

PROJETO DE UM SISTEMA ACÚSTICO DE BAIXO CUSTO PARA A
MEDIÇÃO DE RUÍDOS IRRADIADOS POR NAVIOS E SUBMARINOS

RICARDO TRAMUJAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D. Sc.

Prof. Jules Ghislain Slama, D. Sc.

Prof. Susana Beatriz Vinzon, D. Sc.

Eng. William Soares Filho, D. Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

TRAMUJAS, RICARDO

Projeto de um Sistema Acústico de
Baixo Custo para a Medição de Ruídos
Irradiados por Navios e Submarinos
[Rio de Janeiro] 2008

VIII, 58 p., 29,7 cm (COPPE,
M.Sc., Engenharia Oceânica, 2008)

Dissertação, Universidade Federal
do Rio de Janeiro, COPPE

1 – Array de Hidrofones

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

A Futuros Estudos...

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Parente, pela paciência e orientação segura,

Ao Comandante Fábio Lopes, por estar sempre disponível à ajudar,

Ao Centro de Apoio a Sistemas Operativos pela confiança depositada em mim,

Ao meu Pai, Mãe e Tia Suely, revisores de português e inglês, e

A minha esposa e nossos filhos, Tito e Rui, que me apoiaram e estimularam desde o início.

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

PROJETO DE UM SISTEMA ACÚSTICO DE BAIXO CUSTO PARA A
MEDIÇÃO DE RUÍDOS IRRADIADOS POR NAVIOS E SUBMARINOS

Ricardo Tramuja

Março/2008

Orientador : Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Programa : Engenharia Oceânica

Avanços tecnológicos têm provido os submarinos da capacidade de operarem cada vez mais silenciosos. Devido a esta evolução, a emissão acústica foi reduzida a um nível tão próximo ao do ruído ambiente que se tornou extremamente difícil a medição do seu espectro com dispositivos simples, mesmo que a pequena distância. Neste caso é necessário utilizar algum método para aumentar a relação sinal/ruído como, por exemplo, empregar um arranjo de hidrofones.

Existem diversos tipos de conjuntos de hidrofones capazes de melhorar a relação sinal/ruído. Dentre estes, o *array broadside* é o que se apresenta como o de mais baixo custo de aquisição.

Desta forma, este trabalho pretende analisar o uso de um *array broadside* para a medição dos sinais acústicos de um submarino em um evento controlado, aplicando alguns conhecimentos da área de acústica submarina.

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

LOW COST SYSTEM DESIGN FOR UNDERWATER ACOUSTIC
MEASUREMENTS OF RADIATED NOISE FROM VESSELS AND
SUBMARINES

Ricardo Tramujas

March 2008

Advisor : Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Department : Ocean Engineering

Technological progress have provided the submarines with the capacity of operating more and more silently. Due to this evolution, the acoustic emission has been reduced to a level so close to the environmental noise that it has become extremely difficult the measuring of its spectrum with simple appliances, even from short distances. In this case it is necessary to use a method to increase the signal/noise relation as, for example, using an array of hydrophones or sensor arrays.

There are various kinds of hydrophone arrays capable of increasing the signal/noise ratio. Among them the broadside array is the one that presents the lowest cost.

Thus this work intends to analyze the use of a broadside array to measure the acoustic signals of a submarine in a controlled event, applying some knowledge of underwater acoustic area.

ÍNDICE

Capítulo1 – Introdução	1
Capítulo2 – Fundamentos Teóricos	
2.1 – Equação do Sonar Passivo	4
2.2 – Intensidade de Referência	6
2.3 – Nível da Fonte	6
2.3.1 – Ruído Irrradiado de um Submarino	7
2.4 – Perdas na Transmissão	12
2.5 – Ruído Ambiente	12
2.6 – Limiar de Detecção	15
2.7 – Índice de Diretividade	16
2.7.1 – Acesso aos Elementos	17
2.7.2 – Distância entre os Sensores	18
2.7.3 – Quantificando o DI	20
Capítulo3 – Medição de Ruído Irrradiado de Navios	
3.1 – Raia Acústica	22
3.2 – Sinal Medido	22
Capítulo4 – Projeto do Sistema	
4.1 – Frequências Interesse	24
4.2 – Faixa Dinâmica	25
4.3 – Posicionamento do Dispositivo	29
4.3.1 – Distâncias Máximas para a Medição	29
4.3.2 – Navegação do Submarino	30
4.4 – Regiões Úteis para a Medição	33
4.4.1 – Diagramas de Irradiação	33
4.4.2 – Área útil para a Medição	44

4.5 – Outras Possibilidades	47
4.5.1 – <i>Array</i> Linha na Vertical	47
4.5.2 – Sistema Móvel	52
Capítulo5 – Conclusões e Recomendações	55
Capítulo6 – Bibliografia	57

Capítulo 1 – Introdução

Ruídos de banda larga de frequências são irradiados por navios e submarinos a partir de componentes do sistema de propulsão, incluindo o hélice e as máquinas auxiliares que se tornam uma característica particular a cada um. Assim, esses espectros podem ser entendidos como assinaturas acústicas [1].

A medição e análise dessas emissões acústicas tornam-se importantes:

- a) Para o desenvolvimento de tecnologias e maneiras capazes de aumentar a discriminação acústica;
- b) Nas pesquisas de métodos para detectar, localizar e classificar fontes emissoras; e
- c) Como uma medida para avaliar o desempenho de navios, dentre outras.

Os submarinos se caracterizam pelo alto grau de discriminação operando mergulhados e com baixo nível de ruído irradiado. Esses dois fatores aliados resultam em um elevado grau de incerteza para o inimigo, transformando este navio numa arma de excelente relação custo/benefício, visto que, para localizar uma única unidade, o oponente deverá dispor de um elevado número de meios, tais como navios, aviões, etc. Estas duas condições de discriminação redundam, inclusive, em um importante e significativo fator de dissuasão, sobretudo para marinhas com poder marítimo inferior ao do opositor [2].

Desta forma, significativos investimentos têm sido realizados para tornarem o submarino uma máquina de guerra ainda mais eficiente. Desenhos de hélices que geram menos cavitação, máquinas mais silenciosas e calços amortecedores para reduzir a transmissão de vibrações ao exterior, a forma do casco aperfeiçoada para gerar menos ruídos hidrodinâmicos, revestimentos para absorver a energia acústica de sonares ativos, são alguns exemplos de avanços tecnológicos que têm provido os submarinos da capacidade de operarem de forma cada vez mais silenciosa.

Todas essas medidas resultaram em níveis de emissões acústicas tão próximas ao do ruído ambiente que se tornou extremamente difícil a medição do espectro de submarinos modernos com dispositivos simples, mesmo que a uma pequena distância.

Desta forma as marinhas do primeiro mundo buscam continuamente soluções que permitam o aumento da relação sinal/ruído, de forma a obter estas medidas, o que também se torna a motivação desta dissertação. Dentre os recursos usados em sistemas de medição acústica submarina, é notória a utilização de arranjos de hidrofones, *arrays*, bem como a realização das medidas em locais em que o ruído ambiente é baixo.

A página da *internet* da *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL), divulgou recentemente um projeto de grande dimensão que chamou de “estado da arte” em termos de obtenção de dados acústicos de submarinos. O sensor é composto de vários *arrays* montados em uma estrutura como ilustrado na figura 4.5.2.1, e os sinais são processados em computadores de última geração desenvolvidos exclusivamente para este fim. Conta-se ainda com um navio de apoio capacitado a lançar e recolher o enorme dispositivo. Esses fatores juntos, geram uma capacidade tida como a única forma de monitorar os níveis de emissão da próxima geração da classe “*Seawolf*” de submarinos nucleares. [3].

Embora este sistema possa ser considerado como um expoente de aplicação de recursos, aqueles dos demais países de primeiro mundo também possuem características que levam a pressupor um elevado grau de investimento.

Os *arrays* utilizados nestes sistemas possuem a capacidade de levar ao sistema processador o sinal oriundo de cada hidrofone individualmente, por isso esses arranjos são ditos com acesso aos elementos.

O *array broadside*, é um tipo de agrupamento de hidrofones em que os sinais de cada um são somados em um único sinal de saída. Esse dispositivo é de construção mais trivial do que aqueles com acesso aos elementos, bem como necessita de sistemas mais simples e com menor capacidade de processamento para o tratamento dos sinais, o que configura um menor custo.

Portanto, o objetivo da dissertação é fundamentar o uso de um *array broadside* em um sistema de medição acústica submarina que possibilite a medição do espectro irradiado de submarinos modernos. Entretanto, será visto que o uso deste tipo de array implica em algumas restrições de forma que o desafio é adequar o dispositivo para que

possa adquirir a maior quantidade possível de dados de interesse para as aplicações decorrentes citadas no segundo parágrafo.

Para isto, o estudo se inicia no capítulo dois com a revisão de alguns conceitos básicos, seguido de uma série de simplificações teóricas que serão adotadas no seu desenvolvimento.

No capítulo três descreve-se como é medido o ruído irradiado de um navio em movimento na raia acústica da Marinha do Brasil, bem como este sinal é aproveitado para a obtenção do espectro.

O capítulo quatro analisa algumas formas possíveis para o projeto de um *array broadside* adequado para a utilização na raia acústica e em outras situações, tendo em vista as suas características e limitações. E, através dos diagramas de irradiação dos dispositivos, são quantificadas as áreas onde são possíveis as medições.

Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

2.1 – Equação do Sonar Passivo

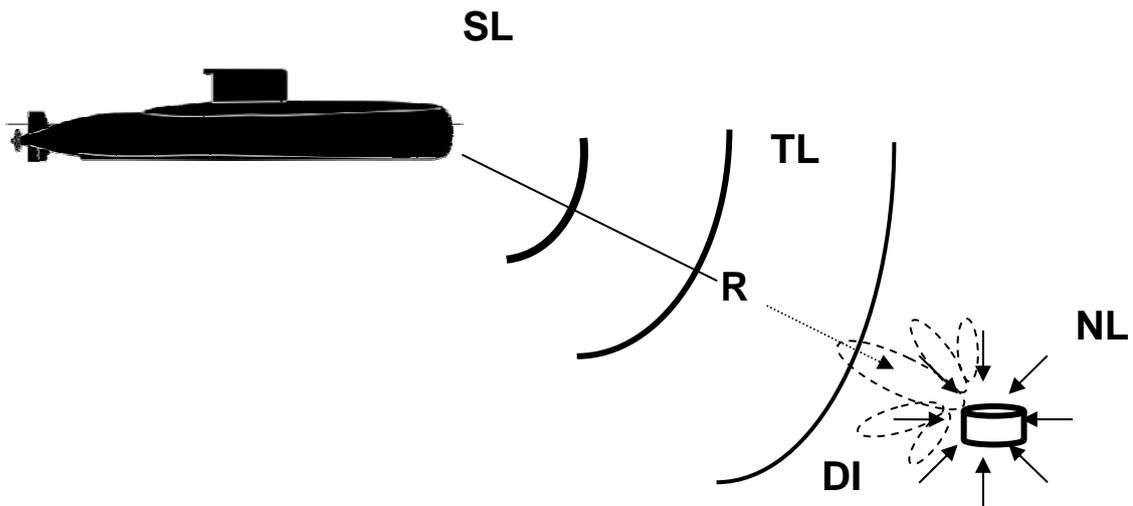


FIG 2.1.1 – O Problema Clássico de Detecção Acústica.

A medição do som emitido por navios e submarinos pode ser encarada como um problema clássico de detecção acústica passiva, tal qual é mostrado na figura 2.1.1, onde:

- SL : Nível de Intensidade da Fonte;
- TL : Perdas na Transmissão ou Perdas na Propagação;
- NL : Ruído Ambiente;
- DI : Índice ou Ganho de Diretividade; e

Na figura 2.1.1 uma fonte sonora, representada pelo submarino, emite um sinal de intensidade “SL” que se propaga a uma distância “R” até um sensor, simbolizado pelo cilindro. As perdas “TL” que o som sofre neste percurso irão atenuar a intensidade que chega ao sensor.

O meio submarino possui um ruído de fundo randômico, chamado ruído ambiente, “NL”, como consequência de vários fenômenos naturais, atividades de organismos marinhos e como resultado da atividade humana. Por simplificação, é considerado isotrópico, como representado pelas setas na figura, e “compete” com o sinal que chega oriundo da fonte.

O sensor pode ser formado por um arranjo de vários hidrofones, conhecido como *array*, que tem um poder de discriminação espacial contra ruídos, aumentando a percepção dos sinais, como será abordado adiante. Este fator é chamado de ganho do array “AG”. Para tratar deste parâmetro de uma forma simplificada é necessário considerar o sinal como uma onda plana e coerente, e o ruído como isotrópico e incoerente. Com isto o “AG” se resume a uma grandeza conhecida como ganho de diretividade, “DI” [4], representado na figura pelas elipses tracejadas, cuja característica é melhorar a recepção em uma determinada direção.

A capacidade de o sistema perceber o sinal será melhor na medida em que for maior a relação sinal/ruído. O nível mínimo que a relação sinal / ruído deve ter é o limiar de detecção, expresso pelo termo “DT” na equação 2.1.1, que depende das características físicas e de processamento do sistema de que o sensor faz parte, sendo calculado em termos da probabilidade de detecção e de falso alarme.

Uma enorme faixa dinâmica acomoda as intensidades sonoras no meio submarino. A forma logarítima em decibéis da relação sinal / ruído torna mais tratável os valores de intensidade sonora, pois integra de forma conveniente e acurada a imensa variedade de efeitos do meio ambiente e as características e parâmetros de um sonar passivo. Desta forma [5]:

$$SL - TL - (NL - AG) \geq DT \quad (2.1.1)$$

Ou, substituindo AG por DI:

$$SL - TL - (NL - DI) \geq DT \quad (2.1.2)$$

2.2 – Intensidade de Referência (I_r)

Para uma onda plana a intensidade pode ser relacionada à pressão [4]:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.2.1)$$

Sendo:

- a) I a intensidade;
- b) p a pressão em Pa ou $\frac{N}{m^2}$;
- c) ρ a densidade do meio; e
- d) c a velocidade do som no meio.

Será considerada como a intensidade de referencia, I_r , a intensidade de uma onda plana cuja pressão em raiz média quadrática, RMS , é igual a $1\mu Pa$ (um micropascal)

2.3 – Nível da Fonte (SL – *Source Level*)

O Nível da Fonte é definido como:

$$SL = 10 \log \left(\frac{\text{Intensid. da fonte à uma distância padrão}}{\text{Intensid. de referência}} \right) \quad (2.3.1)$$

Considerando a fonte como um projetor omnidirecional, à distância padrão de um metro, uma relação interessante entre o SL e a pressão pode ser obtida substituindo a relação 2.2.1 na 2.3.1, obtendo:

$$SL = 20 \log (p) \quad dB \text{ re } 1 \mu Pa @ 1 m \quad (2.3.2)$$

Sendo p em μPa .

O complemento “re 1 μPa @ 1 m”, quando utilizado, deverá ser entendido como: referente à intensidade devido a pressão de um micro pascal à distância padrão de um metro.

2.3.1 – Ruído Irrradiado de um Submarino

Os sons originários de navios e de ruído ambiente normalmente ocupam uma banda larga de frequências. A descrição mais útil destes sinais é provida pela representação gráfica de uma densidade espectral de intensidade sobre uma banda de frequências. Usualmente, a ordenada representa a intensidade total observada em bandas muito estreitas para cada frequência representada na abscissa. Na acústica submarina essa banda é de 1 Hz [1]. A figura 2.3.1.1 descreve três diferentes curvas com estas características.

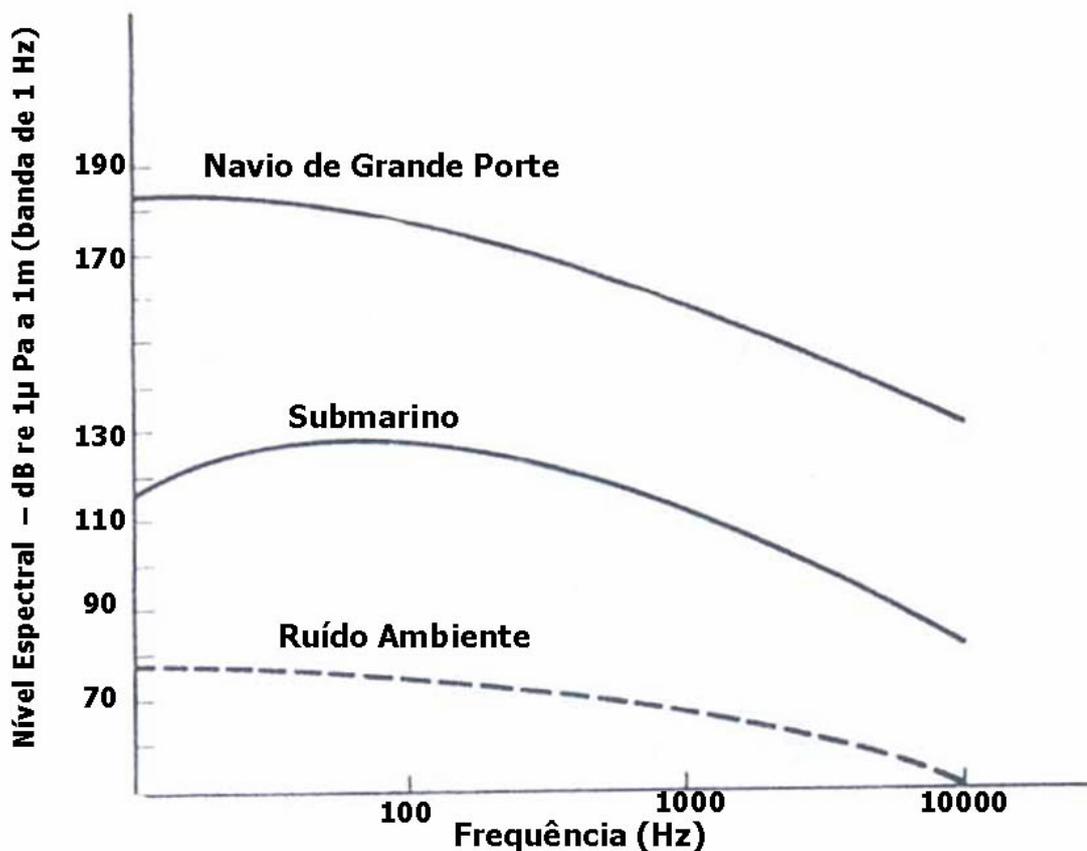


FIGURA 2.3.1.1 – Banda esperada para níveis espectrais de navios e submarinos.

O ruído irradiado por um submarino existe como um espectro contínuo, superposto por componentes em banda estreita conhecidos por tons discretos. A parte contínua tem o máximo entre 50-100 Hz, e, acima de 200 Hz, o valor de SL decresce cerca de 6 dB a cada vez que a frequência dobra.

Os tons discretos podem exceder significativamente a parcela contínua do espectro. Abaixo de 10 *Hz* aparecem as linhas devido à rotação do hélice. Outras costumam ter características próximas a de frequências de geradores elétricos de bordo. Para todo o espectro, ainda é possível a ocorrência de harmônicos destes tons citados e ainda naqueles causados por vibração no casco e maquinaria diversa [6]. De maneira interligada a estes aspectos a velocidade desenvolvida também exerce influência no padrão de distribuição destas linhas como mostrado na figura 2.3.1.2 [1].

As informações a respeito das características do ruído irradiado por navios de guerra são evidentemente confidenciais. Entretanto, é possível estimar uma curva espectral de nível de ruído irradiado a partir de informações de livros, documentos, artigos e estudos diversos da literatura aberta.

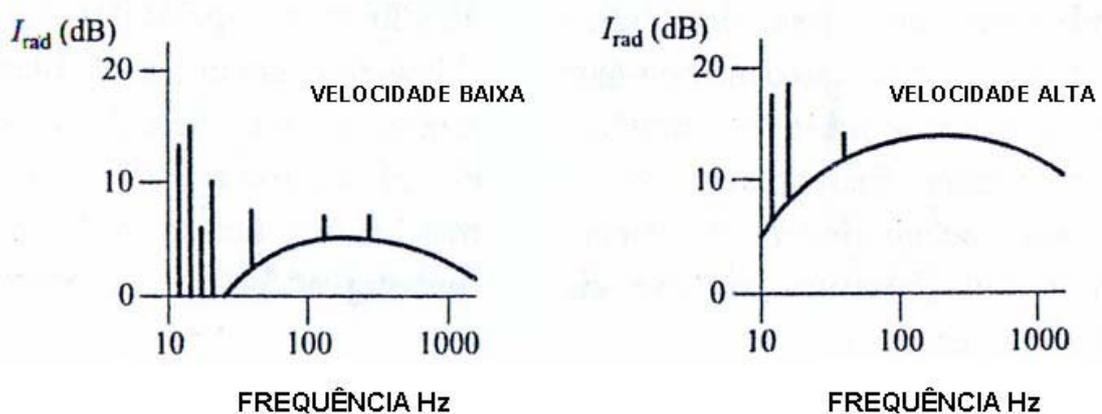


FIGURA 2.3.1.2 – Componentes da banda larga e estreita da assinatura acústica de um submarino em velocidades baixa e alta.

Dentro do contexto da evolução tecnológica citado na introdução, a figura 2.3.1.3 que aparece em pelo menos dois sites, [7] e [8], sugere como foi a redução do ruído irradiado em submarinos dos EUA e USSR ao longo do tempo. Diz-se que os russos ficaram uns passos atrás no quesito discrição neste período, 1960-2000, devido à prioridade da Marinha Soviética dos anos 60 de desenvolver submarinos mais velozes em detrimento ao nível de ruído irradiado [9].

STEALTH: Broadband Quieting Comparison

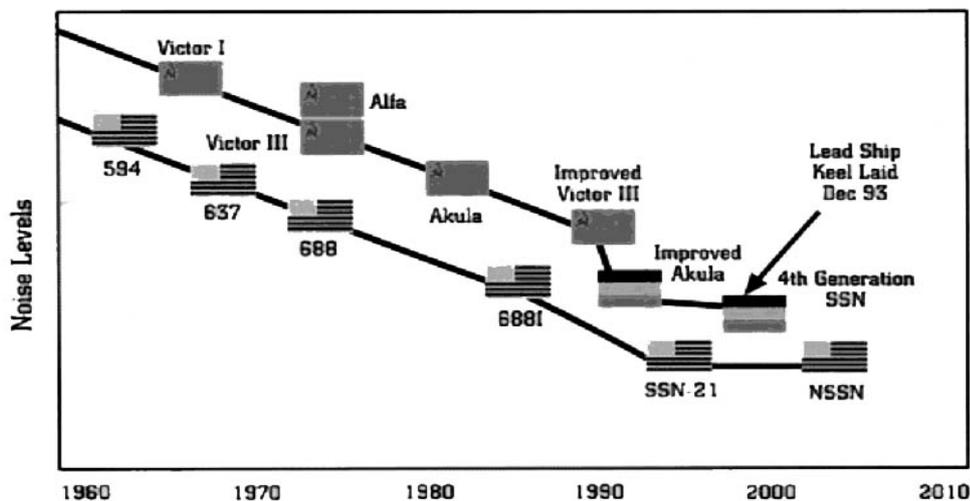


FIGURA 2.3.1.3 – A redução do ruído irradiado de submarinos ao longo do tempo.

Urick[10], Burdic [1] e Waite [4], apresentam curvas similares para a parcela contínua do espectro de antigos submarinos. A partir desses espectros e diversas outras fontes, participantes de uma conferência russo-americana [6] realizaram algumas estimativas para o ruído irradiado de submarinos diesel-elétricos, que são reconhecidamente mais silenciosos do que os nucleares, quando operando somente com suas baterias[11].

A figura 2.3.1.4 ilustra este trabalho de estimativas organizado da seguinte forma:

- 1 e 2 são representações de espectros de submarinos da Segunda Guerra Mundial nas velocidades de 10 e 6 nós respectivamente [10];
- 3 o SL de um submarino russo tipo 641, para a frequência de 50 Hz e velocidade de 2 nós [12];
- 4 a estima do nível de componentes discretos do espectro do submarino alemão tipo 209 com velocidade de 8 nós [13];
- 5 são os submarinos diesel-elétricos modernos dos Países do Terceiro Mundo [14];
- 6 o SL de um submarino russo tipo 887, para a frequência de 50 Hz [12]; e

- f) O número 7 na figura é o espectro do submarino fictício SL1, que será definido a seguir.

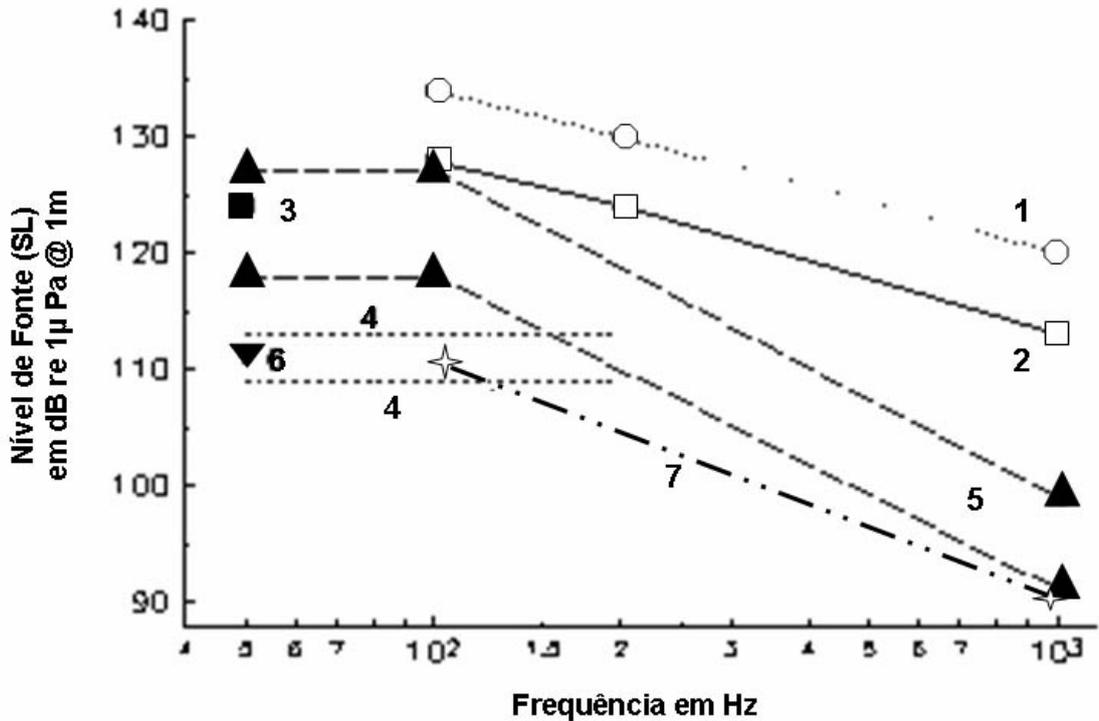


FIGURA 2.3.1.4 – Níveis espectrais de diversos submarinos.

Do submarino diesel-elétrico alemão desenvolvido nos anos oitenta pela companhia IKL, foi divulgado também um gráfico mostrando a dependência da velocidade para o nível de ruído irradiado, figura 2.3.1.5.

Ainda neste encontro Miasnikov [6] apresentou um estudo para a distância estimada de aquisição de submarinos por métodos passivos. Nesta análise, em uma banda de 200 Hz a 10 kHz, o SL é dado em função da frequência f , em uma banda estreita de 1 Hz, a uma distância padrão de um metro, $r = 1m$, como se segue:

$$SL (r = 1 m , f) = SL (r = 1m, f = 1000Hz) - 20 \log \left(\frac{f}{1000} \right) \quad (2.3.1)$$

A mesma fórmula será utilizada neste estudo para um submarino fictício, SL1, a fim de analisar em tese a eficácia dos dispositivos estudados. Para isto será inferido um valor de 90 dB re 1 μPa @ 1 m, para a frequência de 1000 Hz, obtendo:

$$SL1 (r = 1 m , f) = 90 - 20 \log \left(\frac{f}{1000} \right) \quad (2.3.2)$$

Cujo espectro que representa está ilustrado nas figuras 2.3.1.4, 2.3.1.5 e 2.3.1.6.

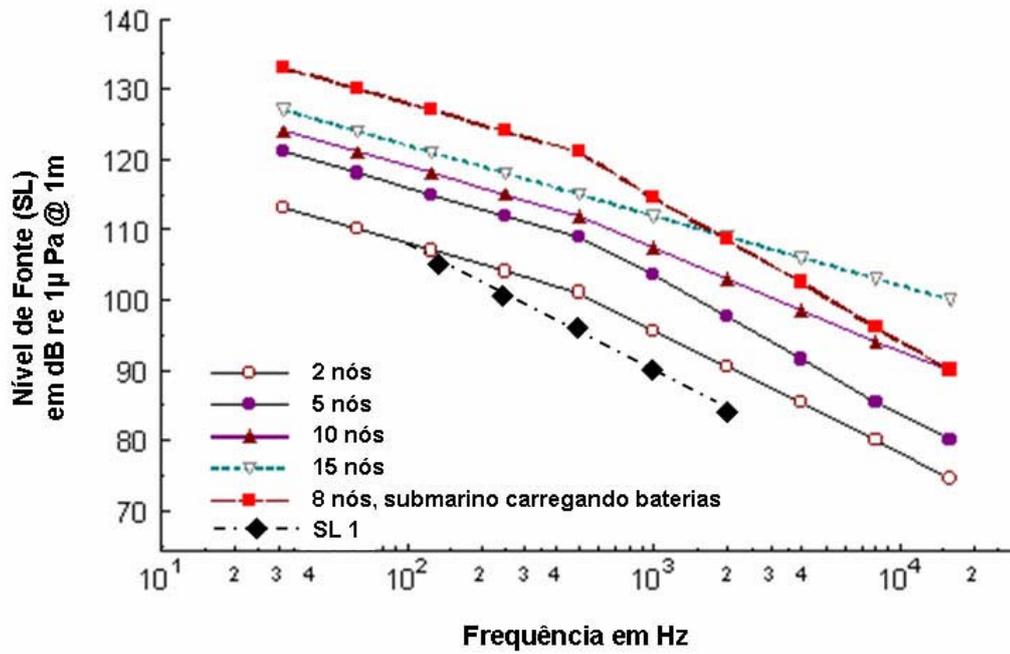


FIGURA 2.3.1.5 – Espectros do submarino classe IKL sob vários modos de operação em comparação ao SL1.

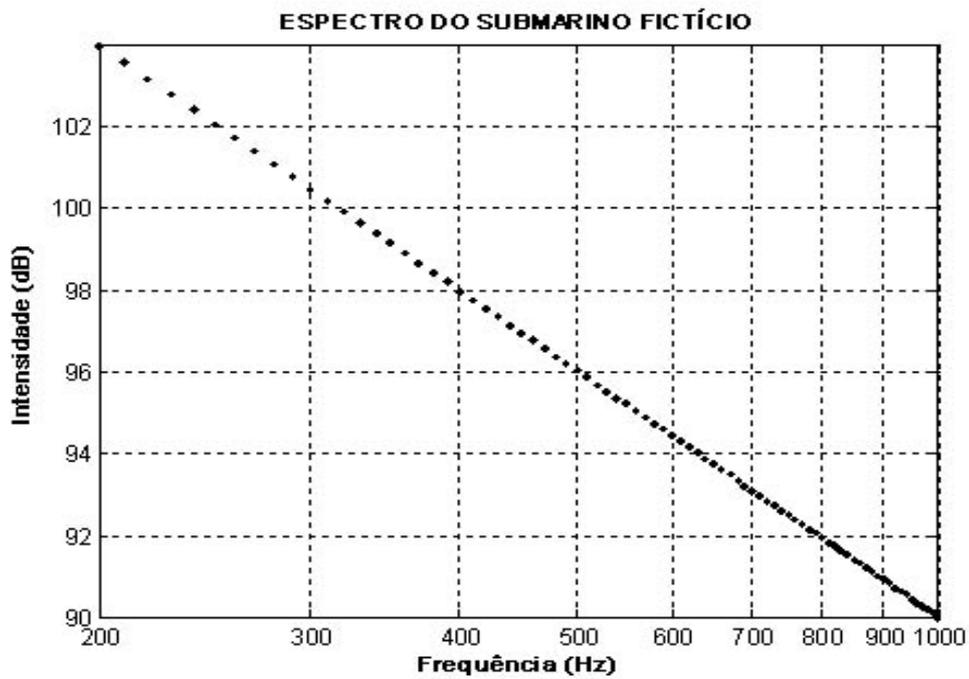


FIGURA 2.3.1.6 – Espectro SL1 do submarino fictício

2.4 – Perdas na Transmissão (TL – *Transmission Loss*)

É a medida da redução da intensidade sonora entre um projetor e um receptor.

Para pequenas distâncias, e onde também não há reflexão em fronteiras, pode-se considerar que o perfil de raios é próximo a uma linha reta [6]. Neste caso, as perdas por espalhamento serão devidas à dispersão geométrica e podem ser descritas em decibéis por:

$$TL = 20 \log (R) \quad (2.4.1)$$

Onde R é a distância da posição da frente de onda até o centro da fonte.

Para frequências abaixo de 1 KHz (item 4.1) as maiores perdas por absorção são da ordem de $10^{-2} dB$ por cada centena de metros [15], desta forma serão desconsideradas neste estudo.

2.5 – Ruído Ambiente (NL – *Noise Level*)

A figura 2.5.1 é um extrato das curvas de Wenz [16] evidenciando as frequências de interesse para a tese. Nesta representação, são indicados os valores típicos de ruído ambiente encontrados no mar e suas principais causas. O eixo das ordenadas mostra o nível espectral em dB *re* $1 \mu Pa$, para cada frequência da abscissa em uma banda estreita de 1 Hz .

Para permitir uma comparação da eficácia de diversos arranjos de hidrofones, foi idealizado um único espectro para o ruído ambiente, NL1. O critério utilizado para a construção desta curva foi o de superar determinados níveis característicos para o local esperado das medições. Como será visto adiante, esse local é em águas rasas. Portanto, definiu-se que para as frequências abaixo de 500 Hz a intensidade de NL1 estão acima dos níveis relativos ao tráfego marítimo em águas rasas.

A escala de beaufort é normalmente utilizada para se indicar uma característica de vento e um estado de mar associado em uma escala de 0 a 12. As medições são realizadas normalmente em condições de pouco vento e mar tranqüilo, que nessa escala pode ser associado à força “2”, ver figura 2.5.2. Desta forma, para frequências acima de 500 Hz o ruído ambiente representado por NL1 excederá as intensidades referentes ao estado do mar 2 da figura 2.5.1.

Assim, é mostrada na figura 2.5.3 a curva arbitrada que cumpre estes requisitos:

$$NL1(f) = 60 - 17 \log\left(\frac{f}{1000}\right) \quad (2.5.1)$$

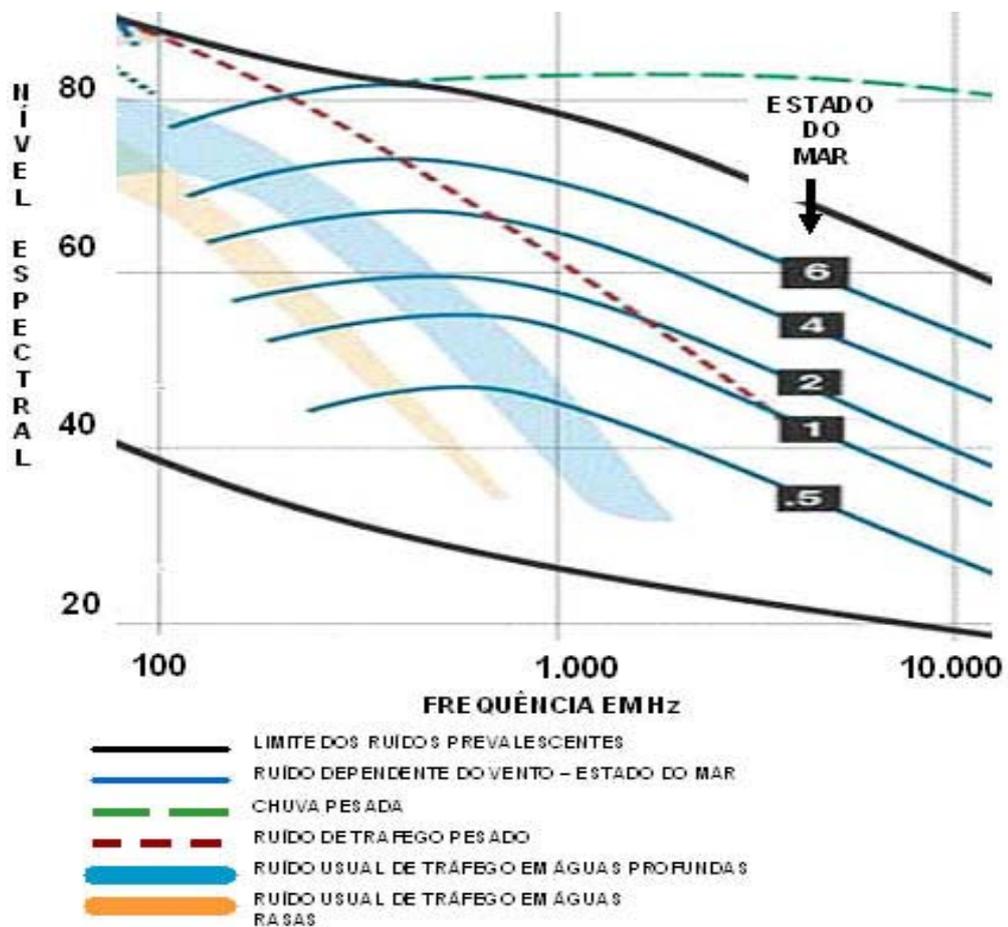


FIGURA 2.5.1 – Extrato das curvas de Wenz.

ESCALA BEAUFORT DE FORÇA DOS VENTOS					
Força	Designação	Velocidade km/h nós		Aspecto do Mar	Influência em Terra
0	CALMARIA	0 a 1	0 a 1	Espelhado.	A fumaça sobe verticalmente.
1	BAFAGEM	2 a 6	2 a 3	Mar encrespado em pequenas rugas, com aparência de escamas.	A direção da bafagem é indicada pela fumaça, mas a grimpá ainda não reage.
2	ARAGEM	7 a 12	4 a 6	Ligeiras ondulações de 30 cm (1 pé), com cristas, mas sem arrebenção.	Sente-se o vento no rosto, movem-se as folhas das árvores e a grimpá começa a funcionar.
3	FRACO	13 a 18	7 a 10	Grandes ondulações de 60 cm com princípio de arrebenção. Alguns "carneiros".	As folhas das árvores se agitam e as bandeiras se desfraldam.

FIGURA 2.5.2 – Extrato da escala de Beaufort que varia de 0 a 12.

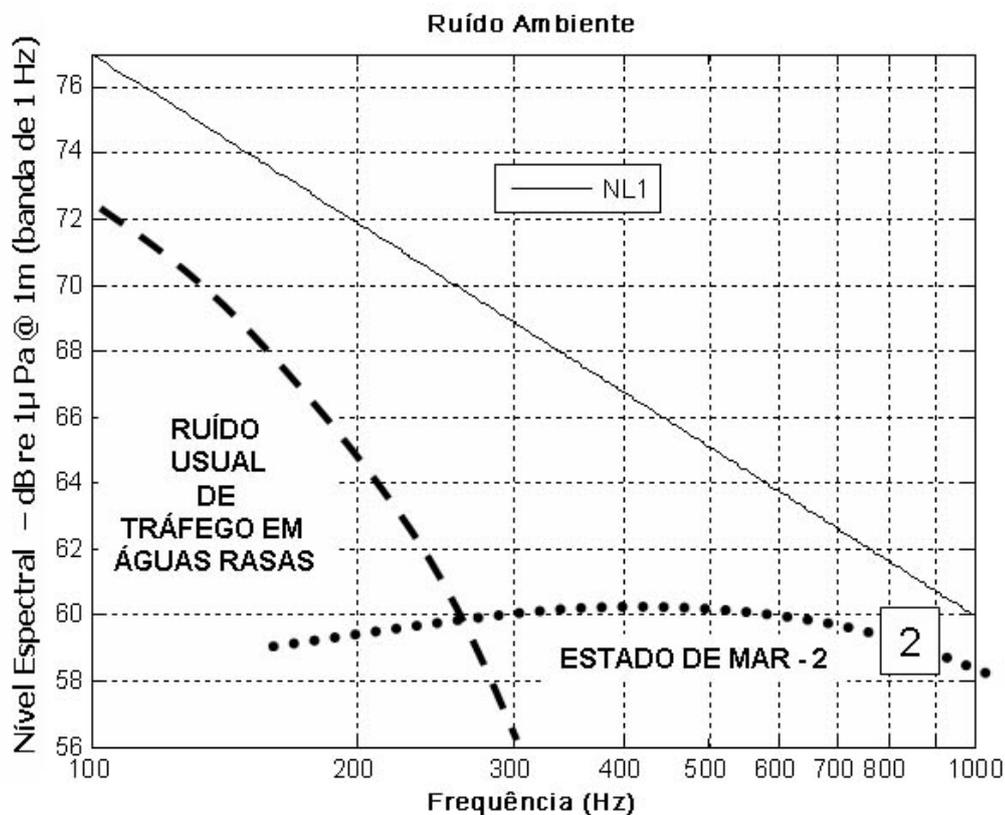


FIGURA 2.5.3 – Curva NL1 de ruído ambiente

2.6 – Limiar de Detecção (DT – *Detection threshold*)

A teoria de detecção fornece uma metodologia para determinação da relação sinal/ruído que é necessária para fixar uma probabilidade específica de detecção, P_d , e uma probabilidade de falso alarme, P_{fa} , decidindo se um alvo está presente quando somente ruído está presente no receptor. Essas probabilidades são correlacionadas nas curvas ROC (*Receiver Operating Characteristics*), características de cada sonar, pelo chamado índice de detecção.

A expressão para o Limiar de Detecção (DT) assume uma decisão baseada em uma única amostra fornecida ao operador ou passada em um sistema automático. Na prática, operadores e sistemas automáticos tomam decisões baseadas no número de amostras sucessivas no tempo, representada por $5 \log(n)$ na equação 2.6.1, onde n é o número de amostras sucessivas no tempo[4].

A equação completa de DT, para um sonar de banda larga é dada por:

$$DT = 5 \log(di) + 5 \log(BT_e) + 5 \log(n) \quad (2.6.1)$$

Onde:

1 – T_e tempo de integração;

2 – di – índice de detecção; e

3 – B – largura de banda do sinal.

Para o dimensionamento do *array* será utilizado um valor considerado prático para o projeto de sonares de banda larga [4] com o objetivo de garantir a eficácia do dispositivo, neste caso:

$$DT = 7 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa @ } 1 \text{ m} \quad (2.6.2)$$

2.7 – Índice de Diretividade (DI – *Directivity Index*)

Um *array* pode ser utilizado para filtrar sinais no campo espaço-temporal explorando as características espaciais da onda acústica [17]. Assim, é gerado um aumento na razão sinal / ruído conhecido como ganho do *array* (AG).

Os sinais de saída de cada unidade do sensor quando somados, formam combinações construtivas ou destrutivas. No primeiro caso, são formadas regiões do espaço adjacente ao conjunto onde a recepção será aumentada, enquanto em outras áreas será diminuída. Estando estes locais de melhor relação construtiva em direção a um sinal interessante, este se sobressairá em relação aos demais presentes.

Matematicamente, os sensores podem ser tratados como receptores ou projetores. Desta forma, considerando um sinal de onda contínua, o ganho gerado com o uso de um *array* pode ser obtido substituindo cada sensor por um projetor com a mesma intensidade da fonte emissora, irradiando com uma mesma frequência e fase. Assim, para cada posição da fonte existe uma resposta que pode ser máxima, quando os sinais somados dos sensores estiverem em fase ou, assumir vários valores inferiores a esse, inclusive o zero, quando estes sinais estiverem defasados. Esse padrão de resposta forma um perfil ou diagrama de irradiação. No caso do dipolo, por exemplo, quando traçado este diagrama sobre os pontos do espaço onde a potência do sinal é reduzida à metade, é formado o diagrama característico da figura 2.7.2.1. Tanto para o dipolo como para arrays com mais elementos os desenhos formados têm um padrão de forma de feijão, *beam patterns*, que possuem um lóbulo maior, principal, e menores, secundários.

O ganho do array é definido por:

$$AG = 10 \log \left(\frac{\left(\frac{S}{N} \right)_{array}}{\left(\frac{S}{N} \right)_{elemento}} \right) \quad (2.7.1)$$

Entretanto, é difícil computar esta quantidade, pois depende da capacidade de determinar corretamente a coerência do sinal e do ruído através das dimensões do *array*.

Assim, quando o sinal considerado é uma onda plana e coerente e o ruído isotrópico e incoerente, o ganho do array é mais facilmente quantificado e definido como índice ou ganho de diretividade, DI [4]:

$$DI = 10 \log \left(\frac{\text{Pico da Intensidade do Padrão de Irradiação}}{\text{Média da Intensidade do Padrão de Irradiação}} \right) \quad (2.7.2)$$

2.7.1 – Acesso aos Elementos

Quando o sinal de cada unidade do conjunto pode ser processado independentemente o *array* é dito com acesso aos elementos. Esta particularidade permite direcionar eletronicamente o eixo de melhor recepção do arranjo para um ponto de interesse, introduzindo-se “atrasos” aos sinais provenientes de cada um dos sensores, em uma operação chamada de *beam steering*. [17]. Essas várias possibilidades de formação de feixes permitem um sistema determinar a direção de um ruído particular.

Outra importante característica em arranjos com acesso aos elementos é a possibilidade de reduzir a formação de lóbulos secundários, ponderando os sinais de cada sensor em um processo conhecido por *shading*. Entretanto essa operação tende a aumentar a largura do lóbulo principal, o que reduz a diretividade. Assim, a sua aplicação deve ser avaliada caso a caso, de forma que as reduções das amplitudes dos lóbulos secundários gerem um alargamento mínimo do lóbulo principal.

Quando os sinais de cada sensor individual são somados em uma única resposta de saída, o arranjo é dito sem acesso aos elementos. Neste tipo de *array*, conhecido como *broadside*, as áreas adjacentes de melhor resposta permanecem estáticas em relação ao dispositivo.

Para o tipo de sistema estudado o interesse é basicamente na medição do SL em uma situação em que é exequível o posicionamento sistemático da fonte em relação ao dispositivo. Desta forma, mesmo que não seja possível acompanhar o alvo direcionando o eixo de melhor resposta, este pode passar pelas áreas de melhor recepção que se formam naturalmente com a utilização de um *array broadside*.

2.7.2 – A distância entre os sensores

A distância entre os elementos do arranjo de sensores define a forma do desenho do perfil de irradiação para cada comprimento de onda. A figura 2.7.2.1 mostra o efeito da distância entre os elementos em termos de comprimento de onda em um dipolo. Nela, são mostrados os pontos onde a potência do sinal emitido por estes dois elementos é reduzida à metade, ou diminuída em $3dB$ [4]. Neste caso, para distâncias entre os elementos maiores do que $\frac{\lambda}{2}$ aparecem lóbulos secundários que aumentam gradativamente enquanto o principal se estreita.

Ao serem agrupados mais elementos em um mesmo dispositivo a forma e o número de lóbulos muda, mas a resposta a alterações em relação à distância entre sensores e comprimento de onda segue o mesmo padrão. A figura 2.7.2.2 mostra o efeito da variação do espaçamento entre os elementos de um *array broadside*, de comprimento constante em três vezes o comprimento de onda.

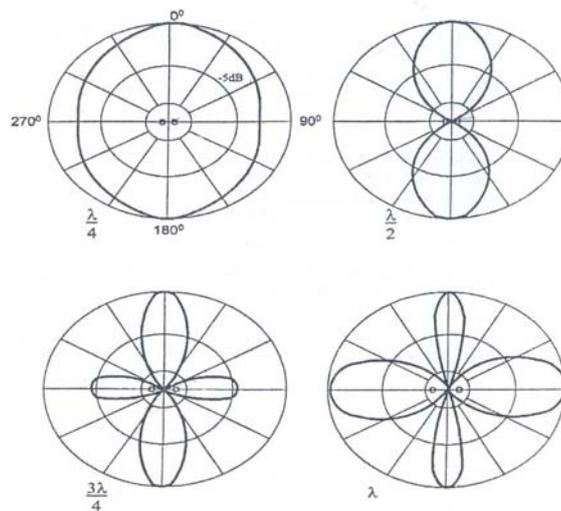


FIGURA 2.7.2.1 – Padrão de Irradiação de um dipolo em função do espaçamento em comprimentos de onda

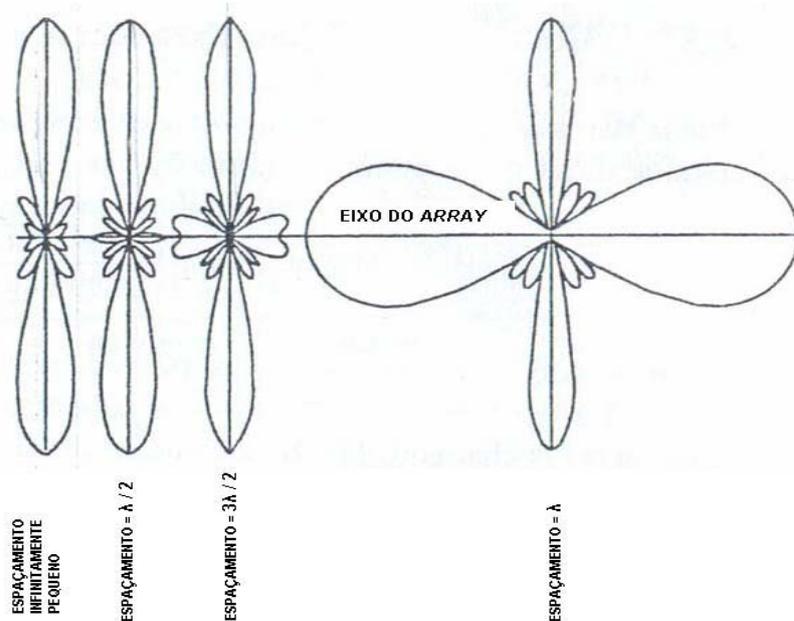


FIGURA 2.7.2.2 – Efeitos do espaçamento crescendo entre os elementos em um array broadside de comprimento constante em três vezes o comprimento de onda.

Duas formas geométricas básicas para o *array broadside* serão estudadas: o arranjo disposto em uma linha e em círculo.

Para estes arranjos, aplicando o teorema da amostragem [17], tem-se que estarão corretamente amostrados os sinais em que:

$$d \leq \frac{\lambda}{2}, \quad (2.7.2.1)$$

onde d é a distancia entre os sensores e λ é o comprimento de onda a ser processado pelo dispositivo. Fixando o valor de d , a relação irá definir o menor comprimento de onda corretamente amostrado pelo *array*:

$$\lambda_{\text{mín}} = 2d \quad (2.7.2.2)$$

Considerando as relações entre comprimento de onda e frequência, de uma onda contínua [5]:

$$c = f \lambda, \quad (2.7.2.3)$$

onde f é a frequência e c a velocidade do som no meio considerado: inserindo 2.7.2.3 em 2.7.2.2, ainda pode ser definida a frequência máxima corretamente amostrada:

$$f_{\text{máx}} = \frac{c}{2d} \quad (2.7.2.4)$$

E para a relação:

$$d = \frac{\lambda}{2}, \quad (2.7.2.5)$$

que também pode ser expressa, utilizando a relação 2.7.2.3 por:

$$d = \frac{c}{2f}, \quad (2.7.2.6)$$

o ganho do array é maximizado quando é considerado o sinal como uma onda plana e coerente em presença de um ruído ambiente isotrópico e incoerente. O array linear uniforme com essa relação é chamado de array linear padrão [17]. E ainda, quando o sinal processado pelo arranjo atende a igualdade 2.7.2.5 ou 2.7.2.6, o comprimento de onda pode ser chamado de comprimento de onda de construção - λ_0 , que corresponde a uma frequência de construção - f_0 [4].

2.7.3 – Quantificando o DI

A partir da definição expressa pela relação 2.7.2, é possível chegar a algumas fórmulas mais simples, mas perfeitamente adequadas para representar o ganho de diretividade em projetos de sonares [4]. Para esta tese serão basicamente interessantes duas destas fórmulas:

1 – A primeira diz respeito ao DI do array linear uniforme - DIL:

$$\text{DIL} = 10 \log\left(\frac{2L}{\lambda}\right) \quad \text{ou} \quad \text{DIL} = 10 \log\left(\frac{2Lf}{c}\right) \quad (2.7.3.1)$$

2 – E a segunda é relacionada ao DI do array circular - DIC:

$$\text{DIC} = 20 \log\left(\frac{1.77D}{\lambda}\right) \quad \text{ou} \quad \text{DIC} = 20 \log\left(\frac{1.77Df}{c}\right) \quad (2.7.3.2)$$

Onde L é o comprimento do *array* linha e D o diâmetro do *array* circular; λ e f são variáveis referentes ao sinal processado pelo dispositivo.

Fazendo uso de “DIL” e “DIC”, é possível comparar a distribuição do índice de diretividade destes dois arranjos em função das frequências. Na figura 2.7.3.1, para os dois arranjos foi fixado o número de sensores em 16, determinado um espaçamento entre elementos correspondente à frequência de construção “ f_0 ” de 400 Hz, e a

freqüência processada, variando de 100 a 600 Hz. A velocidade do som, “c” é considerada constante e igual a $1500 \frac{m}{s}$.

Apesar de ter variado as freqüências até 600 Hz, é importante notar que só estão corretamente amostradas aquelas abaixo de f_0 .

Nesta comparação, é possível perceber que para a freqüência de construção o índice de diretividade do arranjo circular é ligeiramente superior ao linha. Entretanto para as freqüências menores a razão de queda é inferior. Esse aspecto será melhor analisado adiante.

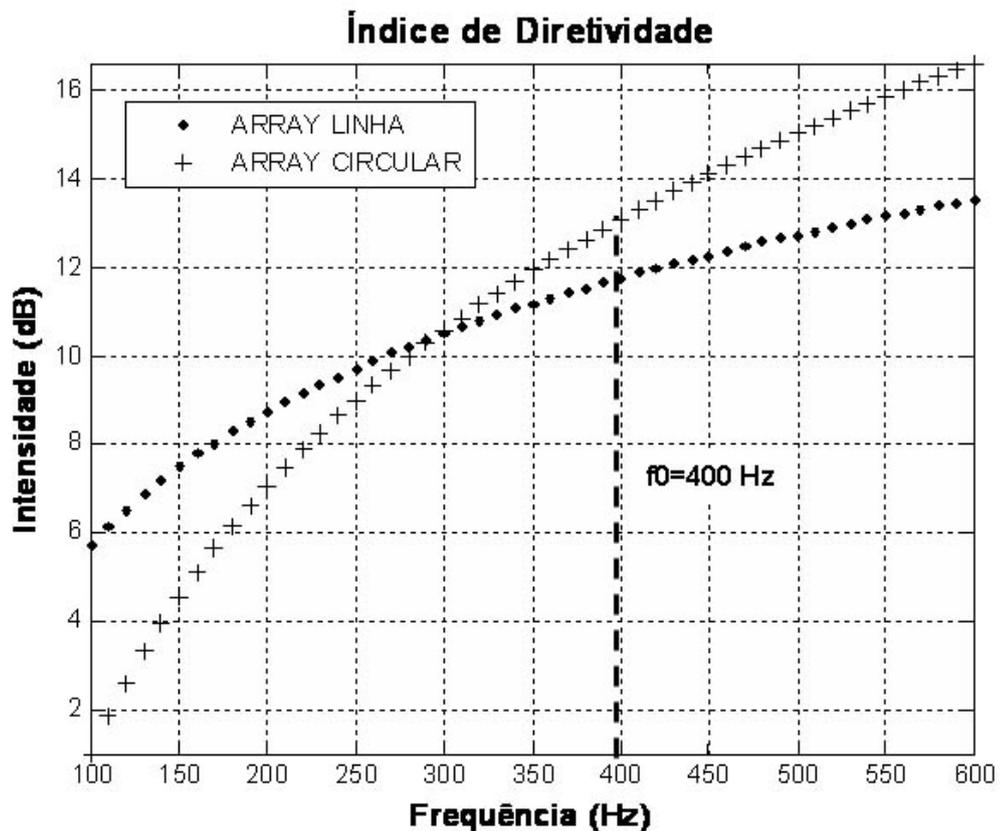


FIGURA 2.7.3.1 – Comparação entre o índice de diretividade do *array* linha com o circular.

Capítulo 3 – Medição do Ruído Irrradiado de Navios

3.1 – Raia Acústica

Na Marinha do Brasil, a medição do ruído irradiado de navios em movimento é realizada em Arraial do Cabo. Em uma área a oeste da Ilha de Cabo Frio, são previstos os percursos da Raia Acústica, como mostrado na figura 3.1.

A onda de pressão acústica oriunda do navio sensibiliza o hidrofone posicionado na letra H, mostrada nas figuras 3.1 e 3.2, sendo convertida em um sinal elétrico, que vai ao posto de controle via cabo submarino, mostrado na figura 3.2, onde são gravados e arquivados.

Entre outras funções, o posto de controle ainda coordena as corridas e coleta os dados enviados pelos teodolitos que irão garantir o correto acompanhamento da posição do navio, figura 3.1.

Após serem realizadas as gravações, os sinais adquiridos são levados para análise no Laboratório do Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP).

3.2 – Sinal Medido

O Sinal Medido na Raia Acústica é a relação sinal/ruído:

$$\text{Sinal Medido} = (\text{SL} - \text{TL}) - (\text{NL} - \text{DI}), \quad (3.2.1)$$

que é a base para o cálculo do SL, após a obtenção dos seguintes parâmetros:

a) TL, de um modelo como o do item 2.4, $\text{TL} = 20\log(R)$. O conhecimento da posição e profundidade da fonte e do sensor permite o cálculo da distância entre os dois que é o “R” da equação;

b) NL, da medição pelo mesmo sensor utilizado na raia acústica, antes de cada corrida e sem a presença da fonte; e

c) DI, de acordo com as características de cada sensor.

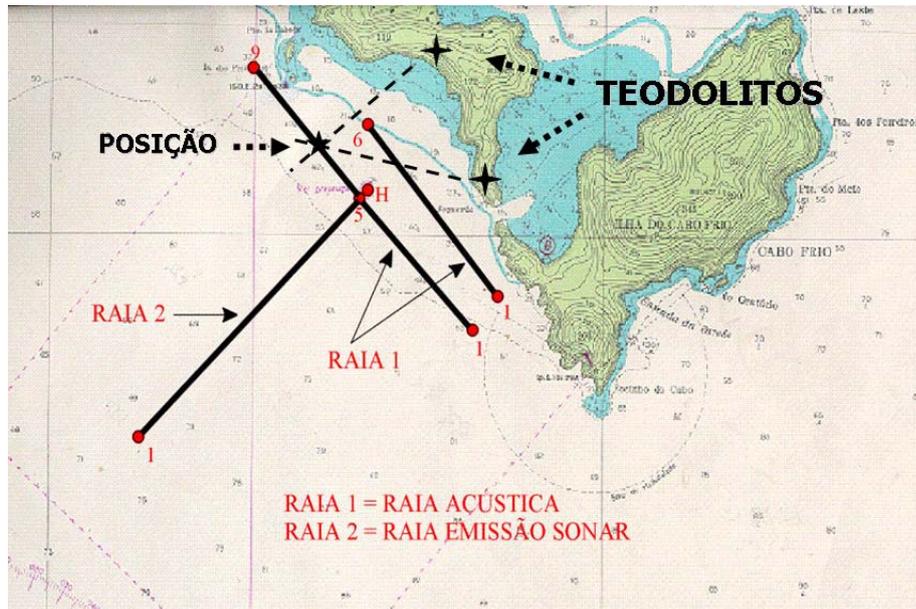


FIGURA 3.1 – A Raia Acústica de Arraijal do Cabo: a posição do sensor (H) e dos teodolitos.

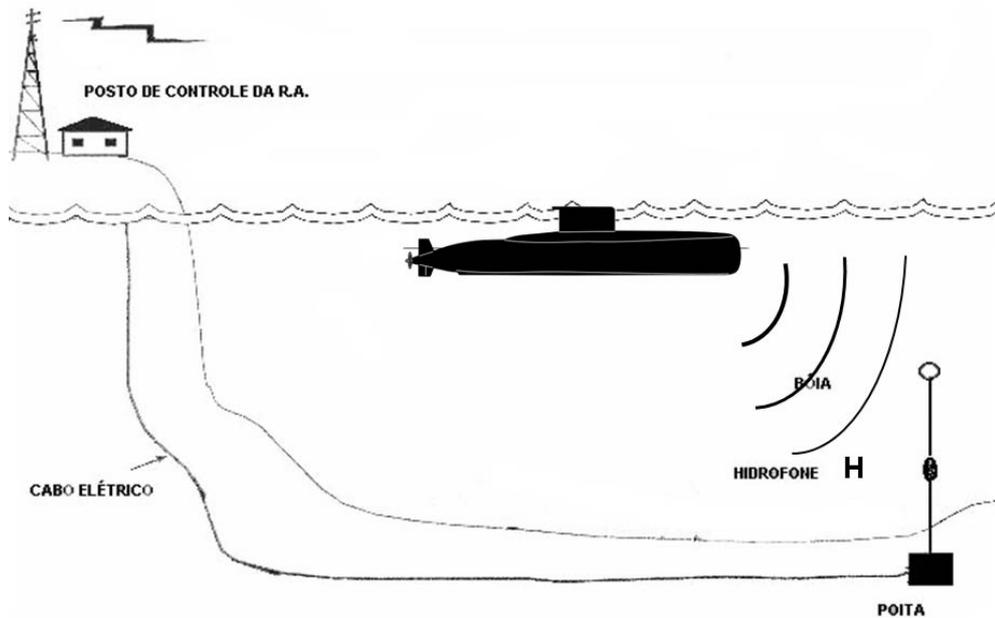


FIGURA 3.2 – Elementos da Raia Acústica

Capítulo 4 – Projeto do Sistema

4.1 – Frequências de Interesse

O uso de um *array broadside* impõe algumas limitações quando utilizado para observar um espectro mais amplo de frequências (*broadband*), como foi exposto no item 2.7. São restrições ao dimensionamento que tornam importante a identificação das frequências mais interessantes para que o dispositivo seja projetado de forma que os dados coletados sejam de interesse de trabalhos decorrentes como aqueles citados na introdução.

Desde o fim da Guerra Fria o foco das missões navais mudou o cenário das operações do mar aberto para águas rasas. O grande desafio do momento tem sido o desenvolvimento de tecnologias para que os sonares operem de maneira ótima também em regiões costeiras [18]. Local este que determina boas condições de propagação do som em determinadas frequências que são extremamente relevantes para a localização, identificação e determinação de distâncias de ruídos interessantes. Assim, esse será o cenário considerado para a identificação das frequências de maior importância para este estudo.

A definição clássica para águas rasas limita sua área de ocorrência à plataforma continental em profundidades inferiores a 200 metros. Entretanto, será acusticamente rasa sempre que a propagação do som for caracterizada por múltiplas interações com o fundo e a superfície marinha, fato que permite às ondas sonoras percorrerem longos trajetos com uma grande quantidade de informação sobre sua fonte emissora.

Outro fenômeno de relevância é o duto de superfície. Ocorre quando a ação do vento sobre as ondas forma uma camada de mistura. Nesta camada, o produto de uma região de quase igual temperatura junto ao efeito da pressão e da salinidade gera um perfil de velocidade do som positivo, ou seja, na medida em que se aumenta a profundidade, cresce a velocidade do som. Desta forma a onda sonora pode ficar confinada a uma camada sendo alternadamente refratada e refletida, se propagando por uma grande distância.

Em todos os casos, é unânime que as frequências ótimas para a propagação do som em águas rasas estão entre 0.1 e 5 KHz [6]. Adicionalmente, a parte contínua do espectro de submarinos tem seu máximo em frequências próximas a 200 Hz, região em que também podem ocorrer tons discretos e ainda, harmônicos dessas linhas, como abordado no item 2.3.1.

Assim, o arranjo de hidrofones para o estudo teórico será planejado de forma a priorizar uma aquisição de dados para as baixas frequências próximas a 200 Hz, incluindo as mais altas na medida do possível.

4.2 – Faixa Dinâmica

No item 2.7.2, foi citado que estarão corretamente amostradas as frequências abaixo da de construção, f_0 . Assim, para este estudo, f_0 será considerada o limite superior da faixa dinâmica de frequências para a medição.

Se um dispositivo projetado com a frequência de construção de 400 Hz apresentar o ganho necessário para a medição das frequências de sinais próximos a 200 Hz, terá cumprido o requisito básico proposto no último parágrafo do item 4.1. Entretanto, muita informação pode estar sendo perdida para as frequências acima deste valor, o que torna desejável aumentar a faixa dinâmica. Com este intuito, e mantendo o uso de *arrays broadside*, duas formas foram idealizadas:

1 - O mesmo tipo de *array* pode ter a distância entre os elementos alteradas, mudando com isso a frequência de construção. Assim, o dispositivo pode ter um ganho próximo ao máximo em bandas mais estreitas. O resultado final pode ser a juntada das melhores faixas de frequências que foram analisadas separadamente.

A figura 4.2.1 é a composição do índice de diretividade do mesmo array que teve sua frequência de construção determinada para, 300, 400, 500, 600, 700 e 800 Hz. Para montar a figura foram selecionadas as frequências de cada intervalo onde o dispositivo apresentou o maior ganho, com frequências corretamente amostradas.

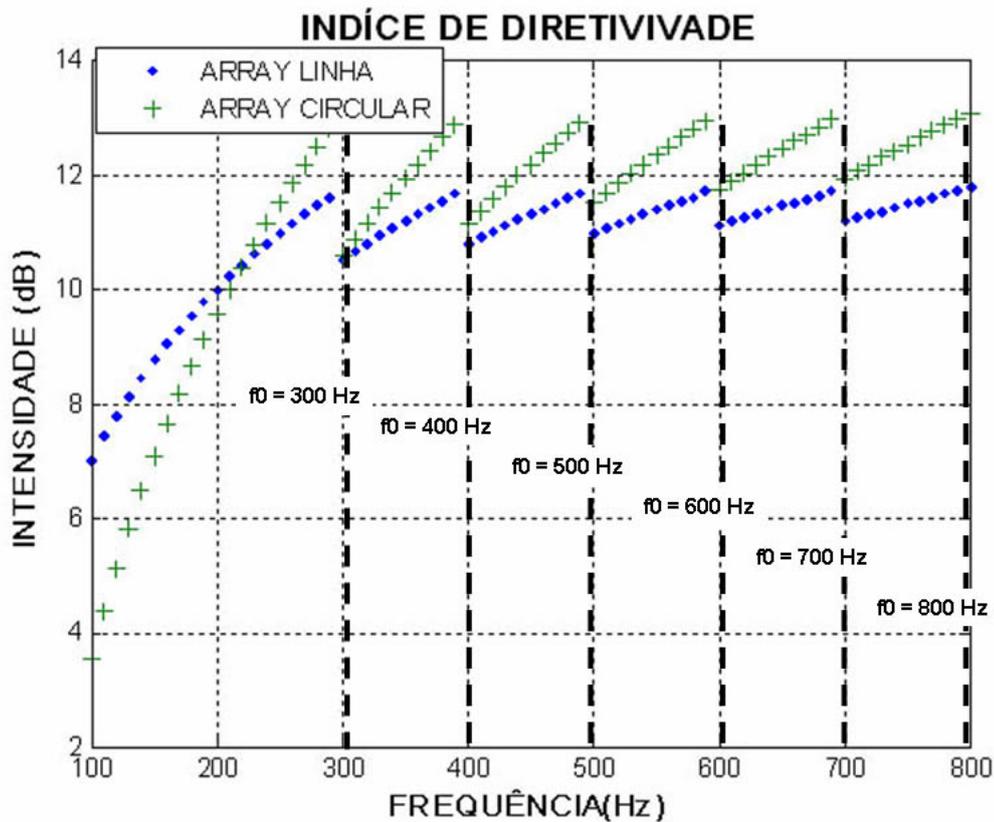


FIGURA 4.2.1 – Composição em um único gráfico dos índices de diretividade gerados por um array com o mesmo número de elementos e dimensionados para diferentes frequências de construção.

Desta forma o número de elementos não muda, mesmo assim é garantida uma cobertura de uma banda tão ampla quando desejada, com um ganho próximo ao máximo do dispositivo.

A desvantagem é a necessidade de alterar o tamanho do dispositivo a cada medição ou possuir mais arranjos para uma medição simultânea, pois cada frequência de construção corresponde a uma dimensão do *array*.

Para o arranjo circular os diâmetros D necessários para obter cada frequência de construção podem ser calculados da seguinte forma:

Da geometria da figura o comprimento do círculo é dado por:

$$\text{Comprimento} = D \pi \tag{4.2.1}$$

Que também pode ser obtido aproximadamente por:

$$\text{Comprimento} = N d \tag{4.2.2}$$

Onde N é o número de elementos e d a distância entre eles, daí, igualando 4.2.2

e 4.2.1 têm-se:
$$D = \frac{N d}{\pi} \quad (4.2.3)$$

E, inserindo a relação 2.7.2.6 em 4.2.3, obtêm-se:
$$D = \frac{N c}{2 \pi f_0} \quad (4.2.4)$$

Assim, a equação 4.2.4 pode ser usada para definir a figura 4.2.2 que faz a comparação entre o diâmetro de arrays circulares com o mesmo número de elementos, mas com frequências de construção diferentes.

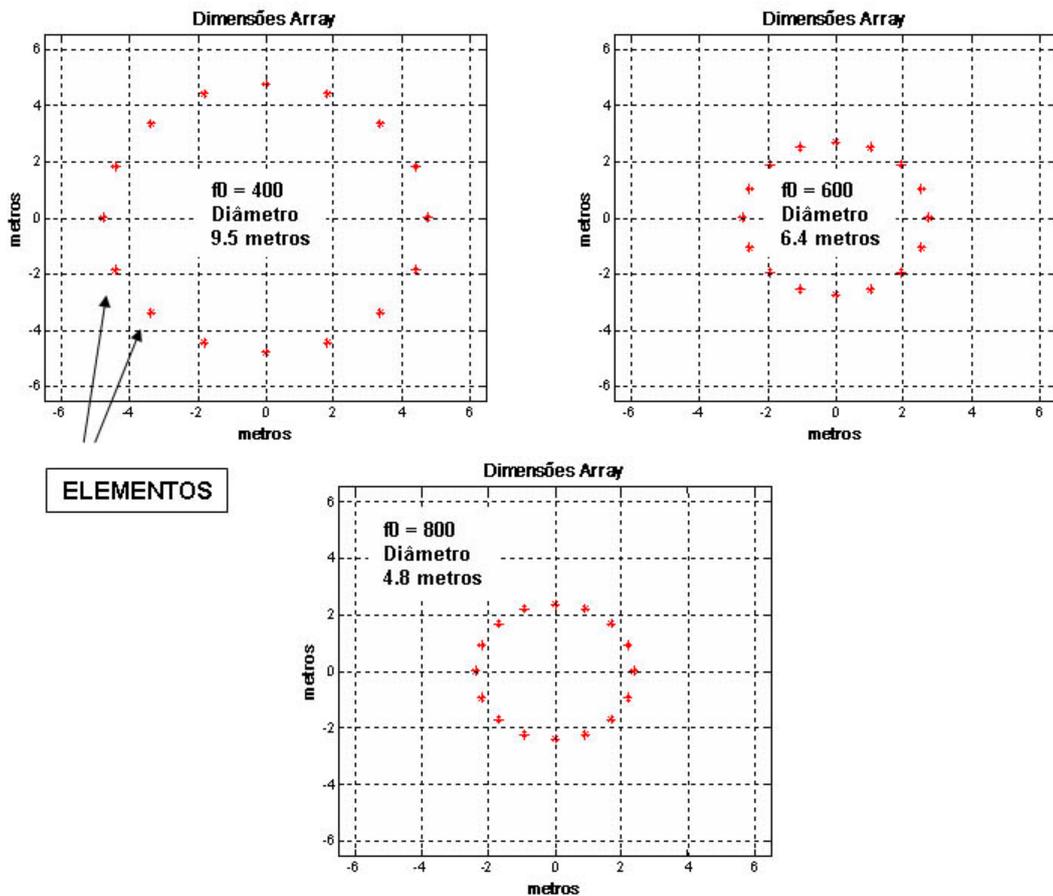


FIGURA 4.2.2 – Comparação entre as dimensões de um array com o mesmo número de elementos, mas diferentes frequências de construção.

No caso dos arranjos dispostos em linha, os comprimentos L , referentes a cada frequência de construção podem ser calculados assim:

Como $L = (N - 1) d$ (4.2.5)

Da relação 2.7.2.6 em 4.2.5, é obtido:
$$L = \frac{(N - 1) c}{2 f_0} \quad (4.2.6)$$

Assim, para as mesmas frequências de construção da figura 4.2.2 são determinados comprimentos L de aproximadamente 28, 18 e 14 metros, respectivamente.

2 – Outra opção é aumentar simultaneamente a frequência de construção e o número de elementos. A partir do exemplo da figura 2.7.3.1, aumentando o número de sensores para 32 e f_0 para 800 Hz é formada a figura 4.2.3.

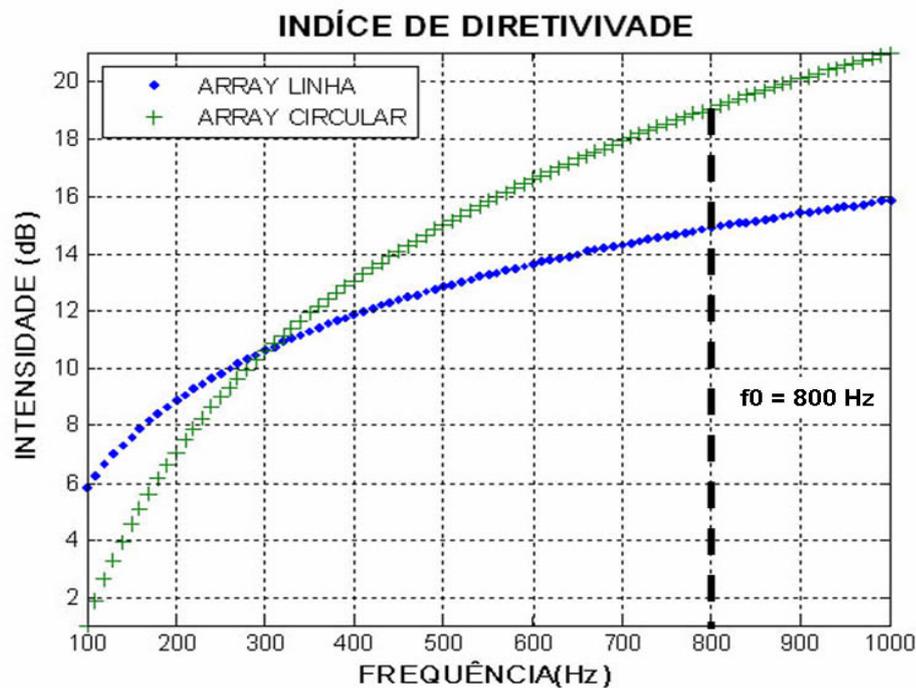


FIGURA 4.2.3 - Comparação entre o índice de diretividade do *array* linha com o circular aumentando o número de elementos e a frequência de construção.

Agora é garantida uma faixa de medição até 800 Hz com apenas um dispositivo, mantendo o mesmo ganho da figura 2.7.3.1 para as frequências abaixo de 400 Hz.

Apesar do grande aumento de sensores, pode-se ainda utilizar as equações 4.2.4 e 4.2.6 e perceber que não há alteração significativa para a dimensão do arranjo. No caso do array linear têm-se um aumento no comprimento de 28 para 29 metros, enquanto para o circular permanece o mesmo, como mostrado na figura 4.2.4

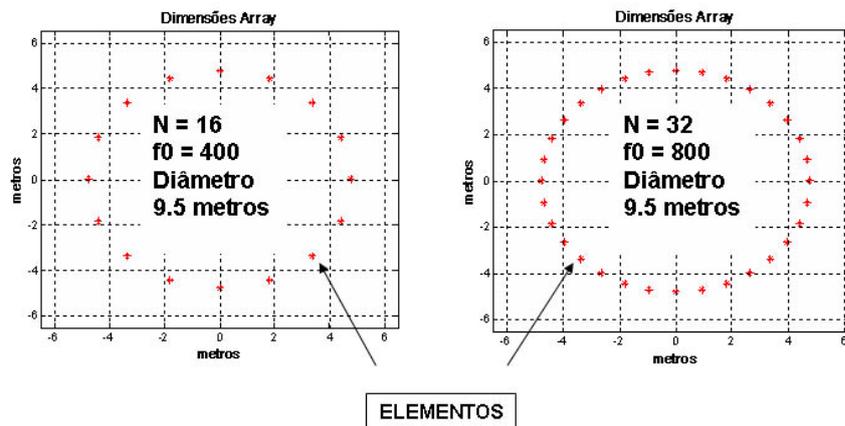


FIGURA 4.2.4 – Visualização da disposição dos elementos em um array circular dobrando o número de elementos e a frequência de construção.

4.3 – O Posicionamento do Dispositivo

Neste item, é definida uma posição favorável para disposição do arranjo observando dois fatores: as distâncias máximas para a medição e a navegação do submarino.

4.3.1 – Distâncias Máximas para a Medição

Considerando que a relação sinal/ruído deverá exceder um valor de DT , nesta análise será considerada a distância máxima para a medição onde essa relação for igual ao valor do DT arbitrado(2.6.2). Assim:

$$(SL - TL) - (NL - DI) = DT \quad (4.3.1.1)$$

Onde os parâmetros são:

- 1) $SL = SL1$, de 2.3.2;
- 2) $TL = 20 \log (R)$, de 2.4.1;
- 3) $NL = NL1$, de 2.5.1;
- 4) $DI = DIL$, de 2.7.3.1 ou DIC , de 2.7.3.2; e
- 5) $DT = 7$.

E ainda, os arranjos são considerados com dezesseis elementos, $N = 16$, e f_0 igual a 400 Hz. Desta forma é obtida a figura 4.3.1.1.

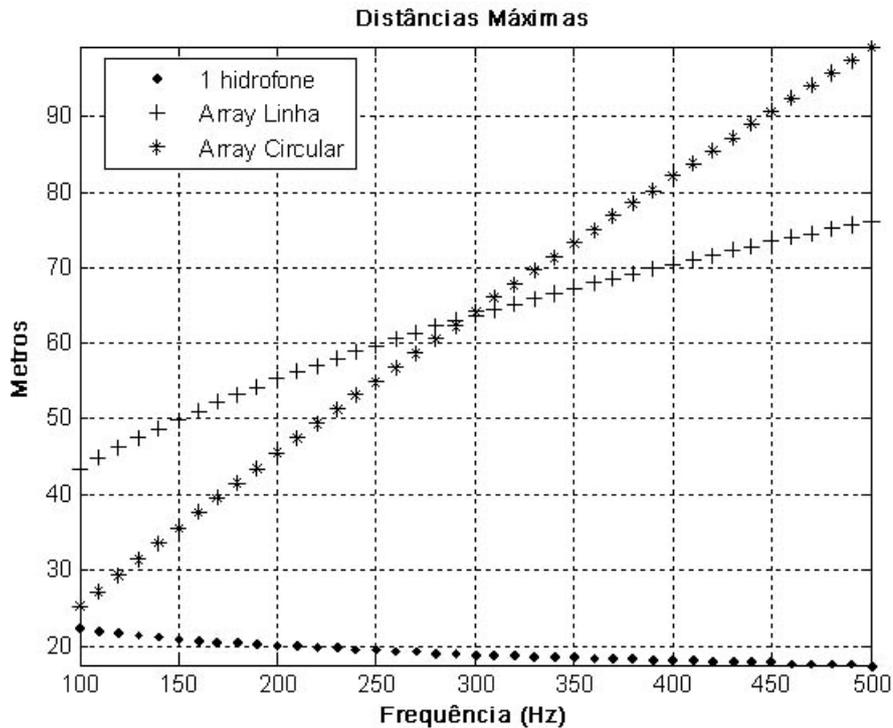


FIGURA 4.3.1.1 – Distâncias máximas para a medição em função da frequência.

O exercício pode ser repetido para todas as considerações feitas no item anterior, mas o fato é que com um reduzido número de elementos o submarino deverá estar bem próximo do sensor para haver a medição.

4.3.2 A Navegação do Submarino

A raia acústica de Cabo Frio é uma escolha natural para a aplicação do dispositivo estudado, pois este local já possui um grande aparato logístico, indispensável quando é desejável manter baixo também os custos para a aplicação do *array* em um sistema.

O cenário, portanto, é de águas com profundidade de cerca de 40 metros e próximo a terra.

O recurso utilizado pelo submarino para se posicionar de maneira precisa na raia acústica é a utilização de seu periscópio, que permite tirar marcações de pontos em terra e com isto obter posições na carta náutica – mapa específico para o uso no mar.

Nesta situação, um submarino da classe “Tupi” encontra-se totalmente mergulhado, mas próximo à superfície do mar em uma cota – profundidade da quilha – de 15 metros. Assim, embora toda sua estrutura esteja abaixo da superfície, seus mastros podem ser expostos, cada um com uma funcionalidade. Na figura 4.3.2.1 o submarino está expondo quatro dos seus seis mastros, enquanto na figura 4.5.1.4, todos são mostrados: os periscópios para a vigilância e navegação; o mastro para comunicação rádio; o radar; o esnorquel, utilizado para a carga de baterias; e o MAGE (Medidas de Apoio a Guerra Eletrônica), que é específico para detecção e análise de ondas eletromagnéticas.

A exposição de pelo menos um dos mastros de periscópio e o de comunicações é necessária para a navegação/vigilância e coordenação dos eventos, bem como para permitir o acompanhamento das posições do submarino a partir das estações em terra, onde estão os teodolitos

São descritas as principais dificuldades em relação à navegação de submarinos no Manual de Navegação da Marinha, capítulo 44 [19]. Dentro deste contexto destacam-se:

1 – “O submarino opera em três dimensões; muitas vezes, é necessário, por exemplo, navegar submerso a 8 nós, a 15 metros do fundo, por períodos prolongados de tempo. Os perigos inerentes a esta situação somente podem ser comparados ao de um navio deslocando-se a 8 nós, com visibilidade restrita, em um canal estreito, com uma lazeira de apenas 15 metros para cada bordo do manual de navegação eletrônica e em condições especiais”;

2 – “Qualquer falha humana ou de equipamento pode resultar em uma colisão do submarino com o fundo”.

No local da medição, o submarino está navegando na cota de 15 metros em profundidades de 40 metros determinando uma separação quilha – fundo de 25 metros. Isso torna o solo marinho uma das maiores preocupações para a navegação.

Assim, foi idealizada a posição do sensor sobre o fundo com o objetivo de permitir uma aproximação do submarino a uma pequena distância do sensor – a própria separação entre a quilha e o fundo - sem acrescentar mais uma variável para a segurança à navegação. A figura 4.3.2.2 ilustra os parâmetros envolvidos no momento de maior aproximação.

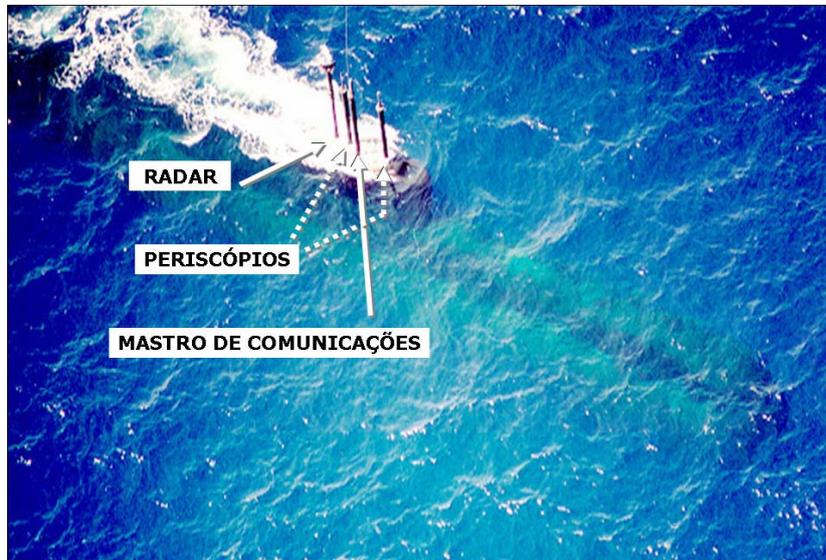


FIGURA 4.3.2.1 – Submarino mergulhado expondo os mastros: periscópios, radar e comunicações.

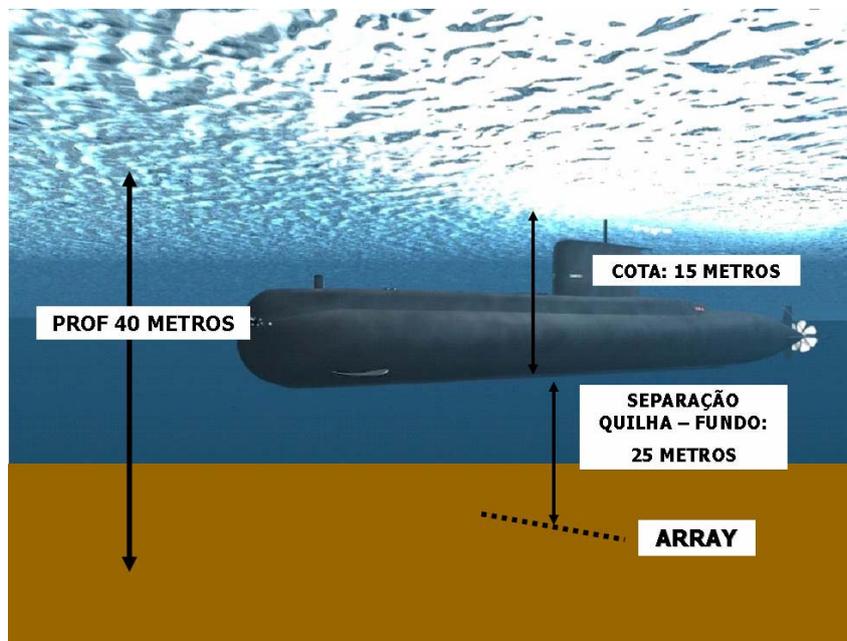


FIGURA 4.3.2.2 – Submarino na posição de maior aproximação do arranjo disposto sobre o fundo.

4.4 – Regiões Úteis Para a Medição

Como já foi descrito no item 2.7.1 o uso de um array sem acesso aos elementos acarretará em um eixo de melhor resposta fixo e áreas adjacentes com um ganho variável que pode ser quantificado através dos diagramas de irradiação. Desta forma, as regiões do espaço adjacente ao *array* onde o aumento da relação sinal ruído será suficiente para haver as medições podem ser identificadas. Esta região útil para a medição será chamada de Área X.

A identificação da Área X é importante para poder planejar as passagens do submarino de forma a obter o melhor ganho do array, bem como verificar qual será o grau de dificuldade para consegui-lo.

Assim, este item pretende de uma forma prática e simples, definir numericamente as dimensões destas áreas para o *array broadside* disposto em linha e também na forma de um círculo, posicionados sobre o fundo.

4.4.1 – Diagramas de Irradiação

A figura 4.4.1.1 ilustra o diagrama de irradiação clássico em decibéis de um arranjo disposto em círculo com a distância entre os elementos iguais à metade do comprimento de onda, $d = \frac{\lambda}{2}$, com as equações formuladas por Van Trees [17], com 16 elementos.

Neste item, os diagramas serão compostos levando em consideração o plano de deslocamento do submarino. Para isto, foi criado um algoritmo simples que faz uso de equações básicas da propagação da onda para o cálculo aproximado dos diagramas, mas preciso o suficiente para fazer a identificação das Áreas X.

Cada frequência é tratada individualmente sendo considerada uma onda contínua, um sinal CW. Sendo adotado para a pressão da frente de onda a expressão [5]:

$$p = \frac{P_0}{R} \exp(i (w t - k R)) \quad (4.4.1.1)$$

Onde:

- a) P_0 é a pressão *RMS* a um metro da fonte;
- b) R é a distância percorrida pela frente de onda desde a fonte emissora em metros;
- c) $w t$ é a fase temporal: w a frequência angular e t o tempo; e
- d) $k R$ é a fase espacial, e $k = \frac{2 \pi f}{c}$, o número de onda: onde f é a frequência do sinal e c a velocidade do som no meio.

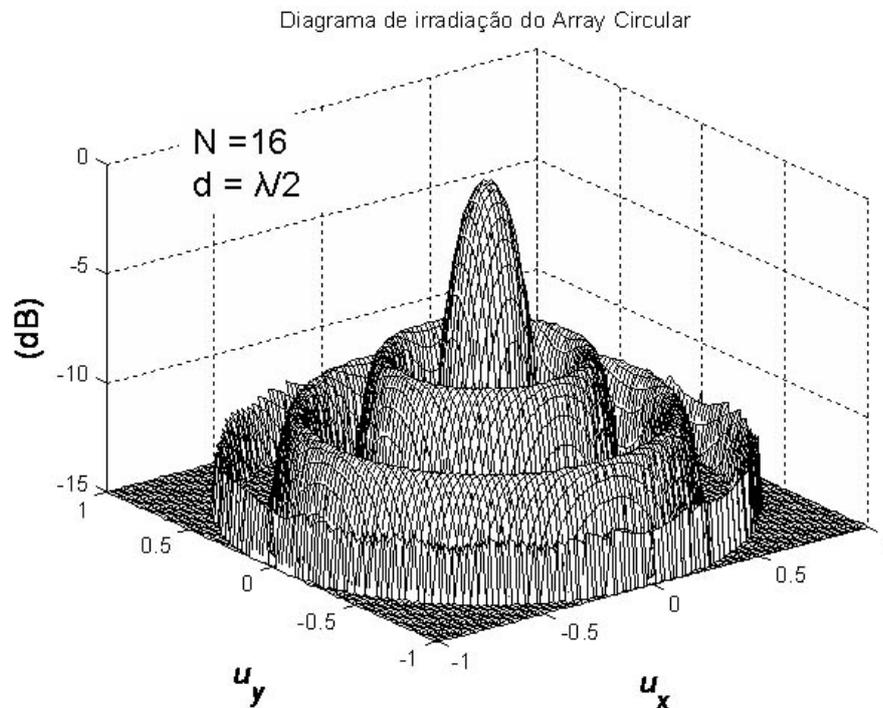


FIGURA 4.4.1.1 – Diagrama de irradiação construído a partir das equações formuladas por Van Trees [17].

Analisando apenas a fase espacial da equação 4.4.1.1, tem-se:

$$p = \frac{P_0}{R} \exp(-i k R) \quad (4.4.1.2)$$

Para o cálculo dos diagramas de irradiação, P_0 da equação 4.4.1.2 pode ser considerado unitário, pois os resultados são normalizados para a obtenção dos diagramas, assim:

$$p = \frac{1}{R} \exp(-i k R) \quad (4.4.1.3)$$

Então, a equação 4.4.1.3 é utilizada em conjunto com as considerações a seguir, que buscam as soluções para o cálculo de R , a partir da geometria espacial do problema. Desta forma, é gerado um algoritmo que permite a visualização da resposta do arranjo para cada frequência, em função da posição da fonte.

Na figura 4.4.1.2, o ponto $P(X1, Y1, Z1)$ está representando o submarino que se desloca em um plano com separação Z do fundo, no caso $Z1 = Z$. O arranjo circular está disposto sobre o solo marinho com seus elementos $e(xn, yn, zn)$, onde $n = 1$ a N , sendo N o número de sensores do *array*. No caso de um arranjo em linha basta escolher um eixo para a colocação dos hidrofones, por exemplo, o eixo x , obtendo $e_{linha}(xn, 0, 0)$.

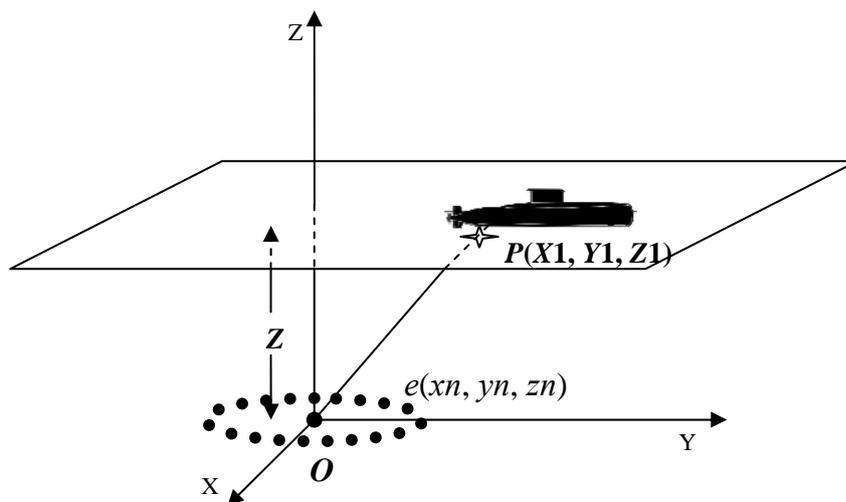


FIGURA 4.4.1.2 – Ilustração do plano de deslocamento do submarino e da posição do array circular sobre o solo.

A onda de pressão que se origina em P vai ter aos hidrofones. Como a distância percorrida pelo sinal é diferente para cada um, os sinais percebidos em cada elemento terão uma diferença de fase. Para o cálculo das distâncias percorridas pela frente de onda a cada sensor, duas situações foram contempladas:

a) A figura 4.4.1.3 representa a primeira, onde a frente de onda é considerada plana desde a posição P e se propaga na direção da reta \overline{OP} . Então, é idealizado um plano que contém o ponto de coordenadas $P (X1, Y1, Z1)$ e é perpendicular a direção de propagação do sinal.

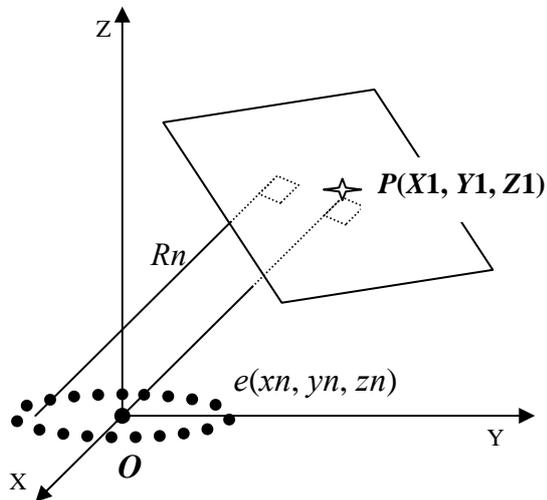


FIGURA 4.4.1.3 – Representação da frente de onda plana.

A partir da equação escalar do plano [20]:

$$a x + b y + c z = Q \quad (4.4.1.4)$$

Os coeficientes a , b , e c formam os componentes escalares do vetor normal, que, no caso são os mesmos da reta \overline{OP} , assim: $a = X1$; $b = Y1$; e $c = Z1$, e a equação 4.4.4 se torna:

$X1 x + Y1 y + Z1 z = Q$, onde $Q = X1^2 + Y1^2 + Z1^2$, então, a equação do plano considerado é:

$$X1 x + Y1 y + Z1 z = X1^2 + Y1^2 + Z1^2 \quad (4.4.1.5)$$

E, aplicando a equação que define a distância de um ponto ao plano [20], têm-se a distância de cada elemento $e(xn, yn, zn)$ ao plano considerado, pela relação:

$$Rn = \frac{|X1 xn + Y1 yn + Z1 zn|}{\sqrt{X1^2 + Y1^2 + Z1^2}}, \text{ com } n=1 \text{ a } N \quad (4.4.1.6)$$

Assim, para cada sensor *en* têm-se uma distância R_n que na equação 4.4.1.3, define uma pressão resultante p_n . Do somatório dessas pressões resultantes, $\sum_1^N p_n$, é obtida a resposta do conjunto para a posição $P(X1, Y1, Z)$.

Para cada outra posição desejada de P , todo o processo é repetido de forma a obter o diagrama como o da figura 4.4.1.4. Para ele, foram inferidos os valores de $N = 16$, $f_0 = 400 \text{ Hz}$, $Z = 25$ e $f = 400 \text{ Hz}$.

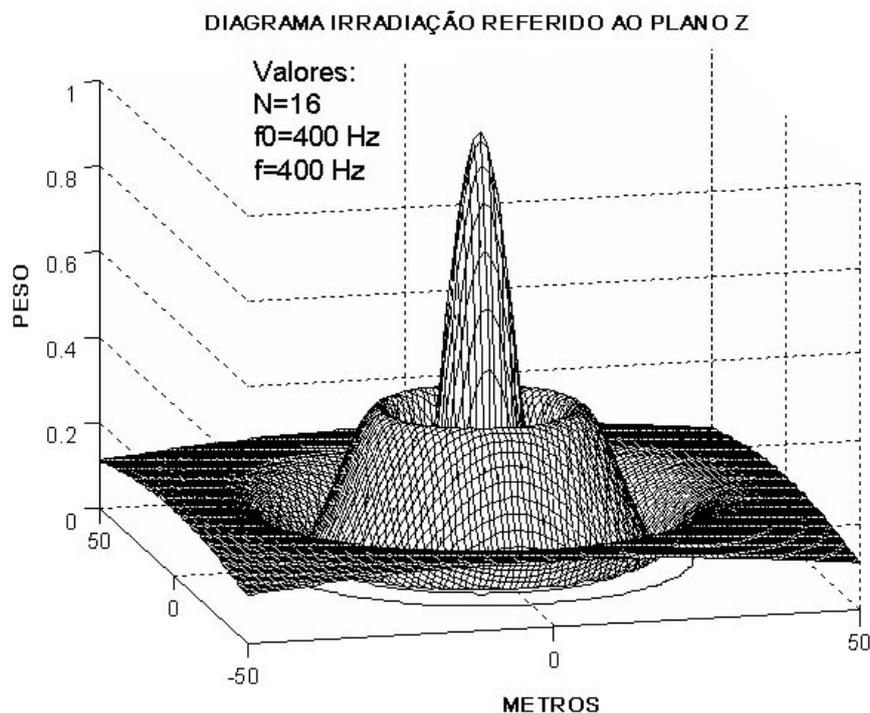


FIGURA 4.4.1.4 – Diagrama de irradiação referido ao plano Z.

Pode-se obter ainda o diagrama em função de uma distância fixa do centro do dispositivo, fazendo $Z1$ variar de tal forma que P esteja em uma semi-esfera de raio constante F , como mostrado na figura 4.4.1.5. Assim:

$$Z = \sqrt{(F^2 - X1^2 - Y1^2)} \quad (4.4.1.7)$$

Então, quando aplicada a relação 4.4.1.7 no algoritmo descrito acima, o diagrama tem um aspecto mais parecido com o da figura 4.4.1.1, como exposto na figura 4.4.1.6. Ainda pode ser aplicada a relação 2.3.2 obtendo a representação em decibéis, como na figura 4.4.1.7.

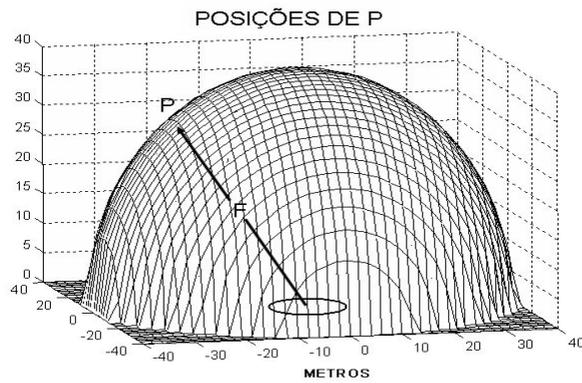


FIGURA 4.4.1.5 – Posições de P descrevendo uma semi-esfera de raio F.

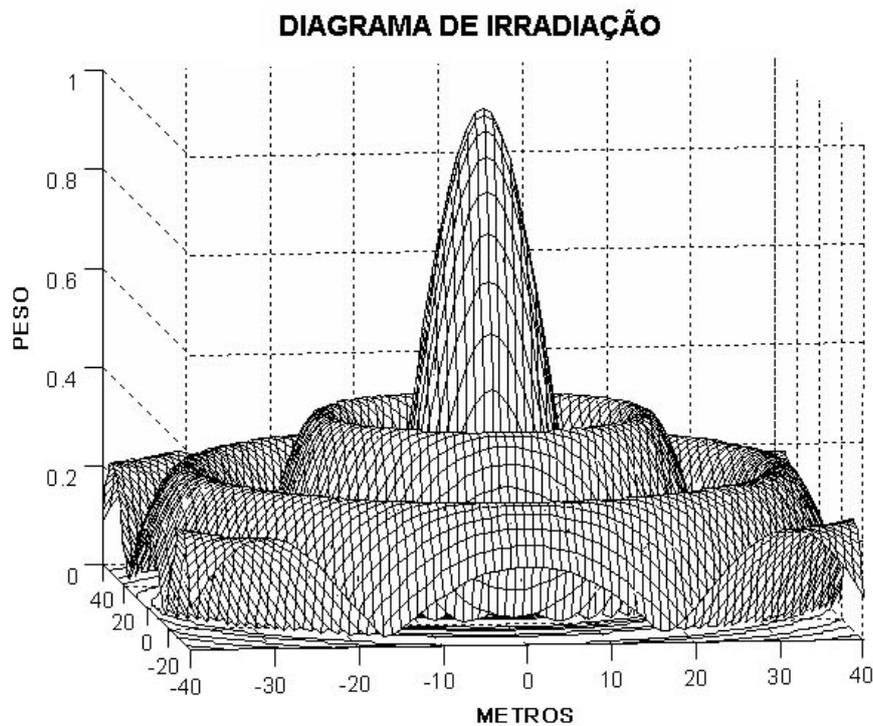


FIGURA 4.4.1.6 – O diagrama de irradiação para os pontos com mesma distância do centro do dispositivo.

b) A figura 4.4.1.8 representa a segunda abordagem em que o sinal é original da fonte P e a onda tem um padrão de dispersão esférico. Neste caso as distâncias de P ($X1, Y1, Z1$) a cada sensor é dada por:

$$R_n = \sqrt{(X1 - x_n)^2 + (Y1 - y_n)^2 + (Z1 - z_n)^2} \quad (4.4.1.8)$$

A partir daí, os diagramas podem ser obtidos seguindo os passos descritos na situação anterior.

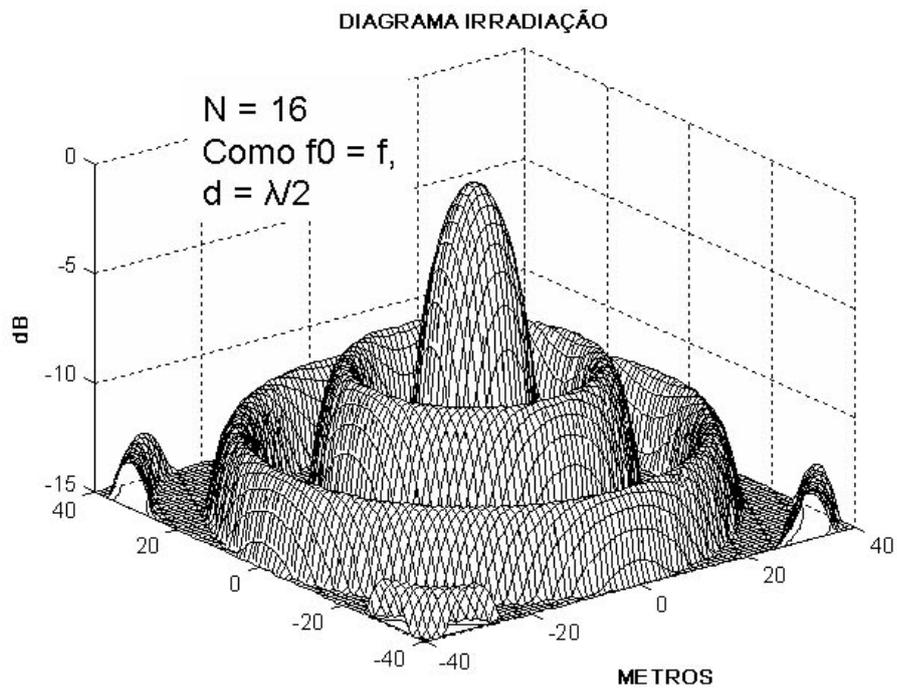


FIGURA 4.4.1.7 – A forma logarítmica do diagrama de irradiação para os pontos com mesma distância do centro do dispositivo.

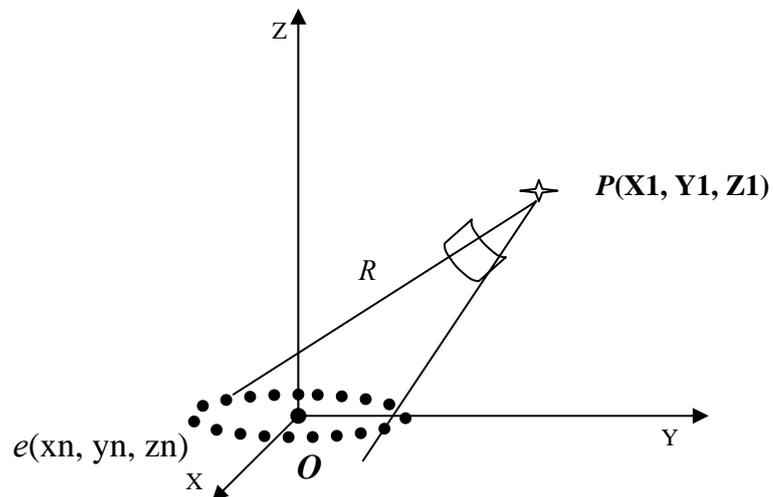


FIGURA 4.4.1.8 – Representação da onda oriunda de P , e com padrão de dispersão geométrico.

Cabe ainda uma comparação entre os diagramas obtidos a partir das duas formas consideradas para o cálculo das distâncias a cada sensor, itens “a” e “b” e ainda quando a distância ao centro do dispositivo é constante, como na figura 4.4.1.6. Assim a figura 4.4.1.9 é obtida a partir dos mesmos parâmetros da figura 4.4.1.4.

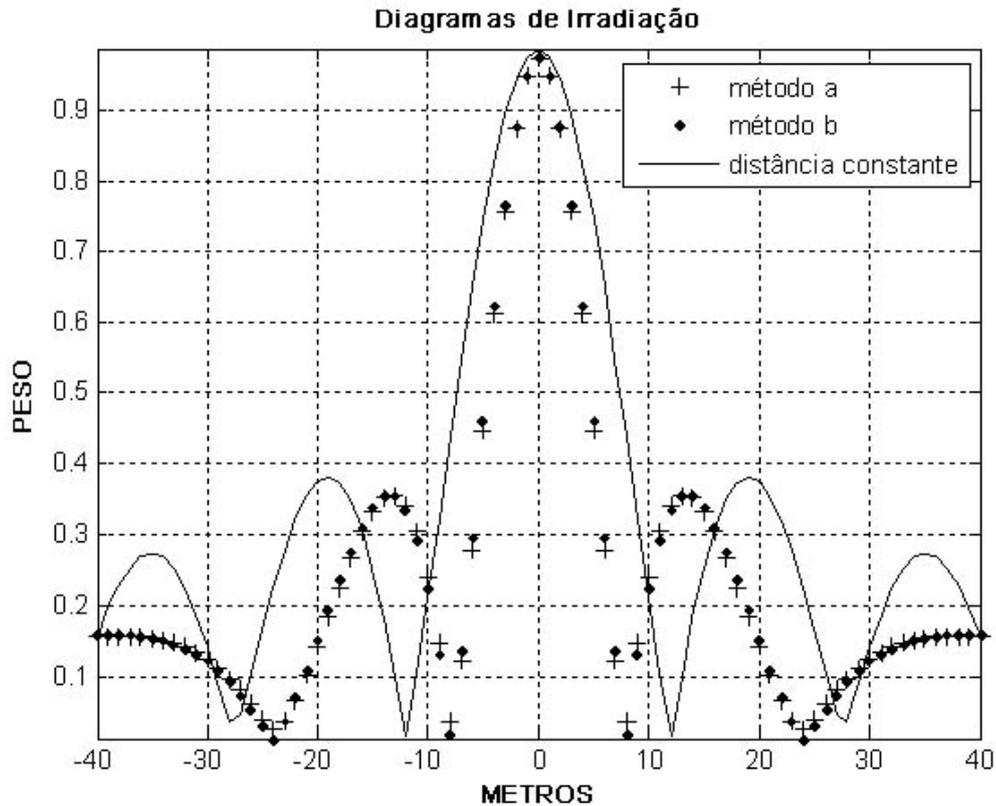


FIGURA 4.4.1.9 – Comparação do cálculo dos diagramas considerando os métodos “a”, “b” e com distância constante ao centro do *array*

Será visto que a largura do lóbulo principal terá influência direta sobre a área onde irá ocorrer a medição: quanto maior a largura, maior a área. Tendo em vista esse aspecto, será utilizado o método “a”, que da mesma forma que o “b”, irá determinar menores áreas, tornando a estimativa mais conservadora.

E, aplicando sistematicamente o algoritmo, é possível obter os diagramas para cada frequência processada. Assim, as figuras 4.4.1.10 e 4.4.1.11, mostram o perfil lateral dos diagramas do array circular, com $N = 16$, $f_0 = 400 \text{ Hz}$, $Z = 25 \text{ m}$, e frequências de processamento de 200 e 600 Hz, respectivamente.

Para o *array* disposto em linha, o mesmo algoritmo é usado para gerar os diagramas. Serão descritos alguns com $N = 16$, $f_0 = 400 \text{ Hz}$ e $Z = 25\text{m}$. Nas figura 4.4.1.12 e 4.4.1.13 a frequência processada é de 400 Hz, porém na primeira têm-se uma visão tridimensional, enquanto a segunda é uma visão transversal ao sentido do arranjo. Para as figuras 4.4.1.14 e 4.4.1.15 a vista transversal é adotada e as frequências são 200 e 600 Hz, respectivamente.

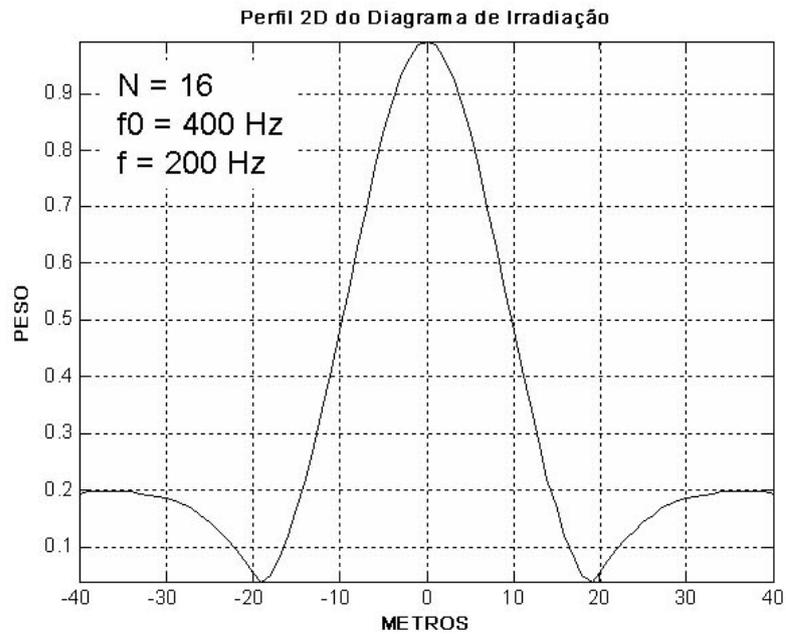


FIGURA 4.4.1.10 – Perfil lateral do array circular com $N=16$, $f_0=400 \text{ Hz}$ e $f= 200 \text{ Hz}$.

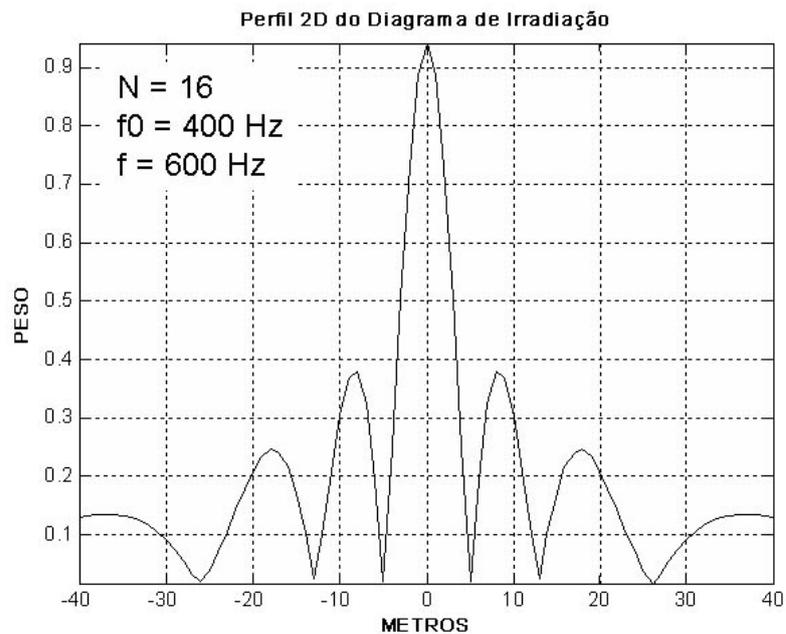


FIGURA 4.4.1.11 – Perfil lateral do array circular com $N=16$, $f_0=400 \text{ Hz}$ e $f= 600 \text{ Hz}$.

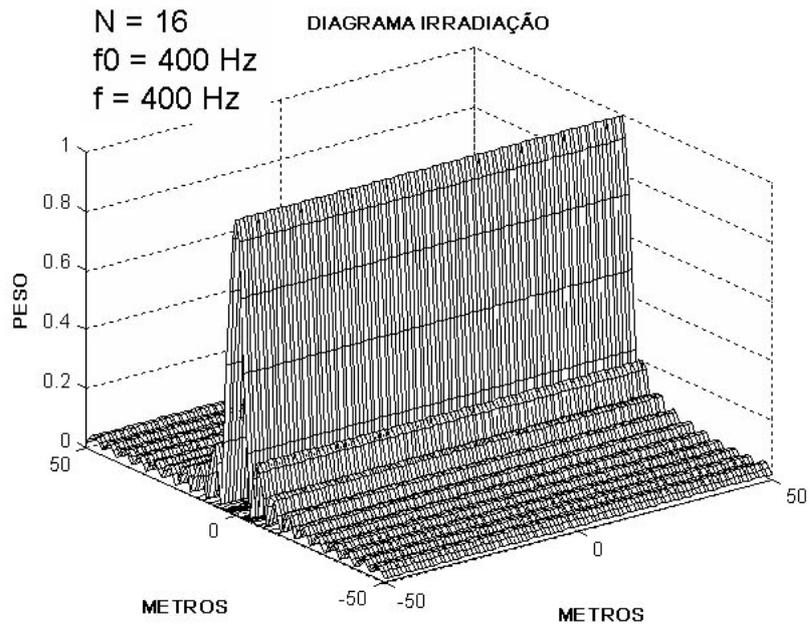


FIGURA 4.4.1.12 – Diagrama de irradiação do array linha com $N=16$, $f_0=400 \text{ Hz}$ e $f=400 \text{ Hz}$.

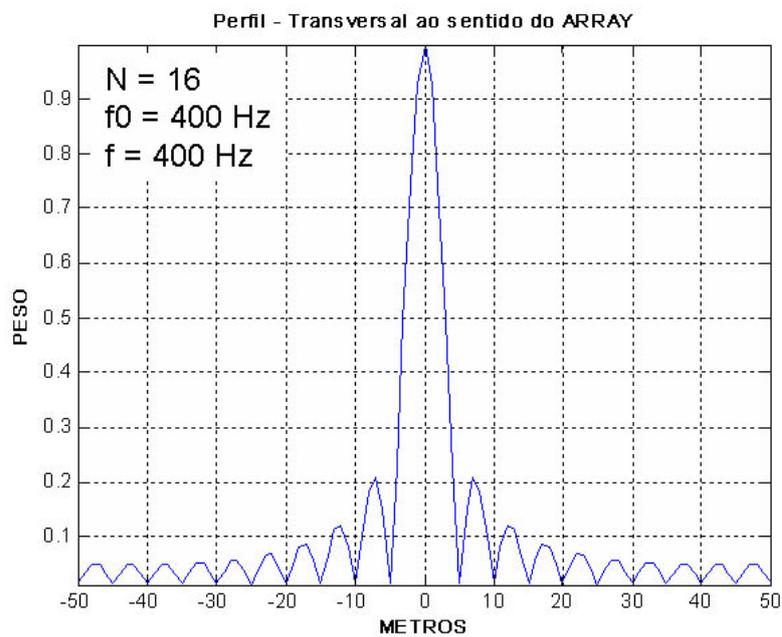


FIGURA 4.4.1.13 – Perfil transversal do array linha com $N=16$, $f_0=400 \text{ Hz}$ e $f=400 \text{ Hz}$.

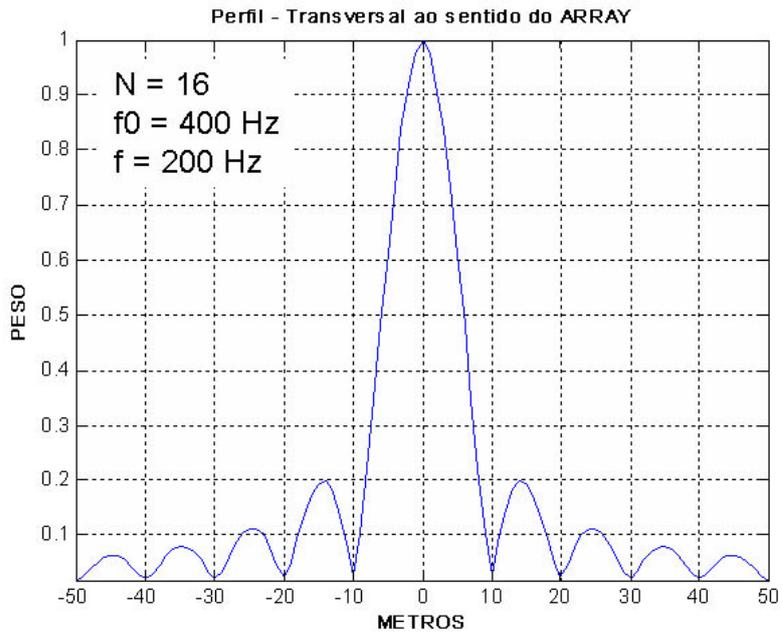


FIGURA 4.4.1.14 - Perfil transversal do array linha com $N=16$, $f_0=400 \text{ Hz}$ e $f=200 \text{ Hz}$.

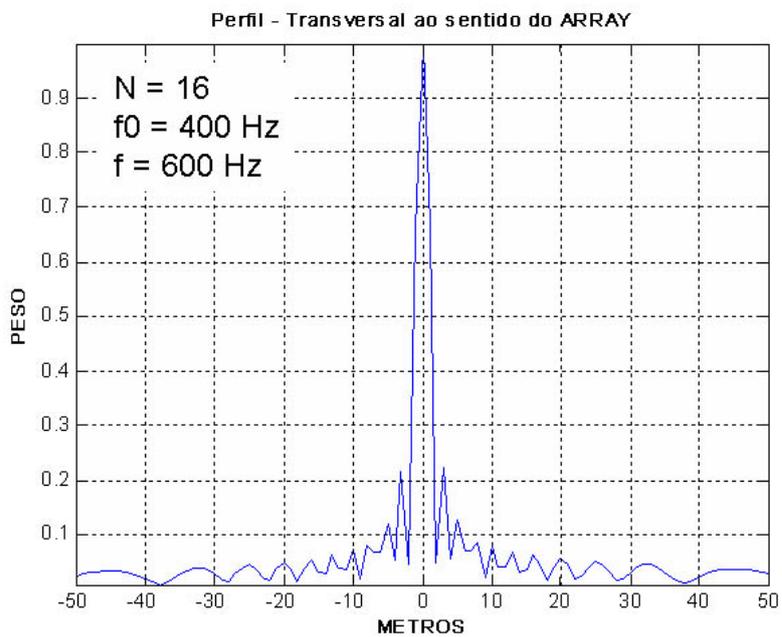


FIGURA 4.4.1.15 - Perfil transversal do array linha com $N=16$, $f_0=400 \text{ Hz}$ e $f=600 \text{ Hz}$.

4.4.2 Área Útil para a Medição

Para identificar a área útil para a medição serão utilizados os ganhos gerados pelos dispositivos, item 2.7.3, distribuídos pelo plano de deslocamento do submarino, de acordo com os diagramas de irradiação do item 4.4.1. Para isto, será considerado que o índice de diretividade DI corresponde à posição onde o array possui a melhor resposta. As demais posições irão corresponder a esse valor em RMS, ponderado pelo diagrama de irradiação.

Será considerada uma área de medição aquela em que a relação sinal ruído exceder o valor arbitrado de DT. Assim:

$$(SL - TL) - (NL - DI) \geq DT \quad (4.4.2.1)$$

Como no item 4.3.1, os parâmetros da equação serão:

- 1) $SL = SL1$, de 2.3.2;
- 2) $TL = 20 \log (R)$, de 2.4.1;
- 3) $NL = NL1$, de 2.5.1;
- 4) $DI = DIL$, de 2.7.3.1 ou DIC , de 2.7.3.2; e
- 5) $DT = 7$.

Assim, é possível delinear uma área útil para a medição, planejar e avaliar a passagem do submarino – com suas dimensões – pelas proximidades do dispositivo.

Nos exemplos que seguem, um submarino classe “Tupi”, que tem cerca de 60 metros de comprimento e 6 metros de “boca”(largura), é mostrado em uma vista superior, próximo às áreas X geradas pelos *arrays* com 16 elementos e frequência de construção, $f_0 = 400 \text{ Hz}$, e frequências processadas de:

- a) *Array* Circular para $f = 200, 400 \text{ Hz}$, nas figuras 4.4.2.1 e 4.4.2.2, respectivamente; e
- b) *Array* Linha para $f = 200$ e 400 Hz , nas figuras 4.4.2.3 e 4.4.2.4, respectivamente.

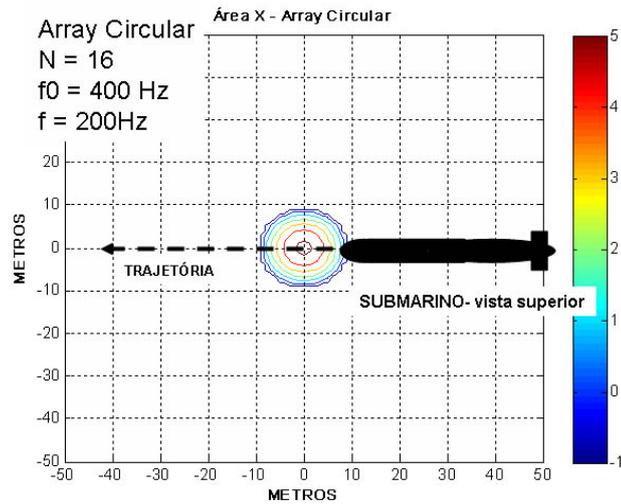


FIGURA 4.4.2.1 – Comparação das dimensões entre o submarino e a Área X gerada com o *array* circular para $f=200 \text{ Hz}$.

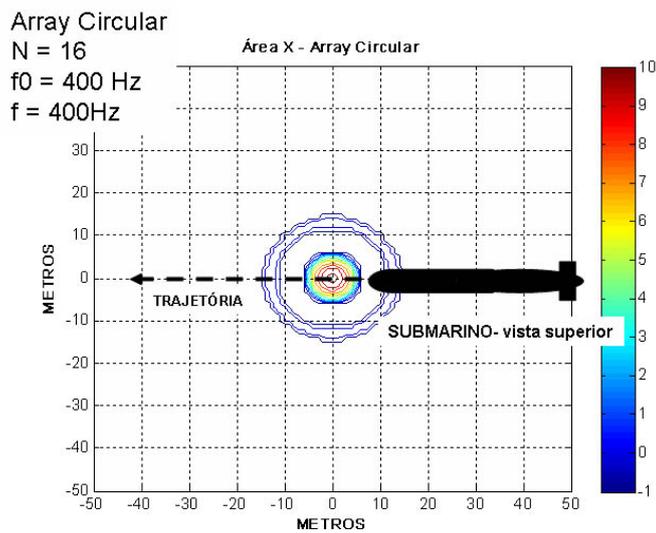


FIGURA 4.4.2.2 - Comparação das dimensões entre o submarino e a Área X gerada com o *array* circular para $f=400 \text{ Hz}$.

No caso do *array* circular, a área X se apresenta com um diâmetro de cerca de 10 metros para a frequência processada de 400 Hz , aumentando para 18 metros quando a frequência processada é reduzida para 200 Hz . Assim, a trajetória do navio ou submarino deverá passar sobre o centro do arranjo para haver a medição.

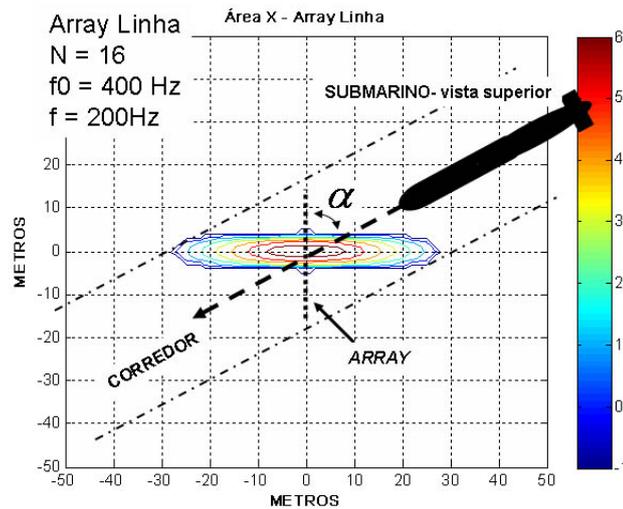


FIGURA 4.4.2.3 - Comparação das dimensões entre o submarino e a Área X gerada com o array linha para $f=200\text{ Hz}$.

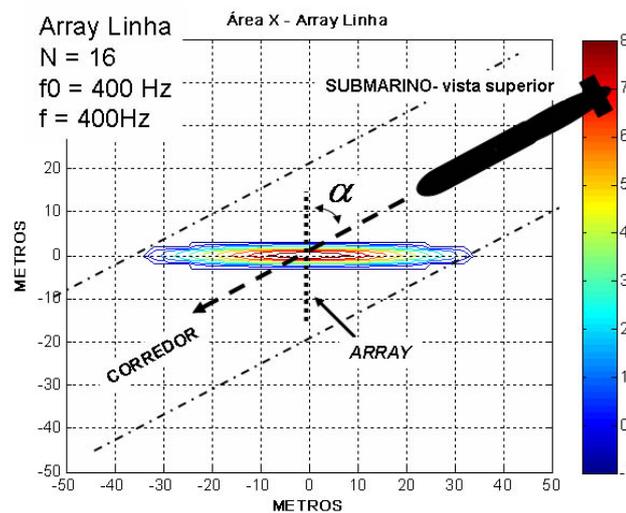


FIGURA 4.4.2.4 - Comparação das dimensões entre o submarino e a Área X gerada com o array linha para $f=400\text{ Hz}$.

Utilizando o arranjo linear, são formadas áreas mais alongadas no sentido perpendicular à disposição do array. Um ângulo “ α ”, variando de 0 a 90 graus, pode ser definido entre o eixo que possui os hidrofones e a direção de aproximação do navio ou submarino. Desta forma esse ângulo irá determinar um corredor por onde a passagem do submarino ou navio irá cruzar a área X, sendo a largura desse corredor máxima quando o ângulo for igual a zero e mínima se “ α ” for igual a 90 graus.

4.5 – Outras Possibilidades

4.5.1 – *Array* Linha na vertical

Como exemplo de medição com *arrays* na posição vertical pode-se citar o sistema de medição acústica que começou a operar em 1994, situado no fiorde em Heggernes, próximo a Bergen. O local é utilizado pelas Marinhas da Noruega, Alemanha e Holanda, que numa cooperação mútua, mantém e compartilham os sensores e a estrutura de apoio, figura 4.5.1.1, mas fazem a aquisição e análise dos sinais em computadores próprios [21].

O sistema é composto de 5 hidrofones: dois em cada array e um no fundo posicionado entre os sensores. Os dispositivos podem ser regulados para uma determinada profundidade, através de manobras com o cabo de sustentação do arranjo que após passar nos locais de ancoragem vão ter a estrutura de apoio em terra. Como as profundidades no local chegam a 400 metros, existe bastante flexibilidade em relação as cotas para a corrida do submarino, cuja navegação e o controle de sua posição é garantido pelo próprio sonar e por telefonia submarina.

No intuito de aproveitar a estrutura logística já existente em Cabo Frio uma primeira situação será imaginada utilizando a poita que posiciona o sensor “H”, que pode ser visualizado nas figuras 3.1 e 3.2. Para esse caso particular, o submarino mantém a cota de 15 metros, e, portanto continua a fazer uso de seus periscópios e mastros para a navegação e acompanhamento das posições pelo posto de controle. A figura 4.5.1.2 é a idealização deste sistema onde um flutuante mantém um *array* na vertical, e no outro extremo do conjunto está a poita, cuja posição é conhecida. O cabo de sustentação passa em um guia fixo à poita e vai para o posto de controle, que “regula” a profundidade do flutuante para cerca de 3 metros abaixo da superfície de modo que os movimentos das ondas da superfície não sejam transmitidos ao dispositivo.

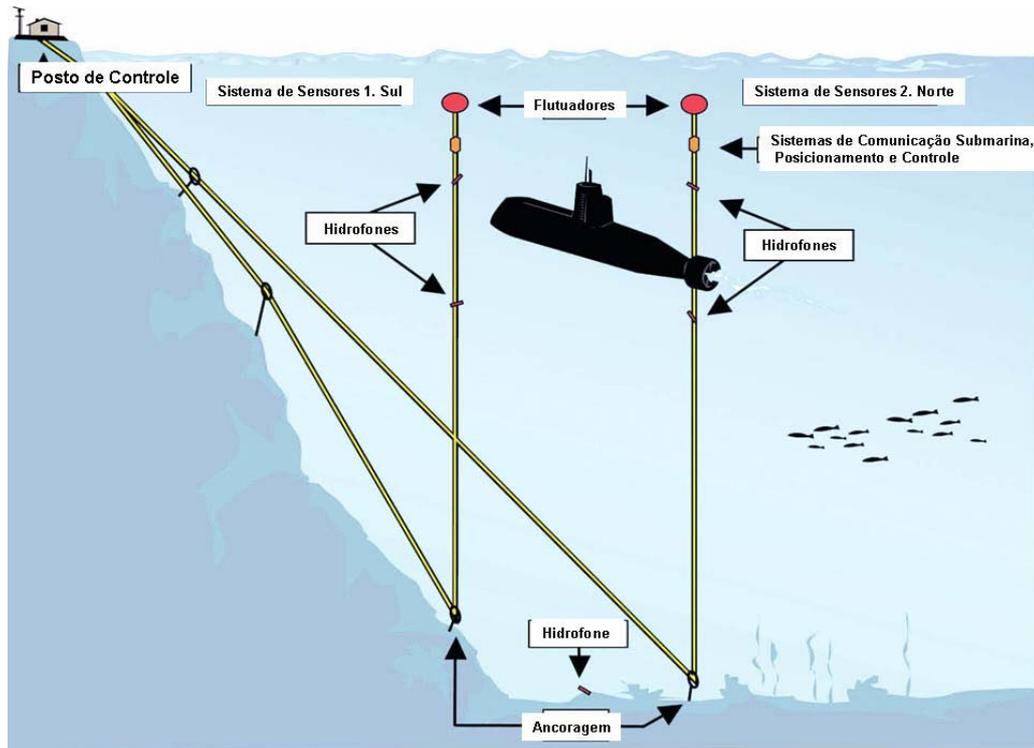


FIGURA 4.5.1.1 - Componentes do sistema de medição acústica de *Heggernes*.

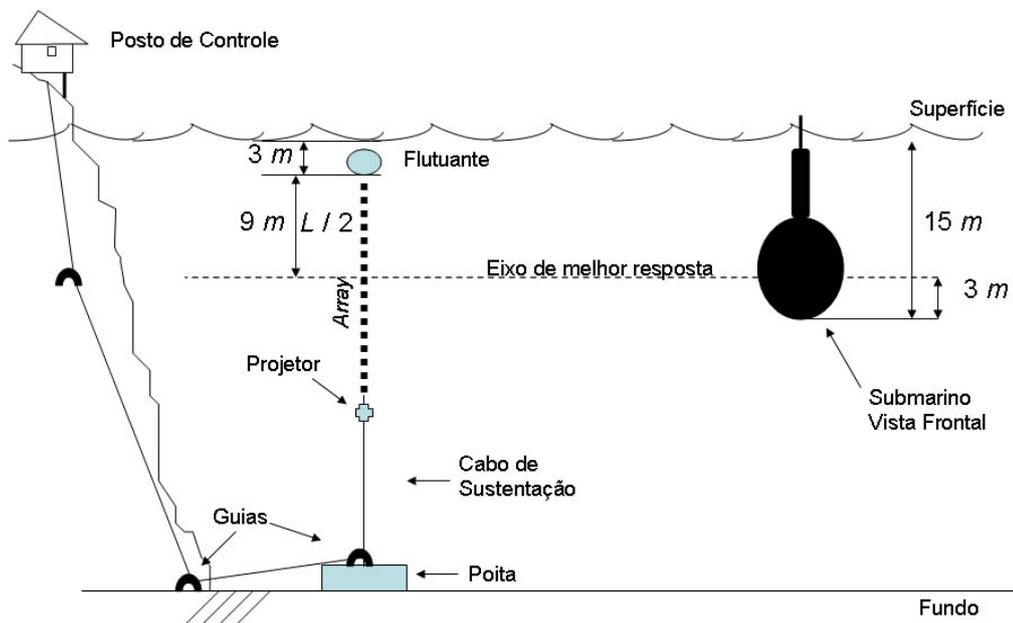


FIGURA 4.5.1.2 – Componentes do sistema de medição acústico com *array broadside* na vertical e apoiado pelo posto de controle.

Como neste caso o submarino permanece na cota de quinze metros cabe ainda uma análise em relação às frequências mínimas processadas pelo sistema na situação da figura 4.5.1.2: O eixo de melhor recepção do dispositivo, que define a direção do lóbulo principal, deverá estar sobre o submarino para obter seu ganho máximo, que será considerado hipoteticamente a profundidade de 3 metros acima da quilha. E ainda, posicionando o primeiro hidrofone 3 metros abaixo da superfície têm-se que:

$$\frac{L}{2} = 9 \text{ m}, \text{ onde } L \text{ é o comprimento do array. Daí: } L = 18 \text{ m. Fixando o número}$$

de hidrofones, $N = 16$, é obtida da equação $L = \frac{(N - 1)c}{2 f_0}$ (4.2.6), o valor da frequência mínima de construção para esse caso: $f_0 = 625 \text{ Hz}$. Utilizando os mesmos parâmetros do item 4.3.1, a figura 4.5.1.3 mostra como essa frequência de construção comparada à de 400 Hz , reduz as distâncias máximas de medição para as frequências mais baixas.

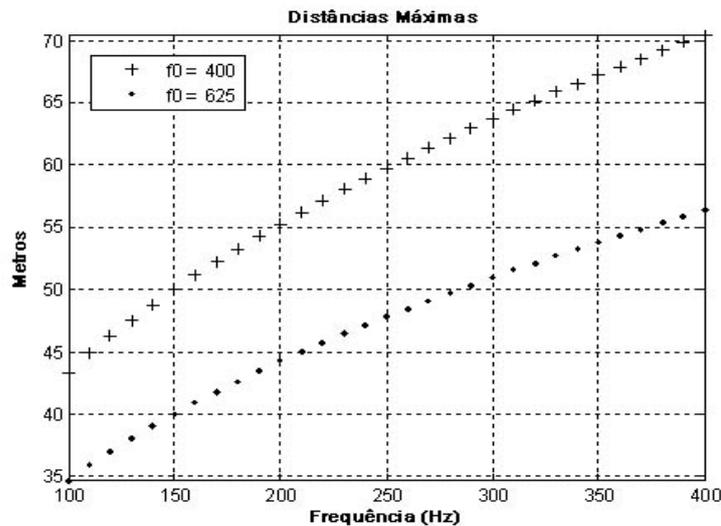


FIGURA 4.5.1.3 – Comparação entre as distâncias máximas de aquisição para o array linha para $f_0=400$ e 625 Hz

Outro ponto interessante de se observar é que, diferente da situação abordada anteriormente no item 4.3.2, nesta o sensor está em uma posição mais vulnerável, pois não fica junto ao fundo, e não é visível na superfície. Assim, mesmo com o conhecimento da posição da poita, e da capacidade de navegação visual do submarino, é necessário utilizar algum método que permita a passagem segura nas proximidades do

dispositivo. Os métodos utilizados para a navegação e controle de posição de submarinos nos sistemas de medição utilizam parcialmente dos recursos do próprio navio. No caso do classe “Tupi”, ele possui um sonar como parte integrante do sistema de combate cujo propósito é manter a vigilância contínua nos 360°, a fim de possibilitar a detecção, apresentação, classificação e acompanhamento de alvos de interesse, tais como: navios de superfície, submarinos, torpedos, dentre outros.

Como parte do sistema sonar os sensores acústicos são, figura 4.5.1.4:

1. *Cylindrical Hydrophone Array (CHA)*;
2. *Intercept Hydrophone Array (IHA)*;
3. *Passive Ranger Sonar (PRS)*; e
4. *Cylindrical Transducer Array (CTA)*.

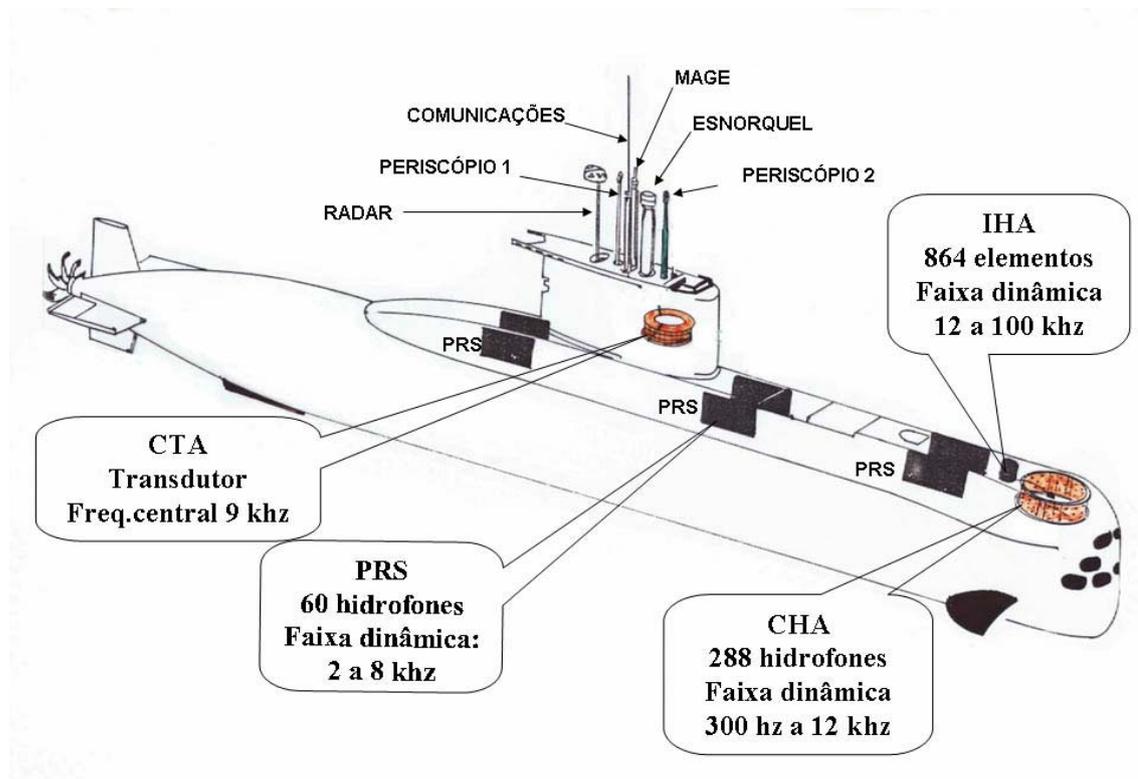


FIGURA 4.5.1.4 – Submarino: Mastros e Sensores do Sonar

Com esses recursos característicos, várias formas de controlar a posição relativa entre o submarino e o dispositivo podem ser desenvolvidas. Como exemplo pode-se imaginar um projetor, representado nas figuras 4.5.1.2 e 4.5.2.2, emitindo pulsos a intervalos definidos e com tempos de disparos pré-sincronizados com um computador conectado ao sonar de bordo. Assim, o submarino pode ser capaz de calcular as distâncias pelo intervalo entre o tempo de disparo do pulso e o tempo de chegada, e

ainda obter a direção do sinal. Na figura 4.5.2.2, as emissões de um transdutor na mesma linha do arranjo são identificadas e acompanhadas (marcação) pelo sonar, enquanto um computador portátil calcula as distâncias. Ao final das medições, as direções e distâncias coletadas pelo submarino são entregues para a reconstituição das corridas para a análise dos sinais.

Para o acompanhamento mais preciso das posições do submarino pelo posto de controle ou outra embarcação de apoio, pode ser utilizado um projetor também no submarino. Segundo a empresa *Chelsea Technologies Group Ltd*, a BUTEC (*British Underwater Test and Evaluation Centre*) costuma utilizar na raia acústica de Rona - Escócia para esse fim, um sistema de pulso sincronizado – *towed synchronised pingers* – que pode ser rebocado a até 25 nós e possui uma precisão nos tempos de disparo melhor do que 200 microsegundos, por todo o período de vida de 12 horas da bateria.[22]

Assim, um sistema que permite uma navegação segura e acompanhamento preciso das posições, leva a uma segunda situação em que submarino pode ser medido em uma cota mais profunda. Essa situação gera uma condição interessante, pois o aumento da pressão externa diminui o fenômeno da cavitação [1], e sem o ruído hidrodinâmico inevitável causado pelo arraste dos mastros da circunstância anterior, o submarino tende a ficar ainda mais silencioso.

Nesse caso, o mesmo sistema da figura 4.5.1.2 pode ser deslocado para águas mais profundas. Então, a distância ao apoio de terra pode levar a um sistema parcialmente autônomo, como imaginado na figura 4.5.1.5 onde é anexado um módulo para o controle do tempo de disparo do projetor e gravação de dados. O dispositivo completo é lançado em um local onde se pretende realizar as medições. A partir daí, o projetor permite a aproximação e as corridas do submarino que são gravadas no módulo de controle. Ao fim de um tempo determinado, o mecanismo de soltura automático se abre, liberando o flutuante que puxa todo o dispositivo para a superfície. O cabo extra que esta no compartimento do carretel garante o comprimento adicional para a subida do array, e tem resistência suficiente para permitir puxar o peso para bordo da embarcação de apoio.

Para facilitar a localização do flutuante, outros dispositivos podem ser anexados, assim como o próprio projetor pode continuar sendo utilizado para marcar a direção do arranjo.

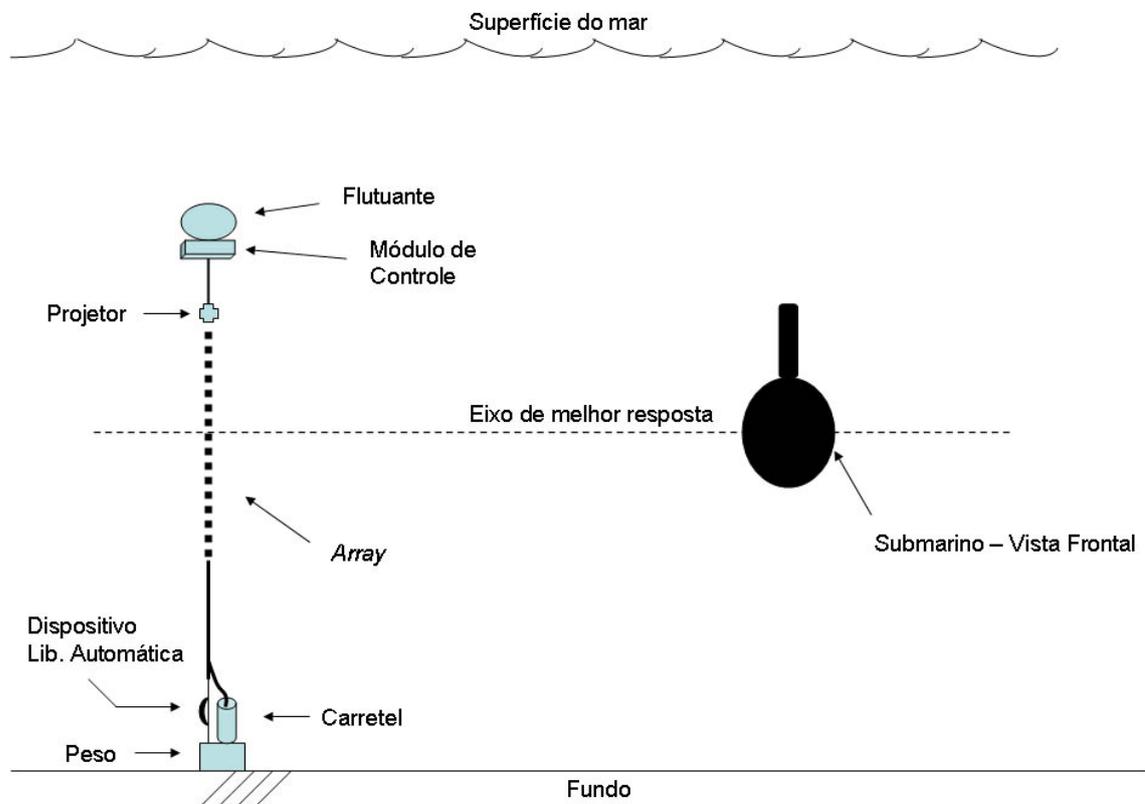


FIGURA 4.5.1.5 – Elementos do sistema automático de medição de sinais acústicos.

4.5.2 – Sistema Móvel

A grande vantagem de um sistema móvel é poder levar a medição para áreas com diferentes características de ruído ambiente, particularmente onde este se apresenta reduzido, e com isso, evidenciar o sinal interessante.

Diz-se que a Marinha americana opera hoje o que há de mais moderno em termos de sistema de medição acústica móvel. O projeto da ORNL, citado na introdução deste trabalho, conta com vários conjuntos de *arrays* montados em uma estrutura como ilustrado na figura 4.5.2.1. Cada *array* é composto de mais de 1000 hidrofones individuais. O sistema também possui um navio de apoio capacitado a lançar e recolher o enorme dispositivo, que, quando utilizado fica “pousado” no fundo.

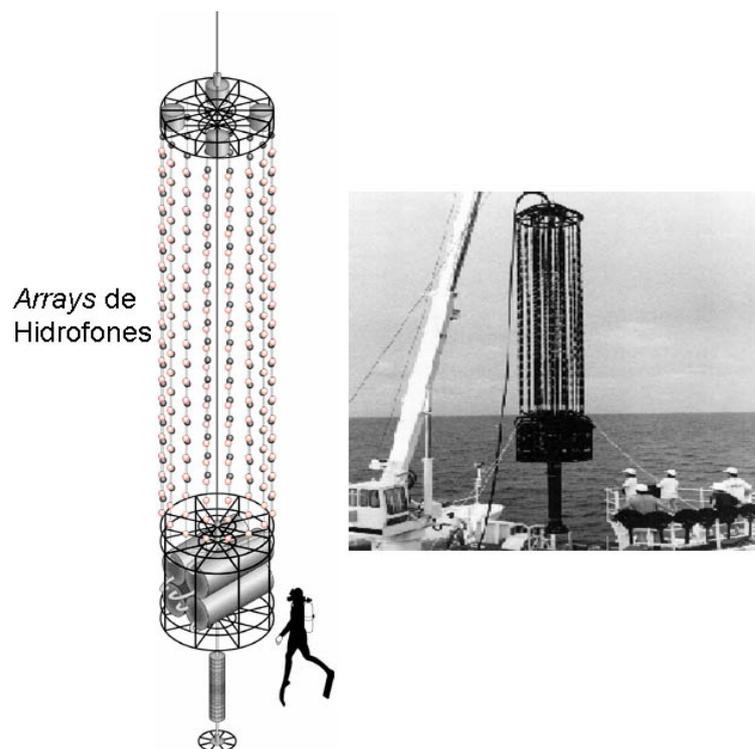


FIGURA 4.5.2.1 – Conjuntos de arrays do projeto da ORNL.

A figura 4.5.2.2 é a idealização de um sistema que procura juntar a simplicidade e baixo custo, obtidos com o uso de um array *broadside*, e, simultaneamente, a versatilidade de um sistema móvel. Neste, foi imaginada uma estrutura de posicionamento do arranjo que exclui a necessidade de ancoragem no fundo do mar. Assim, as águas do mar aberto podem fazer parte das regiões de possibilidades para o posicionamento do sistema. Um dispositivo com esta característica, operado a partir de uma embarcação de apoio, permite que o sistema possa ser operado em qualquer local consistindo uma enorme flexibilidade para a sua utilização.

Como não existe a ancoragem no fundo, deve-se ter atenção ao fato de que o movimento vertical da embarcação causado pelas ondas pode ser transmitido para o arranjo de hidrofones. Este deslocamento pode gerar um ruído hidrodinâmico, que pode ser interpretado para efeito de medida, como um aumento do ruído ambiente. Assim, a figura 4.5.2.2 apresenta alguns elementos necessários a esse sistema móvel que incluem: flutuantes desacoplando o movimento da embarcação para o array; um peso

para a manutenção da posição vertical do dispositivo; e um estabilizador com a função de amortecer os movimentos para cima e para baixo.

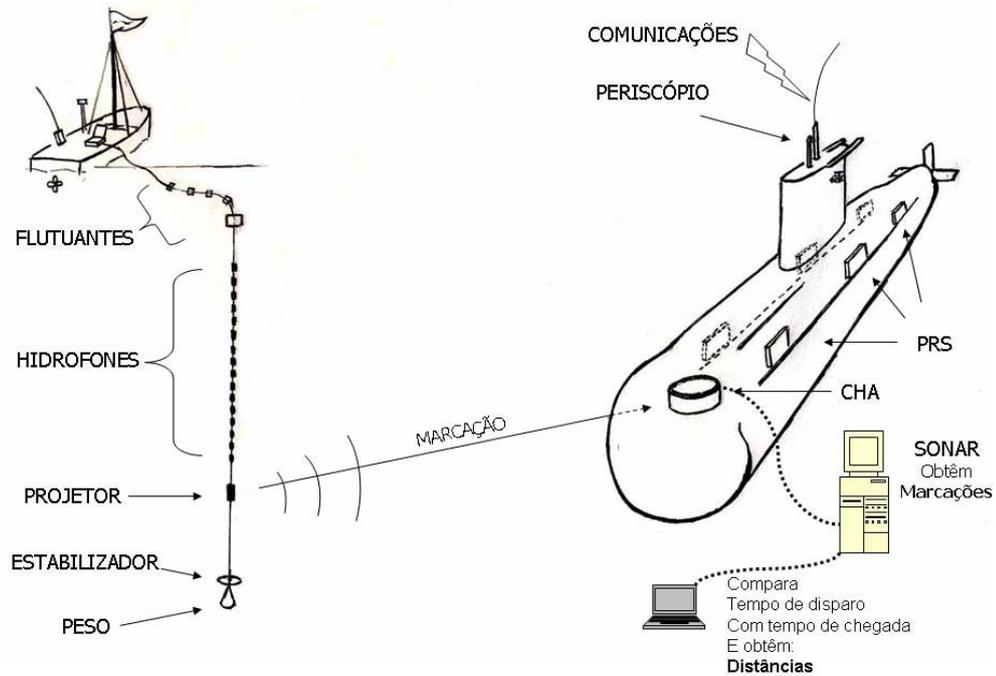


FIGURA 4.5.2.2 – Sistema Móvel e Acessórios

Capítulo 5 – Conclusões e Recomendações

Embora o submarino moderno tenha se tornado tão silencioso que seu nível de emissão sonora quase se confunda ao do ruído ambiente, a pesquisa mostra o interesse das marinhas de primeiro mundo em serem continuamente capazes de obter este sinal. Para isso duas medidas adotadas por essas nações para melhorar a relação sinal/ruído nas medições podem ser claramente observadas:

- a) A primeira é o uso de arrays de hidrofones; e
- b) A segunda é levar ou construir os sistemas de medição em locais onde o ruído ambiente é reduzido.

Do estudo, pode-se concluir que o uso de um *array broadside*, que caracteriza um sistema de baixo custo, pode prover um aumento à relação sinal/ruído aceitável para realizar a medição, com as seguintes ressalvas:

- 1 – A faixa dinâmica em frequências terá o limite superior para a frequência de construção e o inferior a cerca de 300Hz para menos dessa;
- 2 – As distâncias entre o submarino e o dispositivo deverão ser reduzidas para esse ter o seu sinal adquirido; e
- 3 – O não acesso aos elementos faz com que as áreas onde a contribuição do arranjo é suficiente para existir a medição sejam pequenas, o que pode tornar difícil ao submarino ou navio atingir o local correto.

Assim, seguem algumas recomendações para a utilização do *array broadside*:

I – Devido à limitação em relação à faixa dinâmica e ao eixo de melhor recepção que permanece estático, o uso deste tipo de arranjo é interessante pelo seu custo como uma primeira etapa na qualificação e domínio da capacidade de medir baixos ruídos irradiados. Após o que, a seqüência natural indica a utilização de um arranjo com acesso aos elementos.

II – Devido às reduzidas distâncias, necessárias para a medição, são imperativos o uso de auxílios a navegação que permitam uma passagem segura e controlada, como o uso de telefonia submarina ou projetores; e

III – Para o caso estudado em que o array está na horizontal, sobre o fundo e em um local de profundidade de 40 metros, o arranjo em linha se mostra mais promissor para uma aproximação e passagem sobre a área de medição.

Capítulo 6 – Bibliografia

- 1 – Burdic, W.S., *Underwater Acoustic System Analysis*, Prentice-Hall, Inc., 1984.
- 2 – Liberatti, E.W., “Importância dos Submarinos na Complexa Nova Ordem”, *Revista Marítima Brasileira*, Vol. 117, nº 10/12, p. 258 - 273, 1997.
- 3 – Cabbage A.B., <http://www.ornl.gov/info/ornlreview/rev28-4/text/silence.htm>.
Título da página: ORNL and Submarines: Measuring the Sound of Silence.
- 4 – Waite, A.D., *Sonar for Practising Engineers*, John Wiley & Sons, LTD., 1990.
- 5 – Clay, C.S., Medwin H., *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- 6 – Miasnikov, E.V., “The Future of Russia's Strategic Nuclear Forces: Discussions and Arguments”, *Center For Arms Control, Energy, and Environmental Studies at Moscow Institute of Physics and Technology*, 1995.
- 7 – <http://www.naval-technology.com/projects/nssn/>, Título da Página: NSSN VIRGINIA CLASS ATTACK SUBMARINE, USA.
- 8 – Stevens, N., http://www.subsim.com/ssr/nssn_ssr.html, Título da página: America's Future Sub: The NSSN.
- 9 – Parkhomenko, V.N, “Solving the Noise Problem of Nuclear Submarines”, *Morskoy Sbornik*, N2, 1993, p36-40.
- 10 – Urick, R.J., *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill Publishing Company, 1983 op. cit., p.350.
- 11 – Vorornin, G.P., “The Silence of our submarines annoys not only dilettantes”, *Krasnaya Zvezda*, 28 january 1995, p.5.
- 12– Lebed'ko, V.G., "Operations against diesel submarines in coastal waters", Paper from American-Russian Conference on Anti-Submarine Weaponry in Coastal Waters, Queenstown, USA, 20-23 June 1994.

- 13 – V.N. Gorbachev, "The Ability of Submarines to Defend Themselves Against Naval Operations in Coastal Waters", Paper from American-Russian Conference on Anti-Submarine Weaponry in Coastal Waters, Queenstown, USA, 20-23 June 1994.
- 14 – V.B. Mit'ko, "Use of acoustic devices in coastal waters against diesel submarines", Paper from American-Russian Conference on Anti-Submarine Weaponry in Coastal Waters, Queenstown, USA, 20-23 June 1994.
- 15 – Urick, R.J., *Sound Propagation in the Sea*, Peninsula Publishing, 1982.
- 16 – Wenz, G. M., "Acoustical Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources", *The Journal of The Acoustical Society of America*, vol. 34, n° 13, p. 1936 – 1956, 1962.
- 17 – Van Trees, H.L., *Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, John Wiley & Sons, Inc., 2002
- 18 – Etter P.C., *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*, Spon Press Taylor & Francis Group.
- 19 – <http://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/download/cap-44.pdf>, Título da página: NOÇÕES DE NAVEGAÇÃO DE SUBMARINOS
- 20 – Munem M.A., Foulis D.J., *Cálculus with Analytic Geometry : vol 2*, Worth Publishers, Inc., 1978.
- 21 – <http://www.bksv.com/pdf/bo0487.pdf>, Título da página: CASE STUDY - The Royal Norwegian Navy - Underwater Acoustic Noise Measurement of Vessels.
- 22 – <http://www.chelsea.co.uk/Marine%20Acoustics%20PDF%Files/Custom.pdf>, Título da página: CUSTOM DESIGN: Chelsea Technologies Group Ltd - Towed Synchronised Pingers.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)