes. O Capítulo 3, apresenta o método proposto neste trabalho. Por sua vez, o Capítulo 4 apresenta os experimentos realizados com um arranjo de hidrofones em escala reduzida construído no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) e o Capítulo 5 mostra os dados coletados do sonar de um submarino da MB. O Capítulo 6 mostra os resultados da aplicação do método desenvolvido. Por fim, conclusões e perspectivas futuras são discutidas no Capítulo 7.

Capítulo 2

Formação de Feixes em Arranjo de Sensores

Este capítulo discute as tecnologias de processamento de sinais para formação de feixes em arranjo de sensores. Os conceitos da formação de feixes são desenvolvidos para:

- Arranjo Linear Uniforme;
- Arranjo Circular Uniforme com Elementos Direcionais;
- Ganho Direcional;
- Arranjo Circular – Implementação;
- Determinação do arco utilizado no formador de feixes;
- Considerações sobre erros na formação de feixes; e
- Limites de operação.

Dentre diversas configuração geométricas de arranjos, o arranjo em linha uniforme (*Uniform Linear Array - ULA*) é a configuração com maior bibliografia entre as configurações existentes e preferencialmente adotada para o início de estudos de arranjos. No caso de ULA, seu modelo e suas expressões analíticas para potência e diretividade¹ são problemas já estudados e bem desenvolvidos.

Apesar da grande quantidade de aplicações, um problema encontrado nesta geometria refere-se a perda de diretividade quando deseja-se “focar” o arranjo para sinais incidentes nas extremidades do arranjo (ou *endfire*²). O fato da perda de diretividade para *endfire* pode ser suprida realizando o giro do ULA de forma mecânica, como

¹O termo diretividade será melhor definido posteriormente, por enquanto, refere-se a capacidade do arranjo em focar em uma direção.

²*endfire* refere-se a frente de onda incidindo no mesmo eixo do arranjo.

no radar (*Radio Detection And Ranging*). No entanto, em algumas aplicações este giro é pouco prático devido ao meio submarino, como no sonar.

No que tange o problema em questão, o arranjo circular uniforme (*Uniform Circular Array - UCA*) é comumente utilizado em aplicações cujo interesse é obter uma melhor resposta direcional uniforme sob todo o ângulo de azimute³ [10]. O estudo de localização de fontes ou estimação da direção de chegada (*Direction of Arrival Estimation - DOA Estimation*) utilizando UCA, tem bibliografia reduzida para esta configuração de arranjo. Para o UCA, devido a curvatura e a variação de diretividade em cada sensor, a determinação de uma forma analítica da potência de saída não pode ser escrita por uma expressão fechada [11].

2.1 Conceitos de Arranjos e Formação de Feixes

A caracterização da configuração de um arranjo consiste em duas partes. A primeira refere-se ao sensor e suas características padrões (*antenna pattern*), ou seja, como este sensor se comporta ao receber sinais provenientes de diferentes direções no espaço. Por exemplo, um sensor dito isotrópico (omnidirecional), recebe os sinais de forma uniforme em todas as direções.

A segunda parte refere-se à geometria na qual os sensores estão agrupados, ou seja, o posicionamento físico dos elementos no espaço. A distância entre sensores, a quantidade de sensores e o comprimento do arranjo devem ser analisados para cada uma das disposições dos elementos no espaço, estejam estes agrupados de forma linear, planar ou volumétrica [3].

Supondo um arranjo de N elementos e $s(t)$ é um sinal incidente (onda plana), assume-se que o sinal no sensor i é $s(t + \tau_i(\theta))$, onde τ_i é o atraso relacionado a uma referência e θ_0 é o ângulo de incidência do sinal. Se compensarmos adequadamente o atraso em cada sensor, utilizando um dos elementos como referência, todos os sinais do arranjo estarão em fase e terão a mesma amplitude (considerando que não há perdas). Somando estes sinais e acumulando-os no tempo, pode-se obter a saída $D(\theta)$ conforme a Equação 2.1.

$$D(\theta) = \left\{ E \left[\left(\sum_{i=0}^{N-1} s(t + \tau_i(\theta) - \tau_i(\theta_0)) \right)^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (2.1)$$

onde $\mathbf{E}[\cdot]$ representa o operador valor esperado, e $D(\theta)$ é a função diretividade (chamada *Beam Pattern*, em inglês).

A Figura 2.1 mostra o *Beam Pattern* de um arranjo linear para sinais incidentes entre os ângulos $\theta_0 = 0^\circ$ (*endfire*) e $\theta_0 = 90^\circ$ (*broadside*). Percebe-se que para

³ângulo de azimute refere-se a abertura angular cujo valor perfaz horizontalmente um círculo.

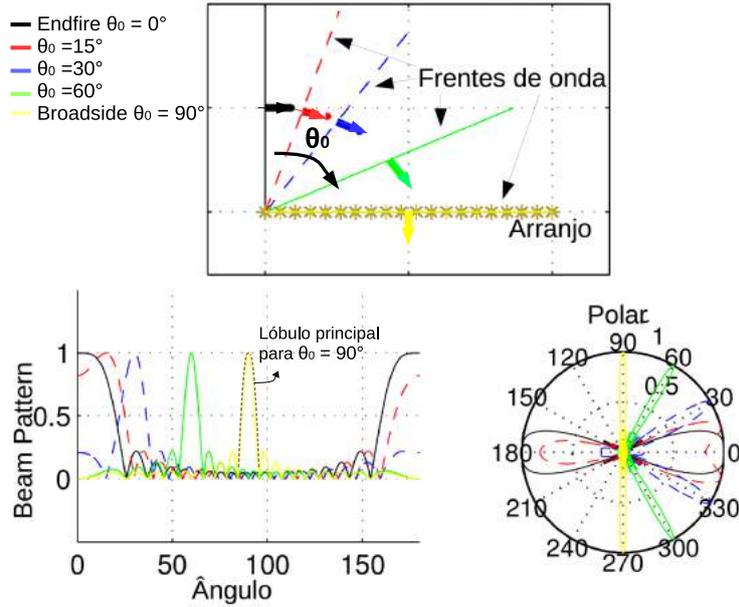


Figura 2.1: *Beam Pattern* em ULA para diferentes ângulos de incidências θ_0 .

endfire o *beam pattern* tem lóbulo principal mais largo comparado quando caminha-se para *broadside*. Além disso, no *beam pattern* polar, pode-se notar o efeito da ambiguidade, onde o processamento indica mais de uma possibilidade de chegada do sinal, característica típica do arranjo linear.

A função diretividade de um sensor, ou de um arranjo, representa a resposta frequência/número de onda versus direção. Sua informação representa a irradiação do sensor/arranjo para uma determinada direção e é isto que determina seu desempenho. A função diretividade será abordada em detalhes posteriormente para o arranjo linear.

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. Estudos da formação de feixes incluem as análises da função diretividade, relação sinal ruído, cálculo de ganho, pesos ótimos, entre outros parâmetros de projetos.

A técnica convencional de *beamforming* é o filtro de atraso-e-soma (*delay-and-sum*) [3]. 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. Pode-se perceber que a função do *beamforming* é direcionar o ganho do arranjo na direção de um alvo, estimando a sua direção

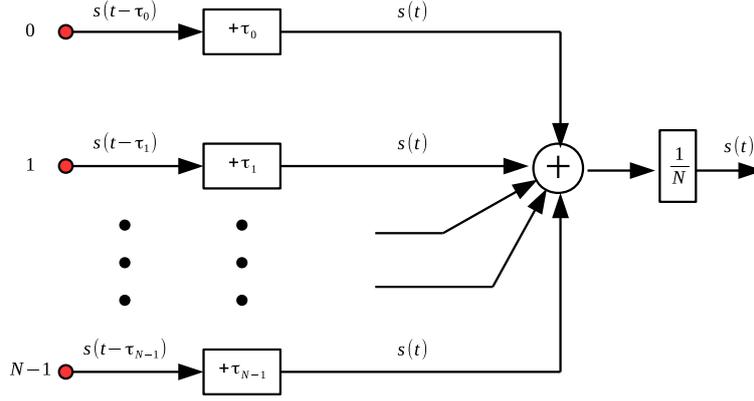


Figura 2.2: Diagrama do *Delay-and-Sum Beamforming*.

em relação ao eixo do arranjo. O filtro de atraso-e-soma pode ser observado da Figura 2.2.

Uma das motivações do uso de arranjo de sensores é o aumento da relação sinal ruído (*Signal to Noise Ratio - SNR*) do sonar. Num desenvolvimento inicial, assume-se que o sinal incidente está em meio a ruído aditivo Gaussiano. Supõe-se que estes ruídos, η_i , nos sensores i , são independentes e com média zero.

A potência de saída, partindo da Equação 2.1, é dada por:

$$E \left[\left(\sum_{i=0}^{N-1} s'(t + \tau_i(\theta) - \tau_i(\theta_0)) \right)^2 \right], \quad (2.2)$$

e, para $\theta = \theta_0$ e, $s'(t) = s(t) + \eta_i(t)$, obtém-se

$$\begin{aligned} & E \left[\left(\sum_{i=0}^{N-1} (s(t) + \eta_i(t)) \right)^2 \right] \\ &= E \left[(s_0(t) + s_1(t) + \dots + s_{N-1}(t) + \eta_0 + \eta_1 + \dots + \eta_{N-1})^2 \right]. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Considera-se, $s_0(t) + s_1(t) + \dots + s_{N-1}(t) = Ns(t)$, ou seja, não há atenuação do sinal entre os sensores. Assim,

$$\begin{aligned} & E \left[(Ns(t) + \eta_0 + \eta_1 + \dots + \eta_{N-1})^2 \right] \\ &= E \left[(N^2 s^2(t) + \eta_0^2 + \eta_1^2 + \dots + \eta_{N-1}^2 + 2Ns(t)\eta_0 + 2Ns(t)\eta_1 + \dots \right. \\ & \quad \left. \dots + 2Ns(t)\eta_{N-1} + 2\eta_0\eta_{N-1} + \dots) \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

e, por considerar o ruído independente, não existe correlação deste com o sinal e com o ruído entre sensores. Assim, utiliza-se da propriedade que $E[a + b] = E[a] + E[b]$,

logo, a Equação 2.4 é simplificada:

$$N^2 E[s^2(t)] + E[\eta_0^2] + E[\eta_1^2] + \dots + E[\eta_{N-1}^2], \quad (2.5)$$

e, sendo $E[\eta_0^2] = E[\eta_1^2] = \dots = E[\eta_{N-1}^2] = E[\eta^2]$, tem-se

$$N^2 E[s^2(t)] + N E[\eta^2] = N^2 \sigma_s^2 + N \sigma_n^2. \quad (2.6)$$

Percebe-se que, para as condições impostas, tem-se a parcela de sinal crescente com N^2 , enquanto o ruído incrementa com N . A relação sinal mais ruído sobre ruído (SNNR) pode ser dada por

$$\begin{aligned} SNNR &= \frac{\text{Sinal} + \text{Ruído}}{\text{Ruído}} \\ &= \frac{N^2 \sigma_s^2 + N \sigma_n^2}{N \sigma_n^2} = \frac{N^2 \sigma_s^2}{N \sigma_n^2} + 1, \end{aligned} \quad (2.7)$$

enquanto a SNR é definida por

$$SNR = \frac{\text{Sinal}}{\text{Ruído}} = N \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \quad (2.8)$$

Este fato também pode ser observado pelo ganho do arranjo, que é definido por

$$G_s = \frac{SNR_{\text{saída}}}{SNR_{\text{entrada}}}, \quad (2.9)$$

onde

$$SNR_{\text{entrada}} = \frac{E[s^2]}{E[\eta^2]} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}, \quad (2.10)$$

sendo a SNR_{entrada} referente apenas a um sensor, e conforme as condições anteriores,

$$SNR_{\text{saída}} = \frac{E[(s_0 + s_1 + \dots + s_{N-1})^2]}{E[(\eta_0 + \eta_1 + \dots + \eta_{N-1})^2]} = \frac{E[(Ns)^2]}{E[N\eta^2]} = \frac{N^2 \sigma_s^2}{N \sigma_n^2} = N \times SNR_{\text{entrada}}, \quad (2.11)$$

logo,

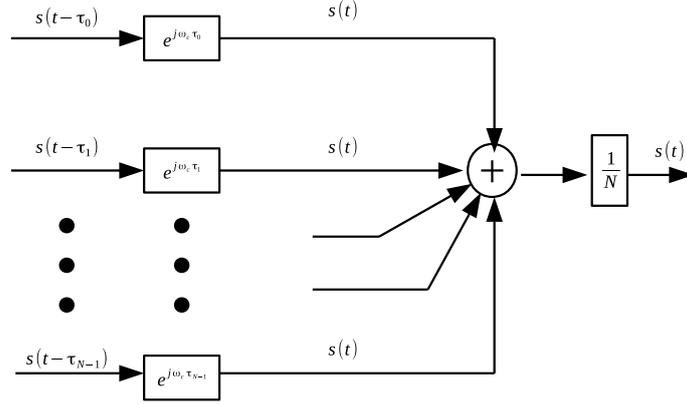


Figura 2.3: Diagrama do *Delay-and-Sum beamforming* para o domínio da frequência.

$$G_s = \frac{SNR_{saída}}{SNR_{entrada}} = N. \quad (2.12)$$

Na Equação 2.12, apresenta-se a solução para o ganho de um arranjo que é vastamente utilizado. Esta equação mostra que o ganho espacial do arranjo é igual ao número de elementos. No entanto, isso somente é verdade se as condições de independência do ruído e atenuação do sinal foram satisfeitos (assumido em projetos de arranjo linear). Além disso, outras restrições, como o espaçamento entre sensores, que evitam problemas de *aliasing* espacial (esse será melhor discutido à frente), devem ser considerados no projeto do arranjo linear.

2.2 Modelo do Arranjo Linear Uniforme

Devido a bibliografia em *beamforming* ser amplamente direcionada a arranjos lineares, aqui, parâmetros do *beam pattern*, que definem o desempenho do arranjo, são avaliados para esta geometria.

Grande parte dos estudos de *beamforming* trata os sinais incidentes como sinais de banda estreita de frequência. Isto facilita a representação destes sinais pois o atraso, devido ao percurso da frente de onda entre sensores, pode ser aproximado por um atraso em fase. Assim, o esquema apresentado na Figura 2.2 equivale ao mostrado na Figura 2.3.

De acordo com [3], um sinal é dito de banda estreita, caso satisfaça a condição de $B_s \Delta T_{max} \ll 1$, onde B_s é a banda no entorno da frequência central ω_c e ΔT_{max} é o tempo máximo de propagação de uma onda entre qualquer sensor. No caso de um arranjo linear, ΔT_{max} é o tempo de propagação entre os elementos extremos do arranjo.

Novamente, assume-se que uma onda plana esteja incidindo em N elementos,

dispostos em quaisquer posições no espaço (p_n), conforme a Figura 2.4.

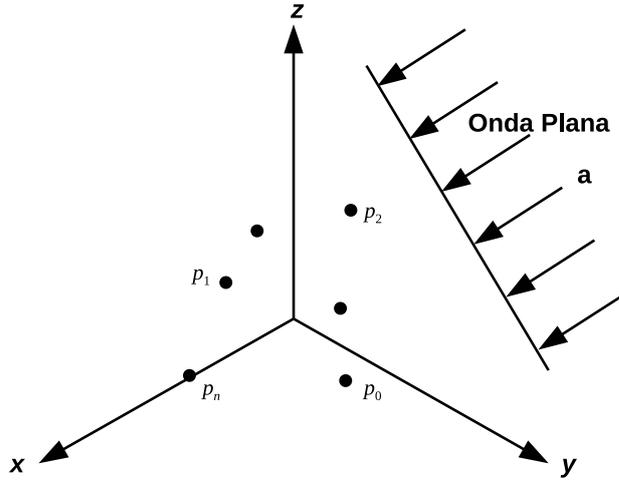


Figura 2.4: Incidência de onda plana em um arranjo com N sensores.

Se em cada sensor incide o sinal $s(t, p)$, de banda estreita, e aplicando a Transformada de Fourier, tem-se o sinal dado por

$$s(t, p) = \begin{bmatrix} s(t, p_0) \\ s(t, p_1) \\ \vdots \\ s(t, p_{N-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(t - \tau_0) \\ s(t - \tau_1) \\ \vdots \\ s(t - \tau_{N-1}) \end{bmatrix} \Rightarrow \text{Transf. Fourier} \Rightarrow S(\omega)e^{-j\omega\tau_n}, \quad (2.13)$$

onde,

$$\tau_n = \frac{\mathbf{a}^T p_n}{c}. \quad (2.14)$$

Sendo c a velocidade de propagação no meio, p_n a posição do elemento n e \mathbf{a} o vetor unitário expresso por

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \cos(\phi) \\ -\sin(\theta) \sin(\phi) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix} = -\mathbf{u}, \quad (2.15)$$

onde θ e ϕ referem-se às coordenadas polar e azimutal. Para ondas planas se propagando em meio homogêneo, define-se o vetor número de onda por

$$\boldsymbol{\kappa} = -\frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \sin(\theta) \cos(\phi) \\ \sin(\theta) \sin(\phi) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix} = -\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{u}. \quad (2.16)$$

onde λ está relacionado com a frequência do sinal incidente. Comparando a

Equação 2.14 com a Equação 2.16, observa-se que $w\tau_n = \kappa p_n$. Assim, a Equação 2.13 no domínio da frequência pode ser reescrita como,

$$\mathbf{S}(\omega) = S(\omega)e^{-j\omega\tau_n} = S(\omega)e^{-j\kappa p_n}, \quad (2.17)$$

sendo o vetor que incorpora as características espaciais do arranjo, referido como *Array Manifold*, dado por

$$v(\kappa) = \begin{bmatrix} e^{-j\kappa p_0} \\ e^{-j\kappa p_1} \\ \vdots \\ e^{-j\kappa p_{N-1}} \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Um arranjo linear uniforme é apresentado na Figura 2.5. Este arranjo é composto de N elementos, com espaçamento d entre eles. Estando o centro do arranjo na origem das coordenadas cartesianas, a localização dos elementos é $p_n = (n - \frac{N-1}{2})d, n = 0, 1, \dots, N-1$ e o vetor número de onda é $\kappa = -\frac{2\pi}{\lambda}[0 \ 0 \ \cos(\theta)]^T$ (assumindo que a onda incide somente sobre a coordenada z).

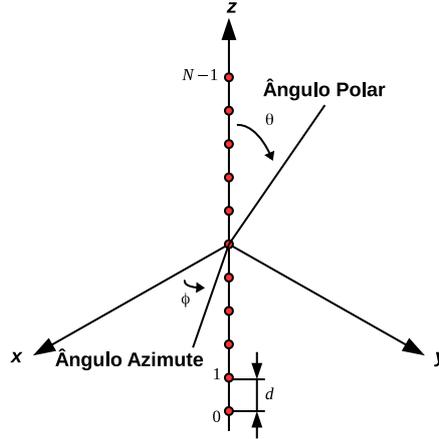


Figura 2.5: Arranjo linear com N Sensores.

Com isso, o *array manifold* para o arranjo linear é dado por

$$v(\psi) = \left[e^{-j(\frac{N-1}{2})\psi} \ e^{-j(\frac{N-3}{2})\psi} \ \dots \ e^{j(\frac{N-3}{2})\psi} \ e^{j(\frac{N-1}{2})\psi} \right]^T, \quad (2.19)$$

onde $\psi = \frac{2\pi}{\lambda}du$ e $u = \cos(\theta)$.

Multiplicando cada elemento do arranjo por um peso $w_i, i = 0, \dots, N-1$, obtém-se a estrutura do *delay-and-sum* conforme a Figura 2.6. Assim, o *beam pattern* definido na Equação 2.1 pode ser reescrito como

$$D(\psi) = w^H v(\psi), \quad (2.20)$$

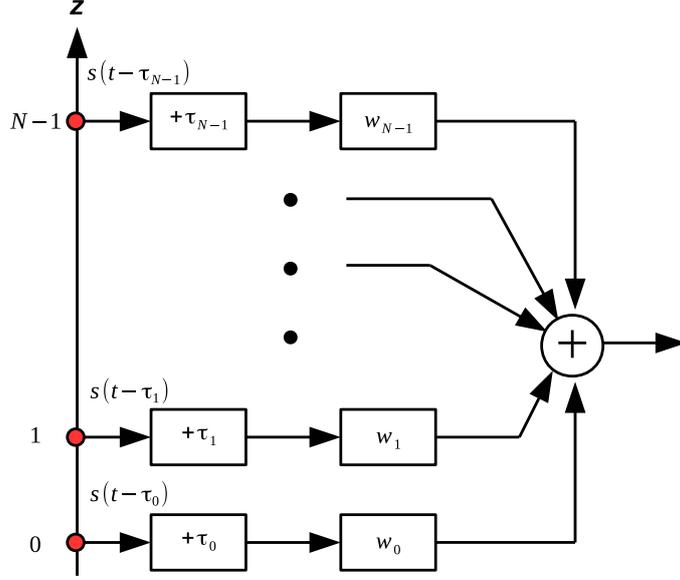


Figura 2.6: Diagrama *beamforming* para arranjo linear com N sensores.

onde, w é um vetor peso $w = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_{N-1}]$ ($[.]^H$ representa a Hermitiana). Assim,

$$D(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n e^{j(n - \frac{N-1}{2})\psi} \quad (2.21)$$

Para o caso de pesos iguais $w_n = \frac{1}{N}$, a Equação 2.21 torna-se

$$\begin{aligned} D(\psi) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(n - \frac{N-1}{2})\psi} \\ &= \frac{1}{N} e^{-j(\frac{N-1}{2})\psi} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn\psi} \\ &= \frac{1}{N} e^{-j(\frac{N-1}{2})\psi} \left[\frac{1 - e^{-jN\psi}}{1 - e^{-j\psi}} \right] \\ &= \frac{1}{N} \frac{\sin\left(N\frac{\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

então, para o arranjo linear com normalização $1/N$ ($w_n = \frac{1}{N}$), têm-se

$$D(\psi) = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(N\frac{\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}, \quad -\frac{2\pi d}{\lambda} \leq \psi \leq \frac{2\pi d}{\lambda}, \quad (2.23)$$

ou,

$$D(\theta) = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \cos(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cos(\theta)\right)}, 0 \leq \theta \leq \pi, \quad (2.24)$$

ou,

$$D(u) = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} u\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} u\right)}, -1 \leq u \leq 1. \quad (2.25)$$

Os módulos das equações 2.23, 2.24 e 2.25 são ilustrados na Figura 2.7.

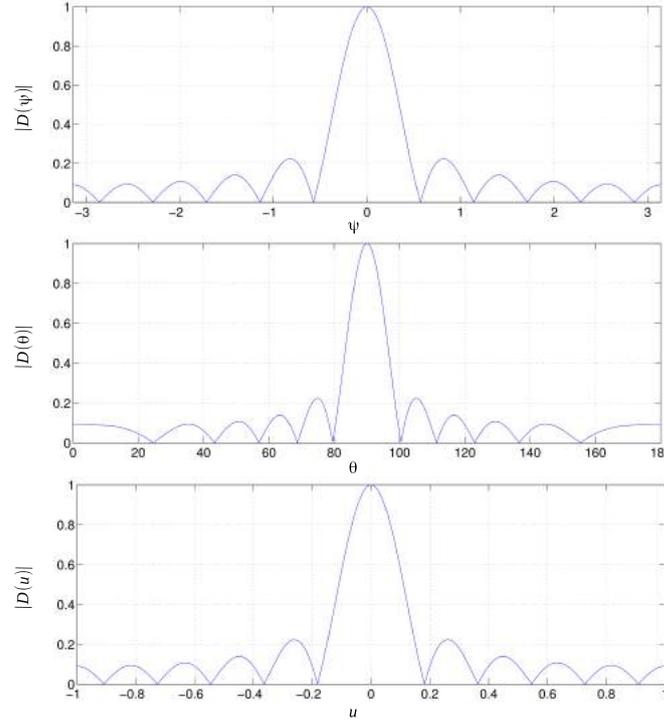


Figura 2.7: *Beam Pattern* de um arranjo linear ($|D|$) para $d = \lambda/2$ e $N = 11$ nos domínios de ψ , θ e u .

A partir da Equação 2.25, alguns parâmetros podem ser visualizados na Figura 2.8 e são definidos como:

- Largura do feixe a meia potência (3-dB *beamwidth* ou *half-power beamwidth*, *HPBW*) - É definido como o ponto onde $|D(u)|^2 = 0,5$ ou $|D(u)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Uma boa aproximação é dada por

$$\frac{\pi N d}{\lambda} u = 1,4 \Rightarrow u = 1,4 \frac{\lambda}{\pi N d} \quad (2.26)$$

- Distância ao primeiro nulo ($BW_{NN}/2$) - É o primeiro ponto onde $|D(u)| = 0$. O primeiro nulo ocorre quando o numerador de $|D(u)|$ é zero e o denominador é diferente de zero. Assim

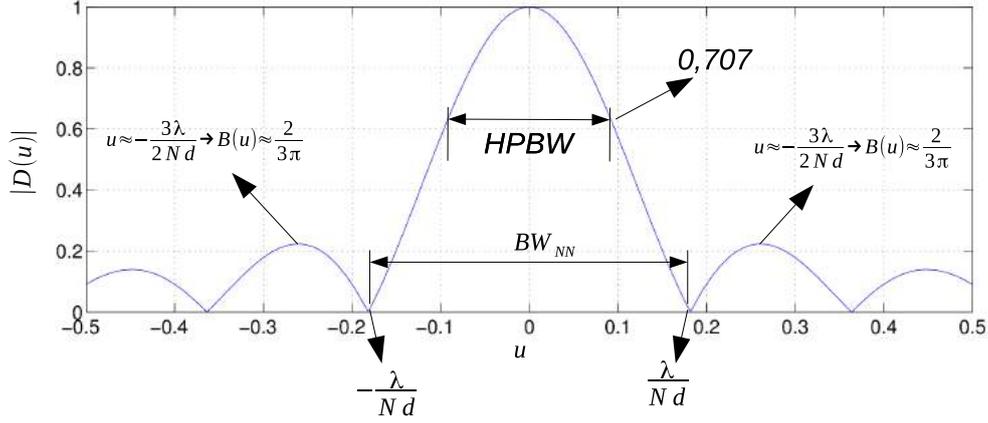


Figura 2.8: Parâmetros do *beam pattern* em um arranjo linear.

$$\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda}u\right) = 0 \Rightarrow u = m\frac{\lambda}{Nd}; u \neq m\frac{\lambda}{d}, m = 1, 2, \dots \Rightarrow u = \frac{\lambda}{Nd} \quad (2.27)$$

- Distância e altura do primeiro lóbulo secundário – São as medidas de ângulo e atenuação entre o lóbulo principal e o secundário. O valor máximo do lóbulo secundário ocorre, aproximadamente, quando o numerador de $|D(u)|$ é um máximo. Assim,

$$\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda}u\right) = 1 \Rightarrow u \approx \pm\frac{(2m+1)\lambda}{2Nd}, m = 1, 2, \dots \Rightarrow$$

$$D\left(\frac{3\lambda}{2Nd}\right) \approx \frac{2}{3\pi}, (\text{para } N \text{ grande}) \quad (2.28)$$

- *Grating lobes* – É a aparição de lóbulos, de mesma altura que o principal, que ocorrem quando o numerador e o denominador são iguais a zero. Este efeito ocorre na região visível do espectro $|D(u)|$ quando o espaçamento entre elementos $d > \lambda/2$, indicando uma ambiguidade de direção.

Aliasing espacial refere-se a indicação de existência de sinal em uma direção que não exista sinal. Como no sonar, o objetivo da conformação de feixe é a localização de fontes verdadeiras, este efeito deve ser evitado. A relação d/λ , é o parâmetro que deve ser analisado para evitar problemas de *aliasing* espacial. De um modo geral, utiliza-se $d \leq \lambda/2$ para evitar possíveis problemas de *aliasing* espacial [12].

Alguns *beam patterns* polares são mostrados na Figura 2.9 em função de diferentes relações de d/λ , para uma frente de onda incidindo em *broadside*. Percebe-se a

degradação de $|D(\theta)|$ a partir de $d = \lambda/2$ (chamado arranjo padrão), até o aparecimento de *grating lobes* em 0° e 180° , quando $d = \lambda$.

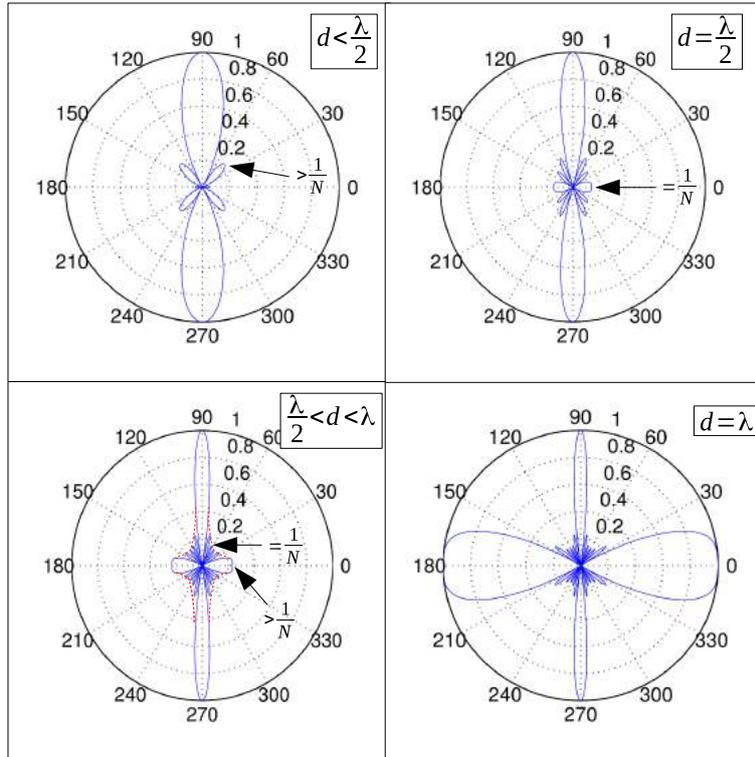


Figura 2.9: *Beam Pattern* polar de um ULA para diferentes relações entre o espaçamento de sensores d e o comprimento de onda incidente λ .

2.3 Arranjo Circular Uniforme com Elementos Direcionais

A Figura 2.10 apresenta um modelo de UCA, de raio r e com 4 sensores espaçados por d , proposto por [10]. São assumidos D sinais incidentes, que coincidem com o plano do arranjo, em vez de apenas um sinal como considerado para o arranjo linear.

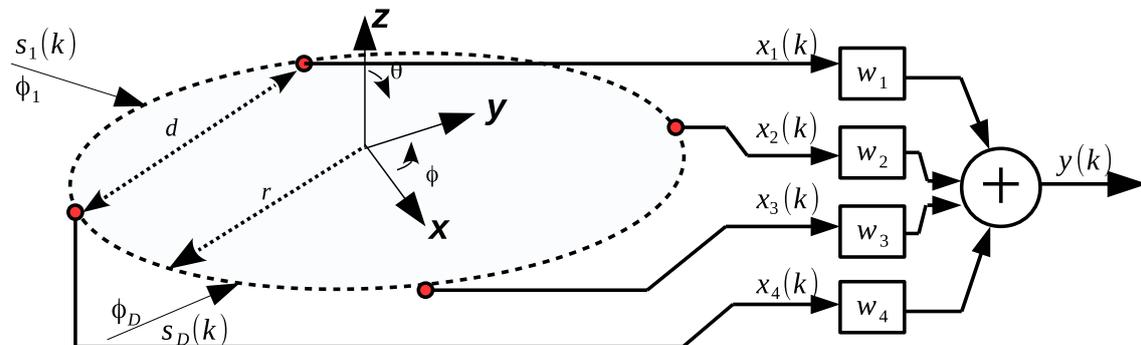


Figura 2.10: Arranjo circular uniforme de raio r e com 4 sensores espaçados por d .

A saída do UCA é dada por

$$y(k) = w^H x(k), \quad (2.29)$$

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, dados por

$$\begin{aligned} x(k) &= [v(\phi_1) \ v(\phi_2) \ \dots \ v(\phi_D)] \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \\ \vdots \\ s_D(k) \end{bmatrix} + \eta(k) \\ &= Vs(k) + \eta(k). \end{aligned} \quad (2.30)$$

Na Equação 2.30, $v(\phi)$ é o vetor resposta do arranjo (*Array Response Vector - ARV*), ou seja, 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 generalizado por

$$v(\phi) = \begin{bmatrix} g_0(\phi)e^{-j\kappa p_0} \\ g_1(\phi)e^{-j\kappa p_1} \\ \vdots \\ g_{N-1}(\phi)e^{-j\kappa p_{N-1}} \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

onde κ é dado pela Equação 2.16 e assume-se $\theta = 90^\circ$ (todos elemento no mesmo plano). Com isso, $\kappa = -\frac{2\pi}{\lambda} [\cos(\phi) \sin(\phi) \ 0]^T = \beta [\cos(\phi) \sin(\phi) \ 0]^T$. 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 do sensor).

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 2.31 pode ser reescrita por

$$v(\phi) = \begin{bmatrix} g(\phi)e^{-j\beta r \cos(\phi)} \\ g\left(\phi - \frac{2\pi}{N}\right) e^{-j\beta r \cos\left(\phi - \frac{2\pi}{N}\right)} \\ \vdots \\ g\left(\phi - \frac{2(N-1)\pi}{N}\right) e^{-j\beta r \cos\left(\phi - \frac{2(N-1)\pi}{N}\right)} \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

onde assume-se que os N sensores tem ganho máximo na direção radial, para fora do centro do arranjo. Assim, de acordo com a Equação 2.20,

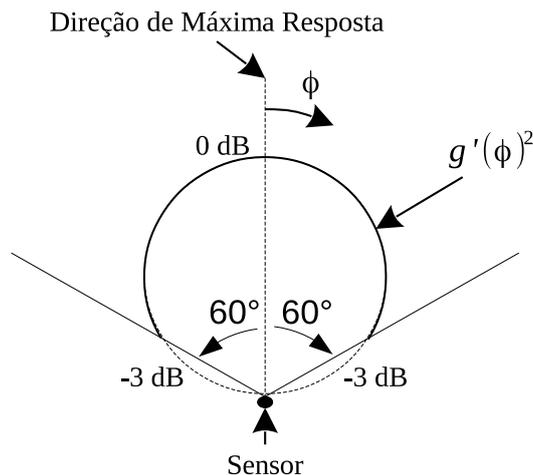


Figura 2.11: Diretividade de um Hidrofone segundo Equação 2.34.

$$D(\phi) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n g_n(\phi - \phi_n) e^{j\beta r \cos(\phi - \phi_n)}. \quad (2.33)$$

Nota-se que a função diretividade para o arranjo circular com ganhos direcionais não encontra equacionamento fechado como no arranjo linear. Aproximações pela função de Bessel podem ser aplicadas em casos de elementos omnidirecionais, como apresentado em [3]. Como os sensores estudados são direcionais, estas aproximações não serão tratadas aqui.

2.4 Sensores com Ganho Direcional

Os hidrofones são sensores que, geralmente, captam energia de forma omnidirecional, no entanto, quando utilizados nos arranjos cilíndricos para sonar, são dispostos em uma estrutura propícia para que apresentem ganhos direcionais. Estes ganhos são relacionados, principalmente, com a sua geometria, com a frequência da onda incidente [7] e com o tipo de estrutura na qual este sensor está acoplado (abafador ou placa de reflexão sonora). Assim, em [7, 8] utiliza-se a assunção da diretividade em cada sensor, de acordo com [11], é dada por

$$g'(\phi)^2 = \cos(\phi), \quad (2.34)$$

sendo, na Equação 2.32, $g(\phi) = g'(\phi)^2$. Da Equação 2.34, pode-se ilustrar a função de irradiação, apresentada na Figura 2.11.

Apesar da Equação 2.34 ser considerada uma aproximação válida, é proposto em [10] um ganho de acordo com a diretividade desejada. A diretividade para cada elemento pode ser representada por

$$D = \frac{2^{2m+2}\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi (1 + \sin(\theta))^m (1 + \cos(\phi))^m \sin(\theta) d\theta d\phi}, \quad (2.35)$$

onde m representa um parâmetro de controle da diretividade. Assumindo que os sensores são perfeitamente casados e sem perda, o ganho direcional é dado por

$$G(\phi) = \frac{D}{2^m} (1 + \cos(\phi - 2\pi nN))^m, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (2.36)$$

sendo $g(\phi) = \sqrt{G(\phi)}$, na Equação 2.32. A Figura 2.12 apresenta os gráficos de irradiação de um elemento para $m = 0, 2.7$ e 8.7 , e $D = 1, 4$ e 10 .

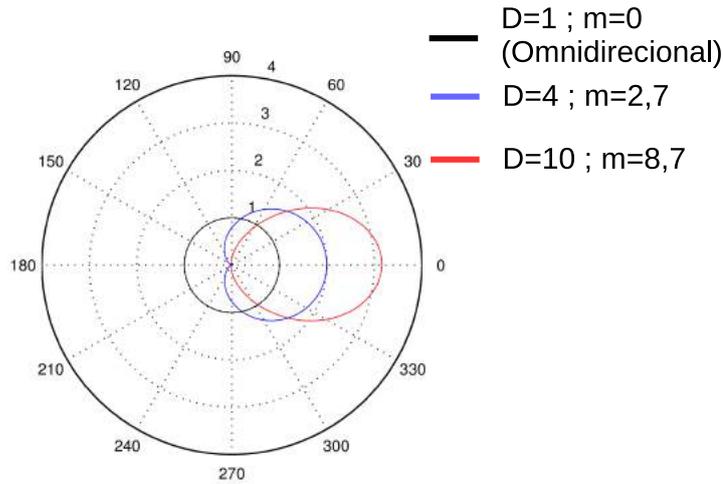


Figura 2.12: Diretividade de um Hidrofone segundo Equação 2.36.

2.5 Arranjo Circular - Implementação

O processo de implementação do *delay-and-sum* no arranjo circular é feito de acordo com [13] e explicado com auxílio da Figura 2.13. Esta figura ilustra um arranjo com geometria circular, e uma frente de onda chegando de 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)⁴. 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.

Como discutido anteriormente, o procedimento de atrasar τ_n é uma forma de "sincronizar" os sinais, para fazer com que o arranjo circular seja considerado 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

⁴Para este arco dizemos que o feixe é centrado aos canais 1 e 32, assumindo a simetria par.

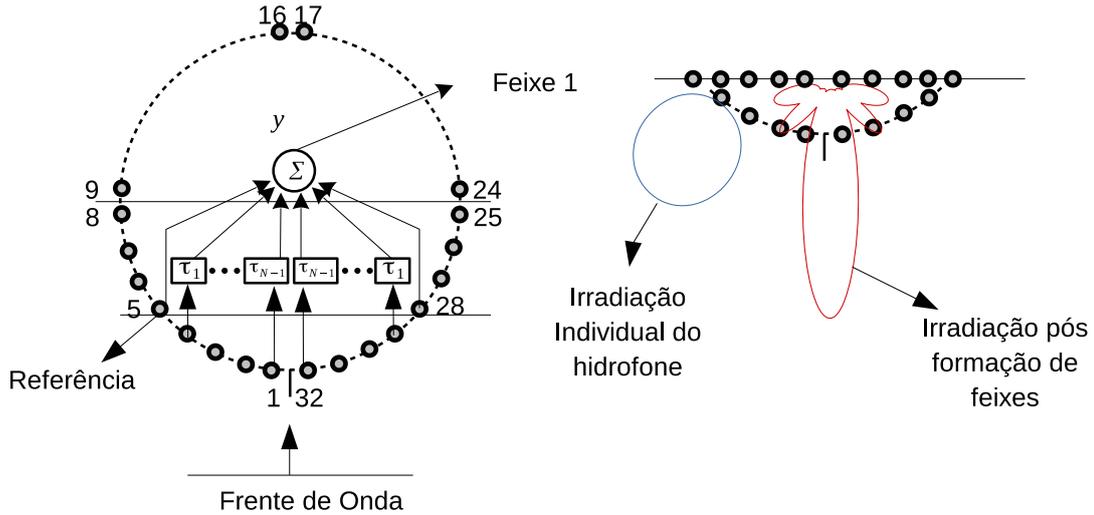


Figura 2.13: Diagrama de implementação do *beamforming* para o arranjo circular.

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.

Na Figura 2.13, ressalta-se a representação da irradiação ao utilizar um sinal individual de um sensor e o diagrama de irradiação após a formação de feixes, onde percebe-se que existe um ganho direcional.

Este procedimento é repetido utilizando-se elementos adjacentes, conforme apresentado na Figura 2.14. 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.

É importante ressaltar que, na teoria apresentada do *delay-and-sum* para arranjo linear, o atraso é feito para realizar uma varredura. A varredura consiste em aplicar atrasos, correspondentes a diferentes possíveis ângulos de incidência, e encontrar aquele que maximiza a resposta do filtro. Na implementação desenvolvida aqui, este atraso é feito para compensar a distância do arco até a corda, sendo a varredura realizada ao utilizar diferentes arcos.

As saídas do *delay-and-sum* são os feixes formados, no entanto, como o objetivo é encontrar a direção de chegada da fonte sonora, é comum calcular a energia desses feixes para uma visualização das fontes existentes ao redor do arranjo. O resultado desta operação é apresentado comumente em forma de gráfico de Energia \times Tempo \times Marcação, conhecido como gráfico *Waterfall* (ou, *Waterfall Display*) [14]. Quando existe sinal em uma das direções, este terá maior intensidade (energia), e isto poderá ser observado no *Waterfall*.

O gráfico de energia *Waterfall* é utilizado para visualização do cenário, ou seja, para apresentação das fontes sonoras existentes ao redor do arranjo ao longo do tempo de forma a possibilitar o acompanhamento da fonte. A Figura 2.15 apresenta

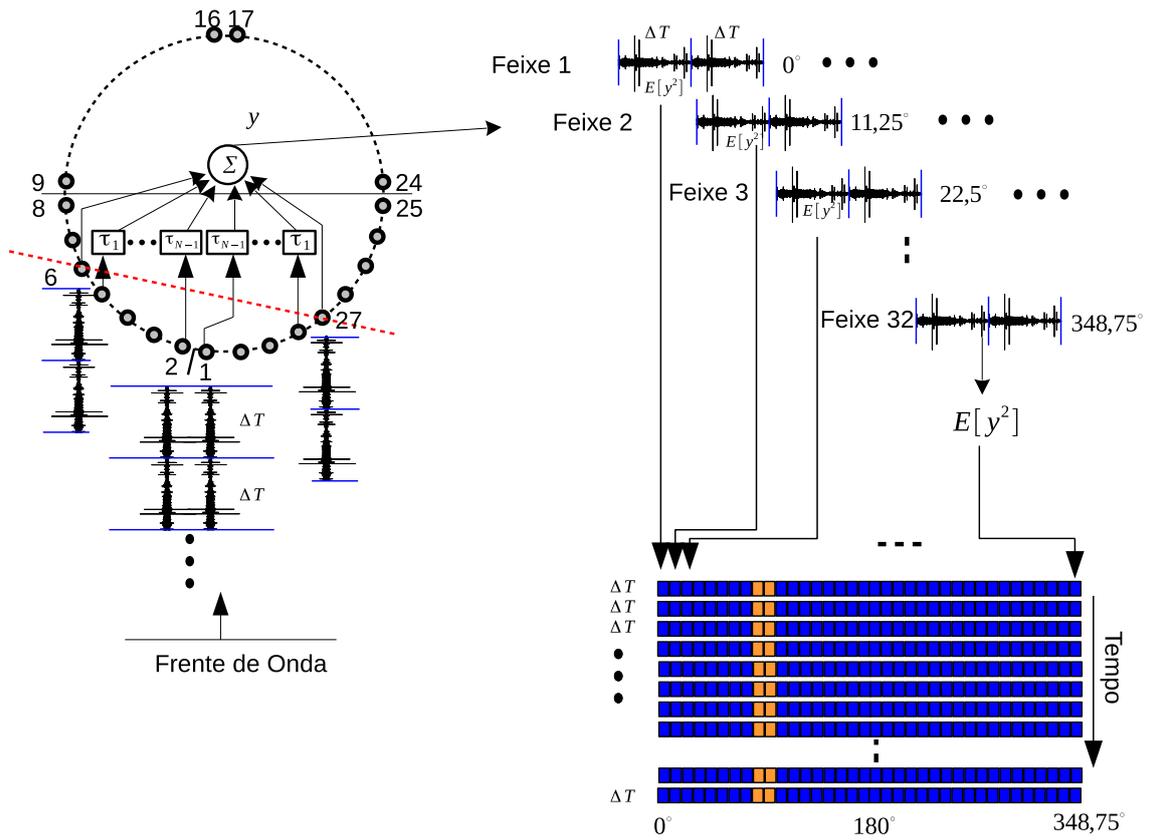


Figura 2.14: *Beamforming* e *Waterfall Display* para estimação de direção de chegada.

um gráfico *Waterfall*, de dados reais, para exemplificar o acompanhamento de uma embarcação.

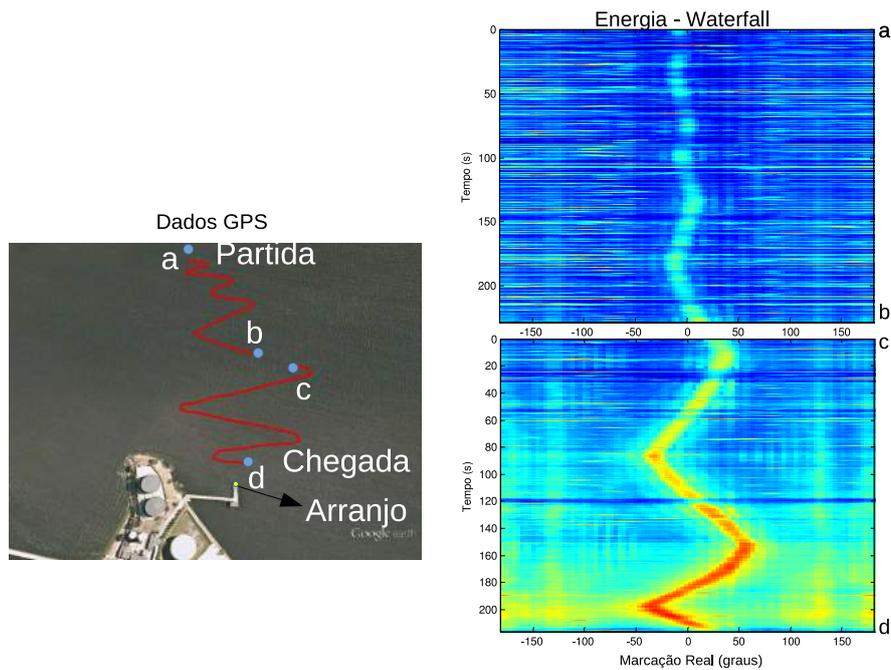


Figura 2.15: *Waterfall Display* para acompanhamento de uma fonte sonora.

2.6 Determinação do Arco Utilizado no Formador de Feixes

No método de formação de feixes apresentados em [7] e [8], utiliza-se um número (K) específico de elementos do arranjo para realizar o atraso-e-soma. Nestes trabalhos, considerou-se que, para uma atenuação maior que 3dB, a energia captada por um hidrofone direcional é desprezível (vide Figura 2.11). Logo, um setor de passagem (arco) é definido por $|\phi| \leq \pi/3$, conforme apresentado na Figura 2.16.

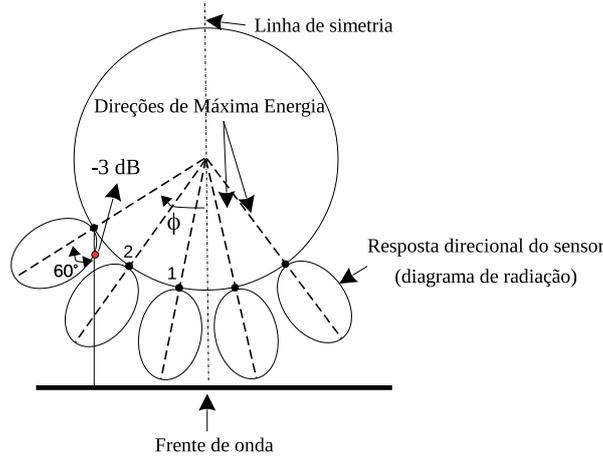


Figura 2.16: Definição do setor de passagem segundo Equação 2.37.

O número de elementos utilizado no arco é limitado ao primeiro elemento que recebe energia fora do setor de passagem, para uma dada frente de onda. Assim, pode-se determinar que

$$K = \frac{S}{3}, \quad (2.37)$$

onde K é o número de elementos do arco e S é o número total de sensores do arranjo. Como pode ser visto em [7, 8], foi utilizado um método determinístico para escolha do número de elementos a ser utilizado na conformação, onde todos os sensores foram considerados idênticos. Um método de estimação deste número de sensores, baseados em dados experimentais, é o objetivo principal proposto neste trabalho.

2.7 Considerações sobre Erros na Formação de Feixes

Neste trabalho, aplica-se a técnica de formação de feixes *delay-and-sum* no domínio do tempo. Deve-se analisar um possível erro relacionado ao atraso em fase desta técnica. A partir da Figura 2.17, calcula-se o atraso do i -ésimo hidrofone. Este atraso, representado por amostras temporais, é dado por

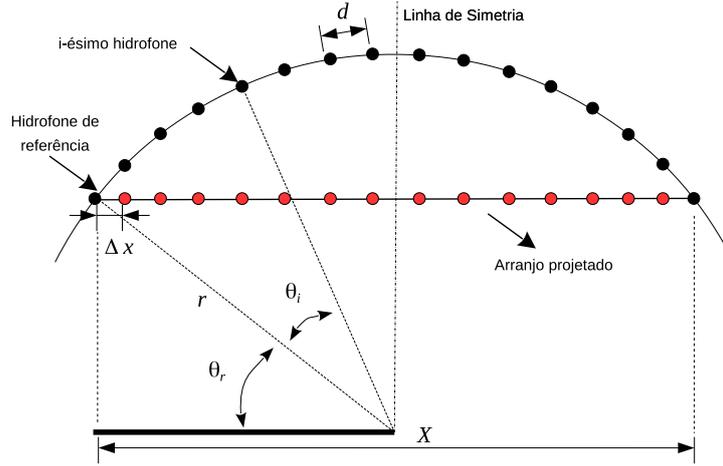


Figura 2.17: Setor do arranjo circular projetado em um arranjo em linha (projeção na corda).

$$n_i = \left\{ r \frac{[\sin(\theta_i + \theta_r) - \sin(\theta_r)]}{c} f_a \right\}, \quad (2.38)$$

onde f_a é a frequência de amostragem, $\{\cdot\}$ é o inteiro mais próximo, θ_i e θ_r são os ângulos dos hidrofones i e da referência r e c é a velocidade de propagação do meio.

Considerando uma onda plana incidente em um dos arcos do arranjo circular, de tom puro f_c , quando $f_a \gg f_c$ o valor de n_i , calculado na Equação 2.38, não causará grandes erros ao atrasar as amostras para que os sensores estejam em fase. Obtém-se esta conclusão pois haverá muitos valores amostrados da onda durante um ciclo, fazendo com que, n_i/f_a seja próximo ao atraso necessário para alinhar os sinais. O problema ocorre quando f_a é da mesma ordem de f_c . Neste caso, a aproximação para um inteiro mais próximo pode causar um erro significativo. Assim, para uma onda sonora limitada em banda, a análise do componente de maior frequência (f_{sup}) e a frequência de amostragem são extremamente importantes.

Uma das técnicas aplicadas para resolver o erro relacionado a amostragem é a interpolação. Nesta técnica, aumenta-se artificialmente a taxa de amostragem por um fator L . Assim, a nova frequência de amostragem é dada por

$$\hat{f}_a = Lf_a, \quad (2.39)$$

onde \hat{f}_a é a nova taxa de amostragem. O valor de L deve ser escolhido de forma a atender $\hat{f}_a \gg f_{sup}$.

Este processo ocorre, inicialmente, pela introdução de $L - 1$ zeros entre as amostras originais. Posteriormente, substituem-se estas amostras nulas através de algum método de interpolação. Alguns métodos de cálculo destes valores de interpolação podem ser encontrados em [15]. A Figura 2.18 esquematiza o processo de interpolação. Nota-se que, ao final do processo de conformação de feixes, retorna-se à

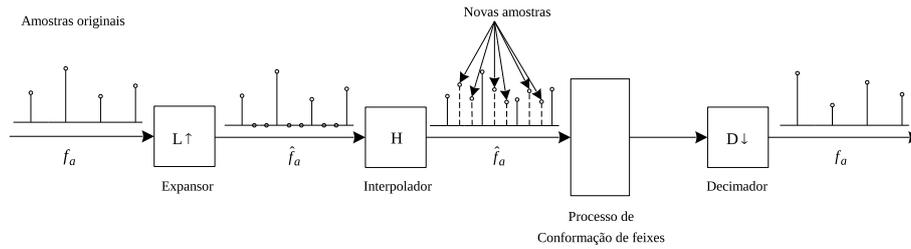


Figura 2.18: Diagrama de interpolação dos dados.

frequência de amostragem original, utilizando um decimador. O decimador reamostra o sinal excluindo amostras, de forma a reduzir o esforço computacional.

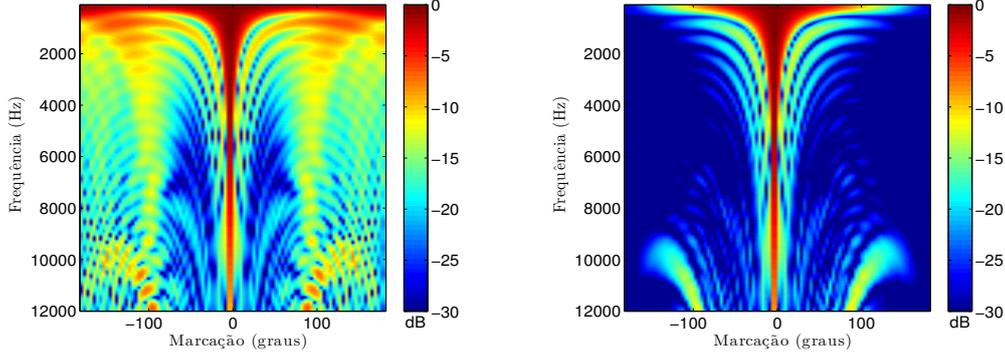
Apesar da técnica de interpolação resolver o problema em questão, existe um compromisso ao aumentar o valor de L . Quando L é aumentado indiscriminadamente, minimiza-se o erro com relação a fase, no entanto aumenta-se a carga computacional. Este fato pode ser interpretado considerando o interpolador como um filtro: a medida que L aumenta, comprimem-se os espectros no domínio da frequência, o que necessita de um filtro com muitos coeficientes. Assim como apresentado em [15], imagens aparentes no domínio da frequência devem ser tratadas para evitar *aliasing*.

Uma outra solução apresentada em [7] consiste em trabalhar com o sinal no domínio da transformada de Fourier. A implementação de formadores para banda larga são modelados como um conjunto de formadores para banda estreita. Esta técnica é geralmente implementada através da transformada discreta de Fourier (DFT) do sinal adquirido pelos sensores. Aplica-se a DFT, selecionam-se os bins de frequência de interesse, realiza-se o processamento para cada componente de frequência e, finalmente, obtém-se o sinal no domínio do tempo através da transformada discreta inversa de Fourier (IDFT). Este procedimento é denominado *delay-and-sum* no domínio da frequência [16].

2.8 Limites de operação

Como apresentado na Figura 2.9, o *beam pattern* de um arranjo varia de acordo com a relação d/λ . No caso em análise, o sinal incidente é de banda larga. Assim, a resposta do arranjo pode ser analisada para a frequência inferior (equivalente ao comprimento de onda máximo, λ_{max}) e superior (equivalente ao comprimento de onda mínimo, λ_{min}) de operação.

Conforme abordado para o arranjo linear, problemas de *aliasing* espacial são evitados garantindo $d \leq \lambda/2$. Para um dado arranjo, desigualmente espaçado de N elementos, como apresentado na Figura 2.17, a menor distância entre elementos (Δx), e a maior distância (X , referente ao comprimento do arranjo), são igualados a $\lambda/2$



(a) *Beam Pattern* utilizando elementos omnidirecionais. (b) *Beam Pattern* utilizando elementos diretivos com $D = 4$.

Figura 2.19: *Beam Pattern* em diferentes frequências (a) sem ganho e (b) com ganho.

para se obter os limites de frequência [17].

Assim, $\lambda_{min} = 2 \Delta x$, mas, sendo conservador, assume-se $\Delta x \approx d$, onde d é o espaçamento entre sensores do arranjo circular. Logo, para a maior frequência, tem-se:

$$f_{max} = \frac{c}{2d}. \quad (2.40)$$

Para a menor frequência, onde o comprimento de onda $\lambda_{max} = 2X$, tem-se:

$$f_{min} = \frac{c}{2X}. \quad (2.41)$$

A Equação 2.40 é desenvolvida para resolver o problema da *aliasing* espacial. Já a Equação 2.41 indica o momento em que o arranjo possui diretividade desprezível, ou seja, a frequência é tão baixa a ponto do arranjo ser considerado praticamente um ponto, não sendo possível discriminar espacialmente as fontes, que é o objetivo do uso do arranjo. Na realidade, não existe uma frequência mínima para o arranjo operar, no entanto, neste caso, o arranjo é incapaz de estimar a direção de chegada do sinal incidente.

A Figura 2.19 ilustra o *beam pattern* de um arranjo circular com 96 elementos (utilizando um arco com 32 sensores) e 3 metros de diâmetro (configuração típica dos arranjos instalados em submarinos) variando-se a frequência de $100Hz$ até $12kHz$. Na Figura 2.19a é simulado um arranjo com elementos omnidirecionais e na Figura 2.19b os elementos têm ganhos conforme a Figura 2.12 para $D = 4$.

Percebe-se, para ambos *beam patterns*, que em baixa frequência o arranjo se comporta como um ponto, não conseguindo discriminar espacialmente uma fonte. Nota-se também que ao utilizarmos sensores diretivos tem-se uma maior atenuação nos lóbulos laterais, comparado ao *beam pattern* com sensores omnidirecionais.

Nota-se que, de acordo com a Equação 2.41, $f_{min} = 250Hz$ e da Equação 2.40,

$f_{max} \approx 7650Hz$, no entanto, a Figura 2.19b mostra que o arranjo pode operar até $10kHz$ sem problemas de *aliasing* espacial ($f_{max} \approx 7650Hz$ devido a assunção conservadora de $\Delta x \approx d$). Para as frequências de operação calculadas pode-se notar o *beam pattern* para o arranjo com elementos diretivos, na Figura 2.20.

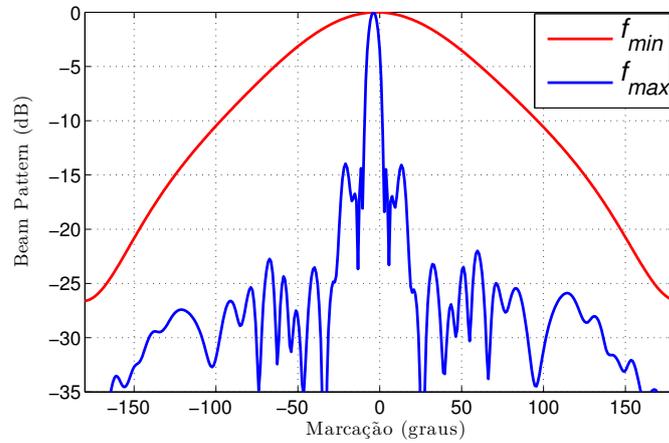


Figura 2.20: *Beam Pattern* para $f_{min} = 250Hz$ e $f_{max} = 7650Hz$ de um arranjo circular com 96 sensores e diretividade ($D = 4$).

Capítulo 3

Método Proposto para Estimação do Número de Sensores Utilizando a Razão Sinal Ruído

Neste capítulo, é apresentado o método proposto para determinação do número de sensores a ser utilizado no arco, assim como a análise da estimação de máxima verossimilhança utilizada na técnica de *denoising* aplicada ao *beamforming* para o arranjo circular.

3.1 Determinação do Número de Sensores do Arco

Como abordado no Capítulo 2, trabalhos anteriores propuseram que o número de elementos utilizado no arco fosse limitado ao primeiro elemento que receba energia fora do setor de passagem, para uma dada frente de onda [7, 8]. Assim, pôde-se determinar, na Equação 2.37 que

$$K = \frac{S}{3},$$

onde K é o número de elementos do arco e S é o número total de sensores do arranjo. Como pode ser visto, utilizou-se de um método determinístico para estimar o número de elementos a ser utilizado na conformação, onde não levou-se em conta o efeito da flutuação existente entre sensores, nem a interação entre sensores devido ao agrupamento na forma circular.

O estudo proposto aqui, desenvolve um método para determinar o número de elementos baseado na razão sinal ruído, levando em consideração a análise estatística

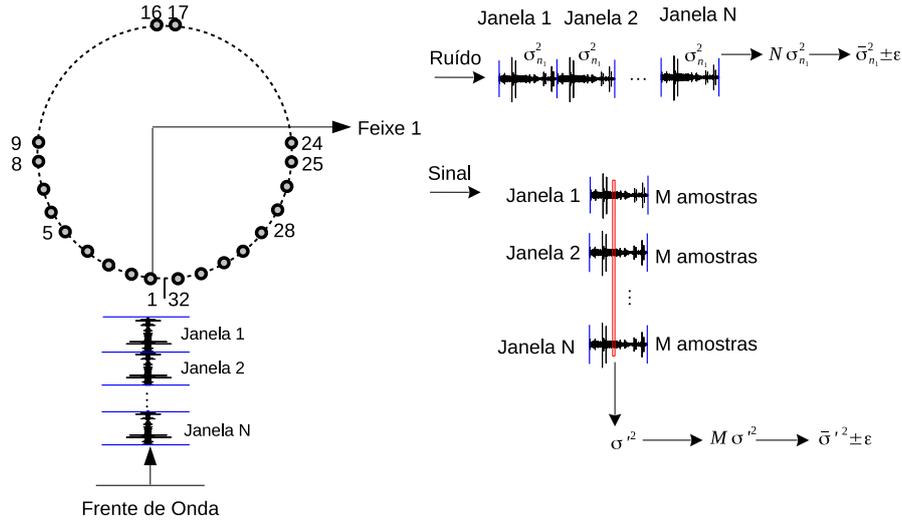


Figura 3.1: Método para obtenção da SNR utilizando um sensor.

de sinais experimentais. Primeiramente, supõe-se um cenário que representa o ruído ambiente, ou seja, sem a presença de uma fonte identificável (por exemplo, uma embarcação gerando ruído de cavitação). Posteriormente, um outro cenário representa o sinal, sabidamente em meio a ruído, e em direção conhecida do arranjo. A SNR, definida em [1], é dado por

$$SNR = \frac{E[s^2]}{E[n^2]}, \quad (3.1)$$

onde s representa o sinal e n o ruído. No entanto, para a situação em análise, tem-se $s' = s + n$. Assim, $E[s'^2]$ é dado por

$$\begin{aligned} E[s'^2] &= E[(s + n)^2] = E[s^2] + E[n^2] + \cancel{2E[sn]} \rightarrow 0 \implies \\ E[s^2] &= E[s'^2] - E[n^2]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Nota-se que na Equação 3.2 desconsidera-se a correlação entre sinal e ruído, logo

$$SNR = \frac{E[s^2]}{E[n^2]} = \frac{E[s'^2]}{E[n^2]} - 1. \quad (3.3)$$

A Equação 3.3 é desenvolvida para um sensor como mostrado na Figura 3.1. Esta figura ilustra um arranjo de sensores com 32 elementos. São definidas N janelas temporais (cada janela com M amostras), relacionadas ao intervalo de integração para os cálculos de $E[s'^2]$ e $E[n^2]$.

Por considerar o sinal s' estocástico, supõe-se que cada uma das janelas representa um experimento, assim, para o sinal, obtém-se M variâncias (σ'^2) calculadas a partir da Equação A.8 [18]. Uma representação inicial para $E[s'^2]$ é obtida pela

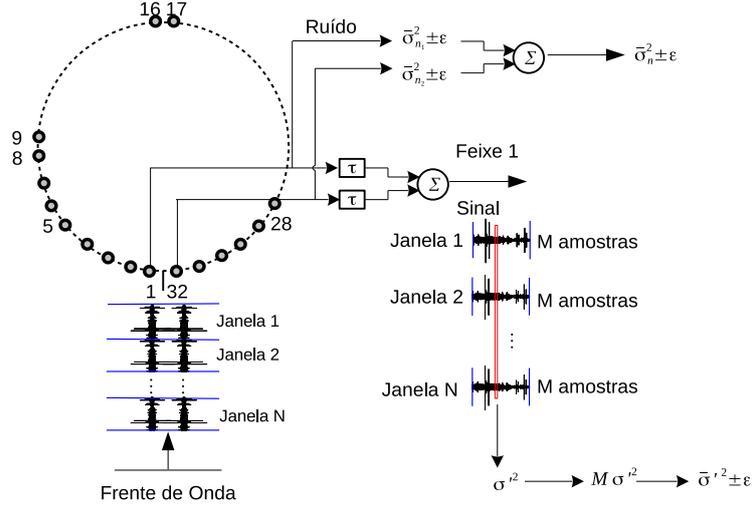


Figura 3.2: Método para obtenção da SNR utilizando dois sensores.

média das M variâncias, logo, $E[s'^2] = \bar{\sigma}'^2 \pm \epsilon$, onde ϵ é o erro, como ilustrado na Figura 3.1.

Para o ruído, o cálculo de $\sigma_{n_i}^2$, onde i é o índice do sensor, é realizado utilizando M amostras sequenciais no tempo e $E[n_i^2] = \langle n_i^2 \rangle = \bar{\sigma}_{n_i}^2 \pm \epsilon$ é obtido a partir média das variâncias das janelas (N variâncias). Após a análise dos dados, será avaliada se a média é o parâmetro apropriado para representar a distribuição das variâncias de σ'^2 e $\sigma_{n_i}^2$.

Desta forma, a Equação 3.3 torna-se

$$SNR = \frac{E[s^2]}{E[n^2]} = \frac{\bar{\sigma}'^2}{\bar{\sigma}_n^2} - 1. \quad (3.4)$$

O cálculo da SNR utilizando dois sensores do arranjo, conforme apresenta a Figura 3.2, é dado por

$$SNR = \frac{E[s^2]}{E[n^2]} = \frac{E[(s_1 + s_2)^2]}{E[(n_1 + n_2)^2]}, \quad (3.5)$$

onde os índices de s e n representam os sensores (na Figura 3.2 o índice 2 refere-se ao sensor 32). Novamente, para a situação em análise, tem-se $s' = s + n$. Assim,

$$\begin{aligned} E[(s'_1 + s'_2)^2] &= E[(s_1 + n_1 + s_2 + n_2)^2] \\ &= \overbrace{E[s_1^2] + E[s_2^2] + 2E[s_1 s_2]}^{E[(s_1 + s_2)^2]} + \overbrace{E[n_1^2] + E[n_2^2] + 2E[n_1 n_2]}^{E[(n_1 + n_2)^2]} + 2E[(n_1 + n_2)(s_1 + s_2)] \\ &\Rightarrow E[(s_1 + s_2)^2] = \overbrace{E[(s'_1 + s'_2)^2]}^{\bar{\sigma}'^2} - E[(n_1 + n_2)^2]. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Na Equação 3.6, desconsidera-se a correlação entre sinal e ruído. Além disso, na Equação 3.5 é considerado que $E[(n_1 + n_2)^2] = E[n_1^2] + E[n_2^2]$, assim, a SNR é dada por

$$SNR = \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2} - 1. \quad (3.7)$$

A Equação 3.7 é desenvolvida para dois sensores como ilustrado na Figura 3.2. Nesta equação σ^2 é obtido após atrasar e somar os sinais dos sensores. Já $\sigma_{n_i}^2$ é obtido individualmente dos canais. Logo, a SNR para K sensores formando o arco, pode ser dada por

$$SNR = \frac{E[s^2]}{E[n^2]} = \frac{\bar{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^K \sigma_{n_i}^2} - 1 \quad (3.8)$$

Percebe-se o ruído considerado no cálculo da SNR é obtido a partir de um trecho onde não tinha presença de uma fonte identificável (embarcação). Para os dados coletados do arranjo do submarino não obteve-se esta condição de coleta, assim, o ruído será considerado a réplica de um canal que esteja menos influenciado pelas fontes presentes.

3.2 Simulação da SNR 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 na seção 2.3 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 incide 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 2.30.

A Figura 3.3a mostra as amplitudes (escala de cores) dos sinais recebidos em cada um dos 32 sensores do arranjo. Utilizou-se o modelo de diretividade apresentado na Equação 2.35, com $D = 4$. Percebe-se que os elementos opostos ao canal 16 recebem o sinal completamente atenuado.

A Figura 3.3b mostra a SNR em função do número de sensores utilizados no arco. Percebe-se que a SNR aumenta na medida que utilizamos mais sensores, atinge um

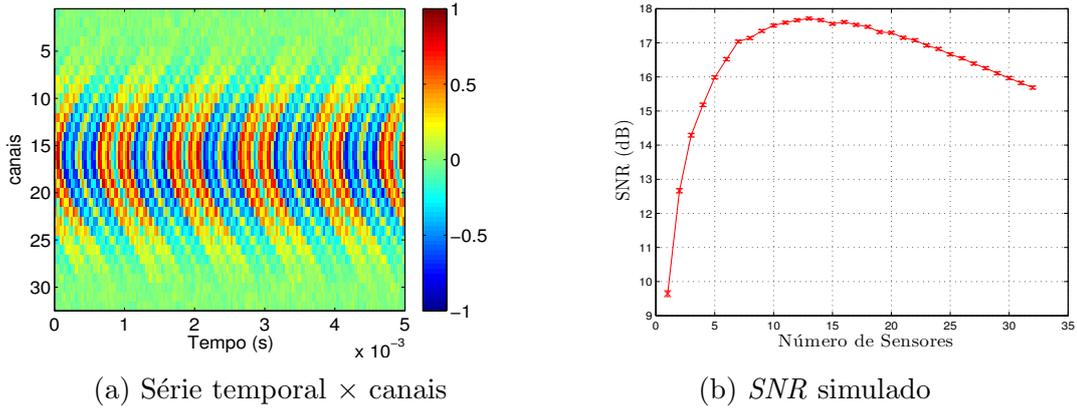


Figura 3.3: Característica da SNR com dados de simulados.

valor máximo seguido de uma queda. A queda da SNR ocorre devido a soma dos sinais da parte oposta do arranjo conter uma parcela de ruído maior que a de sinal.

Pelo fato do sinal gerado ser uma senóide com banda estreita de frequência (tons em $1kHz$, $3kHz$ e $7kHz$) o modelo proposto foi adequado para um sinal determinístico (a série temporal gerada fornece apenas uma única variância, não foi necessário o uso de janelas). Apesar desta modificação, o resultado será utilizado para a comparação com os dados experimentais.

3.3 Estimação de Máxima Verossimilhança para *Denoising* de canais

Uma forma de compensar canais que apresentam ruído eletrônico com maior intensidade é aplicando a técnica de *denoising* explorando a Estimação de Máxima Verossimilhança. Na MLE, o parâmetro a ser estimado (\hat{A}) é dado por

$$\hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^L \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^L \frac{1}{\sigma_i^2}}, \quad (3.9)$$

onde x_i é uma medida com distribuição Gaussiana e σ_i^2 é a variância de ruído branco Gaussiano. A Equação 3.9 é desenvolvida no Apêndice A.

Esta estimação é realizada de forma a ponderar os canais, dando pesos menores para os sinais de canais mais ruidosos, ou seja, atenuando-os. Assim, possíveis canais defeituosos podem ser mascarados no processamento.

Para a aplicação desta técnica no arranjo cilíndrico, multiplica-se o sinal de cada canal por um peso w_m , conforme apresentado na Figura 3.4. Cada peso w_m , referente ao sensor m , é dado por

$$w_m = \frac{\frac{1}{\sigma_m^2}}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{\sigma_i^2}}. \quad (3.10)$$

Como temos o interesse em verificar o crescimento da SNR conforme somamos os canais, na implementação do *beamforming* apresentada na seção 2.5 a saída não é normalizada pelo número de sensores (K) utilizado no arco. Na Equação 3.10, se $\sigma_i^2 = \sigma_m^2, i = 0, \dots, K$ (situação onde os canais são idênticos), $w_m = \frac{1}{K}$ e a saída do *beamforming* estaria normalizada por K . Para efeito de comparação multiplica-se w_m por K , obtendo a saída do *beamforming* sem normalização. Desta forma, a Equação 3.10 torna-se

$$w_m = K \frac{\frac{1}{\sigma_m^2}}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{\sigma_i^2}}. \quad (3.11)$$

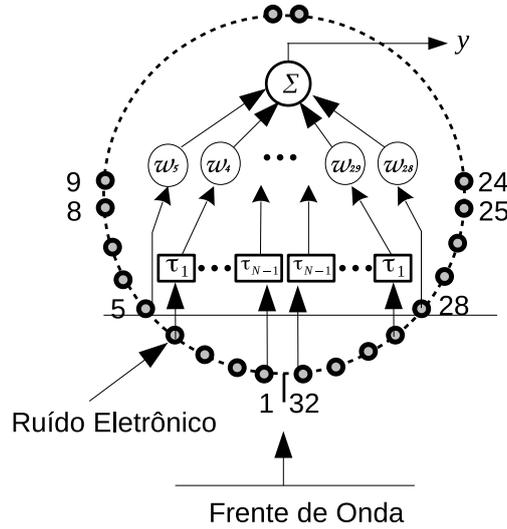


Figura 3.4: *Delay-and-sum beamforming* aplicando *denoising* de canais.

Além da utilização do ruído eletrônico para o cálculo da MLE, propõem-se uma avaliação do efeito da compensação do ruído ambiente. Esta proposta advém do fato de que o ruído ambiente não é isotrópico ao redor do arranjo como será analisado no Capítulo 4.

Como comentado anteriormente, a representação do ruído para os dados coletados do arranjo do submarino será considerado uma réplica de um canal que sofra menor influencia das fontes presentes, assim $\sigma_i^2 = \sigma_m^2, i = 0, \dots, K$, não fazendo sentido aplicar a técnica de *denoising* para os dados do submarino.

Capítulo 4

Dados de um Arranjo Cilíndrico em Escala Reduzida

Este capítulo apresenta o experimento realizado com um arranjo cilíndrico de hidrofones em escala reduzida construído no IPqM, conectado a um sistema de aquisição para coleta de dados. Os dados obtidos são analisados e caracterizados de acordo com as condições do local do experimento. Os seguintes aspectos do experimento serão abordados:

- Arranjo cilíndrico de hidrofones;
- Sistema de aquisição de sinais;
- Local e coleta dos dados;
- Considerações sobre os dados;
- Análise do ruído ambiente;
- Análise do trecho com fonte de sinal; e
- Análise do ruído eletrônico.

4.1 Arranjo Cilíndrico

O propósito da construção de um arranjo de sensores foi possibilitar a coleta de dados brutos provenientes diretamente de cada elemento, sem nenhum processamento prévio. A escolha pela construção de um arranjo em escala reduzida, quando comparado aos arranjos instalados em navios de superfície e submarinos, visou diminuir as dificuldades de utilização do arranjo no tanque hidroacústico do IPqM e facilitar a logística para transporte, posicionamento e embarcação do arranjo.

O *Cilindrical Hydrophone Array* (CHA), consiste em um arranjo de *staves* (barrote), agrupados de forma circular. O chamado *stave* é a estrutura que aglomera os hidrofones (sensores passivos, para captação de sinais acústicos submarinos) e os encapsula em material específico, garantindo que não percam suas propriedades, e ainda realiza a função de protegê-los do contato direto com a água salgada. Por fim, são projetados de forma a abafar um dos lados, com objetivo de dar diretividade a cada sensor.

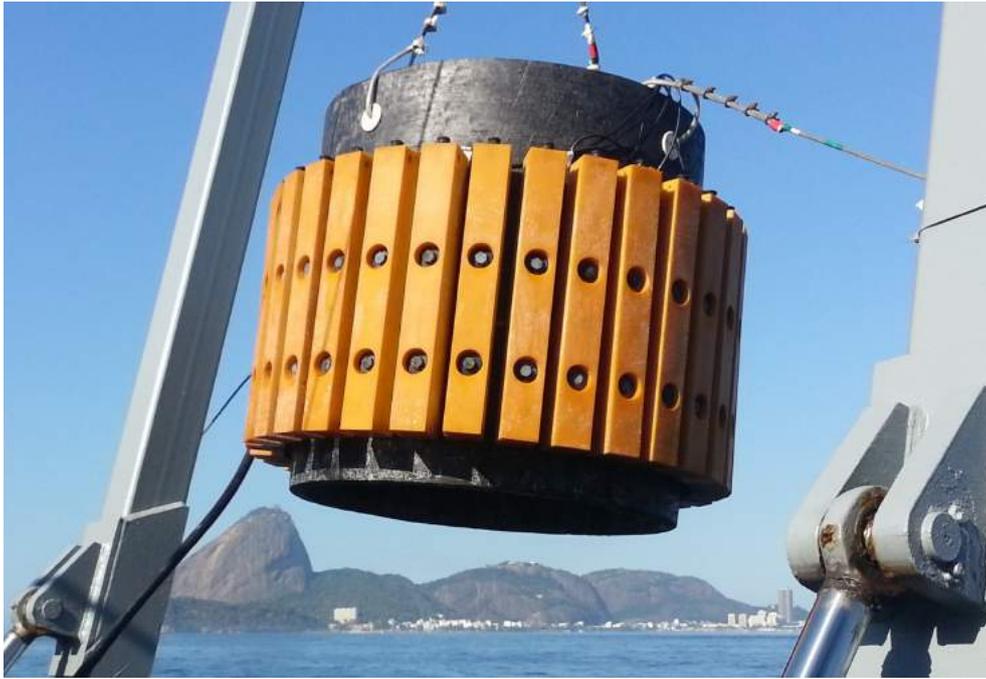


Figura 4.1: Arranjo Cilíndrico de Hidrofones (CHA) em escala reduzida (32 *staves* e 1 metro de diâmetro) construído no IPqM.

O arranjo construído, mostrado na Figura 4.1, é composto de 32 *staves* e tem 1 metro de diâmetro. Cada *stave* possui três hidrofones ligados em paralelo na vertical e sua saída é a soma dos sinais de cada hidrofone. Devido não termos acesso aos três hidrofones verticais, este arranjo será tratado aqui, como circular.

Utilizando as equações 2.40 e 2.41, calcula-se que a frequência máxima para operação do arranjo é $6,5kHz$ e a mínima é $635Hz$. Para a limitação de máxima frequência é utilizado o filtro *anti-aliasing* do sistema de aquisição de sinais (será analisada a resposta em frequência do sistema de aquisição na seção 4.2). Para a frequência mínima, um filtro passa altas, com banda de passagem iniciada em $635Hz$, é utilizado.

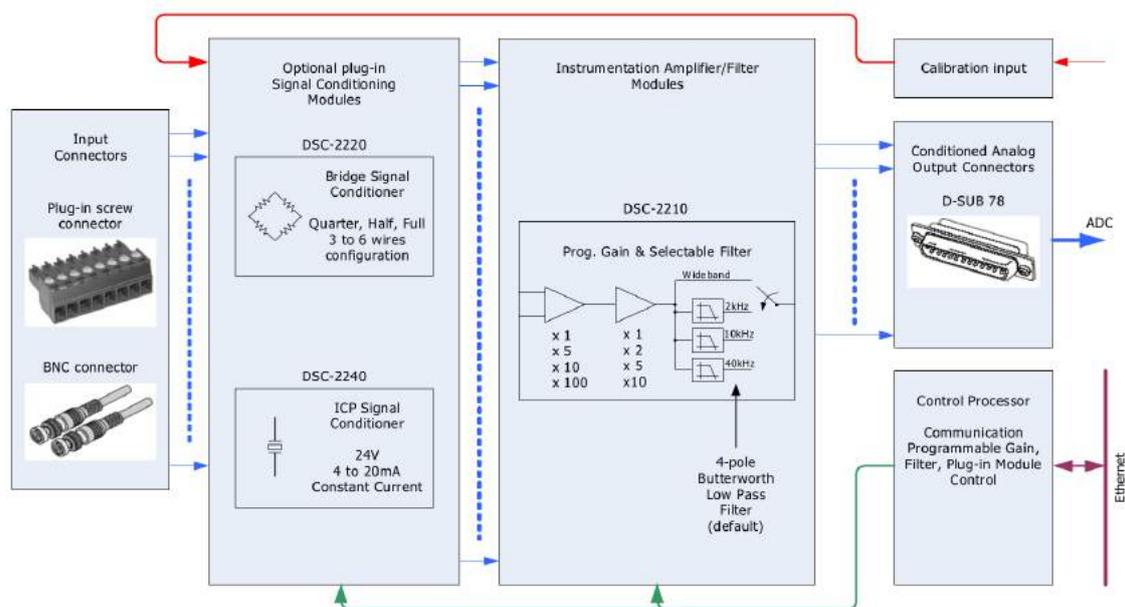


Figura 4.2: Diagrama de amplificação utilizando o condicionador DSC 2200.

4.2 Sistema de Aquisição de Sinais

O sistema de aquisição é composto por um amplificador de sinais, uma placa digitalizadora e um computador. O amplificador de sinais utilizado é o *DSC2200* da empresa *GE Fanuc (DaqScribe Solutions)*. O diagrama geral deste amplificador é mostrado na Figura 4.2. Para os sinais coletados no experimento, utilizou-se os dois estágios de amplificação do módulo *DSC-2210*, assim, o ganho programável utilizado foi de $\times 1000$ ($60dB$), com filtro *Wideband*.

Este amplificador possui 32 canais e é montado em um gabinete tipo *rack*, como mostrado na Figura 4.3.



Figura 4.3: Rack de amplificação DSC 2200.

Após o condicionamento é realizada a digitalização do sinal. Utiliza-se a placa *ICS – 610*, da empresa *GE Fanuc (DaqScribe Solutions)* para esta finalidade. Essa placa possui 32 canais, $24 - bit$ *Sigma-Delta ADC*, que digitaliza simultaneamente todos os canais a uma taxa de até $108kHz$, sendo na coleta de dados, utilizado a

frequência de amostragem de 31,25kHz. As entradas são diferenciais para suprimir ruídos de modo comum. O diagrama mostrado na Figura 4.4 indica os estágios de processamento desta placa.

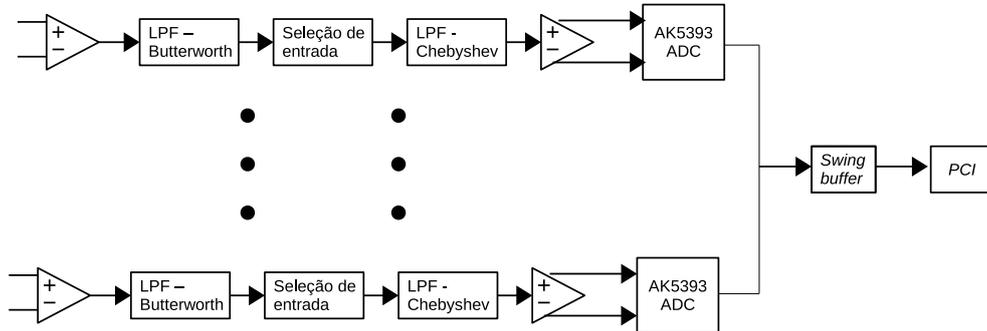


Figura 4.4: Processos de digitalização - ICS – 610.

Nota-se na Figura 4.4 que existem duas etapas de filtragem e uma etapa de seleção da tensão de entrada antes da digitalização. O processo de digitalização é feito pelo conversor *Sigma-Delta* AK5393. Além disto, o *Swing Buffer* (memória) trata as interrupções e a interface com a porta PCI (*Peripheral Component Interconnect*) do computador.

Não foi o escopo deste trabalho analisar o desempenho do sistema industrial de aquisição. Um software para adquirir os sinais de forma contínua e sem perda de informação foi desenvolvido, sendo ele a interface de aquisição. A resposta em frequência do sistema de aquisição é mostrado na Figura 4.5.

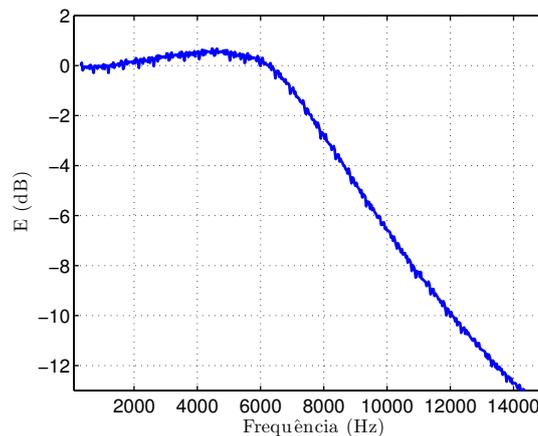


Figura 4.5: Resposta em frequência do sistema de aquisição.

4.3 Local e Coleta dos Dados

Um experimento em ambiente marinho foi proposto para coletar dados do arranjo citado. Utilizou-se um cais localizado no Depósito de Combustíveis da Marinha no

Rio de Janeiro (DepComb). A Figura 4.6 apresenta a instalação do arranjo no cais. O planejamento previa a realização da coletas de sinais com o máximo controle do cenário existente, ou seja, todas as embarcações que estivessem ao redor do arranjo seriam monitoradas. Além disso, embarcações do DepComb foram utilizadas para percorrer trechos específicos ao redor do arranjo, de forma controlada.



Figura 4.6: Instalação do Arranjo Cilíndrico em um Cais.

A direção dos sensores referente ao cais é indicado na Figura 4.7. Foi convenienciado que o feixe referente a 0° é centrado entre os sensores 1 e 32. Os sensores 27 e 28 referem-se a marcação 300° .

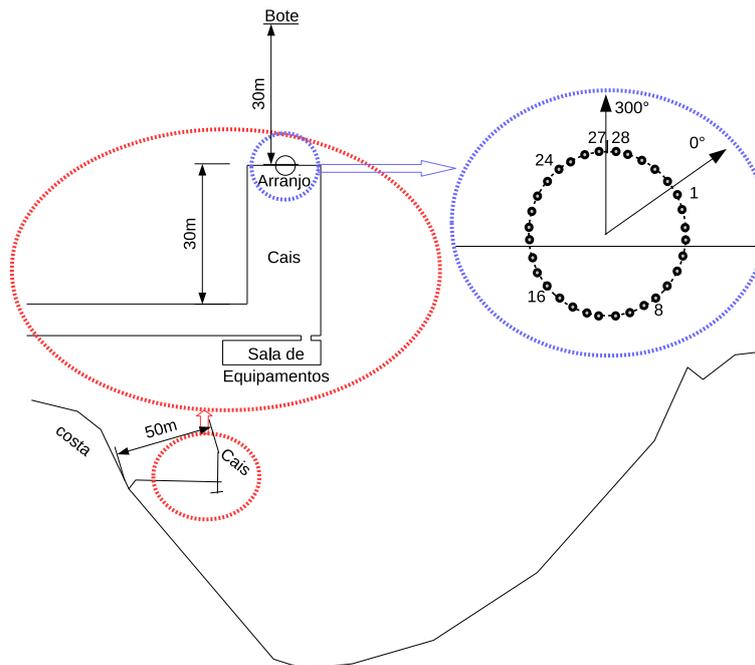


Figura 4.7: Croqui da local de instalação e referencial dos sensores.



Figura 4.8: Embarcação utilizada no experimento com arranjo cilíndrico.

Foi utilizada uma embarcação, tipo bote, mostrada na Figura 4.8, com objetivo de emitir ruído de cavitação, o que, para o estudo realizado aqui, é considerado como sinal. O ruído emitido pelas outras diversas fontes sonoras existentes no meio submarino é considerado ruído ambiente.

Com o arranjo instalado no cais do DepComb, posicionou-se o bote a uma distância de cerca de 30 metros. Com o motor desligado, efetuou-se a gravação do 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. Estes trechos foram separados de uma gravação contínua de dados como apresentada no gráfico de energia *Waterfall* da Figura 4.9 (foi utilizado um arco com 12 sensores e intervalo de integração de 32ms para obtenção deste gráfico).

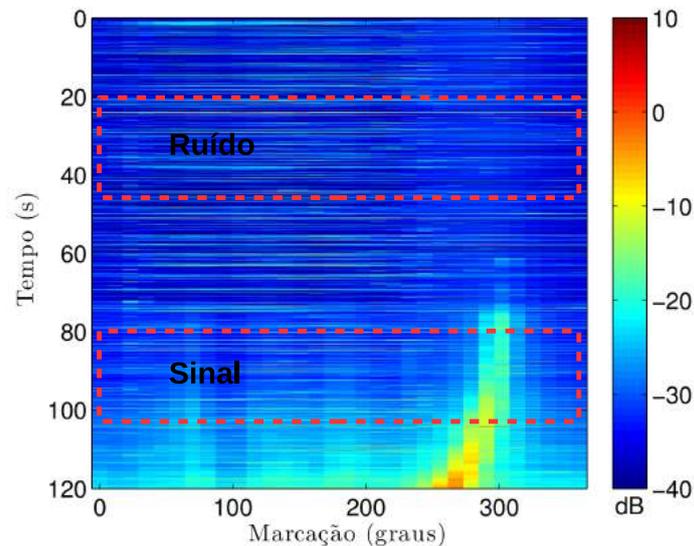


Figura 4.9: *Waterfall* do trecho de sinal e ruído ambiente.

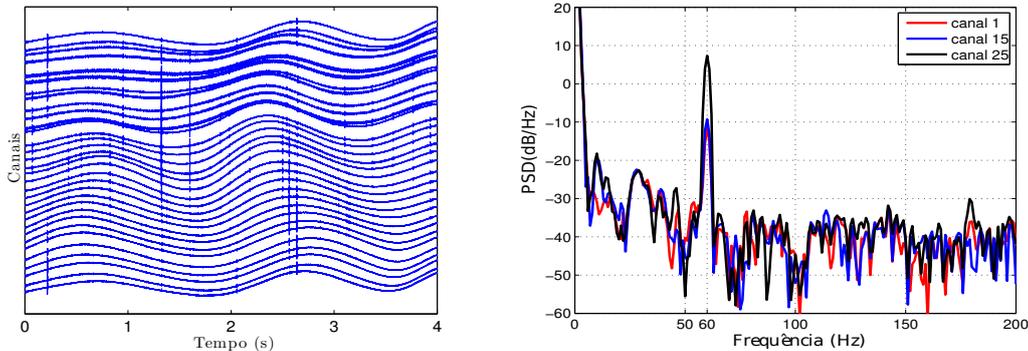
Para a realização da técnica de *denoising* utilizando o ruído eletrônico foi proposta a gravação dos sinais no tanque hidroacústico do IPqM. Este local pode ser considerado de baixa intensidade de ruído, comparado com a situação de ruído am-

biente do experimento, e é considerado aqui, como ruído eletrônico.

4.4 Considerações sobre os Dados

Algumas considerações, envolvendo as condições de coleta dos dados, devem ser feitas. Primeiramente, ressalta-se que, devido ao movimento de corrente, ondas e maré, o arranjo esteve sempre em oscilação, já que ele ficou suspenso por cabos de aço e não tocou o fundo do mar. No entanto, o movimento conhecido como *Yaw*, que é o movimento em torno do eixo vertical (giro), é desconsiderado devido à forma de fixação usada.

Esta oscilação gerou uma modulação no sinal, devido ao fato da pressão hidrostática na superfície dos *staves* variar. Pode-se notar, na Figura 4.10a, a modulação presente nos 32 canais com componente de frequência entre $0,5Hz$ e $1,5Hz$. Além disso, a rede elétrica no local da instalação do sistema de aquisição não continha aterramento apropriado. Assim, a componente de $60Hz$ e harmônicos, correspondente à frequência da rede elétrica, esteve presente na gravação dos dados e pode ser visualizada na Figura 4.10b para três dos 32 canais. A análise da densidade espectral de potência (*Power Spectral Density - PSD*) [19] é utilizada para estimar as características do espectro de potência dos dados experimentais. A obtenção da Figura 4.10b foi obtida com a estimação por periodograma com janelamento (janela de *Hann*) para um intervalo de $1s$ do trecho de ruído ambiente.

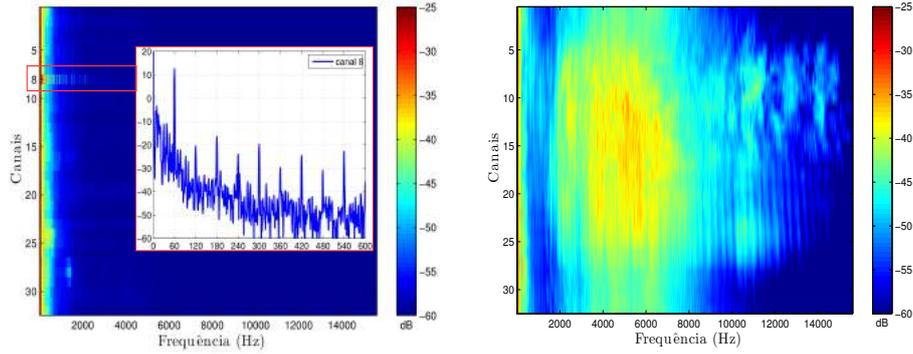


(a) Efeito da oscilação do arranjo gerando uma modulação nos 32 canais

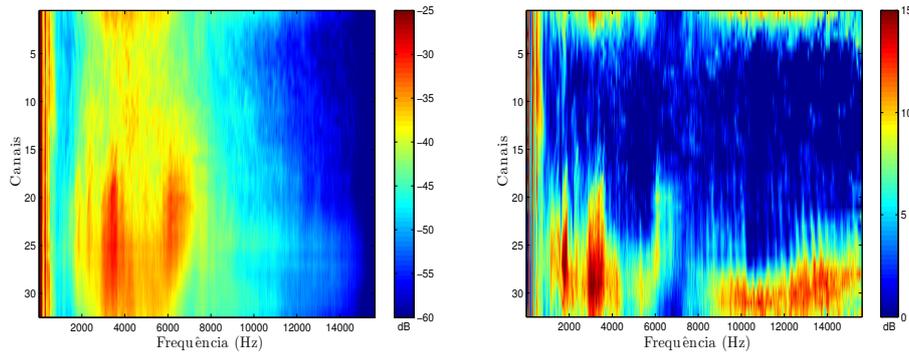
(b) Componente de frequência da rede elétrica ($60Hz$) em 3 canais

Figura 4.10: Considerações sobre a modulação e frequência da rede elétrica no experimento.

A Figura 4.11 apresenta o periodograma \times canais, feito para estimar as bandas de frequência que se destacam nos cenário em análise. Os espectros apresentados foram obtidos com o método de média de periodogramas, utilizando janelas de *Hann* nos intervalos de $200ms$ durante $5s$ de gravação.



(a) PSD(dB/Hz) para o ruído eletrônico (b) PSD(dB/Hz) para o ruído ambiente



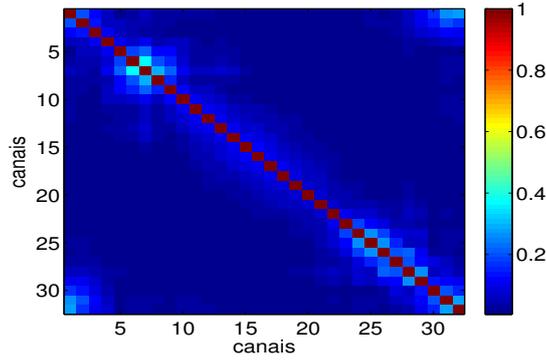
(c) PSD(dB/Hz) para o trecho de sinal em meio a ruído. (d) PSD(dB/Hz) da diferença entre sinal e ruído ambiente

Figura 4.11: PSD(dB/Hz) dos canais \times frequência.

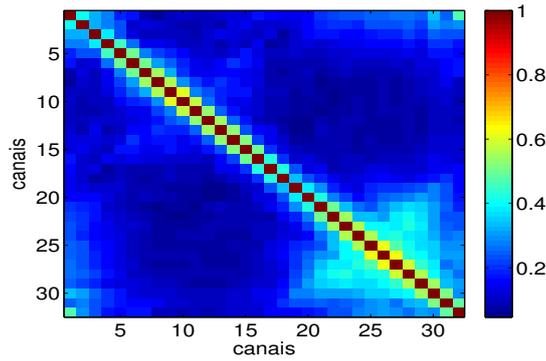
O ruído eletrônico engloba as características dos hidrofones, de cabos e do sistema eletrônico de aquisição de sinais. Pode ser notado na Figura 4.11a que, para frequências abaixo de $1kHz$, o tanque não funciona como um local totalmente silencioso para estes sensores, que já conseguem captar energia. Além disso, nota-se que o canal 8 apresenta uma quantidade maior de interferência da rede elétrica. O *stave* 8 foi substituído e o problema persistiu, o que indica que o defeito está relacionado ao sistema de aquisição. Esta gravação foi realizada após o experimento na enseada, assim, este efeito não é notado nos espectros da coleta no cais.

A análise espectral do ruído ambiente, apresentado na Figura 4.11b, indica uma maior quantidade de energia entre os canais 7 e 22. Estes canais estão direcionados para a região costeira. Assim, infere-se que, devido à maior atividade biológica e à quebra das ondas na costa (ressalta-se que a costa é composta de projeções rochosas), emite-se uma maior quantidade de ruído.

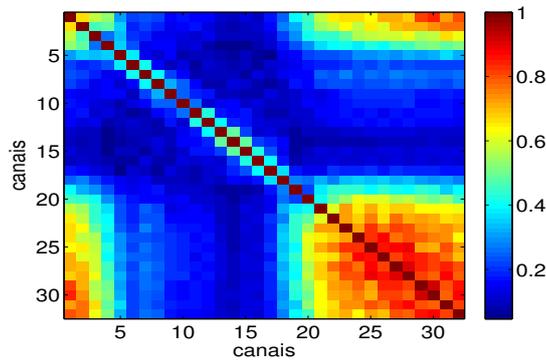
A Figura 4.11c mostra o trecho considerado como sinal (sabe-se que este sinal esta em meio ao ruído ambiente) e nota-se que existe uma quantidade de energia maior na direção em que a embarcação esta presente (canais 22 a 32). Esta indicação



(a) Correlação Ruído Eletrônico



(b) Correlação Ruído Ambiente



(c) Correlação Sinal

Figura 4.12: Correlação entre canais.

pode ser melhor visualizada quando subtrai-se o espectro de sinal com o de ruído ambiente, Figura 4.11d.

A correlação entre os canais pode ser analisada, na Figura 4.12, para o trecho de ruído eletrônico, ruído ambiente e sinal, após aplicar o filtro passa altas com banda passante em 635Hz (referente a frequência mínima de operação do arranjo).

Nota-se, na Figura 4.12a, que o ruído eletrônico apresenta pouca correlação entre os canais. Já a Figura 4.12b, mostra que para o ruído ambiente existe correlação entre canais próximos (cerca de 60%). Para o trecho de sinal, a Figura 4.12c mostra que existe uma alta correlação do sinal entre os canais 20 e 32, canais que estavam

direcionados à fonte.

4.5 Análise do Ruído Ambiente

Uma análise específica do ruído ambiente pode ser feita para caracterizar seu comportamento. Devido o local da instalação do arranjo ser em um cais, próximo à costa, o sinal de ruído ambiental é composto por:

- ruídos biológicos;
- interferência de sinais refletidos nas colunas e paredes do cais;
- projeções rochosas presentes na costa;
- rangido dos cabos de fixação do arranjo; e
- ruído de multi-caminhos devido à profundidade do cais (média de 5m – águas rasas).

Medidas de impulsos de tensão com amplitudes elevadas aparecem no ruído ambiente e devem ser tratadas de maneira adequada para que não interfiram nos resultados. A Figura 4.13 apresenta a série temporal e o espectrograma de um canal (canal 1). Nota-se que os trechos onde ocorrem os picos de tensão são caracterizados em banda larga.

Um gráfico onde se pode analisar a distribuição estatística dos canais é o *boxplot*, que apesar de agrupar os dados considerando-os como uma distribuição normal, auxilia na caracterização de sua distribuição. As variâncias calculadas em cada intervalo de integração, seguindo o método apresentado no Capítulo 3, podem ter suas distribuições analisadas com este gráfico cuja legenda é apresentada na Figura 4.14,

Como abordado no método proposto, para o ruído ambiente o cálculo de $\bar{\sigma}_n^2$ é representado, inicialmente, pela média das variâncias das N janelas. Não é escopo deste trabalho um estudo específico de estacionaridade, assim, são utilizadas três janelas, propostas em [5, 8]. As análises e resultados serão realizados para as janelas de 32 ms, 200ms e 1s. A Figura 4.15 apresenta os *boxplot* para as janelas de 32ms (Figura 4.15a), 200ms (Figura 4.15b) e 1s (Figura 4.15c) do trecho de ruído ambiente após aplicar o filtro passa altas com banda passante em $635Hz$.

A princípio, investiga-se a possibilidade do uso da média das variâncias das N janelas para representar $\bar{\sigma}_n^2$. Percebe-se na Figura 4.15 que a média das variâncias não é a melhor opção para representar a distribuição, estando a média fora dos limites dos percentis. Assim, pode-se considerar que o valor mais provável, neste caso, a mediana, seria mais apropriado para representar a distribuição.

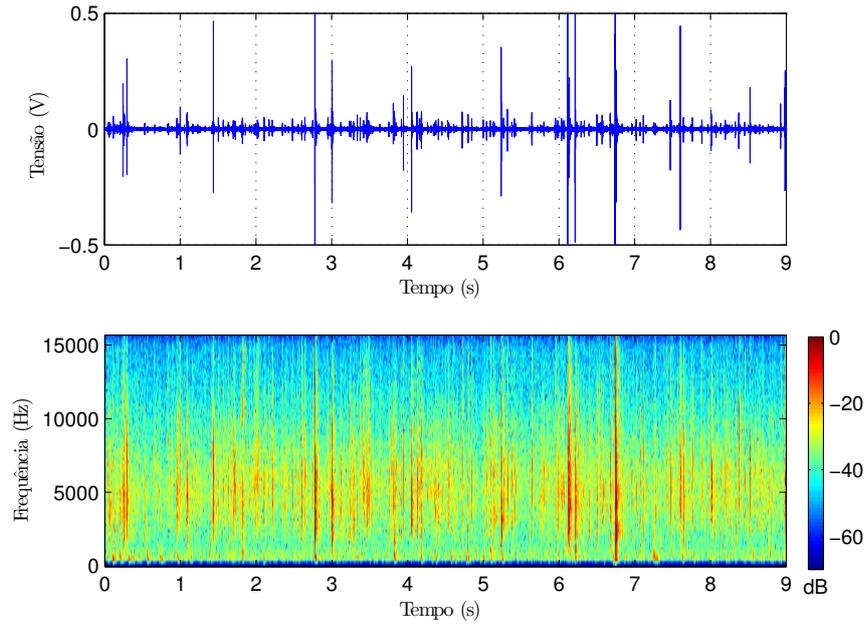


Figura 4.13: Série temporal e Espectro de um canal (frequência \times tempo) para o ruído ambiente.

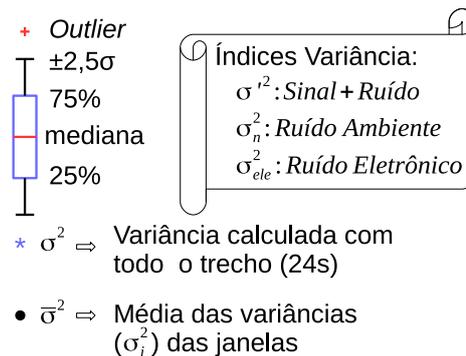
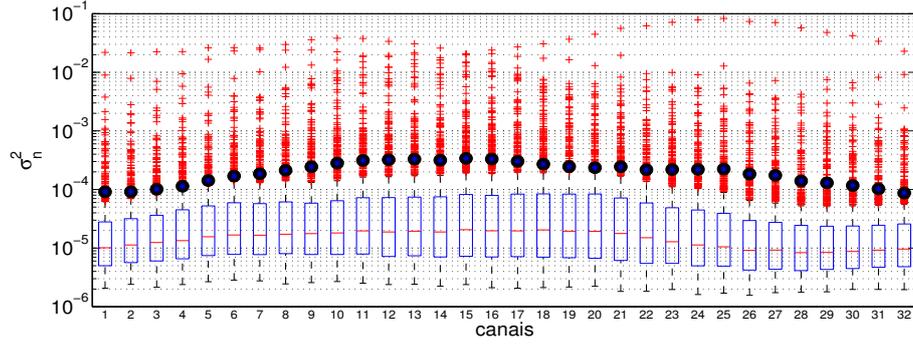


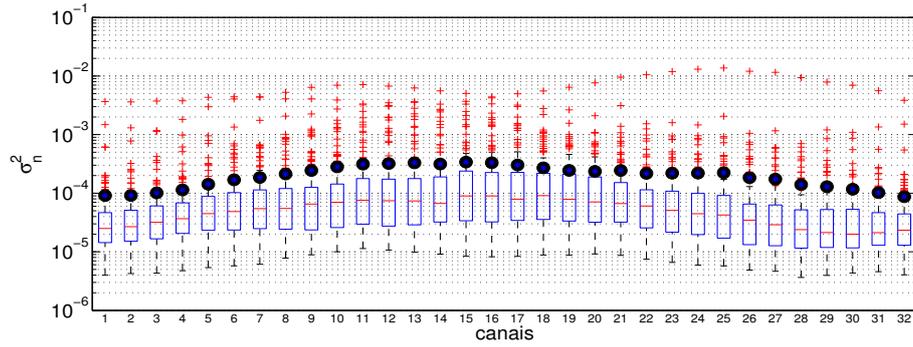
Figura 4.14: Legenda do gráfico *boxplot*.

Percebe-se uma maior quantidade de valores considerados *outliers* quando a janela de análise é pequena. Este fato é explicado devido a presença do ruído impulsivo observado na Figura 4.13. Quando a janela é pequena, por exemplo $32ms$, existe a possibilidade do cálculo da variância ser apenas no intervalo onde exista esse impulso, o que gera um valor alto de variância. A presença destes impulsos faz a distribuição das variâncias ter uma cauda o que tendencia o valor da média das variâncias.

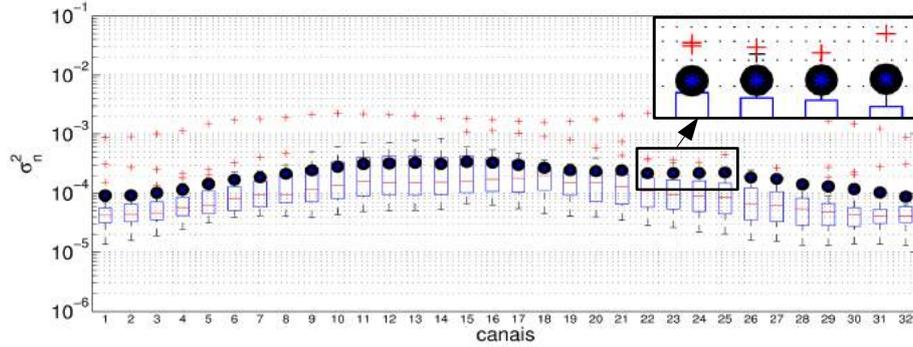
Através do conhecimento de especialistas, inferiu-se que a grande quantidade desses picos é característica específica do local onde o arranjo estava instalado, e que, em uma situação de operação em mar aberto com maior distância da costa, este fato não seria tão intenso como o notado. Assim, para esta análise, considerou-se



(a) janela 32ms



(b) janela 200ms

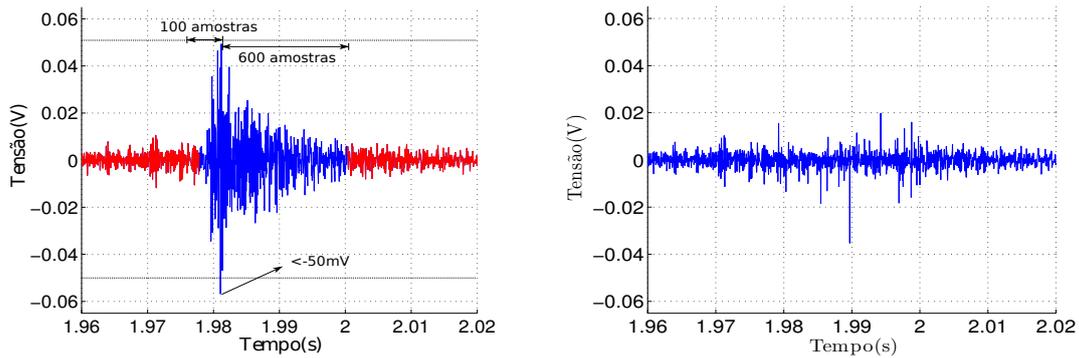


(c) janela 1s

Figura 4.15: *Boxplot* da distribuição das variâncias (σ_n^2) do ruído ambiente.

que estes impulsos não representam o modelo do ruído ambiente. Logo, retiraram-se estes trechos e utilizou-se uma imputação de valores para os dados faltantes, conforme abordado no Apêndice A.

Como apresentado na Figura 4.13, nota-se que os impulsos ocupam toda a banda de frequência em análise. Assim, uma tentativa de filtragem do sinal não eliminaria apenas os picos. Decidiu-se então, assim como em [20, 21], a exclusão dos trechos impulsivos com base na série temporal, e, com a observação dos dados, foi definido um patamar de $50mV$. A partir de uma análise empírica, excluem-se 100 amostras passadas e 600 amostras futuras do referido patamar. Um trecho de um canal (ca-



(a) Sinal no tempo com presença de um impulso de tensão. (b) Sinal no tempo após imputação de novos valores.

Figura 4.16: Efeito da imputação de valores no sinal temporal do trecho de ruído para um canal

nal 1) é apresentado na Figura 4.16 para ilustrar o efeito da exclusão dos dados.

A imputação dos dados faltantes segue o método abordado no Apêndice A. Após esta imputação, pode-se verificar a série temporal e seu espectrograma para um canal (canal 1) conforme Figura 4.17.

A partir da Figura 4.17, percebe-se que ainda existem alguns impulsos de tensão, no entanto, com objetivo de alterar minimamente os dados, considerou-se o patamar escolhido adequado, sendo no máximo 0,25% a quantidade de dados imputados.

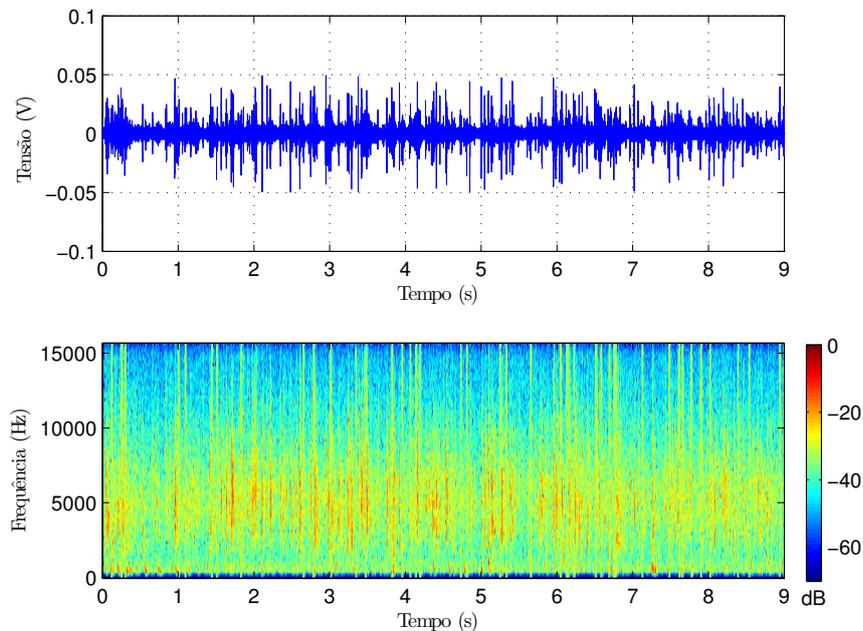
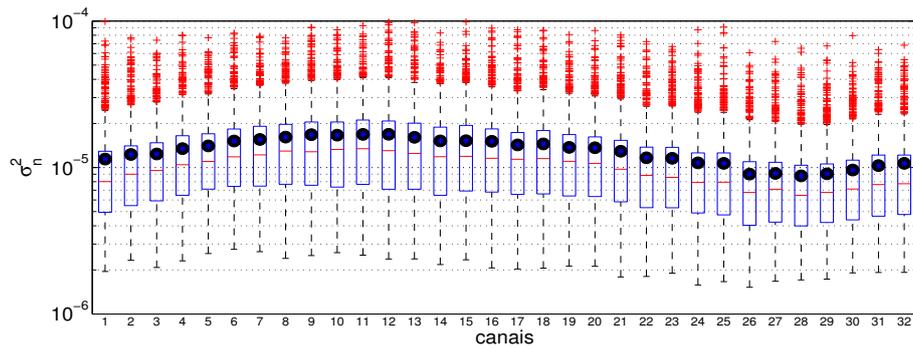
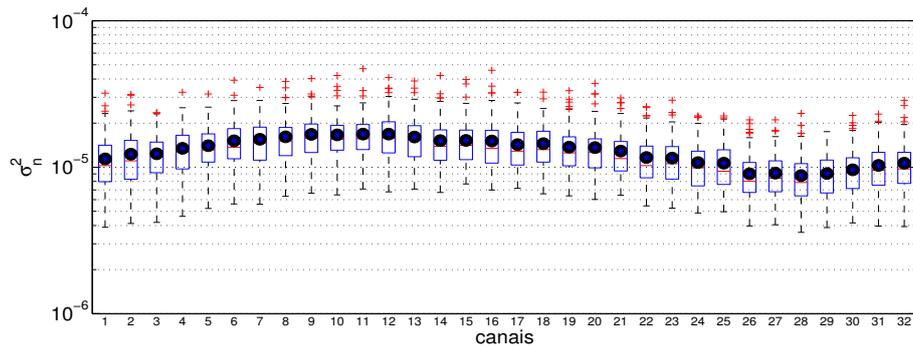


Figura 4.17: Série temporal e Espectro de um canal (frequência \times tempo) do ruído ambiente após imputação de valores.

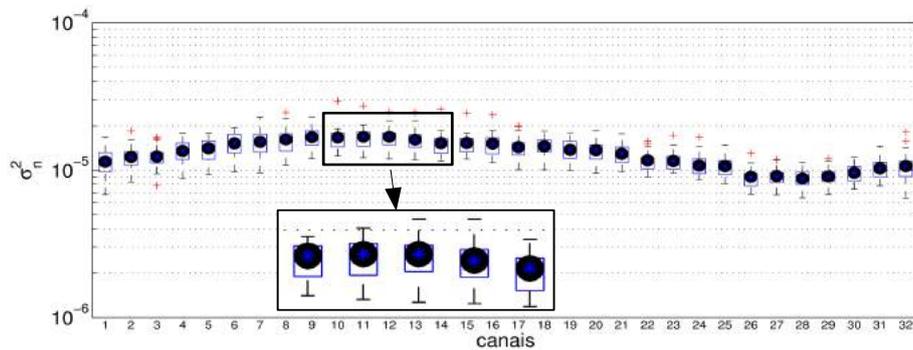
A Figura 4.18 apresenta o boxplot do trecho de ruído ambiente após a imputação dos dados. Pode-se perceber que a média das variâncias está próxima da mediana da distribuição. Logo, a média das variâncias poderá ser considerada para a análise. Além disso, percebe-se que a variância calculada, utilizando todo o trecho de gravação (24s), σ_n^2 , coincide com o valor das médias das variância $\bar{\sigma}_n^2$ (devido ao valor médio do sinal temporal de cada janela e de todo o trecho serem próximas a zero). Assim, aqui o ruído pode ser representado por uma variável aleatória sendo σ_n^2 calculado sem a necessidade de janelamento.



(a) janela 32ms



(b) janela 200ms



(c) janela 1s

Figura 4.18: *Boxplot* da distribuição das variâncias (σ_n^2) do ruído ambiente após a imputação de valores.

4.6 Análise do Trecho de Sinal

Uma análise semelhante pode ser feita com o trecho de sinal¹. A Figura 4.19 apresenta um trecho de gravação de um canal (canal 1) no período onde a embarcação já estava com o motor ligado e se deslocando. Novamente, nota-se a presença dos picos de tensão que abrangem toda a banda de frequência. No espectro em frequência do bote, pode ser notada uma banda mais intensa entre $3kHz$ e $6kHz$, e entre $8kHz$ e $11kHz$, condizente com a Figura 4.11d.

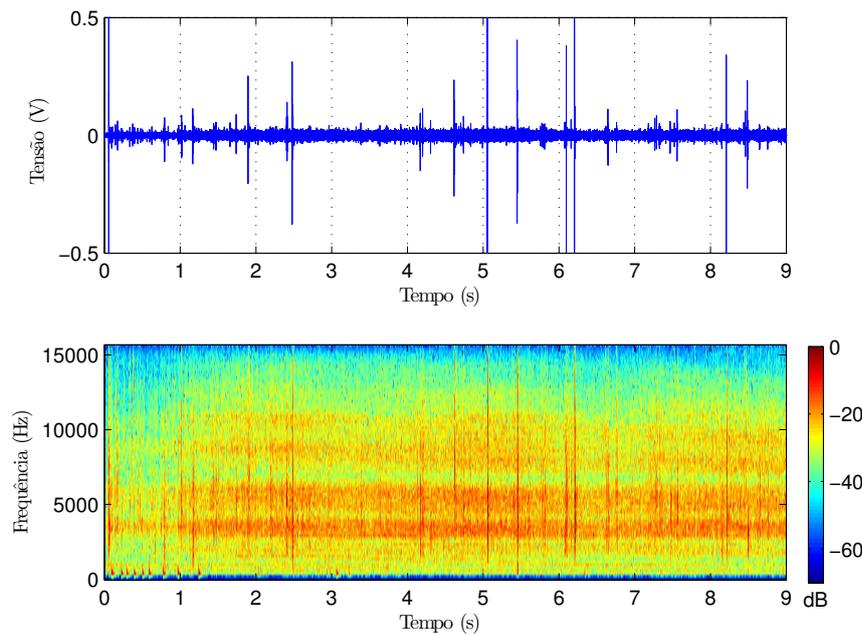


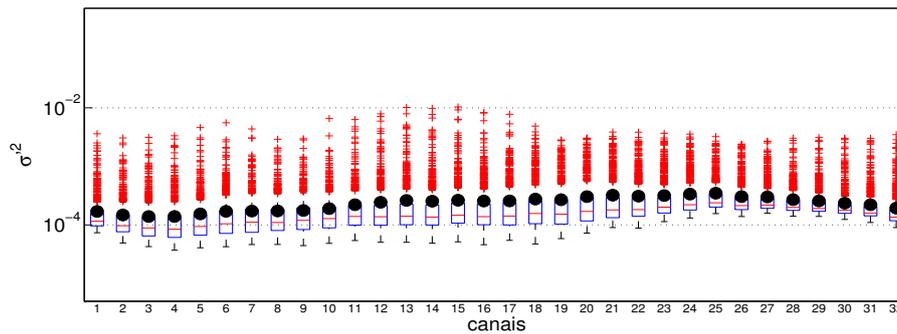
Figura 4.19: Série temporal e Espectro de um canal (frequência \times tempo) para o trecho de sinal.

Assim como abordado em [12], o sinal gerado por uma embarcação é composto, principalmente, por fontes de ruído acústico irradiado pelo sistema de propulsão (ruído de cavitação), máquinas auxiliares (não presente devido a embarcação ser um bote) 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 com um processo estocástico.

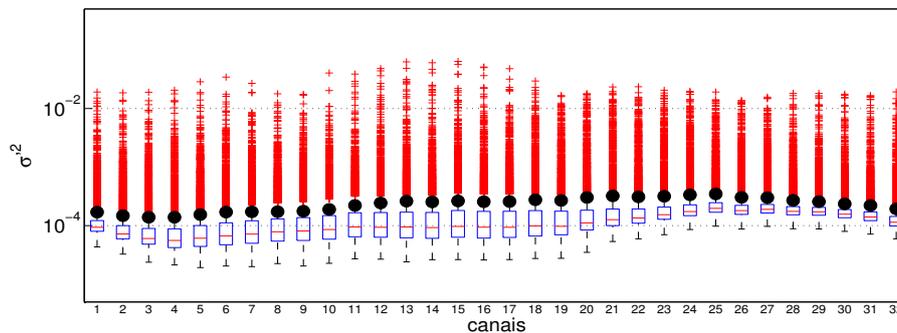
Como abordado no Capítulo 3, para o cálculo da variância em um processo estocástico é assumido que cada intervalo de tempo (janela) corresponde a um experimento e supõe-se que as características do meio e da fonte não foram alteradas entre os experimentos (ou, supõe-se que os experimentos são realizados simultaneamente sem interferência entre eles). A distribuição das variâncias são apresentadas no *box-plot* da Figura 4.20 para as janelas de $32ms$ (Figura 4.20a), $200ms$ (Figura 4.20b)

¹Aqui, sinal será subentendido como sinal em meio a ruído

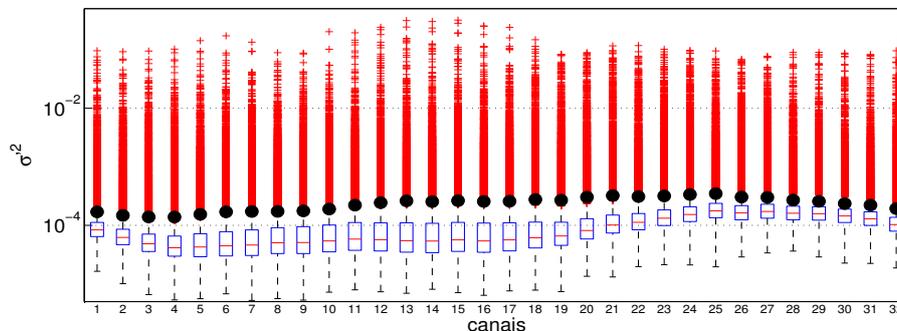
e 1s (Figura 4.20c).



(a) janela 32ms



(b) janela 200ms



(c) janela 1s

Figura 4.20: *Boxplot* da distribuição das variâncias (σ'^2) do sinal (em meio a ruído).

Percebe-se na Figura 4.20, que a distribuição das variâncias do trecho de sinal apresenta uma grande quantidade de valores classificados como *outlier* pelo *boxplot*. Uma interpretação para este fato deve-se à presença de uma cauda na distribuição, o que é interpretado pelo *boxplot* como *outlier*. Nota-se que não faz sentido o cálculo da variância com todo o trecho de gravação (24s), o que equivaleria a utilizar uma janela com apenas uma amostra.

Adotando o mesmo procedimento para exclusão dos picos de tensão e imputando

novos valores, obtém-se a série temporal e seu espectro conforme Figura 4.21.

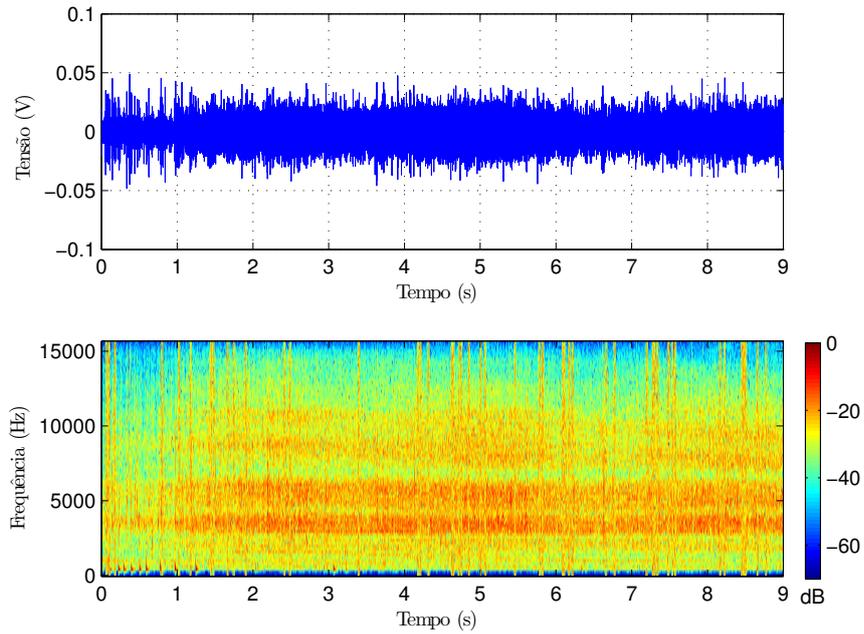
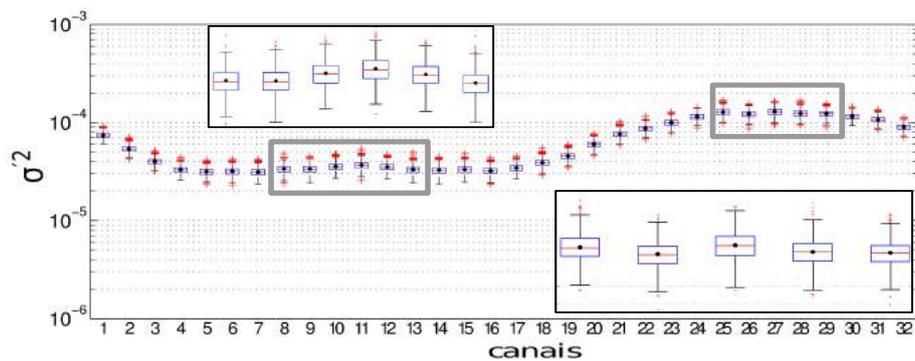


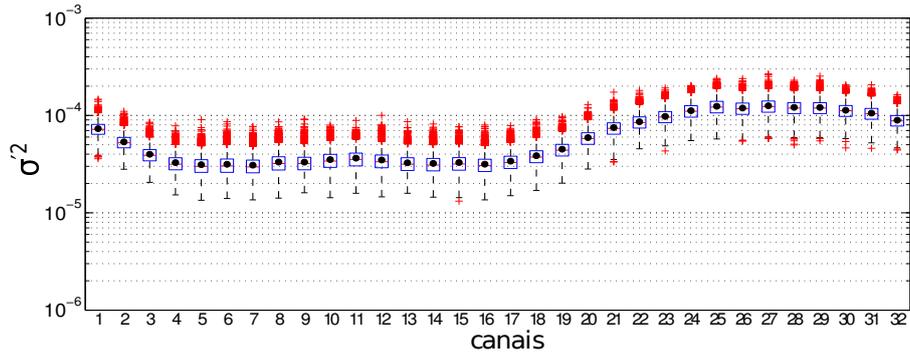
Figura 4.21: Série temporal e Espectro de um canal (frequência \times tempo) para o sinal após imputação.

Nota-se que os picos de maior intensidade foram excluídos e novos valores foram imputados. Percebe-se também, que os novos valores ocupam toda a banda de frequência, mas com menor amplitude.

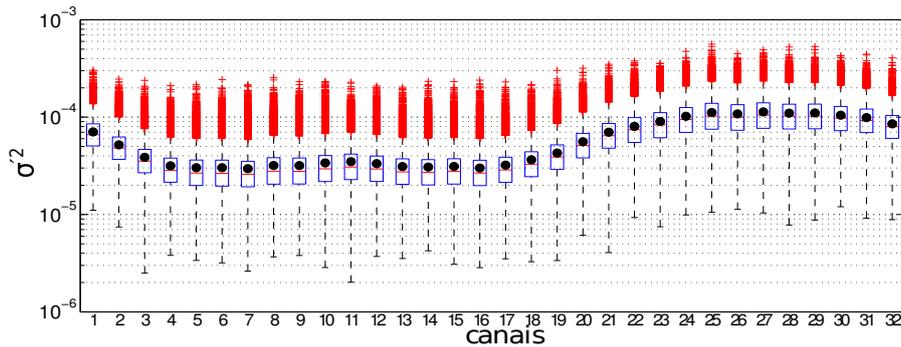
A Figura 4.22 apresenta o *boxplot* com as distribuições das variâncias dos canais para este novo conjunto de dados com valores imputados.



(a) janela 32ms



(b) janela 200ms



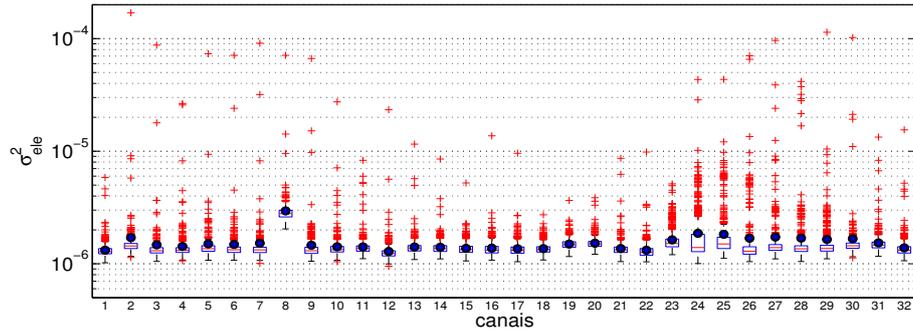
(c) janela 1s

Figura 4.22: *Boxplot* da distribuição das variâncias (σ^2) do sinal (em meio a ruído) após a imputação de valores.

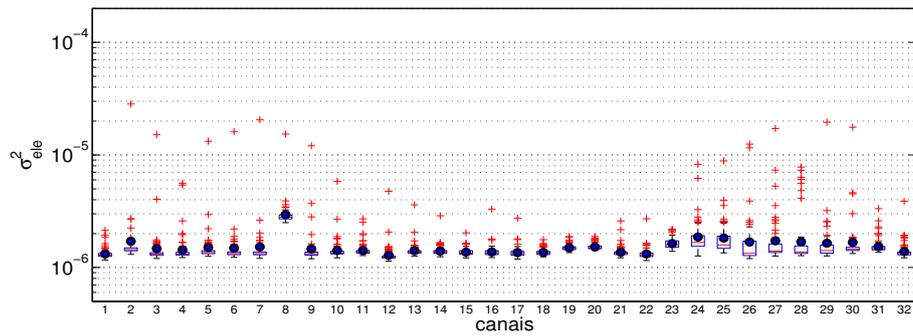
O *boxplot* apresentado na Figura 4.22 enfatiza a característica de maior energia proveniente dos canais direcionados para a embarcação (canais 22 ao 32). Além disso, percebe-se que a média das variâncias se aproxima do valor da mediana, assim, pode ser considerada uma boa representação da distribuição. Logo, o cálculo da SNR será realizado utilizando o valor médio das variâncias.

4.7 Análise do Ruído Eletrônico

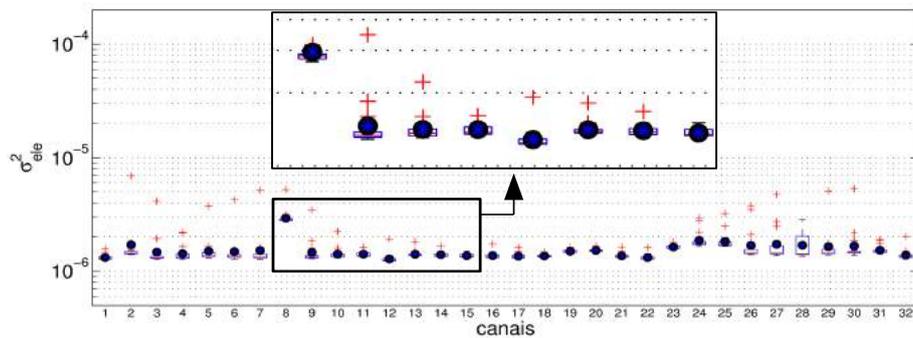
Com objetivo de aplicação da técnica de *denoising* de canais, uma análise dos dados da gravação realizado no tanque hidroacústico do IPqM é apresentada. Novamente, o gráfico *boxplot*, apresentado na Figura 4.23, auxilia a análise das variâncias do ruído eletrônico.



(a) janela 32ms



(b) janela 200ms



(c) janela 1s

Figura 4.23: *Boxplot* da distribuição das variâncias (σ_{ele}^2) do ruído eletrônico (medição em um tanque hidroacústico).

Os problemas de impulsos de tensão não ocorrem no tanque de maneira significativa como no experimento na enseada. As variâncias do ruído eletrônico são calculadas igualmente ao ruído ambiente (série temporal). Percebe-se que o valor médio das variâncias pode ser considerado uma boa opção para representar a distribuição.

Nota-se, na Figura 4.23, que o canal 8 apresenta uma intensidade maior que os outros canais. Este fato foi observado no espectro dos canais apresentados na Figura 4.11.

4.8 Implementação do Estimador do Número de Sensores

Com o objetivo de tornar o método proposto uma forma prática ² para futuros projetos de arranjos, envolvendo sensores semelhantes aos estudados neste trabalho, esta seção se propõe a resumir as atividades necessárias para obtenção da estimação do número de sensores a ser utilizado no arranjo.

- Construção do arranjo cilíndrico e do sistema de aquisição: Os sensores devem estar uniformemente espaçados na geometria circular e ter o mesmo alinhamento vertical entre sensores. O cabeamento de cada *stave* deve ser fixado de forma a não interferir nos sinais incidentes (por exemplo fixa-los com abraçadeiras na parte traseira dos sensores). Entre os sensores e a entrada da amplificação o cabo utilizado deve conter acoplamento que minimize o efeito de interferência eletromagnética. O sistema de aquisição deve amplificar os sinais de forma que a condiciona-los para a digitalização, visando uma otimização da faixa dinâmica do digitalizador e impedindo possíveis saturações. A conversão analógica-digital deve ser feita de maneira sincronizada para todos os canais, de forma a não interferir no formador de feixes, ou seja os atrasos de digitalização entre canais devem ser desprezíveis comparados a uma amostra de atraso no formador de feixes. Os dados devem ser adquiridos de maneira contínua e deve-se garantir que não aconteça perda de dados. O sistema de aquisição deve possuir nível de ruído eletrônico que não degrade os sinais coletados em uma situação de coleta de ruído ambiente (*background*).
- Coleta dos dados: Para o cálculo da SNR é necessário a coleta de dados em ambiente marinho. Para a inserção das flutuações existentes entre canais e cálculo do *denoising*, deve-se coletar dados quando não existem embarcações (trecho de ruído ambiente) e utilizar uma embarcação para prover sinal (trecho de sinal). Além disso, dados em um tanque hidroacústico devem ser coletados para representar o ruído eletrônico.
- Análise dos dados: Como pôde ser visto neste capítulo, além da análise temporal, os dados foram analisados, tanto de forma estatística quando de forma espectral.
 - Verificação de sinais impulsivos: Devido o meio submarino ser composto de atividades biológicas, estas atividades geram sinais, que são identificáveis e impulsivos. Quando existe a identificação deste fenômeno, uma

²prática haja visto que o método determinístico consiste somente da aplicação de uma equação.

análise especialista dos dados é exigida para sua caracterização, e se comprovada a relação biológica, esta não deve ser considerada para o cálculo da SNR. Neste caso, uma imputação de dados utilizando KDE (vide seção A.3) deve ser realizada. Caso exista resposta impulsivas de natureza não identificável, não deve-se imputar novos valores.

- Análise estatística: Para cada cenário de coleta deve-se fazer uma análise da distribuição das variâncias, o que contribui para a tomada de decisão de como as variâncias devem ser calculadas (via processo estocástico ou variável aleatória).

Considera-se o trecho de ruído ambiente e de ruído eletrônico com uma variável aleatória. Deve ser verificado se a média da distribuição das variância está entre os quartis, isso pode ser feito com o auxílio do *boxplot* para as três janelas propostas neste trabalho. Caso a média esteja entre os quartis, compara-se ela com a variância calculada a partir todo o trecho de gravação e caso os valores sejam próximos utiliza-se a variância de todo o trecho, caso contrário utiliza-se a média das variâncias (sendo a flutuação dada pelos percentis). Para a situação em que a média não esteja entre os quartis utiliza-se a mediana das variâncias (como será visto para os dados do submarino no Capítulo 5).

O sinal é considerado um processo estocástico, assim, o cálculo da distribuição das variâncias deve ser realizado como abordado na seção 4.6. Aqui, deve ser verificado se a média da distribuição das variância está entre os quartis, para as três janelas propostas neste trabalho. Caso a média esteja entre os quartis ela deve ser utilizada na SNR representando $\bar{\sigma}^2$ (sendo a flutuação dada pelos percentis), caso contrário utiliza-se a mediana das variâncias.

- Análise Espectral: Apesar de não ser utilizada diretamente no cálculo da SNR, a análise da PSD dos canais auxilia na caracterização dos cenários acústicos. A partir desta análise pode-se obter as bandas de frequências com maior energia, indicando uma característica do trecho analisado como, por exemplo, a presença de ruídos impulsivos, a influencia da costa ou da embarcação.
- Cálculo da SNR e *denoising*: Após o cálculo da variância para os trechos em análise, utiliza-se a Equação 3.8 e obtêm-se a SNR de acordo com o número de sensores. Para o *denoising*, utiliza-se a Equação 3.11, obtendo os pesos no *delay-and-sum*.
- Faixa sugerida: A partir da obtenção da SNR de acordo com o número de

sensores, verifica-se os valores que maximizam a SNR. Deve-se levar em consideração a flutuação existente do método e, a partir desta consideração, sugerir a faixa de valores.

Capítulo 5

Dados Coletados em um Submarino da MB

Este capítulo apresenta os dados coletados do sonar de um submarino da MB. O SONAR CSU-83-1/014, instalado à bordo dos submarinos da classe Tupi, utiliza como um de seus sensores o arranjo cilíndrico de hidrofones (*CHA*), arranjo este, semelhante ao arranjo apresentado no Capítulo 4.

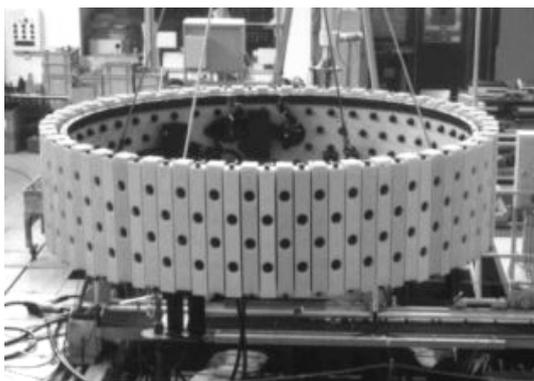
Devido a complexidade de um submarino e as interferências que existem provenientes dos equipamentos que ele é dotado, como interferências eletromagnéticas, e ainda todas as condições adversas da operação real de um sistema sonar, motiva a análise destes dados. A completa ausência de informação acerca das condições de operação, o que nos leva a analisar os dados de maneira completamente cega, torna este, um desafio a mais para a análise do método.

O método proposto é aplicado utilizando os dados coletados do *CHA*, no entanto, não é objetivo desta aplicação a certificação do processo obtido com o experimento no cais, mas busca-se verificar se há indícios se o método poderia ser aplicado em um caso real, de uma instalação profissional, como é no submarino.

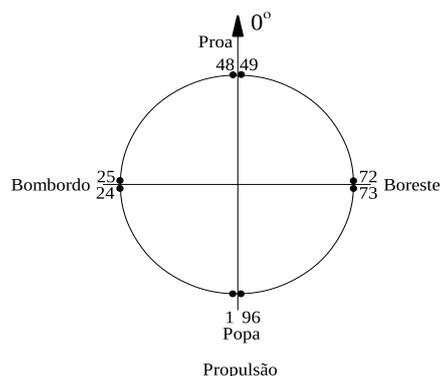
5.1 Arranjo Cilíndrico e Aquisição de Sinais

O *CHA* utilizado no submarino tem 1,4 metros de raio e é composto por um total de 96 *staves*, onde cada *stave* é composto de 3 hidrofones. Este arranjo é apresentado na Figura 5.1a e os sensores estão posicionados de acordo com a Figura 5.1b.

Os sinais recebidos pelo *CHA* são amostrados e digitalizados por conversores analógico-digitais (A/D). São utilizados 96 amostradores do tipo *zero order hold* [13] com uma taxa de amostragem de $25,6\text{kHz}$. Os conversores A/D digitalizam os valores amostrados com a precisão de 16 *bits* que, por sua vez, alimentam o estágio de processamento.



(a) Arranjo Cilíndrico de Hidrofonos (CHA) instalado em um Submarino da Marinha do Brasil.



(b) Referência de posicionamento do Arranjo Cilíndrico de Hidrofonos (CHA).

Figura 5.1: Arranjo Cilíndrico de Hidrofonos (CHA) instalado em um Submarino da Marinha do Brasil e sua referência.

5.2 Considerações sobre os Dados

Como há escassez de informação sobre o cenário de gravação dos dados, foi necessária a análise especialista do áudio gravado. Acredita-se que existam alguns contatos¹, no entorno do submarino, porém tanto o número quanto a disposição desses contatos, são desconhecidos.

Para a análise inicial do cenário existente implementa-se o conformador de feixe apresentado na Seção 2.5. O número de elementos utilizado no arco é $K = \frac{S}{3} = \frac{96}{3} = 32$ (conforme Equação 2.37 do modelo determinístico) e utiliza-se a frequência de operação entre $600Hz$ e $7,5kHz$. A escolha da frequência de $600Hz$ foi devido a melhora na resolução espacial do arranjo. Para esta configuração obtém-se o gráfico de energia *Waterfall* apresentado na Figura 5.2.

Através do *Waterfall* percebe-se a existência de, no mínimo, três contatos, sendo que a validação deste número não foi obtida. Outro fato é que todos os contatos têm a mesma mudança de rumo², o que indica que o submarino guinou. Ainda, nota-se que existem picos de energia em alguns trecho (por exemplo o contato próximo a marcação 10° , entre os tempos de $60s$ e $80s$), sendo necessária uma análise mais detalhada para caracterizar este fato.

Com objetivo da aplicação do método proposto no Capítulo 3, um trecho onde existam menos picos de energia e os contatos não variem o rumo de forma significativa foi escolhido, conforme apresentado na Figura 5.3.

No experimento realizado com o arranjo no cais, foi gravado um período onde não existia fonte sonora (considerado trecho de ruído ambiente). Não é possível caracterizar o ruído ambiente desta forma com os dados coletados no submarino.

¹nomeia-se contato uma fonte sonora que esteja emitindo sinal.

²rumo, neste trabalho, refere-se a marcação.

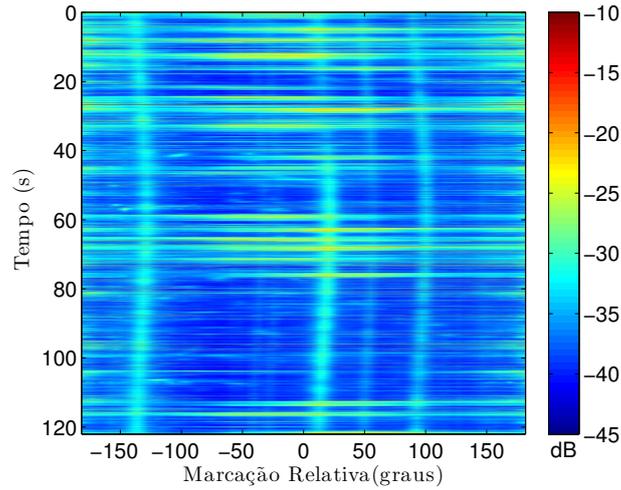


Figura 5.2: Gráfico de energia *Waterfall* dos dados coletados no submarino.

Assim, o ruído ambiente será considerado a réplica de um canal que tenha pouca influência das fontes existentes.

Nota-se que não existem contatos aparentes entre as marcações -100° e -50° . Escolhendo o feixe da marcação -75° , que está centrado aos canais 28 e 29, definiu-se que o ruído será representado pelo canal 28. Vale ressaltar que o canal 28 foi escolhido de forma a não estar influenciado por um contato, nem influenciado pelo ruído de propulsão do submarino (setor do arranjo voltado para a popa). A repre-

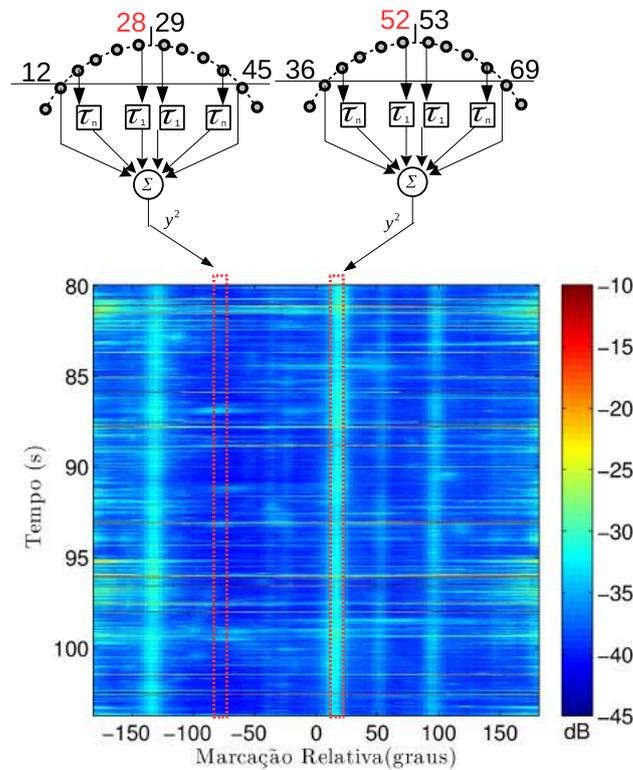


Figura 5.3: Gráfico *Waterfall* do trecho de dados selecionado para análise.

sentação do sinal será iniciada pelo canal 52 e posteriormente, serão utilizados os canais ao seu redor, conforme apresentado na Figura 5.3. A escolha do canal 52 deve-se ao fato dele corresponder ao canal central do feixe conformado em 10° (que indica a existência de um contato).

5.3 Análise dos Dados

Assim como apresentado no Capítulo 4, deve-se fazer uma análise prévia do comportamento dos dados. A Figura 5.4 apresenta a PSD do trecho selecionado, para todos os canais. A estimação espectral mostrada é obtida com o método de médias de periodogramas, utilizando janelas (*Hann*) de $40ms$ durante $5s$ de gravação.

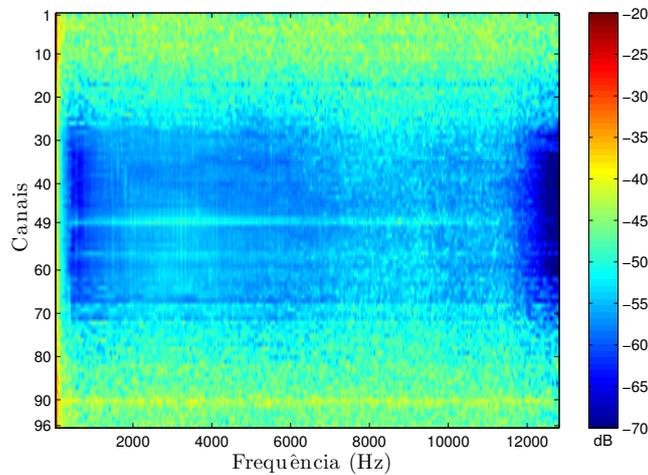
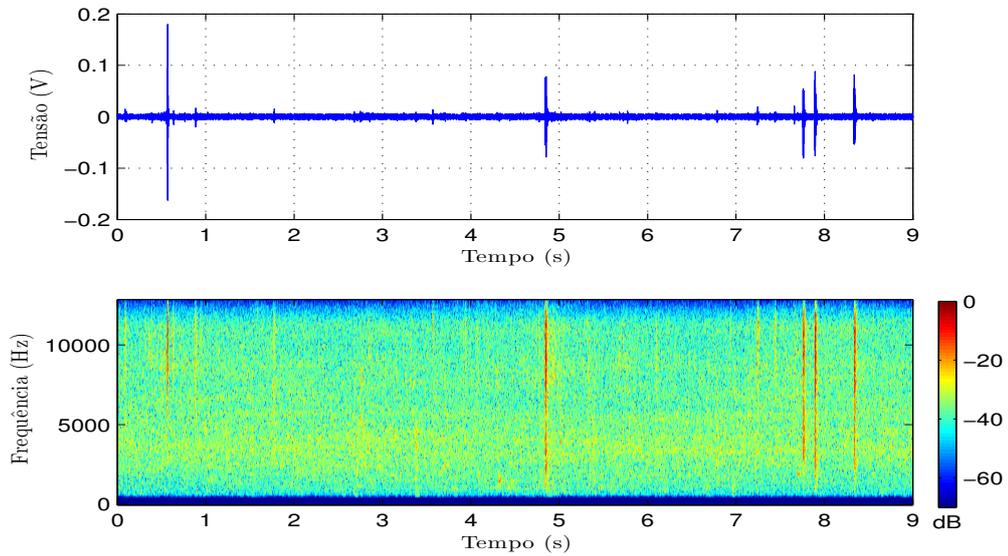


Figura 5.4: PSD(dB/Hz) dos canais \times frequência para os dados coletados do arranjo do submarino.

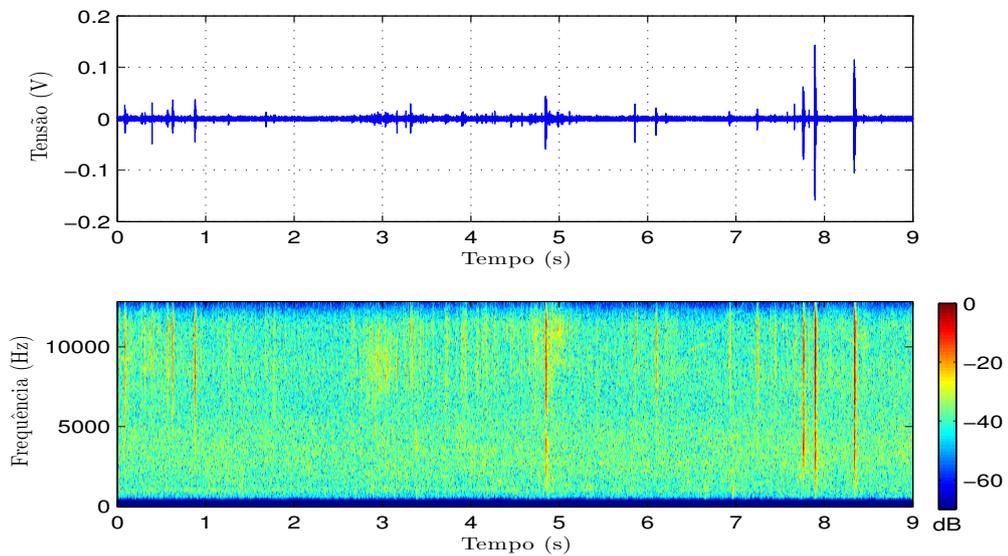
Observa-se que os canais 1 ao 25 e 70 ao 96 apresentam uma intensidade maior de energia, que pode estar associada a seção do arranjo direcionada para a propulsão do submarino (chamado de ruído próprio). Além disso, os canais 49 e 90 tem seus espectros ressaltados, comparado aos outros canais do setor frontal do arranjo, mas devido a escassez de informações sobre o estado dos sensores e fatos ocorridos durante a gravação não conseguimos associar este efeito a um fenômeno específico. Percebe-se também uma maior intensidade entre as frequências de $2kHz$ e $4kHz$ (canais 48 ao 68).

A série temporal e o espectrograma de um trecho dos canais 52 (canal central para formação do feixe de 10° , considerado como contato) e 28 (canal central para formação do feixe de -75° , considerado como ruído) são apresentados na Figura 5.5. Esta figura foi obtida após filtrar o sinal com um filtro passa-altas com banda de passagem iniciada em $600Hz$.

Nota-se, na Figura 5.5, que os impulsos na tensão, apesar de presentes, estão em menor quantidade quando comparado ao dados do experimento no cais. Não é possível identificar uma banda de frequência predominante no canal 52 referente a presença da fonte (contato na marcação 10°) mas nota-se uma intensidade espectral (em toda a banda analisada) ligeiramente maior comparada ao canal 28.



(a) Série temporal e espectrograma do canal 52.

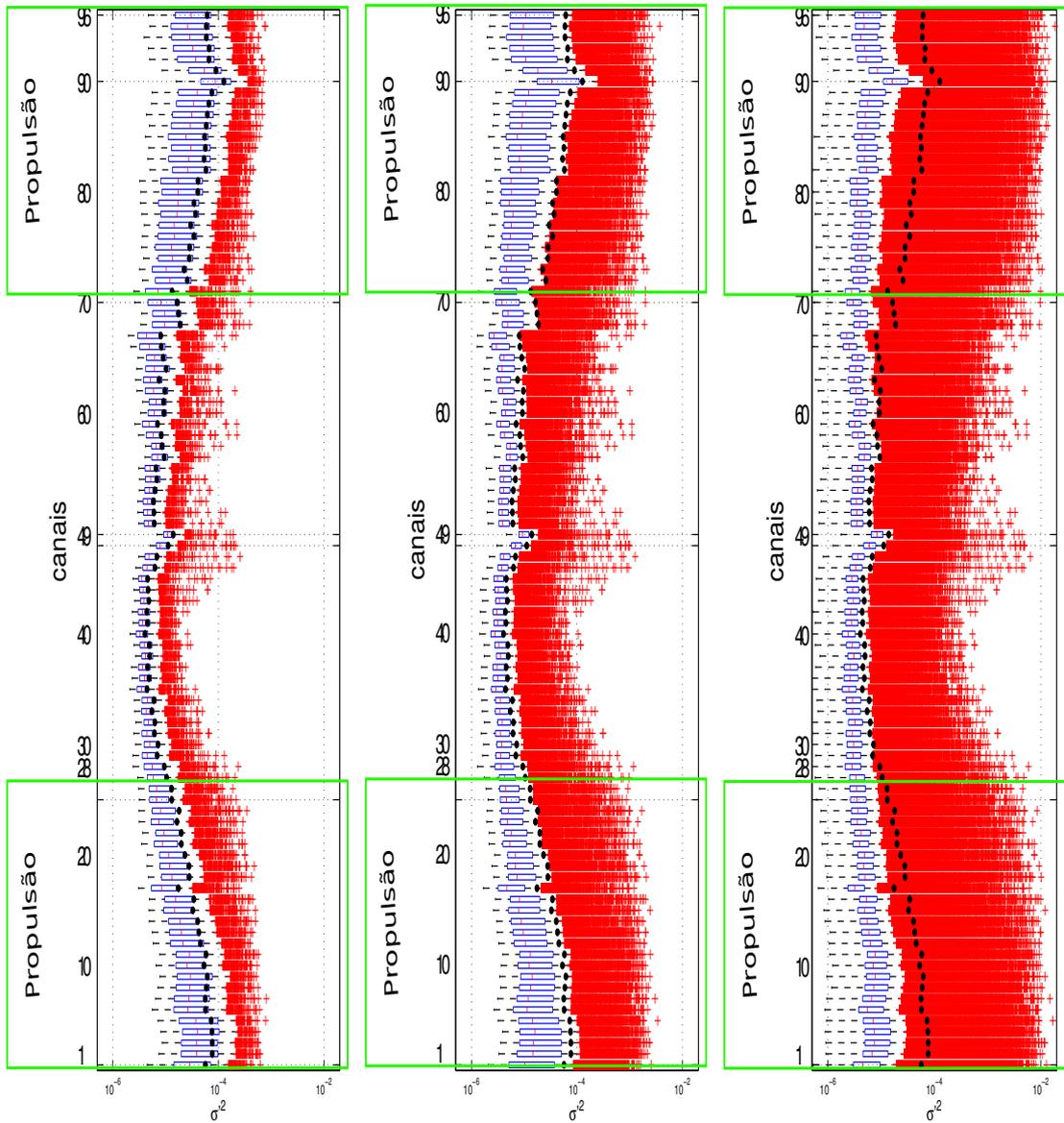


(b) Série temporal e espectrograma do canal 28.

Figura 5.5: Série temporal (Tensão \times tempo) e espectrograma (frequência \times tempo) para os canais 52 e 28 .

Por não conhecer a natureza dos impulsos, não foram retiradas/imputadas amostras no sinal. A análise *boxplot* da variância dos canais é apresentada na Figura 5.6.

Por conveniência, o *boxplot* é apresentado na vertical. Percebe-se através das distribuições que os canais voltados para a propulsão (1 ao 25 e 70 ao 96) apresentam $\bar{\sigma}^2$ maior que nos canais centrais. Nota-se também, que os canais 48 e 49 se destacam com maiores valores de $\bar{\sigma}^2$. Este dois fatos puderam ser vistos na estimação espectral da Figura 5.4. Através dos *boxplots* visualiza-se que a mediana de σ^2 é mais adequada para representar a distribuição, comparada a média. Assim, $\bar{\sigma}^2$ será representada pela mediana com erro dado pelos percentis.



(a) janela 40ms.

(b) janela 200ms.

(c) janela 1s.

Figura 5.6: *Boxplot* canais para os dados coletados de um submarino da MB.

Após todas as considerações realizadas sobre os dados do submarino e do experimento no cais, consideramos ter esgotado a análise dos dados de forma a caracterizar ao máximo os ambientes acústicos em questão.

Capítulo 6

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados para obtenção do número de sensores a ser utilizado no arco de acordo com o método proposto no Capítulo 3. Estes resultados são apresentados para os dados experimentais coletados com o arranjo construído no IPqM e para os dados do sonar de um submarino da MB.

6.1 Arranjo Cilíndrico em Escala Reduzida

A determinação do número de sensores a ser utilizado no arco do arranjo é baseado na avaliação da SNR. A análise da SNR estará restrita à banda de frequência, ao intervalo de integração (janelas) e a aplicação do *denoising* considerando o ruído eletrônico (medição no tanque hidroacústico) e o ruído ambiente.

As análises serão organizadas por tópicos de forma a separar as restrições. Assim, inicialmente, utilizam-se os sinais de banda larga (limitado a frequência mínima de operação do arranjo) e a frequência de corte do sistema de aquisição.

- Análise do intervalo de integração:

Como abordado no Capítulo 4, propõem-se três janelas de análises ($32ms$, $200ms$ e $1s$). A Figura 6.1 apresenta as SNR para as três janelas após aplicar o filtro passa altas com banda passante em $635Hz$ e frequência máxima, limitada ao sistema de aquisição ($-3dB$ em $8kHz$). O sinal simulado é mostrado para comparação do comportamento da SNR esperada.

O cálculo da SNR é realizado de acordo com o método proposto no Capítulo 3, onde para o cálculo do ruído (considerado estacionário) $\bar{\sigma}_{n_i}^2 = \sigma_{n_i}^2$ (calculado sem a necessidade de janelamento), onde i é o índice do canal. Para o sinal utilizou-se a média das variâncias ($\bar{\sigma}^2$) pois foi visto que, após a exclusão dos picos de tensão e imputação de novos valores, a média pôde ser considerada uma escolha apropriada para a distribuição das variâncias.

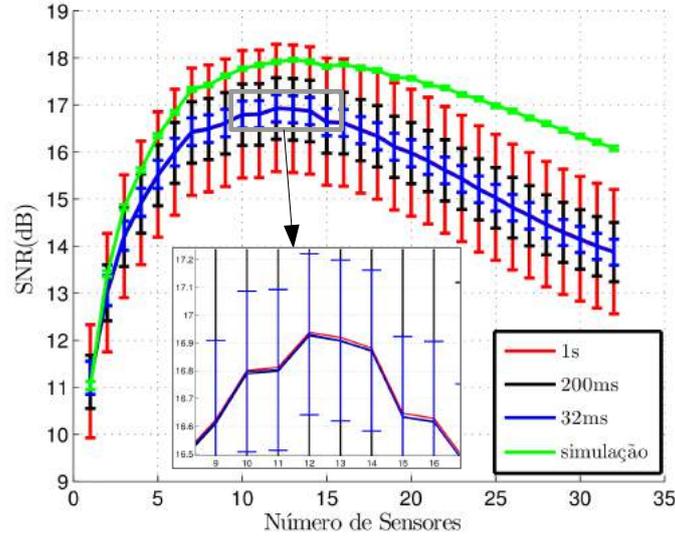


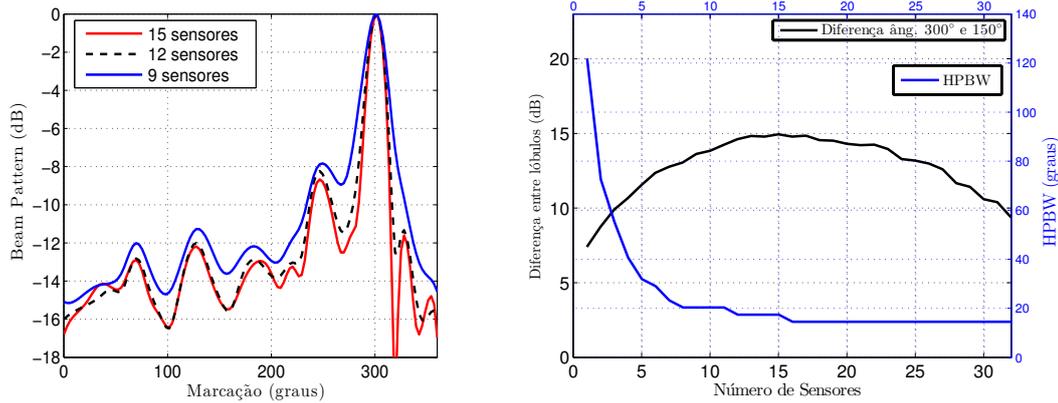
Figura 6.1: SNR \times Número de sensores para 3 janelas propostas.

Devido os valores de $\bar{\sigma}^2$ serem próximos para as três janelas de análise, as SNRs para as três janelas têm o resultado semelhante, exceto pela flutuação da barra de erro. O erro associado a SNR pode ser atribuído a cauda da distribuição, e esta cauda ser diferente para cada janelamento.

O valor da SNR utilizando apenas um canal é de cerca de $11dB$, o que corresponde ao valor da diferença (em dB) entre o sinal emitido pela embarcação e o ruído ambiente. Este fato foi verificado na Figura 4.11d, que mostrou a diferença da estimação espectral entre o trecho de sinal e ruído ambiente.

A Figura 6.1 indica que o número de elementos a ser utilizado no arco, o qual otimiza a SNR, varia entre 9 e 15 elementos. Observa-se que a escolha de 12 elementos, proposta em [7, 8], está dentro da faixa de elementos apresentada pelo método da SNR, sendo considerada, assim, uma boa escolha para o arranjo. 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 a *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 Figura 6.2 mostra uma análise complementar, qualitativa, avaliando o *beam pattern* de um trecho de gravação do cenário de sinal. A Figura 6.2a mostra os *beam patterns* utilizando arcos formados com 9, 12 e 15 sensores para um instante de tempo (*snap shot*) e um intervalo de integração de $32ms$. Percebe-se que o pico do *beam pattern* ocorre em 300° , indicando a existência de uma fonte nesta marcação, e que este lóbulo (chamado aqui de principal) é mais



(a) Comparação entre *beam patterns* para localização da fonte ao utilizar 9, 12 e 15 elementos no arco. (b) Diferença entre lóbulo principal e marcação 150° , e $\text{HPBW} \times \text{Número de Sensores}$.

Figura 6.2: Considerações adicionais para determinação do número de sensores.

estreito conforme aumenta-se o número de sensores.

A Figura 6.2b mostra o comportamento do HPBW (largura do lóbulo principal em -3dB) e percebe-se que após 10 sensores é praticamente constante em cerca de 15° , o que indica que o estreitamento do lóbulo atinge um limite de discriminação espacial após 10 sensores. A diferença de amplitude do *beam pattern* entre o lóbulo principal (300°) e a marcação 150° (escolhida ao acaso), também pode ser visualizada na Figura 6.2b. Nota-se, que após 16 sensores a diferença reduz, indicando que não é vantajoso o uso de mais de 16 sensores.

Como visto, o número de sensores estimado a partir da SNR varia de 9 a 15 e a análise do *beam pattern* indica o uso de 10 a 16 sensores o que indica uma coerência de resultados.

- Análise da técnica *denoising* com ruído eletrônico e ambiente:

Como apresentado no Capítulo 3, canais que apresentem ruído eletrônico de maior intensidade são compensados através da técnica de *denoising* (Estimação da Máxima Verossimilhança - MLE). Esta técnica consiste em ponderar o sinal dos canais utilizados no *delay-and-sum* pela multiplicação de pesos. Inicialmente, utilizou-se o ruído eletrônico para realizar a MLE e posteriormente o ruído ambiente devido a particularidade notada (maior intensidade em canais voltados para a costa). Para o ruído eletrônico, notam-se os pesos calculado da MLE e o *boxplot* das variâncias, repetido aqui por conveniência, na Figura 6.3.

Pode-se verificar que o canal 8, de acordo com o *boxplot*, apresenta um ruído eletrônico de maior intensidade e é compensado pela multiplicação de um peso com cerca de 50%. O problema com o canal 8 foi verificado no Capítulo 4 e aqui

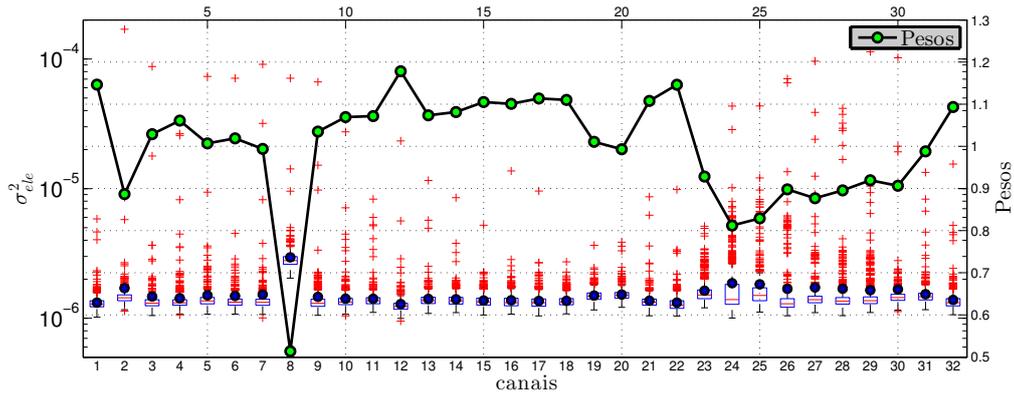


Figura 6.3: Pesos MLE ruído eletrônico.

a MLE tende a mascarar este canal. Já para os outros canais, a ponderação é de no máximo 20%.

Foi proposta a compensação do ruído ambiente, já que verificou-se que os canais direcionados à costa apresentavam maior energia. A Figura 6.4 apresenta os pesos e a *boxplot* das variâncias para o ruído ambiente onde pode-se verificar o efeito da MLE na geração dos pesos.

Para o ruído ambiente, a presença da uma maior intensidade de energia na região costeira (canais 7 ao 16) é atenuada com cerca 25%, enquanto os canais referentes a região oposta são amplificados com até 40%.

Na Figura 6.5 podemos comparar as SNR, para a janela de $32ms$, sem aplicar o *denoising* e aplicando o *denoising* com ruído eletrônico e ambiente. Por conveniência considerou-se a SNR para um sensor igual a zero (correspondente a diferença entre o sinal e o ruído ambiente).

A partir da Figura 6.5 percebe-se que a compensação do ruído eletrônico não gerou um resultado perceptível, uma vez que, estatisticamente, os resultados

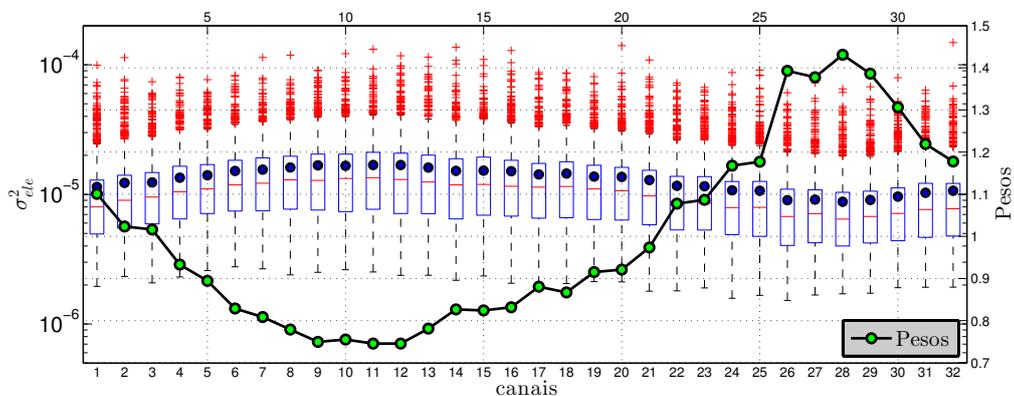


Figura 6.4: Pesos MLE ruído ambiente.

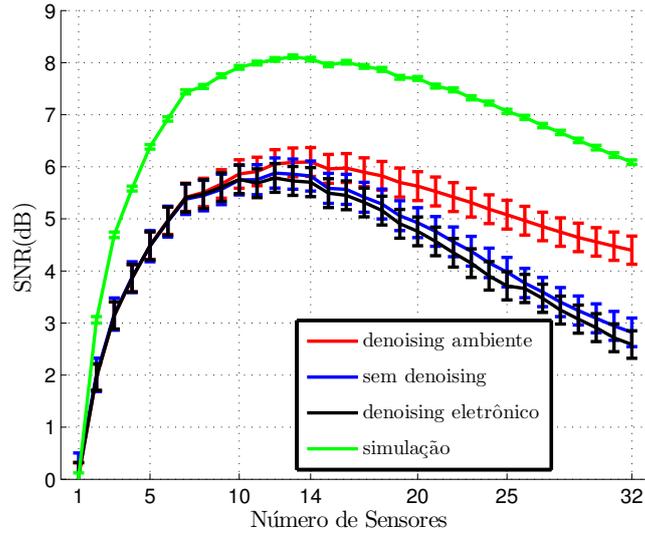


Figura 6.5: SNR \times Número de sensores para janela de $32ms$ - com e sem *denoising*.

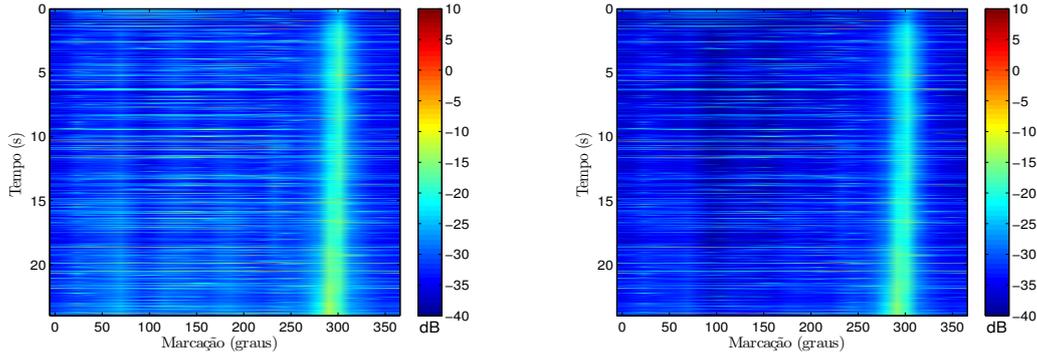
são semelhantes. Já a compensação do ruído ambiente fez com que a cauda da SNR tenha queda menos brusca. O fato da região costeira prover uma parcela grande de ruído faz com que a SNR caia mais rapidamente. Logo, quando os canais direcionados à costa são ponderados com pesos menores, diminui-se a parcela de ruído na soma.

A Figura 6.5 indica que, ao utilizar a técnica de *denoising* com o ruído ambiente, o número ótimo de elementos a ser utilizado no arco varia de 10 a 18 elementos, devido a incerteza. O número de sensores equivalente ao valor máximo da SNR é 14 e pode ser considerado uma boa escolha para o arranjo.

A Figura 6.6 apresenta dois gráficos de energia *Waterfall* do trecho de sinal. Em (a) não aplica-se a técnica *denoising* e em (b) aplica-se a técnica de *denoising* com ruído ambiente. Para obtenção deste gráfico, a implementação do *beamforming* foi feita com um arco com 14 sensores e um intervalo de integração de $32ms$. Percebe-se que ao utilizarmos a técnica de *denoising*, a energia dos feixes formados, voltados para a costa (entre 50° e 200°) é atenuada, o que beneficia a determinação da direção da fonte.

A Figura 6.7a mostra o *beam pattern* em um instante de tempo (*snap shot*) onde é possível verificar a atenuação da energia direcionada para a costa, ao aplicarmos o *denoising* com o ruído ambiente. Podemos perceber que a atenuação chega a $4dB$ na marcação 100° .

A Figura 6.7b apresenta a diferença de amplitude entre os ângulos de 300° e 150° , e o HPBW (referente ao lóbulo principal em 300°), com a aplicação do *denoising* com ruído ambiente (são repetidas estas análises sem o *denoising*,



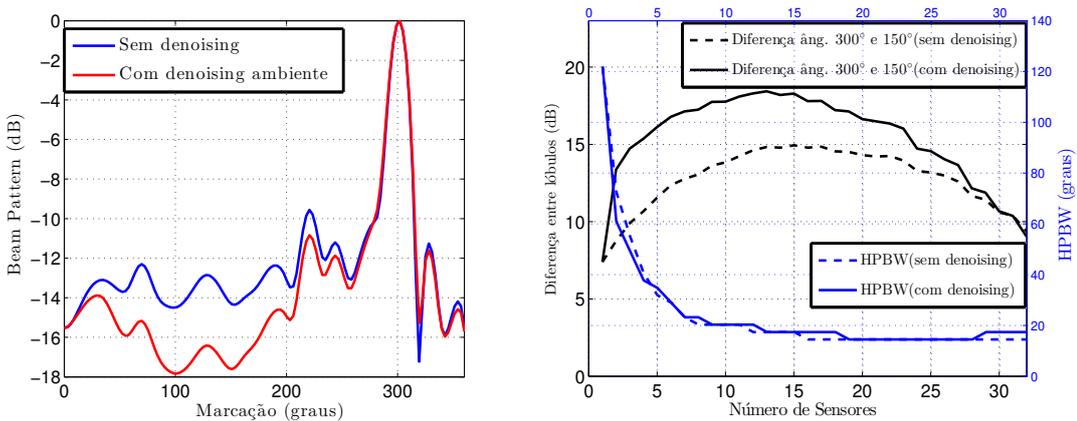
(a) *Waterfall* do trecho de sinal sem utilização da técnica de *denoising*. (b) *Waterfall* do trecho de sinal utilizando a técnica de *denoising* (ruído ambiente).

Figura 6.6: Comparação entre *Waterfall* com e sem utilização da técnica de *denoising*.

conforme Figura 6.2b) de acordo com o número de sensores. Nota-se que o HPBW, com e sem *denoising*, são bastante próximos sendo que, a partir de 10 sensores, existe uma estabilização da largura do lóbulo em 15° . A diferença de amplitude entre os ângulos de 300° e 150° é maior quando aplicamos o *denoising* ambiente, sendo que a máxima diferença ocorre quando utilizamos 12 sensores no arco. Analisando a SNR, apresentada na Figura 6.5, e as considerações adicionais, apresentadas na Figura 6.7, pode-se dizer que 14 sensores (conforme análise da SNR) é uma boa escolha.

- Análise em uma banda de frequência de interesse:

Os estudos em *beamforming* para determinação da direção de chegada, geral-



(a) Comparação entre *beam patterns* para localização da fonte com e sem *denoising* ambiente. (b) Diferença entre lóbulo principal e marcação 150° , e HPBW \times Número de Sensores.

Figura 6.7: Considerações adicionais para determinação do número de sensores com a aplicação da técnica de *denoising* utilizando o ruído ambiente.

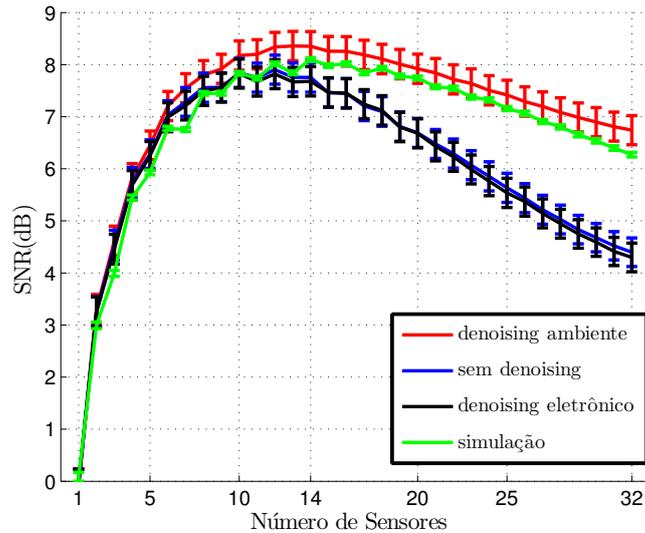


Figura 6.8: SNR \times Número de sensores para janela de $32ms$ - com e sem *denoising* para a banda de frequências entre $3kHz$ e $4kHz$.

mente, utilizam análises de sinal em banda estreita. Como o sistema sonar passivo recebe sinal de banda larga, as análises anteriores limitaram a banda de frequência de acordo com a frequência de operação do arranjo. No entanto, analisando a Figura 4.11, 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.

A Figura 6.8 apresenta a SNR com e sem a aplicação da técnica de *denoising*, para a banda de frequência entre $3kHz$ e $4kHz$. Nesta figura, percebe-se que o valor máximo da SNR aumentou ($\approx 8,5dB$), comparado a análise da banda de $635Hz$ a $8kHz$ ($\approx 6dB$). Este fato é justificado pela banda de energia de sinal ser mais intensa nesta banda de frequência. Apesar da compreensão deste efeito, neste estudo não estamos interessados no valor da SNR e sim na característica da curva da SNR na qual determinará o número de sensores utilizar. O valor máximo da SNR é obtido com 14 sensores, valor também encontrado na análise da banda de $600Hz$ à $8kHz$ e que pode ser considerado uma escolha adequada.

Podemos perceber que a curva da SNR quando utilizamos a técnica de *denoising* com ruído ambiente tem um comportamento semelhante a SNR obtida com dados simulados. Para os dados simulados o ruído foi considerado igual em todos os canais, assim, podemos dizer que o *denoising* teve um efeito de uniformizar os canais.

A partir do experimento realizado com o arranjo cilíndrico de hidrofones pudemos obter um resultado condizente com o que esperávamos, e foi possível verificar

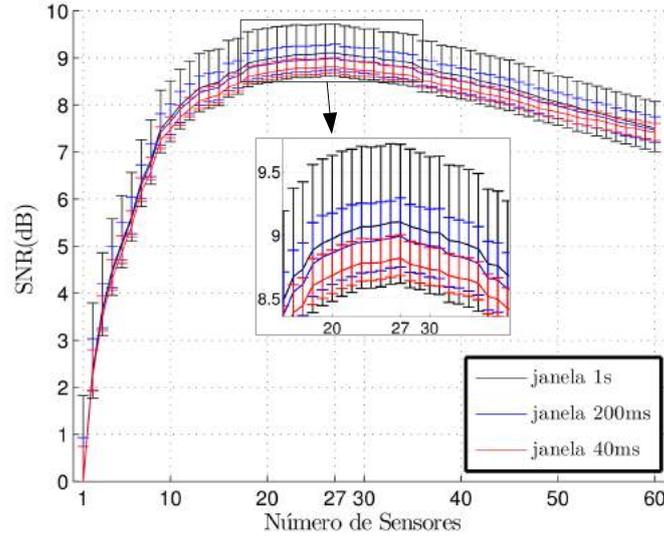


Figura 6.9: SNR \times Número de sensores para 3 janelas propostas.

que o valor do número de sensores a utilizar no arco, calculado através do modelo determinístico, pode ser aceitável (12 sensores), mas com os resultados apresentados a partir do modelo proposto, consideramos 14 sensores uma boa escolha de sensores a utilizar.

6.2 Dados do Submarino

Aproveitando a disponibilidade dos dados coletados do arranjo cilíndrico de hidrofones de um submarino da MB, aplicou-se o método proposto para determinar o número de sensores a ser utilizado no arranjo do submarino. Como abordado no Capítulo 5, o ruído será representado pelo canal 28. Assim, a flutuação canal-canal do ruído não será levada em consideração nesta análise. Para a banda de frequência entre $600Hz$ e $7,5kHz$, obteve-se a SNR utilizando o canal 52 como sinal. A Figura 6.9 apresenta as SNR em função da quantidade de sensores utilizada no arco de conformação de feixes (considerou-se de 1 a 60 sensores).

Como abordado no Capítulo 5, a representação da distribuição das variâncias será dada pela mediana (com a flutuação dada pelos percentis). Como observado no *boxplot* da Figura 5.6, os valores das medianas são diferentes para cada janela e este é o fato que explica a diferença entre os valores da SNR para cada janelamento na Figura 6.9. Apesar desta diferença, não estamos interessados no valor da SNR e sim no comportamento de sua curva, que se mostrou semelhante para as três janelas.

O valor máximo da SNR é encontrado para 27 sensores, no entanto, devido à incerteza, a escolha por 32 sensores, conforme proposto em [7, 8], pode ser considerada uma escolha razoável.

Pelo fato de considerarmos o ruído ambiente igual para todos os sensores não estamos incluindo as flutuações existente nos diferentes sensores do arranjo, que são bastante diferentes, por exemplo, ao comparar os canais voltados para a propulsão e para a proa ¹ do submarino. Assim, é importante ressaltar que o resultado obtido com a utilização destes dados não certifica o método apresentado (para isso deveríamos ter acesso individual aos canais em um cenário sem a presença de fontes), mas mostra que para a situação em uma plataforma real, como o submarino, o resultado se assemelha ao valor obtido através do método determinístico, indicando que o resultado apresentado da análise da SNR, apesar da consideração assumida (ruído sendo o canal 28), é condizente com o esperado (queda da SNR a partir de um máximo).

Assim como realizado para experimento no cais, a SNR pode ser analisada para uma banda de frequência cujo espectro apresente maior intensidade. De acordo com a Figura 5.4 a estimação espectral indica maior energia entre $2kHz$ e $4kHz$ e a SNR para esta banda é apresentada na Figura 6.10. Para esta banda de frequência percebemos que, para o ruído sendo considerado a réplica do canal 28, o valor máximo da SNR é atingido com 27 sensores sendo que o número de sensores a ser utilizado varia de 25 a 35 sensores.

Os resultados apresentados neste capítulo mostraram que o método proposto, para determinação do número de sensores a ser utilizado no conformador de feixe, gerou resultados de acordo com a proposta deste estudo. Ou seja, o método forneceu uma estimativa da faixa de sensores a ser utilizado, buscando inserir todas

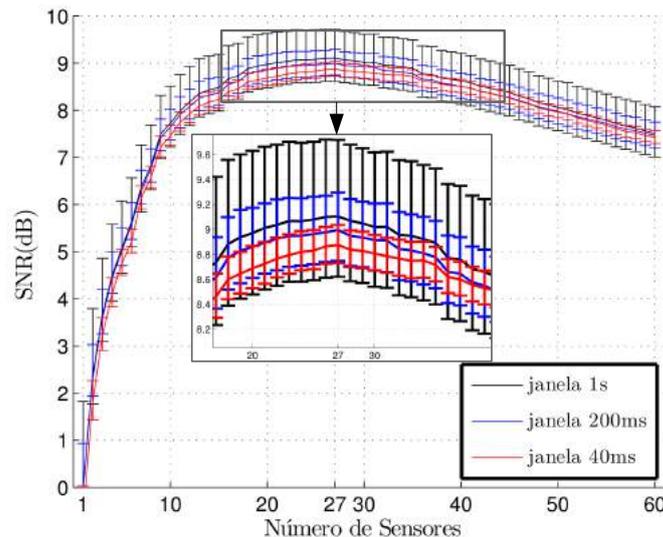


Figura 6.10: SNR \times Número de sensores para 3 janelas propostas para frequência de $2kHz$ à $4kHz$.

¹proa refere-se a parte da frente da embarcação.

as flutuações do processo estatístico nos cálculos, e o valor encontrado através do método determinístico esteve inserido dentro da faixa estimada pelo método proposto (indicando uma coerência dos resultados).

Capítulo 7

Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste capítulo faremos a conclusão do trabalho, no qual falaremos sobre os objetivos traçados no início da dissertação, e discutiremos a respeito do método que foi desenvolvido, evidenciando as contribuições trazidas pela solução proposta, e citando limitações e possíveis melhorias através de trabalhos futuros.

7.1 Realização dos Objetivos

O principal objetivo desta dissertação foi prover uma análise da razão sinal ruído para determinação do número de sensores a ser utilizado na conformação de feixe em um arranjo cilíndrico de hidrofones para sonar passivo. Isto porque vemos que sendo a formação de feixe o núcleo do processamento de sinais em arranjo de sensores, o simples fato da utilização de um método determinístico para estimar um de seus parâmetros não pode ser suficiente para esgotar este problema que envolve tantas incertezas. Assim, este estudo se aprofundou, com um viés estatístico, para uma estimação mais próxima a realidade, utilizando dados experimentais.

Pudemos verificar que a SNR obtida com o método proposto se comportou de maneira esperada, tendo um incremento de valor a medida que utilizam-se mais sensores e após atingir um ponto máximo tem-se uma queda, indicando que a partir deste número as informações utilizadas no conformador não contribuem para uma melhora na SNR. Os resultados mostraram que, na curva da SNR, o ponto de máximo indica uma boa escolha para o número de sensores a ser utilizado no arco. Levando em consideração a flutuação associada ao processo estocástico, que gera uma incerteza na curva da SNR, não é possível definir com exatidão qual o número ideal de sensores, mas dentre as opções percebeu-se que o número de sensores calculado no modelo determinístico também se mostrou um valor adequado, indicando uma coerência nos resultados.

7.2 Discussão

Devido ao método proposto ser aplicado em dados experimentais, pôde-se levar em consideração a flutuação canal-canal e a interferência entre sensores, o que rejeita à aproximação por sensores idênticos. Além disso, o experimento realizado no cais adicionou características comuns daquele ambiente como: a influência da costa, ruídos biológicos e a reflexão na própria estrutura do cais. Medidas impulsivas na tensão foram observadas e a análise especialista indicou que esta característica é própria do local de coleta do dados, assim, foram imputados novos valores para estes trechos com objetivo de não influenciar o método.

Análises da distribuição das variâncias dos canais foram realizadas com auxílio de gráficos *boxplot*. Para o trecho considerado de sinal, percebemos que o valor de $\bar{\sigma}^2$ pôde ser representado pela média das variâncias (após a exclusão dos trechos de impulsos e imputação de dados). Já o trecho de ruído ambiente e eletrônico puderam ser considerados variáveis aleatórias o que foi comprovado experimentalmente.

As análises da SNR restringiram-se à frequência, ao intervalo de integração e à aplicação ou não da técnica de *denoising* (com ruído eletrônico ou ambiente). Inicialmente analisou-se a SNR para os intervalos de integração propostos (janelas de $32ms$, $200ms$ e $1s$), considerando toda a banda de frequência de operação do arranjo, e percebemos que as diferentes janelas interferiram apenas na incerteza da SNR.

A técnica de estimação da máxima verossimilhança foi aplicada para compensar canais ruidosos (*denoising* de canais) e possibilitou a utilização de um número maior de elementos quando aplicada com dados de ruído ambiente. Foi verificado que a utilização de uma quantidade maior de sensores, entre alguns limites, pode trazer vantagens na resolução espacial do arranjo.

Após a estimação espectral da potência da fonte (embarcação), restringiu-se a banda de frequência para o trecho de maior intensidade de energia. As comparações com e sem a utilização do *denoising* mostraram comportamento semelhante aos resultados obtidos com a banda de frequência de operação do arranjo, no entanto, por utilizarmos uma banda de frequência onde existia mais energia de sinal a SNR teve o valor de máximo incrementado.

Aproveitando a disponibilidade de dados gravados a partir do sonar de um submarino, foi proposta à aplicação do método para estimar o número de elementos a ser utilizado neste arranjo. Considerou-se o ruído ambiente sendo representado pelo canal 28 (não levando em conta a flutuação canal-canal) e o sinal o canal 52. A queda da SNR ocorreu próximo ao valor estimado no modelo determinístico, o que nos mostrou uma coerência de resultados. Assim, considera-se que este método mostrou bons resultados no experimento cego podendo ser aplicado em situações

reais de operação.

7.3 Trabalhos Futuros

Para finalizar esta dissertação, iremos expor agora algumas possibilidades de extensão do trabalho que identificamos ao longo do processo de desenvolvimento. Em termos de expressividade este trabalho consolidou uma importante base de aprendizado em análise de dados de sonar, aplicado ao conformador de feixes atraso-e-soma. No entanto, os estudos de diferentes tipos de conformação de feixe aplicada ao arranjo cilíndrico podem oferecer algumas vantagens não abordadas neste trabalho.

Algoritmos de alta resolução para formação de feixes vem sendo amplamente utilizados em sistemas para localização de fontes. No entanto, caso a SNR seja baixa ou o sinal seja de banda larga (como no caso do sonar) podem ocorrer problemas na eficiência destes algoritmos. Apesar disso, com o avanço dos computadores ou com a realização de um processamento paralelo, atualmente, a discretização das bandas de frequência em bandas estreitas poderia ser uma solução interessante para estes problemas.

Finalmente, outras futuras extensões que enxergamos como caminhos interessantes a serem investigados, visando aumento de eficiência da localização de fontes, aplicados ao sonar, seria a investigação do problema de processamento em tempo on-line do grande volume de dados recebidos pelo sonar, que se faz imprescindível em um cenário de operação.

Referências Bibliográficas

- [1] LI, Q. *Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Advanced Topics in Science and Technology in China. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 9783642182907. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=WZuBmNOLGo8C>>.
- [2] SHERMAN, C., BUTLER, J. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. The Underwater Acoustics Series. Springer New York, 2007. ISBN: 9780387331393. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=srREi-ScbFcC>>.
- [3] VAN TREES, H. *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Optimum Array Processing*. Detection, Estimation, and Modulation Theory. Wiley, 2004. ISBN: 9780471463832. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=K5XJC_fmMAwC>.
- [4] RODRIGO C. TORRES, J. M. SEIXAS, W. S. F. “Classificação de Sinais de Sonar Passivo com Base em Componentes Independentes”, *Learning and Nonlinear Models - Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais*, v. 2, n. 2, pp. 60–72, 2004.
- [5] FILHO, W. S. *Classificação do Ruído Irrradiado por Navios usando Redes Neurais*. Tese de Doutorado. Ph.D. Thesis, PEE/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- [6] “Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB)”. 2015. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/acessoainformacao/pdf/snbr.pdf>>.
- [7] DA SILVA, M. R. R. P. *Estudo e Análise de Métodos Empregados em Array Cilíndrico Passivo para Determinação da Direção de Fontes Sonoras*. Dissertação de Mestrado, PEM/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- [8] FELZKY, M. A. *Uma Contribuição às Técnicas de Localização de Fontes Sonoras Através de um Sistema Sonar Passivo Utilizando Filtros Fracionários*.

Dissertação de Mestrado, PEE/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

- [9] PEREIRA, R. A. *Estimação de Energia em um Calorímetro Finamente Segmentado*. Dissertação de Mestrado, PEE/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- [10] JACKSON, B., RAJAN, S., LIAO, B., et al. “Direction of Arrival Estimation Using Directive Antennas in Uniform Circular Arrays”, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 63, n. 2, pp. 736–747, Feb 2015. ISSN: 0018-926X. doi: 10.1109/TAP.2014.2384044.
- [11] SUREAU, J.-C., KEEPING, K. “Sidelobe control in cylindrical arrays”, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 30, n. 5, pp. 1027–1031, Sep 1982. ISSN: 0018-926X. doi: 10.1109/TAP.1982.1142903.
- [12] BURDIC, W. *Underwater acoustic system analysis*. Prentice Hall signal processing series. Prentice Hall, 1991. ISBN: 9780139476075. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=cAdRAAAAMAAJ>>.
- [13] ATLAS ELEKTRONIK KRUPP - TED WESTERN GERMANY PRESS. *Atlas Sonar Equipment CSU 83-1/014 – Operating and Repair Instructions*, Março 1988.
- [14] HODGES, R. *Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar*. Wiley, 2011. ISBN: 9781119957492. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=204f2ETpjm8C>>.
- [15] MITRA, S. *Digital Signal Processing: A Computer-based Approach*. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering. McGraw-Hill, 2011. ISBN: 9780073380490. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=0GqfQwAACAAJ>>.
- [16] VAN VEEN, B., BUCKLEY, K. “Beamforming: a versatile approach to spatial filtering”, *ASSP Magazine, IEEE*, v. 5, n. 2, pp. 4–24, April 1988. ISSN: 0740-7467. doi: 10.1109/53.665.
- [17] TAKUBO, S., TAJIMA, Y., YAMADA, Y. “Radiation pattern synthesis of an unequally spaced array antenna”. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2000. IEEE*, v. 3, pp. 1210–1213 vol.3, July 2000. doi: 10.1109/APS.2000.874291.
- [18] VAN TREES, H. *Detection, Estimation, and Modulation Theory*. N. pt. 1, Detection, Estimation, and Modulation Theory. Wiley, 2004. ISBN:

9780471463825. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Xzp7VkuFqXYC>>.

- [19] DINIZ, P., DA SILVA, E., NETTO, S. *Processamento Digital de Sinais - 2.ed.: Projeto e Análise de Sistemas*. Bookman Editora, 2014. ISBN: 9788582601242. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=HoW̄aAgAAQBAJ>>.
- [20] BOHNENSTIEHL, D. R., LILLIS, A., EGGLESTON, D. B. “The Curious Acoustic Behavior of Estuarine Snapping Shrimp: Temporal Patterns of Snapping Shrimp Sound in Sub-Tidal Oyster Reef Habitat”, *PLoS ONE*, v. 11, pp. e0143691, 01 2016. doi: 10.1371/journal.pone.0143691. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0143691>>.
- [21] LEGG, M., DUNCAN, A., ZAKNICH, A., et al. “An exploratory analysis of non-poisson temporal behaviour in snapping shrimp noise”, 2005.
- [22] DIAS, A. J. R., ALBIERI, S. “Uso de imputação em pesquisas domiciliares”, *VIII Encontro Nacional de Estudos Populacionais - Informação Demografica, Fecundidade, Demografia Historica*, v. 1, pp. 11–26, 1992.
- [23] ENGELS, J. M., DIEHR, P. “Imputation of missing longitudinal data: a comparison of methods”, *Journal of clinical epidemiology*, v. 56, n. 10, pp. 968–976, 2003.
- [24] RUBIN, D. B. *Multiple imputation for nonresponse in surveys*, v. 81. John Wiley & Sons, 2004.
- [25] LITTLE, R., RUBIN, D. *Statistical Analysis With Missing Data*. Wiley Series in Probability and Statistics - Applied Probability and Statistics Section Series. Wiley, 1987. ISBN: 9780471802549. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=w40QAQAIAAJ>>.
- [26] HARRELL, F. *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis*. Graduate Texts in Mathematics. Springer, 2001. ISBN: 9780387952321. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=kfHrF-bVcvQC>>.
- [27] D. M. TITTERINGTON, G. M. M. “Kernel-Based Density Estimates from Incomplete Data”, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, v. 45, n. 2, pp. 258–266, 1983. ISSN: 00359246. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2345531>>.

- [28] “Kernel Density Estimation in Python”. 2016. Disponível em: <http://jakevdp.github.io/blog/2013/12/01/kernel-density-estimation/>.
- [29] “Dataset loading utilities”. 2016. Disponível em: <http://scikit-learn.org/stable/datasets/>.

Apêndice A

Análise Estatística de Sinais Aleatórios e Estimadores

Um hidrofone, quando imerso no mar, capta sinais que são predominantemente descritos como “ruído”, ou seja, cuja amplitude flutua aleatoriamente. Assim, somente uma descrição estatística baseada em intervalos de observação permite sua caracterização.

A tensão de saída resultante é uma combinação de ruídos elétricos do sistema eletrônico e ruídos acústicos produzidos pela flutuação de pressão do oceano no local do hidrofone. Um adequado sistema de aquisição de sinais deve predominantemente coletar o componente de ruído acústico. Este último será tratado como ruído acústico de base (*background acoustic noise*), ou ruído ambiente.

O termo ruído ambiente se refere ao ruído que permanece depois de eliminar todas fontes sonoras facilmente identificados. Por exemplo, o ruído emitido por uma embarcação é tratado como sinal acústico, uma vez que é localizável e identificável, e não é considerado ruído ambiente.

Este capítulo, revisa algumas características estatísticas de sinais aleatórios, que serão utilizadas para a definição do método proposto.

A.1 Processos Aleatórios

Os sistemas, sinais e parâmetros ambientais requisitados na análise de um sistema acústico submarino são conhecidos por sua pouca acurácia e podem envolver grandes incertezas [12]. Obviamente, o ruído ambiente no oceano é resultado de fenômenos não determinísticos proveniente da interação da superfície, meio e fundo do mar. Assim, usuais análises podem ser obtidas a partir de médias em que considera-se uma estatística regular do fenômeno em questão.

Métodos probabilísticos e estatísticos são ferramentas importantes de análise

de sistemas com fenômenos aleatórios. Algumas definições sobre valor esperado e processos estocásticos e ergóticos serão abordados nas seguintes subseções.

A.1.1 Momentos

Análises envolvendo variáveis aleatórias requerem uma avaliação de médias ou valores esperados [12]. Estas médias estão relacionadas a uma função probabilística ou, uma distribuição de probabilidade.

Considerando uma variável aleatória (x) com K possíveis saídas (x_k), se este experimento for repetido N vezes, o valor médio (x_{av}) é calculado por

$$x_{av} = \frac{x_1n(1) + \cdots + x_kn(k) + \cdots + x_Kn(K)}{N}, \quad (\text{A.1})$$

onde N é o número de testes e $n(k)$ é o número de vezes que $x = x_k$. Assim, a Equação A.1 pode ser escrita compactamente como

$$x_{av} = \sum_{k=1}^K x_k \left[\frac{n(k)}{N} \right]. \quad (\text{A.2})$$

No limite de N tendendo ao infinito, a Equação A.2 transforma-se em

$$E[x] = \sum_{k=1}^K x_k P(x_k) = \bar{x}. \quad (\text{A.3})$$

O termo $E[x]$ é o valor esperado da variável aleatória x . Este fator é também chamado de média, esperança, média estatística, ou agrupamento médio de x . Se x é função de outra variável, como o tempo, ele pode ser chamado de variável estocástica, com a média associada sendo referida como média estocástica.

O termo $P(x_k)$ é a probabilidade de ocorrência. O conceito de probabilidade é convenientemente apresentado como a frequência relativa de ocorrência. Essa definição, sem rigor matemático é suficiente para a proposta apresentada aqui.

Para o caso geral, se $f(x)$ é uma função arbitrária de x ,

$$E[f(x)] = \sum_{k=1}^K f(x)P(x_k), \quad (\text{A.4})$$

e, trocando a probabilidade discreta pela função densidade de probabilidade $p(x)$ (*probability density function - pdf*), e o somatório com a integral, obtém-se o valor esperado de variáveis aleatórias contínuas, que é dado por

$$E[f(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)p(x)dx. \quad (\text{A.5})$$

O valor esperado de várias potências de x tem particulares importâncias em cada

análise de um sistema. Estas variações do valor esperado, relacionado a potência de x são chamados momentos da função densidade de probabilidade de x , definido como

$$n\text{-ésimo momento} = E[x^n] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n p(x) dx. \quad (\text{A.6})$$

Os momentos centrais de $p(x)$ são definidos como a n -ésima ordem do valor esperado da variável $(x - \bar{x})$. Assim,

$$n\text{-ésimo momento central} = E[(x - \bar{x})^n] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^n p(x) dx. \quad (\text{A.7})$$

O primeiro momento central é zero, por definição. O segundo momento central é a variância de x , frequentemente identificado pelas seguintes notações

$$\text{variância de } x = \text{Var}[x] = \sigma_x^2.$$

Pode-se expandir a Equação A.7 para a variância, e obter

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx - 2\bar{x} \int_{-\infty}^{+\infty} x p(x) dx + \bar{x}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx - \bar{x}^2 \\ &= E[x^2] - E^2[x]. \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Assim, a variância é igual ao segundo momento menos o quadrado do primeiro momento. A raiz quadrada da variância (σ_x) é o desvio padrão de x .

A.1.2 Estacionaridade e Ergodicidade

Se a propriedade estatística de um processo aleatório não varia com o tempo, o processo é dito estacionário. Como exemplo, considere um grande número de resistores idênticos na mesma temperatura. Ajustando a tensão em cada resistor no tempo particular t_1 , nomeada $x_k(t_1)$, onde k é o k -ésimo resistor, a *pdf* $p[\mathbf{x}(t_1)]$, ou $p[\mathbf{x}_1]$ é a função de densidade da leitura sobre o grupo de resistores no tempo t_1 . Se o

processo é estacionário, uma similar leitura num tempo posterior (t_2) proverá uma função de densidade idêntica.

De maneira similar, pode-se comparar as leituras em tempos t_1 e t_2 e obter a *pdf* do processo conjunto, $p[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2]$. Para um processo estacionário, a *pdf* depende somente da diferença de tempo, $\Delta t = t_2 - t_1$ e não da localização absoluta das amostras. Ou seja, para um processo estacionário,

$$p[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2] = p[\mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4],$$

desde que, $t_2 - t_1 = t_3 - t_4$. Se esta relação se mantém para todas as *pdf* conjuntas de altas ordens, ou seja, para todo x_k e Δt , o processo é definido como estritamente estacionário (*strict-sense-stationary*). No caso da *pdf* conjunta não se manter invariante para todas as altas ordens, o processo é dito estacionário em sentido amplo (*wide-sense stationary*).

O conceito de estacionaridade deve ser interpretado em um contexto de importância da escala de tempo para cada situação. Considerar um sistema estacionário pode ser uma útil aproximação quando as propriedades estatísticas não se alteram notavelmente sobre o intervalo de tempo de interesse de um dado problema.

A média temporal é definida pela equação

$$\langle x_k(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x_k(t) dt, \quad (\text{A.9})$$

onde $x_k(t)$ representa, por exemplo, o k -ésimo resistor de um grupo. Já a média estatística, ou média do grupo, é obtida pela media simultânea das medidas de tensão sobre cada resistor do grupo em algum instante de tempo:

$$E[\mathbf{x}(t_1)] = \overline{\mathbf{x}(t_1)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{x}_1 p(\mathbf{x}_1) d\mathbf{x}. \quad (\text{A.10})$$

Se todos os resistores forem iguais na mesma condição de temperatura, os resultados obtidos nas equações A.9 e A.10 são iguais. Portanto, para este processo

$$\langle x_k(t) \rangle = E[\mathbf{x}_1] = \bar{x}_1. \quad (\text{A.11})$$

Além disso, para este processo, seria encontrado que

$$\langle x_k^2(t) \rangle = E[\mathbf{x}_1^2], \quad (\text{A.12})$$

e

$$\langle x_k(t)x_k(t - \tau) \rangle = E[\mathbf{x}(t_1) - \mathbf{x}(t_1 - \tau)] = E[\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2], \quad (\text{A.13})$$

onde $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}(t_1)$ e $\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}(t_1 - \tau)$. Um processo que se comporta desta maneira é chamado processo ergódico (*ergodic random process*). Um processo ergódico é necessariamente estacionário no entanto o inverso não é garantido.

A.2 Estimador de Máxima Verossimilhança

Assim como apresentado em [9], o estimador de máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation - MLE*) é utilizado neste trabalho como forma de compensar canais ruidosos. Este estimador visa, a partir de um dado experimento com função densidade de probabilidade $f(x; \alpha)$, determinar um parâmetro desconhecido α , encontrando o ponto de máximo na função de verossimilhança $\zeta(\alpha)$.

$$\zeta(\alpha) = \prod_{i=1}^L f(x_i; \alpha). \quad (\text{A.14})$$

Considerando x_i uma medida com distribuição Gaussiana e com erro de medição σ_i , ou seja

$$x[l] = A + w[l] \quad (\text{A.15})$$

onde A é o parâmetro a ser estimado e $w[l]$ é um ruído branco gaussiano com variância σ_i^2 , a PDF é dada por

$$f(x_i; A) = \frac{1}{(2\pi\sigma_i^2)} \exp\left[-\frac{(x_i - A)^2}{2\sigma_i^2}\right]. \quad (\text{A.16})$$

Para L medidas de x_i , a função de verossimilhança é dada por

$$\zeta(A) = \prod_{i=1}^L \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left[-\frac{(x_i - A)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (\text{A.17})$$

e calculando o logaritmo natural, tem-se

$$p = \sum_{i=1}^L \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^L \left[-\frac{(x_i - A)^2}{\sigma_i^2}\right]. \quad (\text{A.18})$$

Derivando a Equação A.18 em relação a A , obtém-se

$$\frac{\partial p}{\partial A} = \sum_{i=1}^L \frac{x_i - A}{\sigma_i^2}, \quad (\text{A.19})$$

que, quando igualado a zero, encontra-se o valor ótimo do parâmetro:

$$\hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^L \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^L \frac{1}{\sigma_i^2}}. \quad (\text{A.20})$$

A partir da Equação A.20, conclui-se que, o parâmetro ótimo é obtido ponderando-se as medidas individuais com o inverso do quadrado dos seus erros. Como exemplo, se todas as medidas possuírem o mesmo erro associado, então a medida ótima será a média aritmética das medidas individuais.

A.3 Imputação de Valores em Dados Faltantes

O método de imputação envolve trocar um grupo de dados faltantes por valores plausíveis, considerando um conjunto de informações disponíveis. Em [22], define-se os procedimentos de imputação como sendo aqueles que se preocupam em substituir os valores ausentes, de um grupo de dados ou de um item, por estimativas dos mesmos. Inicialmente, os métodos de imputação foram propostos com técnicas relativamente simples, como cálculo de médias, medianas, interpolação, ou regressão linear.

As referências estudadas separam duas classes de imputação, a simples e a múltipla. Na imputação simples (ou única) os dados faltantes são substituídos uma única vez por métodos como: *hot deck*, imputação pela função distância, imputação dedutiva, substituição por um valor de tendência central, estimativa de máxima verossimilhança entre outros [23]. Neste método não existe preocupação com a incerteza associada a imputação.

Na imputação múltipla [24, 25], para cada dado faltante são imputados vários valores, ao invés de um. Assim, gera-se um conjunto de dados completos (com valores imputados) e cada um desses conjuntos é avaliado utilizando procedimentos específicos. A média das múltiplas imputações gera uma estimativa de um parâmetro, e seu desvio padrão é obtido a partir da variância das imputações. Desta forma, insere-se variabilidade aos resultados.

Apesar das técnicas de imputação múltipla abrangerem o estado da arte das pesquisas atuais, HARRELL [26] propõe uma possível escolha entre os métodos de imputação de acordo com a proporção de dados faltantes.

Se a proporção dos valores for menor que 5%, pode-se utilizar a imputação simples, ou analisa-se somente os dados completos. No caso da proporção estar entre 5% e 15%, a imputação simples poderá ser usada, entretanto o uso da imputação múltipla é indicado. Já no caso da proporção ser maior que 15%, a imputação múltipla é indicada na maior parte dos casos.

Neste trabalho é proposta a imputação única utilizando *Kernel Density Estimation* - (*KDE*), proposto em [27]. Esta técnica estima uma função densidade

de probabilidade de uma variável aleatória baseando-se nas amostras dos dados.

Com interesse em estimar uma função desconhecida f , dadas as amostras independentes e identicamente distribuídas x_1, x_2, \dots, x_n , o estimador *Kernel* é

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (\text{A.21})$$

onde $K(\cdot)$ é uma função não negativa intitulada *kernel* e h é o parâmetro de alisamento. Neste trabalho, utilizou-se de um *kernel* normal, ou seja, $K(x) = \Phi(x)$, onde $\Phi(x)$ é uma Gaussiana.

Para implementação desta técnica, utilizou-se a biblioteca “*Scikit – learn*”, implementada em *Python* [28]. As amostras imputadas são escolhidas utilizando um gerador aleatório que segue a distribuição estimada pelo *KDE* Gaussiano [29].

Apêndice B

Trabalhos Publicados

Apresentação de trabalhos

- 1 F. A. Bozzi; J. M. de Seixas; T. C. Xavier; L. M. Barreira; **Maximum likelihood estimation to denoising channels in beamforming circular array.**

Abstract:

The delay and sum beamforming is the most simple technique in Direction Of Arrival (DOA) Estimation. Although its performance on spatial discrimination is poor, comparing to others beamforming, delay and sum still used in large operating Sound Navigation and Ranging (SONAR), because of its low computational cost. A Circular Hydrophone Array (CHA), commonly used in SONAR system, are an attractive alternative to provide a more uniform directive response over all azimuth angle. This array is analyzed here, working with experimental data, acquired in a acoustic tank and in the sea. Maximum Likelihood Estimation (MLE) is applied to denoising noisy channels, summing up them after in delay-and- sum. First of all, a noise in an acoustic tank is considered to represent the hydrophones, cables and acquisition system noises. Then, a environmental noise is collected in the sea. The MLE use both of them to calculate the weights in the beamforming. A boat is used to running around the array, the DOA of the uniformly weight and MLE in delay-and-sum shows the performance improvement.

Acoustical Society of America (ASA) - 171st Meeting, Salt Lake City, Utah, USA, 23-27 May 2016.

- 2 F. A. Bozzi; N.J.Moura; J. M. de Seixas . **Estudo da Estimação de Sinais de um Arranjo Cilíndrico de Hidrofonos.**

Resumo:

Este trabalho visa analisar estatisticamente dados provenientes de um arranjo cilíndrico de hidrofones. O pré-processamento é realizado com a implementação de um conformador de feixes. Arcos distintos dos arranjos foram escolhidos para compor o formador e avaliaram-se os estimadores. Por fim foi realizado um estudo de detecção para a seção escolhida.

Encontro de Tecnologia Submarina, 2014, Rio de Janeiro. XI Encontro de Tecnologia Subamarina, 2014.