



LOCALIZAÇÃO DE EMISSORES ACÚSTICOS EM AMBIENTES  
SUBMARINOS COM REDES DE SENSORES MÓVEIS

João Henrique Costa Carvalho Carneiro

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.

Orientador: Mariane Rembold Petraglia

Rio de Janeiro

Março de 2015

LOCALIZAÇÃO DE EMISSORES ACÚSTICOS EM AMBIENTES  
SUBMARINOS COM REDES DE SENSORES MÓVEIS

João Henrique Costa Carvalho Carneiro

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. Mariane Rembold Petraglia, Ph.D.

---

Prof. Fernando Gil Vianna Resende Junior, Ph.D.

---

Prof. Ricardo Eduardo Musafir, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2015

Carneiro, João Henrique Costa Carvalho

Localização de Emissores Acústicos em Ambientes Submarinos com Redes de Sensores Móveis/João Henrique Costa Carvalho Carneiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XI, 51 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Mariane Rembold Petraglia

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 47 – 49.

1. Localização Acústica. 2. Rede de Sensores. 3. Ambiente Submarino. I. Petraglia, Mariane Rembold. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedico este trabalho a meus pais,  
que possibilitaram tal feito.*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que me ajudaram em um projeto difícil que foi essa dissertação de mestrado. Eu nunca imaginava que teria tanta dificuldade para escrever um parágrafo, muito menos um trabalho completo. Sem dúvida nenhuma não seria possível sem a ajuda essencial de todos abaixo.

Agradeço:

Aos meus pais, Donizeti e Maria, que investiram tanto tempo, dinheiro e amor em mim para que eu fosse uma pessoa educada e capaz de enfrentar os desafios apresentados até agora. Muito obrigado.

À minha família em geral por acreditar nas minhas conquistas. Agradeço em especial ao meu irmão, Adriano, por sempre me defender em horas difíceis, mesmo com imensa pressão em torno dele. Manda um beijo para a Nina e Eve. Talvez quando sejam mais crescidas, elas possam entender este texto.

À minha namorada, Carol, que soube das dificuldades encontradas e fez os devidos sacrifícios para que eu tivesse um caminho mais fácil. Obrigado. Te amo.

Aos meus bons amigos, tão difíceis de encontrar. Agradeço pela compreensão e paciência pelo pequeno desaparecimento do autor em certas horas críticas. Bruna(rrr), Camilo, Yuri, Yuri<sup>2</sup>, Nick, Tainá: vocês vão me ver um pouco mais a partir de agora.

Em especial, agradeço aos grandes amigos Carlos e Nacht pelas discussões e auxílio direto na minha dissertação. Muito obrigado.

À minha orientadora, Mariane, pela incrível paciência demonstrada durante todo o tempo da orientação.

Por fim, a Deus, porque sem ele nada disso existiria. Nem eu, nem meus queridos.

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

LOCALIZAÇÃO DE EMISSORES ACÚSTICOS EM AMBIENTES  
SUBMARINOS COM REDES DE SENSORES MÓVEIS

João Henrique Costa Carvalho Carneiro

Março/2015

Orientador: Mariane Rembold Petraglia

Programa: Engenharia Elétrica

O uso de redes de sensores acústicos passivos para a localização de emissores em ambientes submarinos é considerado novidade no âmbito industrial. Porém, há problemas a serem considerados relativos à utilização de sensores estáticos. Investigamos neste trabalho o problema da inflexibilidade da geometria espacial da rede sensorial, analisando o seu efeito sobre a resolução das estimativas das diferenças dos tempos de chegada (TDoA) do sinal nos sensores. Em seguida, propomos o uso de uma rede móvel e elástica para o controle dinâmico da resolução dessas estimativas. Para isso, desenvolvemos um algoritmo que dita a transformação e a translação da rede sensorial até precisar a posição do emissor com a máxima resolução espacial possível. Resultados de testes em um ambiente simulado são apresentados, sendo o comportamento do sistema analisado para diferentes razões sinal ruído (SNR). Melhorias no sistema são então propostas, levando em conta a SNR, a atenuação do sinal pelo canal submarino e a redundância entre sinais dos diferentes sensores. Um exemplo de aplicação do sistema, na busca de transmissores de caixa preta de aviões comerciais, é discutido, bem como uma implementação mais eficiente do algoritmo de localização por meio da paralelização do seu código.

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

LOCALIZATION OF ACOUSTIC SOURCES IN UNDERWATER  
ENVIRONMENTS USING A NETWORK OF MOBILE SENSORES

João Henrique Costa Carvalho Carneiro

March/2015

Advisor: Mariane Rembold Petraglia

Department: Electrical Engineering

The use of passive acoustic sensor networks for locating transmitters in underwater environments is considered new in industry. However, there are issues to consider regarding the use of static sensors. In this work, we investigate the problem of spatial geometry inflexibility of a sensor network, analyzing its effect on the resolution of the estimates of the time differences of arrival (TDoA) of the signal at the sensors. Then we propose the use of a mobile and elastic network for dynamic control of the resolution of these estimates. For this, we developed an algorithm that dictates the transformation and the translation of sensors until the source position is determined with the highest spatial resolution possible. Test results in a simulated environment are presented, and the system behavior is analyzed for different signal to noise ratios (SNR). Improvements in the system are then proposed, taking into account the SNR, the signal attenuation by the underwater channel and the redundancy among signals from different sensors. An example of the system application, in the search for black box transmitters of commercial aircrafts, is discussed, as well as a more efficient implementation of the localization algorithm by parallelizing its code.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Localização de Emissor Acústico Usando Rede de Sensores</b>	<b>3</b>
2.1 Estado da arte de redes sensoriais submarinas . . . . .	4
2.2 Formulação matemática do problema de localização . . . . .	5
2.3 Solução do problema de otimização . . . . .	7
2.3.1 Monte Carlo Sequencial . . . . .	7
2.3.2 Algoritmo gradiente de descida mais acentuada . . . . .	8
<b>3 Translação e Transformação da Rede Sensorial</b>	<b>10</b>
3.1 Descrição do movimento do <i>simplex</i> de quatro sensores . . . . .	15
3.2 Paralelização do código de busca . . . . .	18
<b>4 Simulação em Ambiente Ideal na Presença de Ruído</b>	<b>20</b>
4.1 Resultados . . . . .	22
4.2 Cálculo da energia mínima do sinal emitido nos sensores . . . . .	27
<b>5 Adaptações do Sistema para Utilização em Ambiente Real</b>	<b>30</b>
5.1 Detetor de sinais não ruidosos . . . . .	30
5.2 Perdas do sinal acústico na propagação . . . . .	34
5.3 Modelo de ruído submarino . . . . .	37
5.4 Utilização da potência nos sensores para TDoAs com alta redundância	39
5.5 Exemplo Hipotético de Aplicação do Sistema . . . . .	42
<b>6 Conclusões</b>	<b>44</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>47</b>
<b>A Pseudocódigo da simulação em ambiente ideal</b>	<b>50</b>



# Lista de Figuras

2.1	A região de busca contém não somente a fonte emissora, mas a própria rede sensorial. . . . .	4
3.1	Localização 2-D de um locutor via movimentos sucessivos do ouvinte, gerando estimativas cada vez mais precisas . . . . .	10
3.2	Comportamento de incertezas distintas entre redes de sensores de geometrias distintas. . . . .	14
3.3	Vista superior, de lado, e 3D de um simplex centrado em posição estimada de emissor. . . . .	15
3.4	Diagrama da máquina de estado do movimento iterativo. Note que o movimento transitório é uma pequena parte do iterativo. . . . .	17
3.5	Divisão do espaço de busca em partições iguais para paralelização do método de busca. . . . .	19
4.1	Desempenho por movimento iterativo do algoritmo em um cubo de busca de 1000 m de lado. . . . .	22
4.2	Desempenho por movimento iterativo do algoritmo em um cubo de busca de 400 m de lado. . . . .	24
4.3	Porcentagem de acertos para diversos valores de SNR para cubo de busca de 1000 m. . . . .	25
4.4	Porcentagem de acertos para diversos valores de SNR para cubo de busca de 400 m. . . . .	26
4.5	Porcentagem de acertos para diversos valores de SNR e tamanhos do cubo de busca. . . . .	26
4.6	Relação entre SNR e tamanho do cubo de busca exemplificada pelo limiar de 50% de acertos. . . . .	27
4.7	Diferença entre os termos $e^{0.1216r}$ e $10^{\frac{r}{20}}$ , em função da SNR. . . . .	29
5.1	Medida do erro do sistema com cubo de busca de 1000 m de lado para diversos valores de SNR usando o detetor de sinal não ruidoso. . . . .	32

5.2	Medida do erro do sistema com cubo de busca de 400 m de lado para diversos valores de SNR usando o detetor de sinal não ruidoso. . . . .	33
5.3	Porcentagem de acertos com detetor de sinal não ruidoso para diversos valores de SNR e tamanhos do cubo de busca. . . . .	34
5.4	Absorção do som pela água do mar e pelos seus diversos constituintes [21]. . . . .	36
5.5	Mudança de base da medida diferencial de potência para a base normal.	41

# Lista de Tabelas

5.1	Fontes significativas de ruído submarino para diversas faixas de frequência . . . . .	38
5.2	Valores típicos do coeficiente de estado de agitação do mar . . . . .	39

# Capítulo 1

## Introdução

O uso de redes distribuídas de sensores ativos e passivos para a localização de emissores acústicos em ambientes submarinos vem crescendo consideravelmente nos últimos anos. Podemos citar dentre algumas aplicações a localização de caixas pretas de aviões comerciais [1], o monitoramento e localização de vazamentos da indústria de óleo e gás [2], e o acompanhamento de vida marinha [3]. Existe a tendência de se utilizar uma quantidade cada vez maior de nós ou sensores nessas redes, o que certamente aumenta a complexidade computacional de algoritmos convencionais de localização em tempo real. Por exemplo, em [4] é descrito um sistema que utiliza processadores óticos para atender à recente necessidade de processamentos mais velozes devido à maior quantidade de dados resultante do aumento do número de nós nas redes sensorias. Além disso, o uso de redes estáticas pode resultar em estimativas subótimas de localização da fonte acústica devido à não linearidade do canal acústico submarino.

Nesta dissertação, investigamos o uso de uma rede móvel e elástica, onde a topologia da rede pode evoluir com o tempo, como solução para os dois problemas descritos acima. Espera-se que com uma rede móvel não seja necessário o uso de um número muito elevado de nós, implicando menores esforço e custo computacionais. Outra vantagem é que a translação da rede para posições mais próximas da fonte emissora resulta em menor efeito do canal acústico na propagação do som até os sensores, gerando, portanto, estimativas de posições da fonte mais precisas. Como analogia, pode-se citar o exemplo do cão farejador que utiliza somente seu acurado sentido do olfato. Ele utiliza o cheiro conhecido de uma pessoa desaparecida ou foragida para se aproximar da mesma, melhorando sua precisão na localização à medida em que o cheiro é cada vez mais forte. No caso submarino, uma maior proximidade da fonte implica menor atenuação do sinal e, conseqüentemente, menor efeito do ruído, ou seja, medições com maior razão sinal ruído (SNR, do inglês *Signal Noise Ratio*).

Também haverá uma menor variação da velocidade do som no canal acústico, a qual depende de diversos fatores como salinidade, temperatura e pressão, que se alteram no trajeto fonte-sensor [5]. A transformação da geometria da rede, portanto, será útil para diminuir a incerteza das medidas em diversos cenários, como indicado em [6]. Neste trabalho observa-se que o englobamento da fonte acústica pelos sensores é um fator importante para que a localização seja bem sucedida, uma vez que emissores localizados na região interna ao poliedro virtual com vértices nas posições dos sensores da rede resultam em estimativas de posição com menores incertezas do que os localizados na região externa a esse poliedro. Para realizar a translação e a transformação da rede, é necessária a implementação de dois algoritmos. O primeiro obtém estimativas da diferença de tempo de chegada (TDoA, do inglês *Time difference of arrival*), com a adaptação necessária para considerar o movimento dos sensores no ambiente tridimensional. O segundo resume-se ao uso dos resultados do primeiro algoritmo para determinar a translação e a transformação da rede ao longo do tempo que resultam em melhores estimativas.

No próximo capítulo será vista a formulação matemática do problema e descrita uma solução teórica para ele. Em seguida, serão discutidos dois algoritmos de otimização clássicos, que resolvem numericamente o problema formulado de maneira geral. No Capítulo 3, apresenta-se o desenvolvimento de um algoritmo de translação e transformação de uma rede sensorial móvel, considerando-se tanto o modelo geral de movimento como um modelo simplificado, mais eficiente e de fácil implementação. É também brevemente discutida a possibilidade de paralelização dos códigos dos métodos propostos, a fim de diminuir o esforço computacional em cada nó da rede sensorial. No Capítulo 4, descreve-se uma simulação correspondente à utilização do sistema em um cenário ideal (sem efeito do canal acústico ou de reverberação), sendo avaliado o efeito do ruído ambiente sobre o desempenho do sistema. Dentre os resultados obtidos dessa simulação, destaca-se a conclusão sobre a energia mínima do sinal do emissor que deve chegar a cada sensor para que a localização seja bem sucedida. No Capítulo 5 são apresentadas diversas adaptações do sistema necessárias para a sua utilização em ambientes submarinos reais. Dentre essas adaptações, encontram-se a implementação de um detetor de sinal não ruidoso, que impede o acionamento do sistema sem que se tenha certeza que de fato a fonte foi detectada, e a inclusão do coeficiente de absorção do som pelo mar nos cálculos de potência mínima do sinal emitido e da distância máxima entre sensores. No Capítulo 5 é também descrita a utilização hipotética do sistema proposto na localização de caixas pretas de aviões comerciais. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

## Capítulo 2

# Localização de Emissor Acústico Usando Rede de Sensores

O problema de localização de um emissor acústico por uma rede de sensores é ilustrado na Fig. 2.1. Considerando  $M$  sensores (no exemplo,  $M = 4$ ) distribuídos no entorno da fonte  $e$ , busca-se detectar diferenças de tempo do sinal emitido pela fonte nas respectivas  $M$  medidas. Supõe-se que todos os sensores e o emissor estejam contidos em um hexaedro regular de lados  $L$ ,  $W$  e  $D$ , limitando a busca da posição da fonte a essa região. Nas próximas seções, a formulação matemática do problema, supondo condições ideais, e a sua solução ótima serão apresentadas.

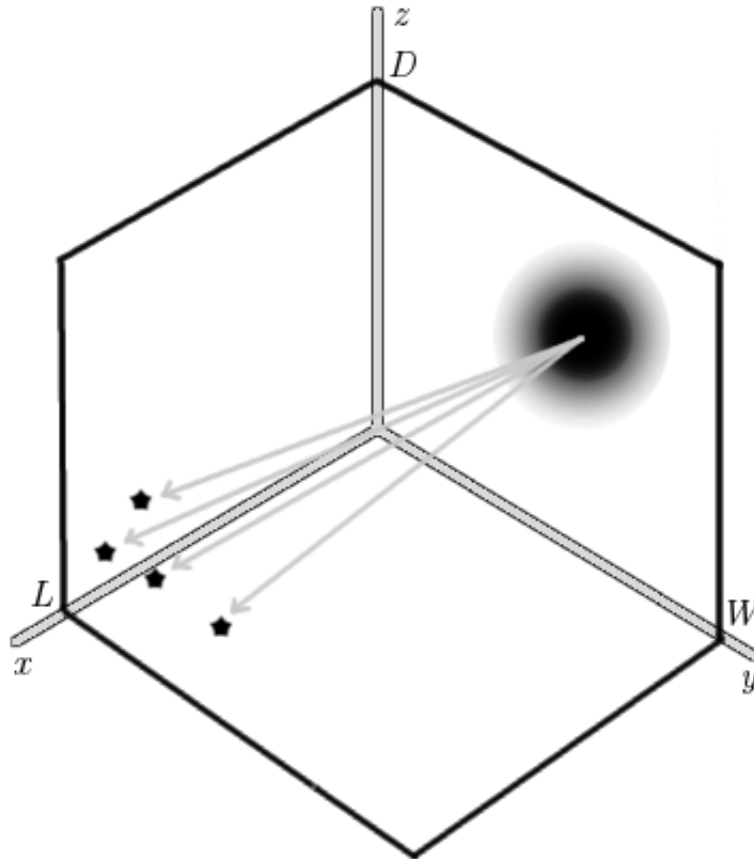


Figura 2.1: A região de busca contém não somente a fonte emissora, mas a própria rede sensorial.

## 2.1 Estado da arte de redes sensoriais submarinas

As redes sensoriais, usadas na localização acústica, podem ser classificadas por suas topologias [7]:

1. Redes fixas ao fundo do mar, com a posição de cada nó bem conhecida [8].
2. Redes relativamente fixas, ancoradas a bóias ou ao leito marinho, também com a posição de cada nó bem conhecida [9].
3. Redes não fixas, e.g., sensores movidos pela corrente marítima. Pior posicionamento que os anteriores [10].
4. Redes híbridas, combinando as soluções acima [11].

O primeiro método nos oferece uma localização fácil do objeto de interesse e com erro mínimo, já que os nós são fixos. Porém é um sistema muito caro de se implementar, e restrito à região instalada. A segunda técnica contém as mesmas características deste. Já o terceiro, expande muito a região de atuação, com menor custo, porém

com detrimento sob a qualidade do posicionamento e portanto sob o erro da localização. São necessárias subidas frequentes à superfície do mar para o sensor móvel tenha acesso aos sinais de GPS, pois estes não penetram a lâmina d'água. Também é interessante considerar as soluções híbridas que combinam as técnicas acima. Por exemplo, utilizando a comunicação acústica entre uma rede fixa e um sensor móvel, contido dentro da região de atuação da mesma, é possível a utilização deste sensor sem a necessidade de subidas à superfície para corrigir seu posicionamento.

Esta dissertação de mestrado trata da terceira técnica, com múltiplos sensores móveis. Dada a grande expansão na região de atuação, como também o desempenho medíocre em relação à qualidade do posicionamento, tem sido muito discutido essa técnica a fim melhor a acurácia de sua localização, mesmo sem correções constantes de suas coordenadas via atualizações GPS. Chamadas de técnicas *GPS-free* (livre de GPS), tentam substituir completamente ou minimizam a necessidade do uso de satélites GPS [12] [13] [14]. Neste trabalho, é suposto que cada nó da rede sensorial tem sua posição bem conhecida.

## 2.2 Formulação matemática do problema de localização

Existem diversos algoritmos de localização de emissores acústicos, sendo que uma parte considerável deles necessita de um primeiro passo, que é a estimação das TDoAs. Sendo  $x_R(t)$  o sinal recebido pelo sensor de referência  $R$ ,  $x_i(t)$  o sinal recebido pelo  $i$ -ésimo sensor e  $s(t)$  o sinal da fonte acústica na posição do sensor de referência (sem ruído e já considerada a atenuação feita pelo canal acústico), podemos escrever:

$$x_R(t) = s(t) + n_R(t) \quad (2.1)$$

$$x_i(t) = \rho_i s(t + \tau_i) + n_i(t) \quad i \neq R \quad (2.2)$$

onde  $n_R(t)$  e  $n_i(t)$  são os sinais de ruído no sensor de referência e no  $i$ -ésimo sensor, respectivamente,  $\rho_i$  é a constante de atenuação (ou ganho) de  $s(t)$  no  $i$ -ésimo sensor, e  $\tau_i$  é o atraso correspondente. Assumindo-se que  $s(t)$ ,  $n_R(t)$  e  $n_i(t)$  são descorrelacionados entre si, a TDoA entre a referência e o  $i$ -ésimo sensor ( $\tau_i$ ) pode ser estimada a partir da correlação cruzada entre  $x_R(t)$  e  $x_i(t)$ , dada por:

$$(x_R \star x_i)(\tau) = E [x_R(t)x_i(t - \tau)] \quad (2.3)$$

onde o operador  $E$  denota o valor esperado estatístico e,  $\star$ , a correlação.



A melhor estimativa da TDoA é o argumento que maximiza a função de correlação cruzada, ou seja:

$$\hat{\tau}_i = \arg \max_{\tau} [(x_R \star x_i)(\tau)] \quad (2.4)$$

Porém, devido à natureza do processamento dos dados em tempo real, tendo disponível apenas uma medição em cada sensor, é necessário usar a seguinte aproximação discreta janelada:

$$(x_R \star x_i)(k) \approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}_R(n) \tilde{x}_i(n+k) \quad (2.5)$$

sendo  $\tilde{x}_R(n) = x_R(n)w(n)$  e  $\tilde{x}_i(n) = x_i(n)w(n)$ , com  $w(n)$  uma sequência de comprimento  $K$  igual ao número de amostras disponíveis do sinal de cada sensor. Pode-se diminuir a variância da estimativa de  $(x_R \star x_i)(k)$  empregando-se uma janela diferente da retangular [15], sendo a janela de Hamming a mais utilizada para sinais de voz. É também usual interpolar os sinais dos sensores e, conseqüentemente, as correlações cruzadas, a fim de obter estimativas mais precisas das TDoAs. Com as estimativas de TDoA calculadas, é possível estimar a posição do emissor acústico, conforme descrito a seguir.

A partir dos  $M-1$  valores de TDoA (um para cada par referenciado), cada estimativa gera uma função hiperbólica para as possíveis soluções da posição da fonte, conforme mostrado para duas dimensões em [16]. Essas posições são extraídas da diferença entre as distâncias percorridas pelo sinal até os sensores do par referenciado. Sendo  $t_R$  e  $t_i$  os tempos de chegada do sinal da fonte acústica nos respectivos sensores, define-se então  $\delta_i$  como a diferença entre os raios das esferas centradas no emissor acústico e cujas superfícies contenham os sensores, ou seja:

$$\delta_i = c(t_R - t_i) = c\hat{\tau}_i \quad (2.6)$$

onde  $c$  é a velocidade do som no meio. Note que a velocidade do som na água depende da profundidade, da temperatura e da pressão, fazendo com que seja necessária uma correção do seu valor.

Para a localização da fonte, cada valor  $\delta_i$  obtido de (2.5) será comparado à diferença das distâncias do emissor ao sensor de referência ( $d_R$ ) e ao  $i$ -ésimo sensor ( $d_i$ ), a qual pode ser obtida usando o modelo matemático  $h$ , dado por:

$$\begin{aligned} h(P_e, P_R, P_i) &= d_R - d_i \\ &= \|P_R - P_e\| - \|P_i - P_e\| \end{aligned}$$

onde  $P_e$ ,  $P_R$  e  $P_i$  são os vetores com as respectivas coordenadas cartesianas do emissor, sensor referencial e do  $i$ -ésimo sensor, enquanto a norma  $\|\cdot\|$  é a euclidiana.

O problema resume-se, então, a um de otimização convexa, já que se trabalha apenas com distâncias. A estimativa da posição do emissor é obtida por:

$$\begin{aligned} P_e^* &= \arg \min_{P_e} \sum_{i \neq R} (\delta_i - h(P_e, P_R, P_i))^2 \\ &= \arg \min_{P_e} \sum_{i \neq R} (c\hat{\tau}_i - h(P_e, P_R, P_i))^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

## 2.3 Solução do problema de otimização

A otimização da Eq. (2.7) foi realizada de duas formas. A primeira foi por meio da implementação de um filtro de partículas, mais conhecido como otimização por Monte Carlo Sequencial, onde uma distribuição de probabilidade da posição do emissor é gerada a cada iteração. Idealmente, cada distribuição é sucessivamente melhor do que a anterior [17]. A segunda utiliza um algoritmo estocástico que segue o gradiente da função custo (2.7), beneficiando-se da natureza convexa do problema.

### 2.3.1 Monte Carlo Sequencial

O filtro de partículas, mais conhecido como algoritmo de Monte Carlo Sequencial, atualiza sequencialmente a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória de interesse. O algoritmo implementado nesse problema se resume aos seguintes passos:

1. Distribuir as  $N$  partículas uniformemente espaçadas dentro de um hexaedro regular com largura  $W$ , comprimento  $L$  e profundidade  $D$ ;
2. Definir a constante de tremulação  $C_Q$  a fim de calcular a covariância de movimento aleatório,  $\bar{Q} = C_Q/k^2$ , a cada iteração;
3. Para iteração  $k = 1, 2, \dots$ , até satisfazer a condição de parada:
  - (a) Calcular os pesos das partículas. Neste trabalho, utilizamos:

$$\begin{aligned} w^j &= \frac{1}{f(P^j)} \\ f(P^j) &= \sum_{i \neq R} (\delta_i - h(P^j, P_R, P_i))^2 \end{aligned}$$

com a normalização:

$$w^j = \frac{w^j}{\sum_{i=1}^N w^i}$$

(b) Obter a estimativa da localização do emissor na iteração  $k$ :

$$P_e^*(k) = \sum_{j=1}^N w^j P^j$$

(c) Fazer a reamostragem da população de partículas de acordo com os pesos calculados no passo anterior, ou seja:

$$P_{k+1}^j \sim p(P_{k+1}^j | P_k) \quad \forall j \in [1, N]$$

(d) Implementar a movimentação aleatória na vizinhança de cada partícula:

$$P^j = P^j + m$$

$$m \sim N(0, \bar{Q})^3$$

### 2.3.2 Algoritmo gradiente de descida mais acentuada

O algoritmo gradiente de descida mais acentuada (*steepest descent algorithm*) atualiza os parâmetros da função a ser minimizada na direção contrária ao vetor gradiente. Para o problema de otimização descrito em (2.7), considerando que  $w_k$  é a estimativa da posição do emissor na iteração  $k$ , o algoritmo se resume aos seguintes passos:

1. Inicializar o vetor  $w$ , por exemplo em  $[\frac{W}{2}, \frac{L}{2}, \frac{D}{2}]$ ;
2. Para iteração  $k = 1, 2, \dots$ , até satisfazer condição de parada:
  - (a) Calcular o gradiente no ponto  $w_k$  da função  $f$ , ou seja,

$$\begin{aligned} \nabla f(P) &= \nabla_P \sum_{i \neq R} (\delta_i - h(P, P_R, P_i))^2 \\ &= -2 \sum_{i \neq R} (\delta_i - h(P, P_R, P_i)) \nabla_P h(P, P_R, P_i) \end{aligned}$$

onde

$$\begin{aligned}\nabla_P h(P, P_R, P_i) &= \nabla_P (\|P_R - P_e\| - \|P_i - P_e\|) \\ &= \frac{P - P_R}{\|P_R - P\|} - \frac{P - P_i}{\|P_i - P\|}\end{aligned}$$

(b) Atualizar a estimativa da posição do emissor por:

$$w_{k+1} = w_k - \mu \nabla f(P)$$

O passo de atualização  $\mu$  pode ser calculado usando o algoritmo de otimização em linha *backtracking*, sujeito às condições de Wolfe [18].

## Capítulo 3

# Translação e Transformação da Rede Sensorial

Sob condições ideais, é possível a localização precisa de emissores acústicos com o uso dos algoritmos descritos no capítulo anterior. Porém a inclusão dos efeitos do ambiente submarino traz problemas significativos.

Como analogia, pode-se imaginar a localização 2-D de uma pessoa falando dentro de uma casa. A posição verdadeira dessa pessoa está dentro de um quarto, com único acesso por um corredor que leva a outros quartos. Se as paredes dessa casa são revestidas de isolantes acústicos perfeitos, então as ondas sonoras só terão passagem por portas e corredores. Imagine agora outra pessoa que está tentando localizar esse amigo locutor somente pelo som de sua voz. Se aquela pessoa estiver em outro quarto conectado ao mesmo corredor, necessitará se movimentar para descobrir a localização precisa do locutor.

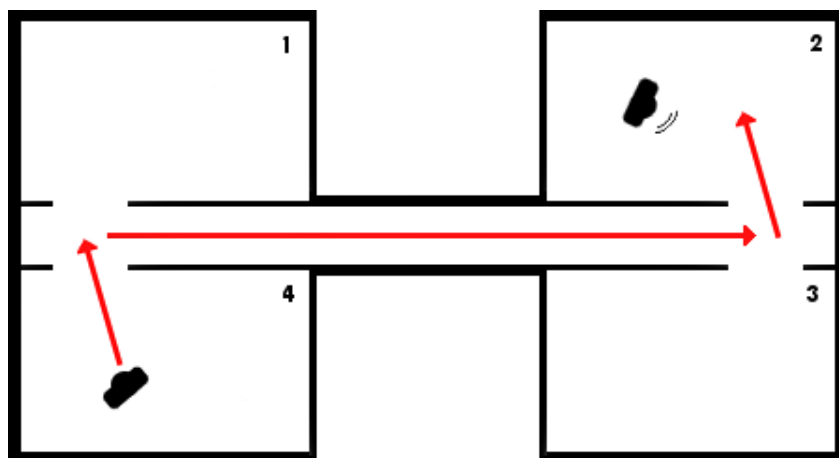


Figura 3.1: Localização 2-D de um locutor via movimentos sucessivos do ouvinte, gerando estimativas cada vez mais precisas

No exemplo da Fig. 3.1, na posição inicial da pessoa que busca seu amigo, a sua melhor estimativa está no corredor em frente à porta do seu quarto. Após se mover até esse ponto, a sua estimativa é atualizada, pois percebe que o som vem do outro lado do corredor. Chegando a este novo local, atualiza uma última vez para o quarto correto de onde o seu amigo enuncia. Da mesma forma, a localização acústica submarina pode ser substancialmente melhorada com poucos, embora importantes, movimentos.

No caso real de localização acústica submarina, o preciso sistema auditivo humano é substituído por uma rede de sensores móveis. As paredes impenetráveis correspondem ao conjunto de obstáculos acústicos. Os corredores e a passagem representam o sinal que de fato chega a cada sensor, e o amigo falante representa a fonte acústica desconhecida.

Um dos obstáculos acústicos que podem ser atenuados com movimentos sucessivos da rede sensorial é o ruído intrínseco do ambiente, uma vez que este apresenta correlação positiva com a distância. Deve-se observar que, quanto maior a distância entre um sensor e a fonte, pior a qualidade da medição, assim como, quanto maior a distância entre os pares de sensores, pior a estimativa da TDoA. Uma melhora substancial pode ser obtida usando um sistema de realimentação que usa sucessivas estimativas da posição da fonte de interesse para a aproximação da rede à mesma, resultando em estimativas cada vez melhores. A aproximação dos sensores entre si também pode diminuir o efeito do ruído ambiente.

A introdução de um método evolutivo, no entanto, traz um problema. Como já foi descrito anteriormente, cada estimativa da TDoA serve pra estimar o ângulo de chegada do sinal emitido ao par de sensores. É a análise de todos os ângulos de chegada, em conjunto com a posição de cada sensor, que torna possível a localização do emissor acústico. Se todos os sensores se aproximarem entre si a fim de reduzir o efeito do ruído, é provável que o ângulo de chegada relativo a um par de sensores seja muito parecido com os de outros pares, aumentando a redundância dos dados e tornando a análise do conjunto mais difícil. Voltando à analogia, seria como se a pessoa que busca o amigo perdesse a audição de um dos seus ouvidos.

Considere, por exemplo, que o emissor e todos os sensores estão em uma mesma reta. Nesse caso, o ângulo de chegada de todos os pares será 0 ou  $\pi$  radianos, dependendo da referência de medida. Deve ficar claro que qualquer posição do emissor que estiver nesse caminho retilíneo entre os sensores satisfaz a Eq. (2.7), o que demonstra a indeterminação do problema de localização. É natural conjecturar que espalhar os sensores a fim de diversificar os valores do ângulo de chegada pode reduzir a redundância da rede de sensores, melhorando a estimativa da posição do

emissor. É de se notar, porém, que esse espalhamento pode aumentar a distância entre os sensores, o que piora o efeito de ruído ambiente. Ou seja, as soluções dos dois problemas citados são naturalmente antagônicas.

Por fim, o canal acústico submarino é mais complicado do que o da atmosfera. Há maior variação da velocidade do som na água, pois essa depende de diversos fatores, como profundidade, salinidade, temperatura e correntes marinhas. A atenuação do sinal emitido aumenta com a distância entre os sensores e o emissor acústico, uma vez que, além de haver maior dispersão, uma maior parte da sua energia é absorvida pelas partículas do meio. Assim, a intensidade do som é rapidamente atenuada na água, e quanto mais afastados estiverem a fonte e os sensores, maior será o efeito do canal nos sinais medidos.

Resumindo, temos os seguintes problemas associados à localização de um emissor acústico em ambiente submarino:

1. O efeito do ruído ambiente aumenta com a distância entre os sensores, prejudicando as medições nos sensores do sinal emitido;
2. A estimativa da posição da fonte piora com a redundância entre os valores do ângulo de chegada do sinal emitido nos pares de sensores;
3. O canal acústico submarino é não-linear e variante no tempo, e seu efeito nos sinais medidos aumenta com a distância entre os sensores e a fonte.

Tendo em vista os problemas acima, propomos a seguinte formulação para obtenção da translação e transformação ótimas da rede sensorial:

$$\mathcal{P}^* = \arg \min_{\mathcal{P}} \sum_{i \neq j} \sum_j \left( \lambda_1 \langle P_i, P_j \rangle^2 + \lambda_2 \|P_i - P_j\|^2 \right), \quad P_i, P_j \in \mathcal{P}, \quad (3.1)$$

$$i, j \in [1, \|\mathcal{P}\|],$$

onde  $\mathcal{P}$  é o conjunto de posições cartesianas dos sensores, referenciadas pela estimativa da localização do emissor. Ou seja, a posição do emissor é a origem nesse espaço cartesiano. As constantes de proporcionalidade,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , serão estudadas em seções posteriores, a fim de selecionar seus valores apropriados.

Observando a equação acima, verifica-se que há dois termos relativamente opostos que a compõem. O primeiro termo, com peso  $\lambda_1$ , tende a aumentar as distâncias entre os sensores para que os ângulos entre eles, referenciados pela estimativa da posição do emissor acústico, sejam maiores. O segundo termo, com peso  $\lambda_2$ , tende a diminuir essa mesma distância, para que o efeito do ruído estatisticamente inde-

pendente seja atenuado. O efeito final é um movimento não paralelo dos sensores, na superfície de um cone, onde os dois termos são satisfeitos simultaneamente. Note que naturalmente essa equação resolve os primeiros dois problemas mencionados. Por consequência do movimento resultante, resolve-se também o terceiro problema.

É possível mostrar que, para quatro sensores móveis num espaço tri-dimensional, uma solução que diminui o produto interno da Eq. (3.1) é o objeto chamado *3-simplex* [19]. O *n-simplex*, para toda distância do seu centro e qualquer vértice (onde situa-se um dos sensores), minimiza a soma dos produtos internos dos vetores associados a todos os ângulos. Existe também uma maneira fácil de obter este objeto matemático, conforme descrito a seguir.

As coordenadas do *n-simplex* podem ser extraídas, utilizando suas duas características principais [19]:

1. Em um *simplex* regular, as distâncias dos vértices até o centro são idênticas;
2. Considerando essa distância como unitária, o produto interno entre quaisquer pares de vértices é  $-1/n$ .

Logo, se considerarmos o espaço tri-dimensional e  $n = 3$ , podemos arbitrar que o centro está na origem e que o primeiro vértice está em  $(1, 0, 0)$ , tornando o *3-simplex* unitário. Pela segunda propriedade do objeto, a primeira coordenada de todos os outros três vértices é igual a  $-1/3$ . Ou seja, temos vértices com as seguintes coordenadas:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix}$$

Neste momento, podemos repetir os mesmos passos até descobrir o valor de todas as variáveis. Por exemplo, podemos arbitrar que  $z_1 = 0$ , fazendo com que  $y_1$  possa ser calculado pelo uso do teorema de pitágoras. Novamente pela segunda propriedade do *simplex*,  $y_2$  e  $y_3$  podem ser calculados utilizando o valor do produto interno. Alternamos o emprego da primeira e da segunda propriedade, até obtermos os quatro vetores:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ \frac{2\sqrt{2}}{3} \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ -\frac{\sqrt{2}}{3} \\ \frac{\sqrt{6}}{3} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ -\frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{\sqrt{6}}{3} \end{pmatrix}$$



Esses vetores podem ser guardados, ao invés de calculados repetidamente, economizando tempo de processamento.

O procedimento acima gera um  $3$ -*simplex* unitário com centro na origem cartesiana. Para obter esse objeto centrado em qualquer ponto e de tamanho arbitrário, basta fazer a seguinte operação para cada um dos vetores:

$$v'_i = R_\theta v_i + o_c, \quad \theta \in [0, 2\pi)^3, \quad (3.2)$$

onde  $R_\theta$  é uma matriz de rotação e  $o_c$  é o ponto central que vai servir como nova origem do *simplex*.

É importante destacar que com quatro sensores é possível obter um arranjo geométrico no qual o produto interno dos vetores de coordenadas dos sensores adjacentes é nulo e o dos sensores opostos é  $-1$ . Do ponto de vista de eliminação de redundâncias, esse arranjo é excelente, porém os quatro pontos se localizam sobre um mesmo plano, enquanto o *simplex* cria um volume fechado. Como visto no exemplo 2-D de [6], embora a precisão das estimativas de TDoA seja melhor para essa configuração para posições próximas da rede de sensores, ela se degrada muito ao se distanciar dos sensores, conforme ilustrado na Fig. 3.2(a), diferentemente do observado em de uma rede volumétrica, com resultados ilustrados na Fig. 3.2(b).

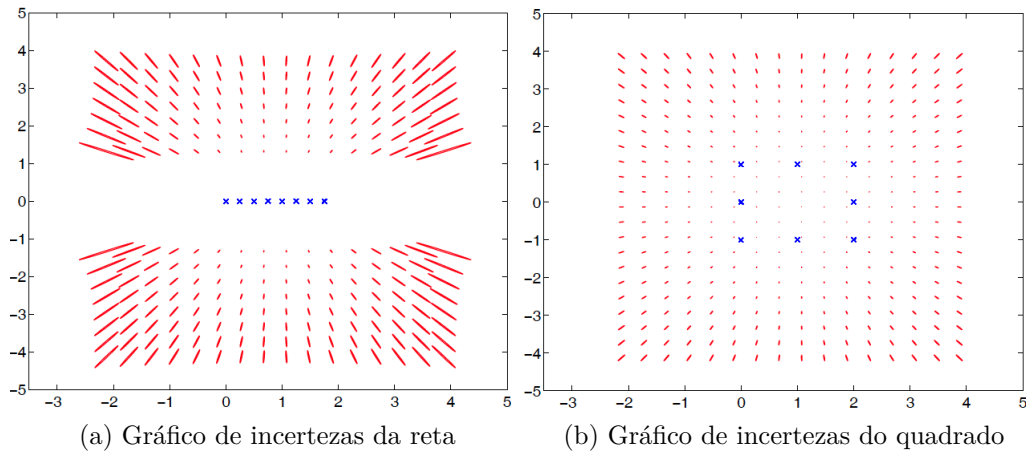


Figura 3.2: Comportamento de incertezas distintas entre redes de sensores de geometrias distintas.

Também é possível que com três sensores, todos os respectivos produtos internos sejam nulos, porém novamente esta configuração não é suficiente para a criação de um volume fechado como desejado (seria criado um plano). Para um número de sensores maior do que quatro, não existe o *simplex* no  $\mathbb{R}^3$ . É necessário resolver a equação de otimização definida em (3.1). Logo, prefere-se utilizar somente quatro

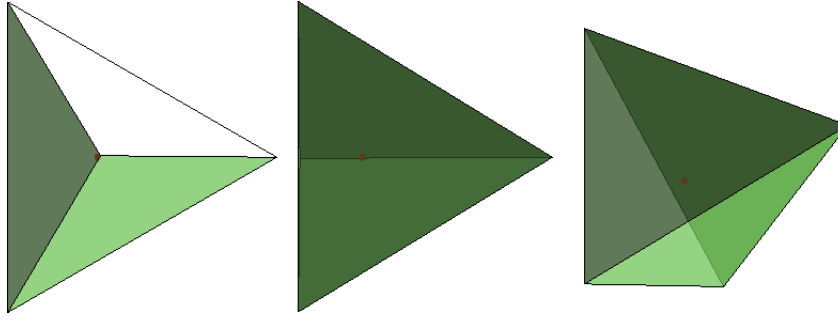


Figura 3.3: Vista superior, de lado, e 3D de um simplex centrado em posição estimada de emissor.

sensores nesse formato ideal, com volume não nulo, diminuindo progressivamente a distância até a localização estimada da fonte acústica. Na Fig. 3.3, o ponto vermelho representa a posição da fonte acústica estimada pelo algoritmo desenvolvido. Pode se observar que, em três dimensões, o *simplex* é um tetraedro regular centrado na posição do emissor estimado previamente. Note também que qualquer outro arranjo geométrico dos sensores reduziria a redundância da medida de pelo menos um par de sensores, mas aumentaria a redundância entre outros pares de sensores. Como quatro sensores são essenciais para a criação de um volume fechado, a perda de eficiência de qualquer par é muito prejudicial nesse caso, eliminando os benefícios da redundância diminuída nos demais pares de sensores.

### 3.1 Descrição do movimento do *simplex* de quatro sensores

As etapas ordenadas para a obtenção de um *simplex* não fornecem informação a respeito de como fazer o movimento dos sensores, seja ele dentro de uma iteração, ou entre sucessivas iterações. Infelizmente, ao preferir o *simplex* à Eq. (2.4), há perda de informação, especialmente aquela referente ao próprio movimento. Torna-se necessária, então, a inclusão de regras objetivas adicionais.

Distinguem-se dois tipos de movimento: o movimento transitório, que é o movimento contínuo feito para a transição entre um estado e outro, dentro de uma mesma iteração; já o movimento iterativo, é o movimento discreto que é feito ao observar um estado e outros sucessivos, após o movimento transitório.

O movimento iterativo é o mais simples e pode ser descrito por uma máquina de estados. Consiste das seguintes regras:

1. Se a posição estimada do emissor acústico estiver fora do volume fechado

descrito pela rede sensorial, então, com essa rede, forma-se um *simplex* em torno desse ponto, com volume aproximadamente igual à forma anterior. Os pontos exatos de cada sensor são determinados pelo movimento transitório;

2. Se a posição estimada do emissor acústico já estiver contida no volume fechado descrito pela rede sensorial, forma-se um novo *simplex* em torno desse ponto, mas com volume diminuído. Assim, a rede gradativamente se aproxima do emissor acústico;
3. Se na próxima iteração não for possível manter a posição estimada no volume fechado descrito pela rede sensorial, aproxima-se a rede desse ponto, enquanto simultaneamente o volume é aumentado. Isso é feito porque, quanto mais longe estiver a posição estimada, pior será o desempenho da rede, devido à redundância. O aumento do volume da rede sensorial torna-se necessário para diminuir essa redundância.

É importante, na terceira regra, notar a existência de um volume máximo a partir do qual a formação do *simplex* não é mais possível. Esse limite superior não é arbitrário, e depende basicamente das limitações da comunicação sem fio entre os sensores. Como o ambiente submarino resulta em maiores atenuações que o ambiente terrestre [20], é necessário limitar a distância máxima entre os sensores. Assim, define-se essa distância utilizando um *simplex* máximo<sup>1</sup>.

O movimento transitório é contínuo e descreve a transição de um estado para outro por meio da otimização descrita a seguir. Sejam  $(s_1, s_2, s_3, s_4)$  as posições dos sensores e  $(s_1^*, s_2^*, s_3^*, s_4^*)$  as posições ótimas do próximo estado. A otimização do movimento até posições próximas é feita definindo-se uma função custo de menor esforço, dada por:

$$F(s_i, s_j, s_k, s_l) = \|s_1 - s_i\| + \|s_2 - s_j\| + \|s_3 - s_k\| + \|s_4 - s_l\| \quad (3.3)$$

$$\{s_1^*, s_2^*, s_3^*, s_4^*\} = \arg \min_{\text{Perm}(i,j,k,l)} F(s_i, s_j, s_k, s_l) \quad (3.4)$$

Se as posições do próximo estado tiverem sido calculadas anteriormente pelo movimento iterativo, via a criação do *simplex*, então a otimização será discreta e encontrará simplesmente quais sensores estarão em determinadas posições, a fim de minimizar o esforço utilizado para tal translação. Como há somente quatro sensores

---

<sup>1</sup>Nas simulações realizadas neste trabalho, arbitrou-se a distância máxima entre sensores, uma vez que não tínhamos disponível o valor exato desse parâmetro referente a um sistema de comunicação

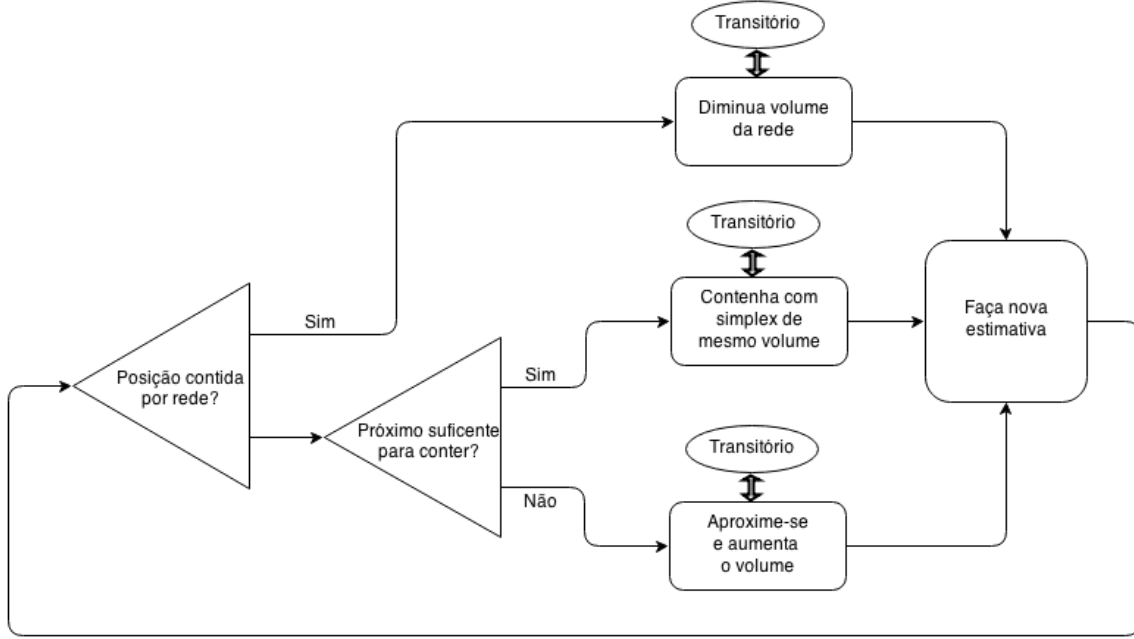


Figura 3.4: Diagrama da máquina de estado do movimento iterativo. Note que o movimento transitório é uma pequena parte do iterativo.

nessa aplicação, seriam necessárias somente  $4! = 24$  tentativas na busca exaustiva para encontrar a solução ideal. Por outro lado, se o algoritmo incluir a rotação livre do *simplex*, feito via Eq. (3.2), a otimização se torna mista (discreta-contínua), tornando a obtenção da solução mais difícil. A solução então é dada por:

$$F(s_i, s_j, s_k, s_l, \theta) = \|s_1 - s_i(\theta)\| + \|s_2 - s_j(\theta)\| + \|s_3 - s_k(\theta)\| + \|s_4 - s_l(\theta)\| \quad (3.5)$$

$$\{s_1^*, s_2^*, s_3^*, s_4^*\} = \arg \min_{\text{Perm}(i,j,k,l), \theta \in [0, 2\pi]^3} F(s_i, s_j, s_k, s_l, \theta) \quad (3.6)$$

Nesse caso, mais adequado a um ambiente com obstáculos físicos, o próprio tetraedro que representa a rede sensorial pode ser girado em torno da posição estimada do emissor acústico. Assim, o movimento pode ser minimizado via rotações adequadas, e depois ainda mais por meio de escolhas corretas de pares de sensores e posições próximas. Porém, a resolução do problema resultante de otimização mista não será feita neste trabalho.

O diagrama da Fig. 3.4 mostra as regras de decisão do movimento iterativo, onde o movimento transitório é somente uma parte, embora importante, do processo. Note que o passo de medição e estimativa da posição do emissor acústico, objetivo principal de estudo dessa dissertação, também faz parte desse mesmo processo iterativo.

## 3.2 Paralelização do código de busca

Um dos objetivos do uso de uma rede móvel de sensores é o aumento da velocidade de localização da fonte sonora, que pode ser atingido através do aumento da quantidade de dados e da mobilidade da rede. Com a natureza autônoma da rede sensorial, é necessário que o processamento desses dados seja feito pela própria rede. Torna-se então importante a discussão da implementação eficiente do sistema através da paralelização do código de busca pelos nós existentes na rede sensorial.

Admite-se que a comunicação submarina sem fios é atualmente ainda um problema, pois a comunicação entre nós com muita informação requer banda larga, o que implica transmitir sinais de altas frequências, que são rapidamente atenuadas no ambiente submarino. Por isso, é necessário o uso de um tamanho máximo de *simplex*, para facilitar a comunicação entre sensores diferentes em distâncias adequadas. Logo, quanto maior a largura da banda, menor será o tamanho permitido da rede sensorial. Porém, como será visto nesta seção, não é necessária comunicação entre os sensores com grande quantidade de dados.

Há duas possibilidades de paralelização do processamento de dados do sistema, uma para cada tipo de algoritmo de localização utilizada. Para a localização via simulação de Monte Carlo Sequencial, divide-se o volume de busca em partições iguais para cada sensor, sendo efetuada uma pequena simulação de Monte Carlo Sequencial dentro do espaço de busca correspondente. Ao finalizar as simulações de todos os sensores, o resultado ótimo de cada partição é enviado para o sensor designado como líder. O sensor líder compara os resultados e escolhe o melhor. Dessa maneira, sendo  $M$  a quantidade de sensores, o tempo necessário para executar uma simulação de Monte Carlo no espaço inteiro de busca é equivalente a  $\frac{1}{M}$  do tempo necessário para efetuar a simulação com a quantidade total de partículas Monte Carlo, porém feito por somente um sensor de cada vez. Na Fig. 3.5, pode-se observar, para um exemplo com quatro sensores, o espaço de busca sendo dividido em quatro quadrantes. Note que não há necessidade de grande largura de banda, uma vez que a comunicação somente é feita no início e no final da simulação. Se necessário, é possível fazer a aproximação dos diversos sensores entre si nestes dois momentos.

Para localização via algoritmo de gradiente descendente, pela natureza do algoritmo, não é possível paralelizar localmente o processamento. A atualização da estimativa da posição por gradiente requer os valores dessa estimativa em iterações passadas, ou seja, a otimização é feita sequencialmente. Logo, prefere-se dividir o espaço de busca em zonas de otimização independentes. Cada sensor recebe uma partição igualitária do espaço de busca e inicializa o algoritmo com uma estimativa inicial

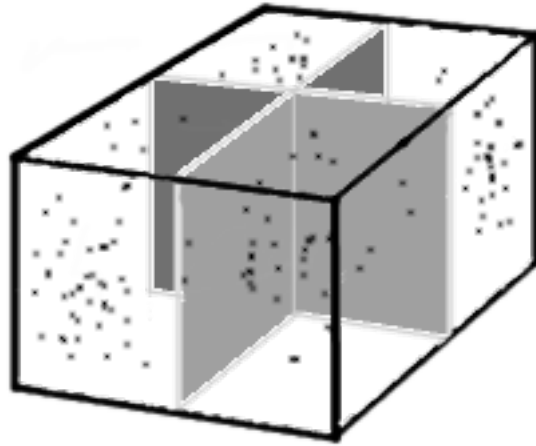


Figura 3.5: Divisão do espaço de busca em partições iguais para paralelização do método de busca.

dentro do seu próprio subespaço. Uma analogia que pode ser feita é com a busca por comida pelas formigas. Uma formiga não faz a busca por comida pela colônia inteira. Ao invés disso há um grande número de formigas espalhadas, que transmitem via sinais químicos os resultados de sua busca. No caso dos sensores subaquáticos, o resultado de otimização de cada nó é enviado para um sensor líder para verificação final. Novamente deve ficar claro que não há necessidade de grande comunicação entre as partes distintas durante o estágio de otimização em si. A troca de dados é feita em intervalos de tempos pré-determinados.

# Capítulo 4

## Simulação em Ambiente Ideal na Presença de Ruído

Neste capítulo, apresentamos os resultados de uma simulação do sistema de localização em ambiente ideal, na qual foram desprezados os efeitos do canal acústico submarino e da reverberação, as propriedades específicas do sinal acústico da fonte e as limitações mecânicas do posicionamento dos sensores. O objetivo desse experimento foi a averiguação do funcionamento do conjunto de algoritmos e sua robustez em relação à presença de ruído.

Em resumo, seguem as considerações principais adotadas na simulação:

1. Como não há reverberação, o sinal  $x_i(t)$  que chega ao  $i$ -ésimo sensor é uma cópia atenuada e atrasada do sinal da fonte,  $s_f(t)$ , somada a ruído branco  $n_i(t)$ , ou seja:

$$x_i(t) = \frac{\gamma}{\delta_{if}} s_f(t - \tau_i) + n_i(t) \quad (4.1)$$

onde  $\gamma$  é uma constante de proporcionalidade e  $\delta_{if}$  é a distância entre o sensor e a fonte acústica;

2. Todos os sensores são inicialmente posicionados a fim de maximizar a equação de translação definida em (3.1), ou seja, tornando todas as medidas redundantes e, portanto, começando com a pior geometria possível. O objetivo desse procedimento é verificar se o sistema é capaz de melhorar o seu desempenho;
3. Todos os sensores são acionados por um temporizador único, a fim de obter sinais referentes a um mesmo evento. O fim do registro também é feito por esse mesmo temporizador;
4. Há uma distância máxima entre a fonte acústica e a rede sensorial, para a qual

a localização é sempre possível.

Podemos estimar a distância máxima entre fonte e sensores considerando as potências médias dos sinais (ao invés de seus valores instantâneos no tempo). Da Eq. (4.1), temos:

$$E_i = \frac{\eta}{\delta_{if}^2} E_f + E_N \quad (4.2)$$

onde  $\eta = \gamma^2$ .

Expressando a potência de cada sinal em relação à potência do ruído, temos:

$$\begin{aligned} E_i &= \kappa_i E_N \\ E_f &= \kappa_f E_N \end{aligned}$$

onde  $\kappa_i$  e  $\kappa_f$  são constantes de proporcionalidade. Obtemos então a seguinte estimativa para a distância máxima entre sensores:

$$\delta_{if} = \sqrt{\eta \frac{\kappa_f}{\kappa_i - 1}} \quad (4.3)$$

Considerando que a SNR próximo à fonte acústica é igual a 80 dB, que a SNR mínima de discernimento no sensor é 10 dB e que  $\eta = \frac{1}{4\pi}$ , a distância máxima permitida é:

$$\delta_{if} = \sqrt{\frac{10^8}{4\pi(10^1 - 1)}} = \sqrt{\frac{10^8}{36\pi}} \approx 940.32\text{m}$$

Note que considerar  $\eta = \frac{1}{4\pi}$  supõe que o espalhamento do som é feito de forma esférica e despreza por completo a absorção do som pela água do mar. O decaimento do nível do sinal ocorre por simples espalhamento do mesmo em superfícies cada vez maiores. A perda por absorção será vista em seção posterior.

Uma métrica útil para a avaliação do algoritmo é a quantidade média de iterações que a rede precisa para estimar bem a posição da fonte acústica, para a distância máxima determinada acima. Encontrada com razoável precisão a localização da fonte acústica, a rede sensorial pode se aproximar do mesmo para fazer uma medida melhor com menor efeito do ruído. Logo, outra métrica de desempenho possível é a diferença entre a estimativa da posição da fonte acústica e a posição real da mesma após suficiente aproximação, por meio das translações em iterações anteriores, da rede de sensores. Por fim, uma outra medida de desempenho é a porcentagem de acertos obtidos pelo sistema após uma quantidade substancial de movimentos



iterativos.

A simulação ideal descrita acima foi realizada no ambiente MATLAB ®. O pseudocódigo correspondente é descrito no Apêndice A.

## 4.1 Resultados

De acordo com as regras mostradas acima, foi feita uma simulação do sistema de localização utilizando uma rede móvel de sensores. Como critério de avaliação de desempenho, foi usada a distância entre a estimativa gerada pelo sistema desenvolvido e o ponto real do emissor acústico. Para melhor visualização, os gráficos dos resultados mostram o logaritmo dessa distância, ou seja:

$$\epsilon_i = \log_{10} (\|e_i - P_f\|) \quad (4.4)$$

onde  $\epsilon_i$  é o erro da estimativa  $e_i$  do  $i$ -ésimo movimento iterativo e  $P_f$  é a posição real do emissor acústico. Note que essa medida de desempenho não pode ser utilizada em uma aplicação real do sistema, por desconhecimento da posição verdadeira da fonte.

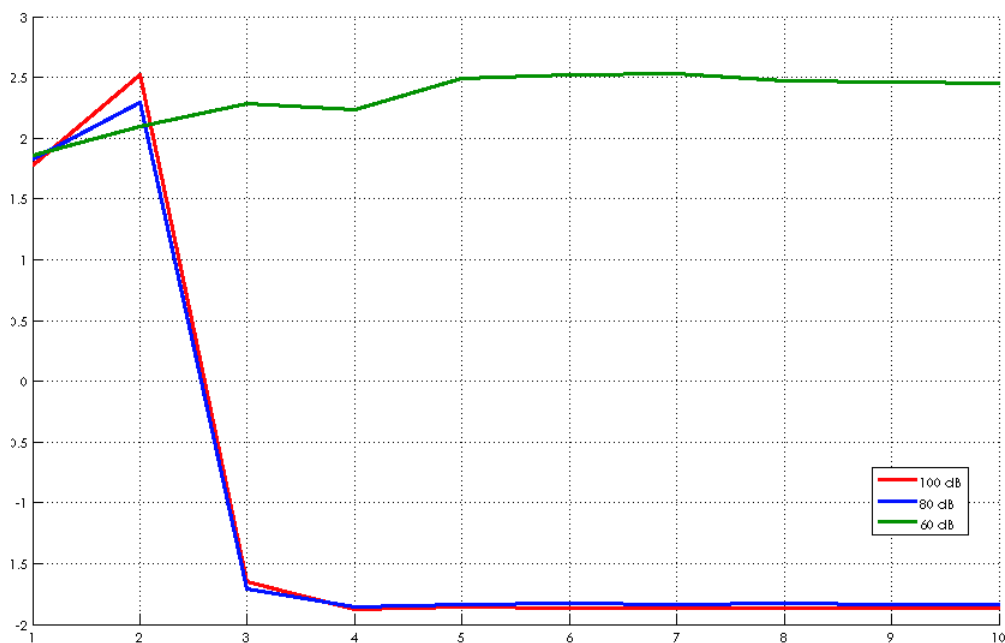


Figura 4.1: Desempenho por movimento iterativo do algoritmo em um cubo de busca de 1000 m de lado.

Os resultados mostrados na Fig. 4.1 foram obtidos calculando-se os valores médios

das distâncias de 50 rodadas independentes e aleatórias da simulação descrita anteriormente para SNR de 60 dB, 80 dB e 100 dB (totalizando 150 rodadas). Nessa figura, vemos que as medidas de desempenho iniciais e as obtidas após o primeiro movimento não são boas. Somente após a terceira estimativa, a localização da fonte emissora começa a ser consistente para SNR igual a 80 dB e a 100 dB. Eventualmente, ao piorar a razão sinal ruído, a localização se torna impossível, como ocorre no caso simulado, no qual o cubo de busca tem lados de tamanho 1000 m, para SNR igual 60 dB.

A Eq. (4.3) prevê que a diminuição do tamanho do cubo de busca permite que a localização correta de emissores para razões sinal ruído menores seja mais provável. Foi feita então outra simulação, semelhante à anterior mas com um cubo de busca de 400 m de lado. Como pode ser observado na Fig. 4.2, os resultados obtidos são similares aos da Fig. 4.1 quando há sucesso na busca, porém o insucesso da localização é observado para SNR igual a 40 dB, mais baixo do que o anterior. Para níveis de SNR abaixo desse valor, o algoritmo tende a fornecer estimativas aleatórias, provocando movimentos aleatórios da rede sensorial. Para evitar tais movimentos, a inclusão de um detetor de sinais não ruidosos é necessária, o que não foi feito nesta simulação ideal. No próximo capítulo, será discutida a implementação desse detetor.

A localização correta, em média, foi feita após apenas três iterações. É de se ressaltar, porém, que nessa simulação os sensores móveis não tinham limite de velocidade nem impedimento de reposicionar-se devido a obstáculos. Isso permitiu que a rede se arranjasse de forma ideal imediatamente após cada estimativa. Se um limite de velocidade fosse considerado, é provável que a rede não conseguisse cercar a posição estimada (e, portanto, diminuir ao máximo o erro) em apenas uma iteração, o que implicaria em um número maior de movimentos iterativos até a localização final.

Em ambas as simulações, com cubos de busca de lados 400 m e 1000 m,  $\epsilon_i$  convergiu para um valor mínimo de aproximadamente  $-1.8$  no caso de localização bem sucedida. Isso quer dizer que a melhor estimativa fica a 1.5 cm da posição verdadeira do emissor de sinais acústicos. Erros menores são provavelmente difíceis de obter, exceto caso a frequência de amostragem seja aumentada. Para velocidade do som na água de 1480 m/s e frequência de amostragem de 44.1 KHz, a resolução espacial é:

$$\frac{1480 \text{ m/s}}{44100 \text{ Hz}} \approx 3.4 \text{ cm}$$

correspondendo ao resultado ótimo de convergência do sistema. Note que, partindo de um mínimo de 1.5 cm, se tentarmos aproximar na direção da posição verdadeira

do emissor acústico em mais uma unidade da resolução espacial, a nova estimativa ficaria mais distante e no lado oposto àquele em que estava anteriormente.

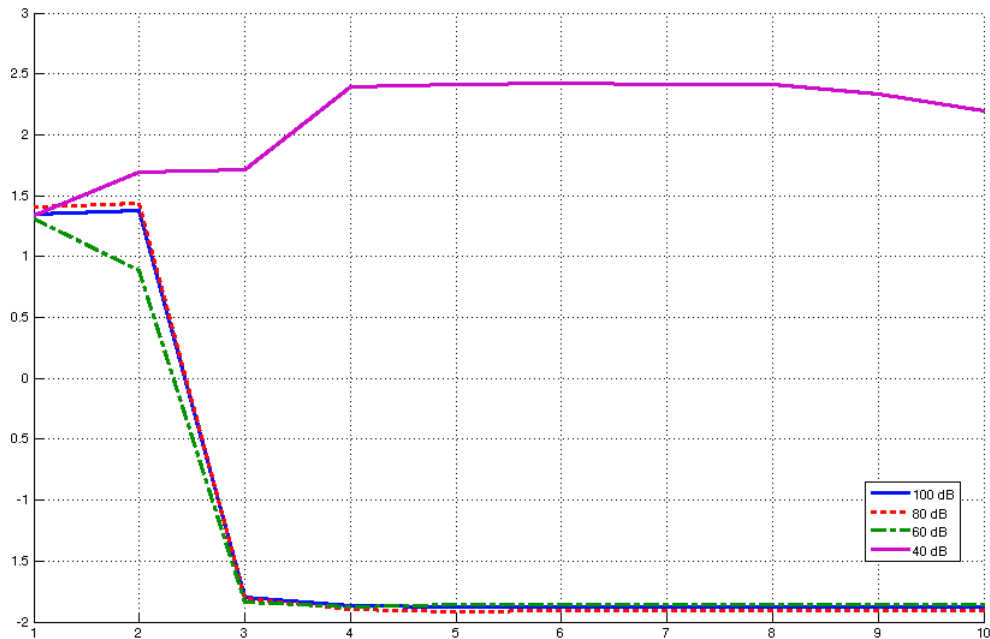


Figura 4.2: Desempenho por movimento iterativo do algoritmo em um cubo de busca de 400 m de lado.

Uma outra medida de desempenho utilizada foi a porcentagem de acertos do algoritmo. O critério de acertos e erros é definido pela distância entre as posições estimada e real do emissor acústico em um número máximo de iterações. Na simulação realizada, considerou-se que a rede sensorial conseguiu encontrar a fonte acústica quando a distância era menor que 1 m em dez movimentos iterativos ou menos. Esse tipo de resultado é adequado para a análise do efeito real da SNR sobre o desempenho do sistema.

Na Fig. 4.3, que mostra a porcentagem de acertos em relação à SNR para um cubo de busca de 1000 m de lado, vemos o efeito drástico que a SNR tem sobre o desempenho do sistema. Há um ponto crítico do gráfico onde, em apenas 10 dB de redução da SNR, o desempenho do sistema se degrada completamente. Para SNR abaixo do valor desse ponto, não há energia suficiente para os sensores captarem o sinal emitido, impossibilitando a resolução do problema de localização. Similarmente, na Fig. 4.4, observa-se o mesmo comportamento do sistema para um cubo de 400 m de lado. Conforme esperado, o desempenho do sistema se degradou para valores de SNR pouco menores que os apresentados na simulação com cubo de 1000 m de lado. Esse resultado também é útil, pois complementa as conclusões obtidas dos dados ilustrados nas Figs. 4.1 e 4.2. Nessas figuras, verificou-se que o sistema falhou com valores de SNR iguais a 60 dB e a 40 dB, respectivamente. Por outro lado,

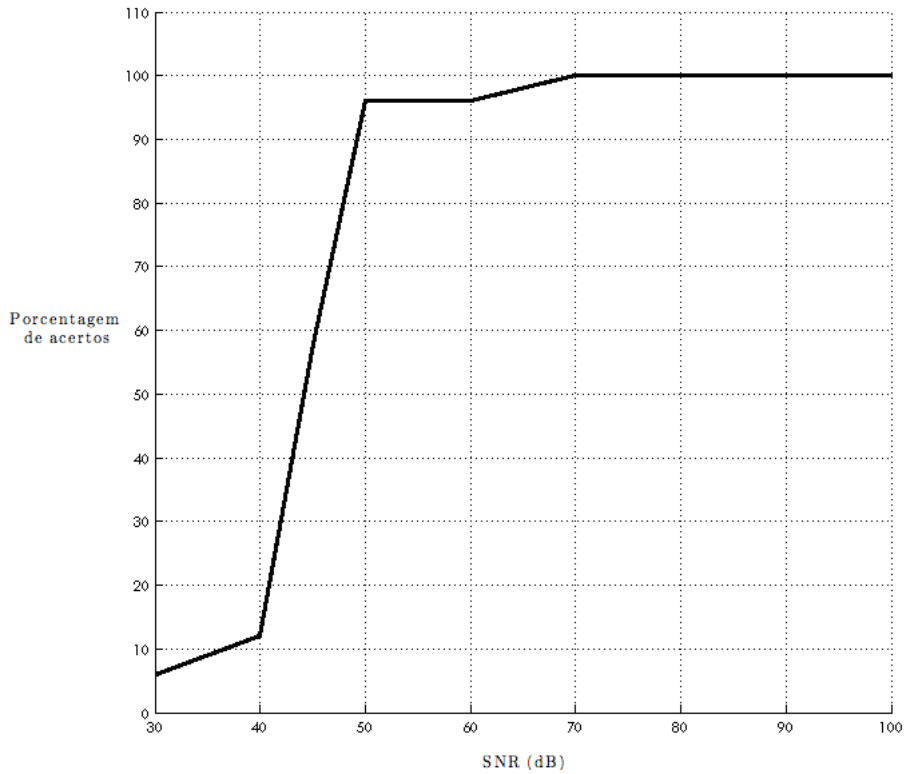


Figura 4.3: Porcentagem de acertos para diversos valores de SNR para cubo de busca de 1000 m.

as medidas de porcentagem de acertos apontam valores menores de SNR. De fato, para SNR de 60 dB e de 40 dB, respectivamente, o sistema quase não errou. Porém, embora tenha acertado em praticamente todas as rodadas, quando errou, o sistema se perdeu e gerou erros enormes. Esses erros, da ordem de 10 km, correspondem a fortes *outliers* estatísticos. O ideal para evitar esses casos é que o sistema não mova os sensores quando não conseguir detectar sinal forte o suficiente. De fato, no próximo capítulo será discutida a inclusão de um detetor de sinais não ruidosos para tais ações.

A Fig. 4.5 contém uma sequência ordenada de gráficos de porcentagem de acertos. O objetivo dessa figura é mostrar mais claramente a dependência do início do de-gradamento do sistema com o tamanho do cubo de busca. É evidente que quanto maior o cubo, mais forte deve ser o sinal do emissor para que o mesmo seja local-izado pelo sistema. Esse resultado foi gerado a partir de 50 rodadas independentes, com inicialização aleatória, para cada valor de SNR e para cada valor de distância, totalizando 3500 rodadas.

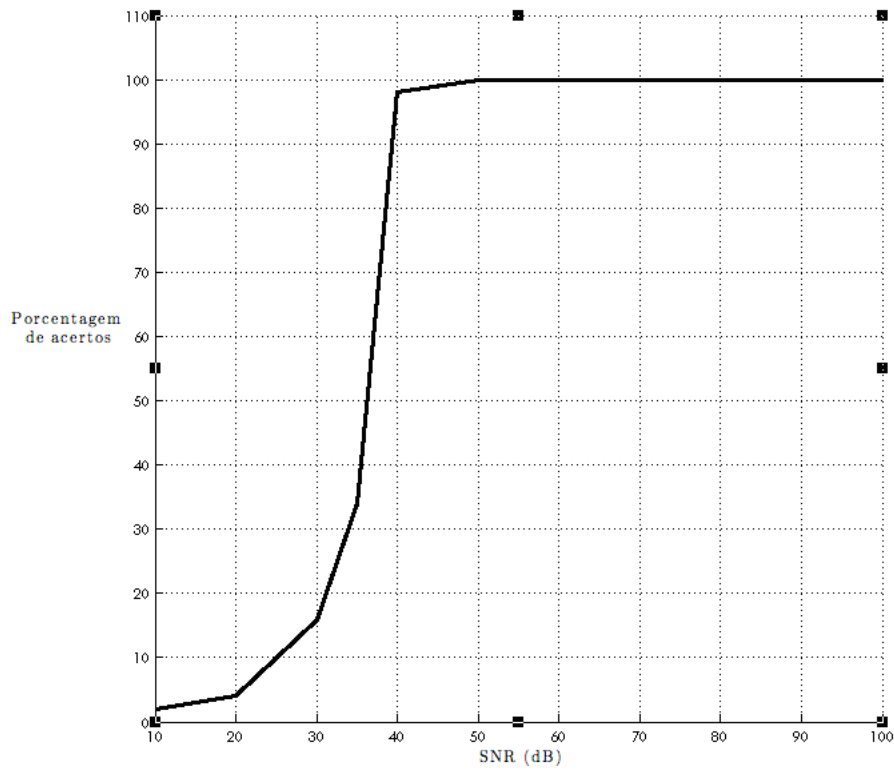


Figura 4.4: Percentagem de acertos para diversos valores de SNR para cubo de busca de 400 m.

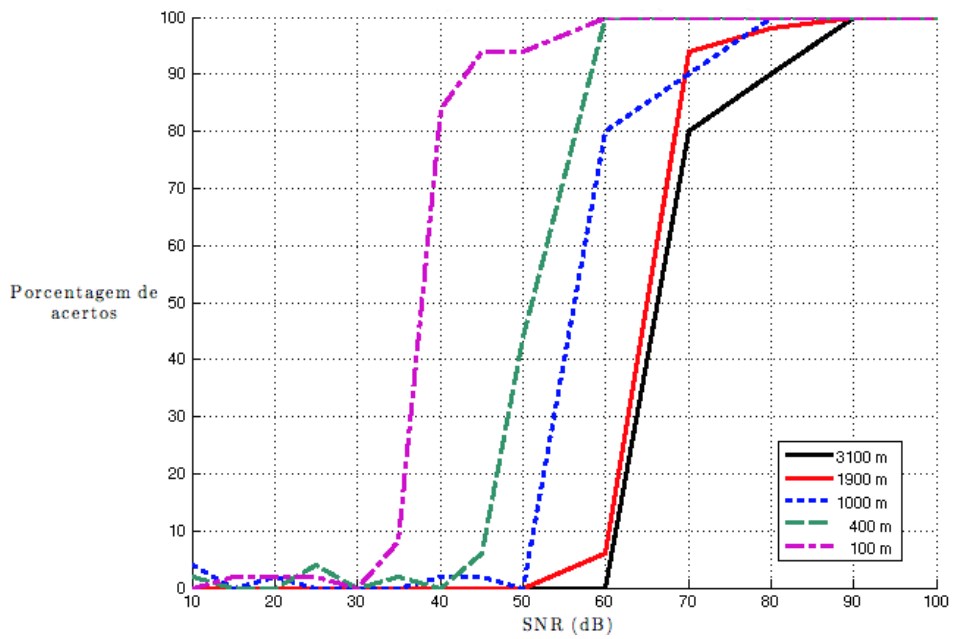


Figura 4.5: Percentagem de acertos para diversos valores de SNR e tamanhos do cubo de busca.

## 4.2 Cálculo da energia mínima do sinal emitido nos sensores

A Fig. 4.6 mostra a variação da SNR que diminui a taxa de acerto do sistema para 50% em relação ao tamanho do lado do cubo de busca. Observa-se nessa figura

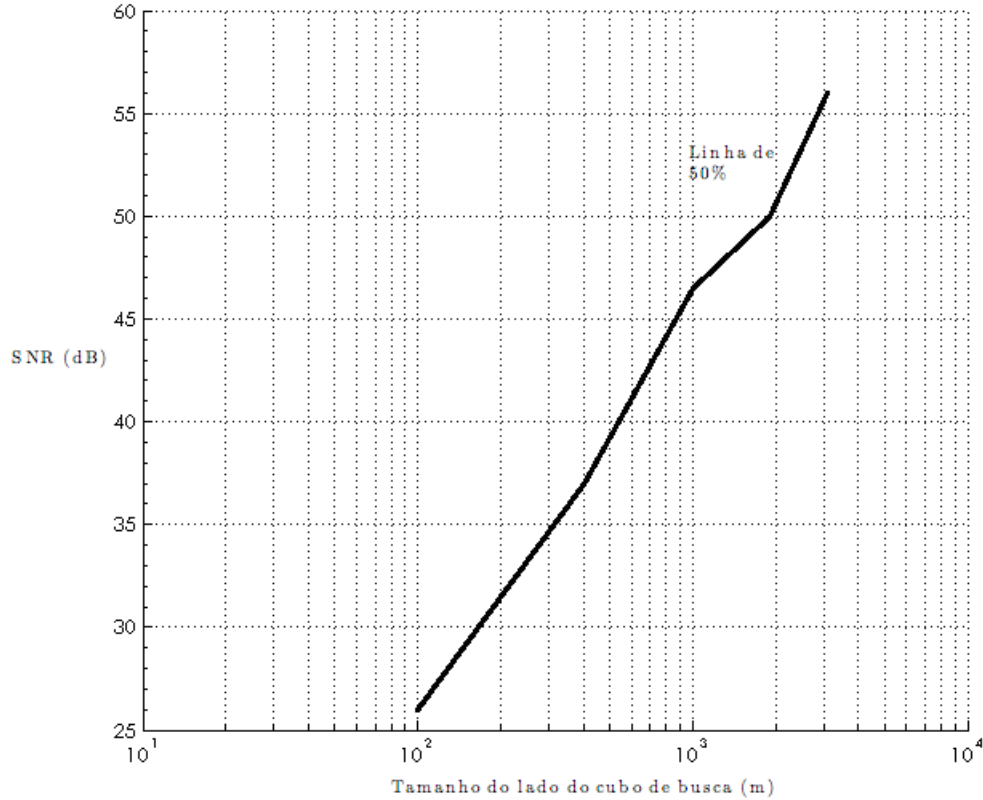


Figura 4.6: Relação entre SNR e tamanho do cubo de busca exemplificada pelo limiar de 50% de acertos.

uma curva quase linear. Como a escala usada na distância é logarítmica, pode-se concluir que a relação entre a razão sinal-ruído e o lado do cubo é aproximadamente exponencial, da forma:

$$\delta(r) = ae^{br}$$

$$r(\delta) = \frac{1}{b} \ln(\delta/a)$$

onde  $\delta$  é o tamanho do lado do cubo de busca e  $r$  é a razão sinal ruído em escala dB. A partir dos dados do gráfico da Fig. 4.6, encontramos  $a \approx 0.8831$  e  $b \approx 0.1216$ , resultando nas relações:

$$\delta(r) \approx 0.8831e^{0.1216r}$$

$$r(\delta) \approx 1.1324 \ln(8.2237\delta)$$

Como não foi investigado o comportamento do sistema para valores de SNR menores e distâncias maiores que os apresentados na Fig. 4.5, é possível que a extrapolação das funções acima para valores muito afastados dos considerados gere erros significativos.

A Fig. 4.5 indica que um aumento de 10 dB da SNR a partir do ponto de 50% de acerto é suficiente para se obter probabilidade de localização correta maior que 90%. Assim, podemos prever as condições necessárias para a aplicação real do sistema sob condições ideais por meio das equações:

$$\delta_{\max}(r) < 0.8831e^{0.1216(r-10)} \quad (4.5)$$

$$r_{\min}(\delta) > 1.1324 \ln(8.2237\delta) + 10 \quad (4.6)$$

Por exemplo, sabendo que a fonte de posição desconhecida emite sons com potência mínima de 70 dB acima do nível do ruído, então, a partir da desigualdade da Eq. (4.5), conclui-se que o cubo de busca deve ter lado menor que aproximadamente 8 km. É evidente que essas relações são resultados de um modelo simplificado, que não inclui a absorção do som pelo meio. Esse efeito será considerado no próximo capítulo.

Um resultado derivado da análise acima, que independe da absorção do som pela água do mar, é o nível mínimo de energia do sinal emitido em relação ao nível do ruído, que deve chegar em cada sensor para que o sistema consiga fazer corretamente a localização. Para obter esse dado, emprega-se a Eq. (4.3). Note que o valor do coeficiente de absorção  $\eta$ , embora altere a distância efetiva  $\delta_{if}$ , não tem efeito sobre a potência mínima do sinal na posição de cada sensor. Portanto, podemos considerar  $\eta = 1$  e utilizar o modelo simplificado obtido sem o efeito da absorção. Da Eq. (4.3), obtém-se:

$$\delta_{if} = \sqrt{\frac{10^{\frac{r_f}{10}}}{10^{\frac{r_i}{10}} - 1}} \quad (4.7)$$

onde  $r_f$  e  $r_i$  são as SNRs da fonte acústica e do  $i$ -ésimo sensor, respectivamente. Podemos combinar as Eqs. (4.5) e (4.7) para obter o  $r_i$  mínimo para que a localização seja possível. Porém, enquanto em (4.7)  $\delta_{if}$  é a distância entre o  $i$ -ésimo sensor e a fonte, em (4.5)  $\delta(r)$  é o tamanho do lado do cubo de busca. A maior distância possível dentro desse cubo corresponde a uma das diagonais, sendo igual a  $\sqrt{3}\delta(r)$ . Assim, qualquer distância entre sensor e fonte, considerando todos os parâmetros iguais em (4.5) e (4.7), satisfaz  $\delta_{if}(r) < \sqrt{3}\delta(r)$ , e, portanto,

$$\sqrt{\frac{1}{10^{r_{\min}} - 1}} 10^{\frac{r}{20}} < 0.8831\sqrt{3}e^{0.1216(r-10)} = 0.4534e^{0.1216r}$$

Para obter  $r_{\min}$ , é necessário que os fatores exponenciais dos dois lados da desigualdade sejam iguais, o que não ocorre devido ao uso de dados não ideais. Porém, eles são bastante próximos, conforme ilustrado na Fig. 4.7, principalmente para valores baixos de SNR. Considerando então a seguinte aproximação:

$$10^{\frac{r}{20}} = e^{(\ln 10/20)r} = e^{0.115r} \approx e^{0.1216r} \quad (4.8)$$

obtemos uma nova desigualdade, dada por:

$$\sqrt{\frac{1}{10^{r_{\min}} - 1}} 10^{\frac{r}{20}} < 0.4534e^{0.1216r} < 0.4534e^{0.115r}$$

de onde obtemos

$$r_{\min} > \log_{10} \left( 1 + \frac{1}{0.4534^2} \right) \approx 0.7681 \text{ dB}$$

Com a introdução dessa desigualdade secundária, conseguimos calcular o nível mínimo de relação sinal-ruído em cada sensor para que se possa localizar a fonte emissora. Porém, como várias suposições e aproximações foram utilizadas, adotamos um valor de  $r_{\min}$  maior que 0.768 dB. Neste trabalho, consideramos  $r_{\min} = 3$  dB.

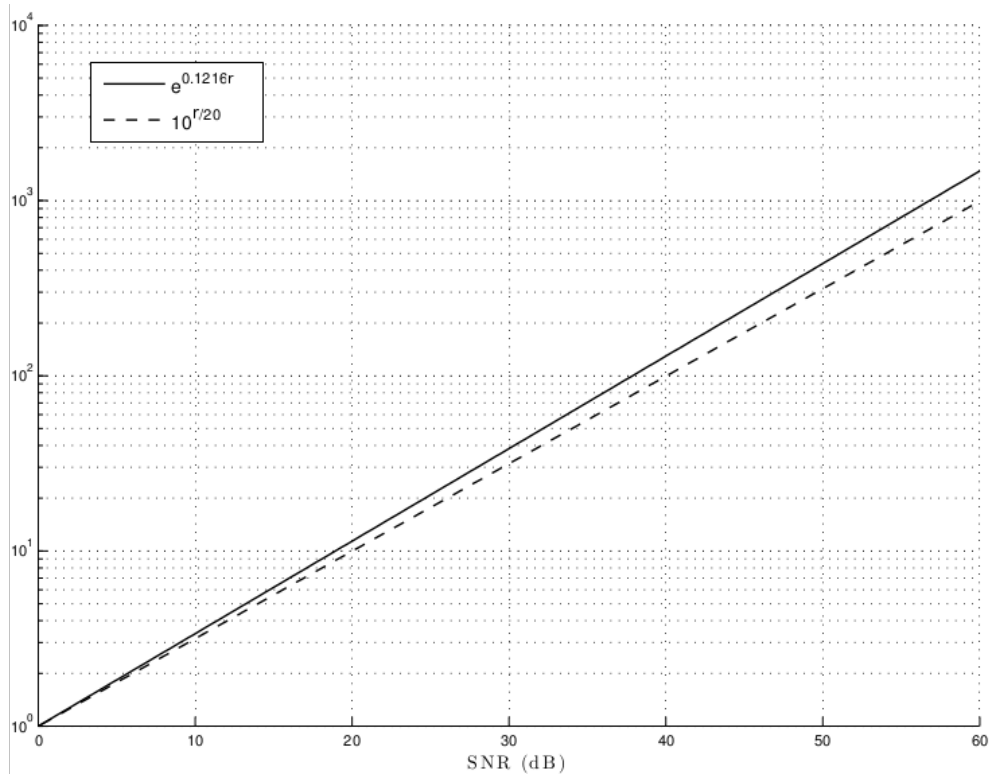


Figura 4.7: Diferença entre os termos  $e^{0.1216r}$  e  $10^{\frac{r}{20}}$ , em função da SNR.



# Capítulo 5

## Adaptações do Sistema para Utilização em Ambiente Real

Há vários problemas relacionados à aplicação do algoritmo de localização proposto quando utilizado em ambiente aquático. Algumas melhorias são necessárias para a correção desses problemas. Duas adaptações do sistema para sua utilização em ambientes reais são descritas neste capítulo: a utilização de um detetor de sinal não ruidoso, que impede o acionamento do sistema quando não se tem certeza que de fato o sinal emitido foi detectada nos sensores, e a inclusão da perda por absorção do som no modelo do canal submarino. É também discutida a utilização da variação espacial da potência do sinal emitido como alternativa à TDoA. Finalmente é descrita a aplicação hipotética do sistema na localização da caixa preta de um avião comercial no fundo do mar.

### 5.1 Detetor de sinais não ruidosos

Neste trabalho, definimos ruído como um sinal que tem sua energia ou densidade de potência estável por um tempo prolongado e é independente do sinal da fonte. Consideramos que suas características são determinadas antes de qualquer tentativa de localização via repetidas medições. A detecção do sinal não ruidoso pode ser realizada de duas formas:

1. Detecção por nível de energia

Considera-se que um sinal é não ruidoso quando sua energia ultrapassa o nível estável de energia do ruído. Um bom valor para o limiar a ser empregado é o  $r_{\min}$  calculado no capítulo anterior;

2. Detecção por correlação cruzada com sinal conhecido a priori

Neste caso, assume-se que, embora não se saiba a localização exata da fonte, é disponível uma medição do sinal emitido. Calcula-se então a correlação cruzada deste sinal com o sinal registrado em cada sensor. Se o coeficiente de correlação for alto, considera-se que o sinal é não ruidoso. Quando possível, prefere-se esta solução à anterior.

O detetor de sinal não ruidoso por nível de energia é implementado e utilizado na rede de sensores para selecionar os pares de sinais não ruidosos. Em seguida, obtém-se a estimativa da posição da fonte através da Eq. (2.7) apenas com esses pares, ou seja:

$$P_e^* = \arg \min_{P_e} \sum_{i \neq R} (v\tau_i - h(P_e, P_R, P_i))^2$$

para todos  $R$  e  $i$  pertencentes a  $\{1, \dots, M\}$  tais que as energias dos sinais  $x_R(t)$  e  $x_i(t)$  satisfaçam

$$\begin{aligned} E_R &\geq 10^{\frac{r_{\min}}{10}} E_N \\ E_i &\geq 10^{\frac{r_{\min}}{10}} E_N \end{aligned}$$

sendo  $E_N$  a energia do ruído.

As regras acima só permitem a contribuição de pares de sensores quando ambos detectam o sinal acústico não ruidoso. Para a solução pelo método de Monte Carlo, a soma parcial (composta por termos de um subconjunto de pares detetores) terá a tendência de fornecer uma posição onde esses sensores têm a possibilidade de detecção do sinal emitido. Assim, na próxima iteração aqueles pares que não detectaram o sinal serão movimentados para locais com melhor SNR, aumentando a precisão da próxima estimativa. Sem o uso do filtro acima, seria provável que a contribuição de pares não detetores piorasse a estimativa feita, deteriorando a detecção na próxima iteração até mesmo de pares já detetores.

Já com a solução usando o método do gradiente descendente, a atualização da solução é feita considerando o gradiente da soma parcial da função custo definida em (2.7). Assim, quanto menor o número de pares não ruidosos, menor será a norma do vetor gradiente, ou seja, menor o ajuste feito na estimativa anterior. Assim como na solução de Monte Carlo, pares ruidosos não terão efeito algum. Logo, na próxima iteração é provável que os pares já detetores continuem assim e os pares não detetores passem a também ser detetores.

Em ambas as soluções distintas, quando não há pares detetores a localização é suspensa. Nesse caso, movem-se todos os sensores para uma área fora do seu domínio

de detecção para fazer uma nova tentativa. Ao contrário da localização descrita neste trabalho, a etapa de detecção não precisa de múltiplos sensores, uma vez que não requer o uso de triangulação. Na Seção 5.5, apresentamos um exemplo dessa etapa de detecção, chamada de etapa de pré-localização.

Foi refeita então a simulação anterior, com as mesmas condições estipuladas, porém com o uso de um detetor de sinal acústico não ruidoso implementado por meio do método de energia mínima. É importante observar que a ocorrência de ruídos temporários, como barulhos de animais e de chuva, pode gerar uma falsa detecção. Por isso, prefere-se sempre que possível o uso de detecção de sinais não ruidosos com base na correlação cruzada com um sinal conhecido. Porém, como essa simulação não inclui ocorrências desse tipo de ruído, empregamos o método da energia mínima para demonstrar as melhorias que podem ser obtidas com o detetor de sinais não ruidosos.

As Figs. 5.1 e 5.2 mostram os resultados obtidos nas mesmas simulações descritas no Capítulo 4, mas usando o detetor de sinais não ruidosos. Note que, diferentemente

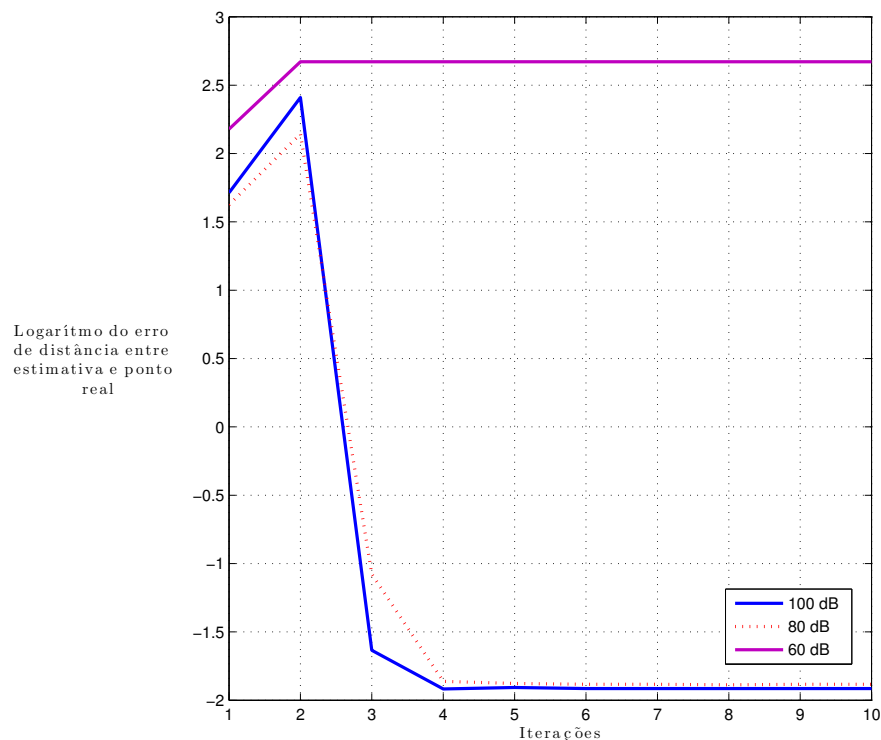


Figura 5.1: Medida do erro do sistema com cubo de busca de 1000 m de lado para diversos valores de SNR usando o detetor de sinal não ruidoso.

do caso sem detetor de sinais não ruidosos, o erro de estimação da posição do emissor para níveis de ruído que mascaram o seu sinal nos sensores não diminui nem aumenta. Isso se deve ao fato de que, quando sinal não ruidoso não é detectado

em nenhum par de sensores, o sistema para de buscar ativamente a fonte. No caso do experimento com SNR igual a 60 dB, houve um aumento inicial no erro, por causa da detecção do sinal em poucos sensores. A estimativa da posição da fonte com os sinais desses sensores não foi precisa, aumentando a distância entre a rede sensorial e a fonte acústica. Porém, após essa piora inicial, a rede desistiu de buscar a fonte ativamente, como esperado. Um sistema de correção de posicionamento, que moveria o sensor para uma posição antiga, onde o sinal já havia sido detectado, em caso de perda de detecção do mesmo, poderia resolver esse problema.

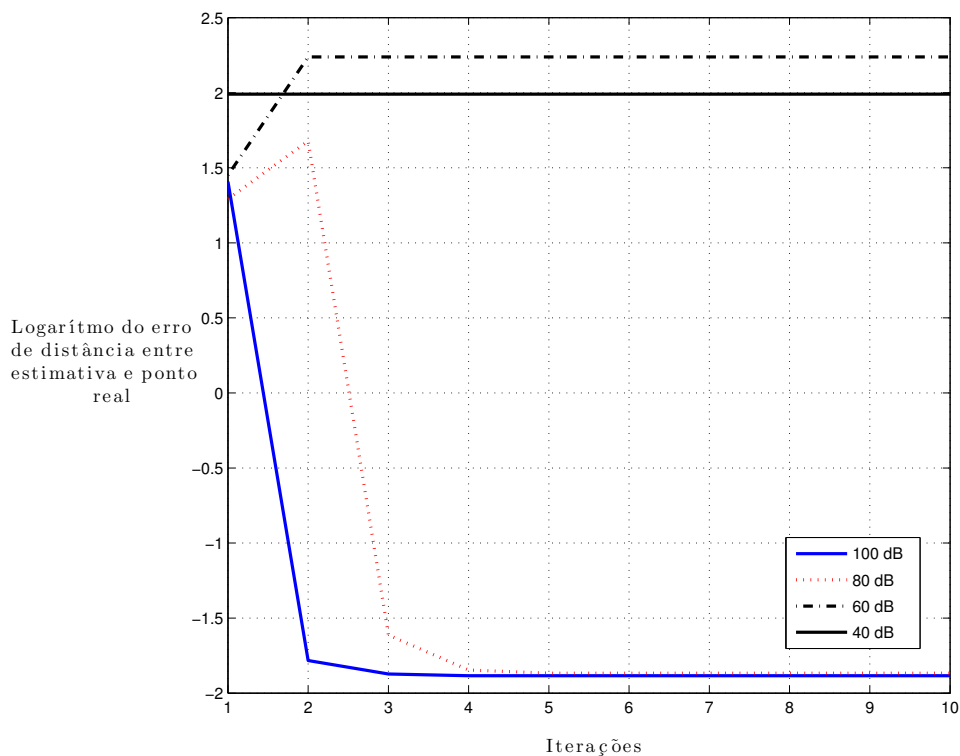


Figura 5.2: Medida do erro do sistema com cubo de busca de 400 m de lado para diversos valores de SNR usando o detetor de sinal não ruidoso.

Também é interessante analisar a porcentagem de acertos do sistema com o detetor de sinais não ruidosos. Teoricamente, não deveria haver mudança no desempenho do sistema nesse critério, pois quando o sistema detecta que o sinal não é ruidoso, a sua estimativa é corrigida por meio de melhorias iterativas. A Fig. 5.3 mostra a porcentagem de acertos do sistema com um detetor de sinais não ruidosos. Note que os resultados dessa figura são semelhantes aos da Fig. 4.5, confirmando que o emprego do detetor não afeta significativamente a porcentagem de acertos.

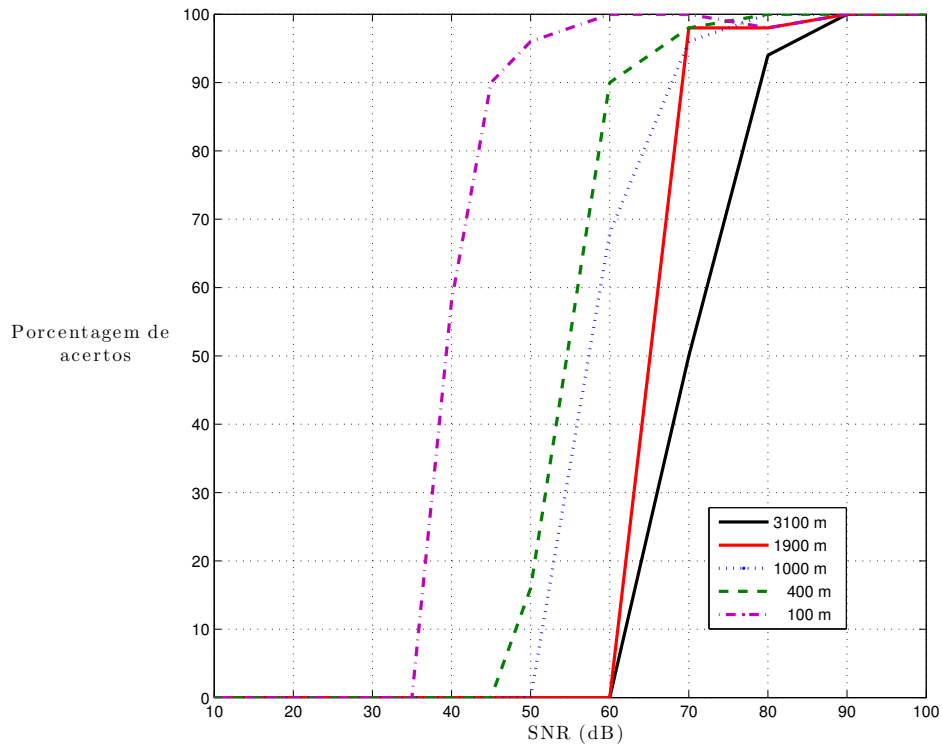


Figura 5.3: Porcentagem de acertos com detetor de sinal não ruidoso para diversos valores de SNR e tamanhos do cubo de busca.

## 5.2 Perdas do sinal acústico na propagação

No capítulo anterior, foi enfatizada a importância do tamanho do cubo de busca utilizado pelo sistema de localização, que depende da SNR nos sensores. A perda de energia sofrida pelo sinal durante a propagação (PT) pode ser atribuída principalmente a dois fenômenos: a absorção da energia do som pela água do mar ( $\Lambda$ ) e a dispersão da onda ( $\Xi$ ) numa superfície cada vez maior. Portanto, podemos escrever

$$PT = \Lambda + \Xi \quad (5.1)$$

Pela natureza da dispersão da onda acústica, a energia do sinal propagado decai com o quadrado da distância. Em relação à outra fonte de decaimento, observa-se que qualquer material absorve energia, incluindo a das ondas sonoras, em quantidade que depende do espectro de potência do sinal. A absorção da onda sonora pela água afeta substancialmente o cálculo da distância percorrida pelo sinal acústico.

No mar, há ainda outros fatores que afetam a absorção do som, entre os quais podemos citar a profundidade, a salinidade e a concentração de substâncias químicas. De acordo com a análise de [21], a absorção do som pela água do mar é a soma de

três componentes:

$$\begin{aligned} \text{Absorção} &= \text{Contribuição do Ácido Bórico} \\ &+ \text{Contribuição do Sulfato de Magnésio} \\ &+ \text{Contribuição da Água Pura} \end{aligned}$$

As duas primeiras contribuições são causadas por reações químicas que são desencadeadas com mudanças na pressão ambiente, como as provocadas por ondas sonoras. Cada reação tem seu tempo de relaxamento, ou frequência de relaxamento, dependendo da sua velocidade. Sinais com frequências muito maiores que essa frequência de relaxamento não sofrem com absorção por esses elementos. Por fim, a última contribuição é causada pelo fenômeno de arrastamento de partículas, movimentadas pela onda sonora dentro da água, provocando a perda de energia sonora em forma de calor.

Os experimentos feitos por Ainslie e McColm [21] geraram a seguinte equação para o coeficiente de absorção do mar (em dB/km):

$$\alpha(f) = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{\frac{\text{pH}-8}{0.56}} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{S}{35}\right) \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-\frac{D}{6}} + 0.00049 f^2 e^{-\left(\frac{T}{27} + \frac{D}{17}\right)} \quad (5.2)$$

com

$$\begin{aligned} f_1 &= 0.78 \sqrt{\frac{S}{35}} e^{\frac{T}{26}} \text{ kHz} \\ f_2 &= 42 e^{\frac{T}{17}} \text{ kHz} \end{aligned}$$

onde  $f$  é a frequência do sinal de interesse, em kHz; pH é o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água do mar;  $T$  é a temperatura da água, em graus Celsius;  $S$  é a salinidade do mesmo, em ppt (*parts per thousand*);  $D$  é a profundidade em km; e  $f_1$  e  $f_2$  são as frequências de relaxamento das reações químicas envolvendo o ácido bórico e o sulfato de magnésio, respectivamente, ambas em kHz.

É importante observar, com base em (5.2), a dependência do coeficiente de absorção em relação à frequência do sinal. A absorção é monotonicamente crescente em relação à frequência; logo, para sinais de banda larga, basta calcular a absorção correspondente à componente de frequência máxima com informação significativa para garantir a detecção do sinal. Note também o efeito da profundidade na absorção. Ao contrário da variação com a frequência do sinal, a absorção é monotonicamente decrescente em relação à profundidade.

O componente  $\Xi$  da Eq. (5.1) é geralmente desconhecido, pois depende da geometria

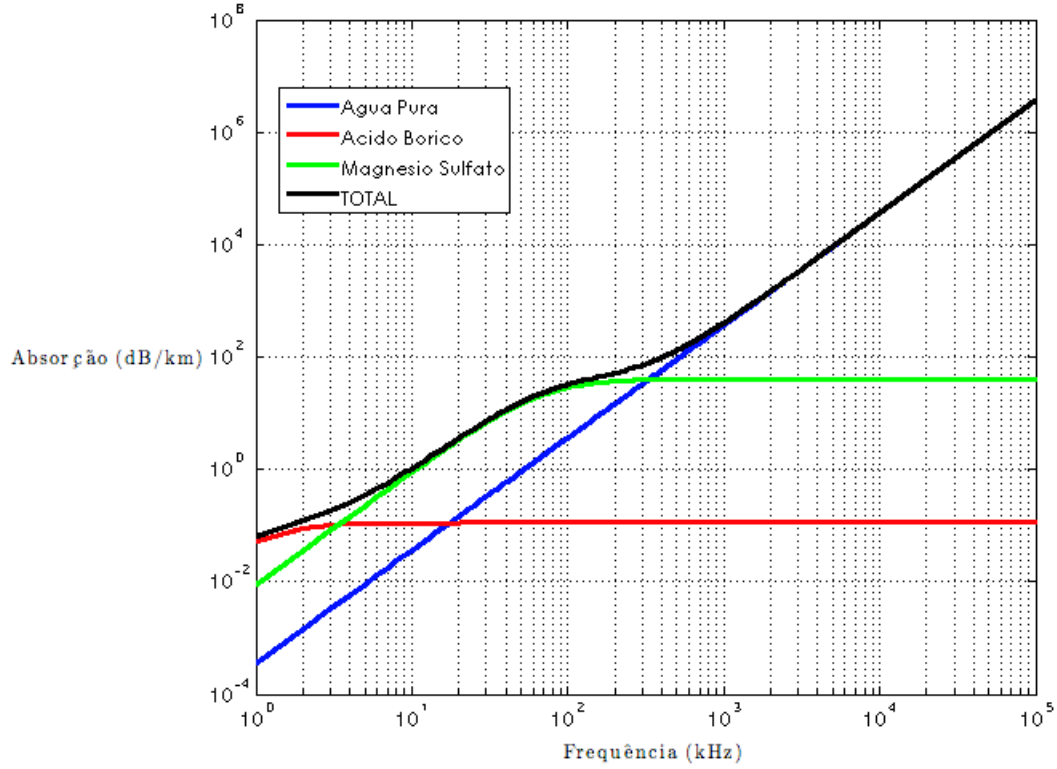


Figura 5.4: Absorção do som pela água do mar e pelos seus diversos constituintes [21].

no entorno da fonte acústica e da sua natureza. Para fontes omnidirecionais, pode-se supor um modelo de dispersão cilíndrico ou esférico, que será apropriado para grande parte dos cenários. Neste trabalho, consideraremos o modelo esférico. Uma maneira de obter o componente  $\Xi$  é utilizar o fato de que a quantidade de energia que passa pela superfície de um volume fechado é sempre constante, ou seja, considerando  $A$  a área de superfície de um volume fechado e  $I$  a intensidade (energia) do sinal acústico, tem-se

$$A_o I_o = AI \quad (5.3)$$

onde  $A_o$  e  $I_o$  são a área da superfície e a intensidade do sinal de referência, conhecidas em um ponto no entorno do emissor.

Se o volume fechado for esférico, então  $A = 4\pi l^2$ , onde  $l$  é o raio da esfera. Assim,

$$4\pi l_o^2 I_o = 4\pi l^2 I \quad (5.4)$$

Considerando o raio de referência (distância entre o emissor e o ponto de referência)

igual a  $l_o = 1$  m, a perda por espalhamento esférica é dada por:

$$\begin{aligned} 10 \log \left( \frac{I}{I_o} \right) &= -20 \log(l) \\ \Rightarrow \epsilon &= 20 \log(l) \end{aligned}$$

Assim, para  $l$  em metros, a perda de energia do sinal na propagação é dada por

$$\text{PT} = 20 \log(l) + \alpha_m l$$

onde  $\alpha_m$  é o coeficiente de absorção em dB/m ( $\alpha_m = \alpha \times 10^3$ ). Para  $l$  em km, tem-se

$$\text{PT} = 60 \log(l) + \alpha l$$

Considere então o cálculo da distância máxima efetiva, ou seja, da distância entre sensores e fonte acústica tal que o sistema de localização acústica seja bem-sucedido. Assim, sendo  $r_{\min}$  a energia mínima acima do ruído do sinal em cada sensor e  $\kappa_f$  o nível do sinal a 1 metro da fonte acústica acima do ruído em dB, pode-se calcular a distância máxima efetiva, a partir da equação:

$$\begin{aligned} r_{\min} &= \kappa_f - \text{PT} \\ r_{\min} &= \kappa_f - 20 \log(l_{\max}) - \alpha l_{\max} \end{aligned} \quad (5.5)$$

A Eq. (5.5) foi resolvida em  $l_{\max}$  utilizando a ferramenta de matemática simbólica Maple  $\text{\textcircled{R}}$ , obtendo-se a seguinte solução:

$$l_{\max} = e^{\xi(\kappa_f - r_{\min}) - W\left(\xi \alpha_m e^{\xi(\kappa_f - r_{\min})}\right)} \quad (5.6)$$

onde  $\xi = \frac{\ln(10)}{20}$  e  $W(z)$  é a função de Lambert, que resolve a equação:

$$z = W(z)e^{W(z)}$$

### 5.3 Modelo de ruído submarino

Na seção anterior, foi derivada uma expressão para a distância máxima de detecção que requer o conhecimento das razões sinal ruído no ponto de referência (considerado a 1 m da fonte acústica) e nos sensores. No entanto, o ruído submarino pode



ser altamente variável, dependendo de vários fatores, como concentração de rotas marítimas, condições meteorológicas, vida submarina e condições geofísicas, o que torna de suma importância o uso de um modelo razoável para esse ruído.

Podemos separar as fontes significantes de ruído para cada faixa de frequência distinta, de acordo com a análise apresentada em [22].

Tabela 5.1: Fontes significativas de ruído submarino para diversas faixas de frequência

<b>Faixa</b>	<b>Fontes significantes de ruído</b>
0 - 10 Hz	Fenômenos sísmicos, maré
10 - 100 Hz	Atividades industriais, turbulência do mar
100 - 1000 Hz	Trânsito de embarcações comerciais
1 kHz - 100 kHz	Estado de agitação do mar, chuva, animais marinhos
> 100 kHz	Movimento browniano de moléculas próximas ao hidrofone

Como pode ser visto na Tabela 5.1, a maior parte do ruído submarino em frequências abaixo de 1 kHz é originária de atividades humanas. Por essa razão, essas fontes variam muito com a região em que se faz a medição. Por exemplo, o Oceano Atlântico no Hemisfério Norte tem usualmente ruído com intensidade 20 dB acima do ruído no Hemisfério Sul, que apresenta menor atividade humana [22]. Assim, prefere-se trabalhar com a localização de fontes acústicas dentro da faixa de 1 kHz a 100 kHz, uma vez que nessa faixa não há tanta dependência das condições regionais, facilitando o uso de um modelo matemático para o ruído. Para esses valores de frequência, o estado de agitação do mar pode ser priorizado, pois o distúrbio gerado pela chuva, assim como os sons emitidos por animais marinhos, são eventos temporários. A Tabela 5.2 contém alguns valores do coeficiente do estado de agitação do mar ( $e_a$ ). Deve-se observar que, quanto maior o valor de  $e_a$ , mais forte é o ruído devido à agitação do mar.

A partir da Tabela 5.2, pode-se obter a intensidade do ruído devido à agitação do mar, em dB, usando a expressão derivada de estudos em águas rasas (até 200 m) em [23], dada por

$$E_N(e_a, f) = 56 + 19 \log(e_a) - 17 \log(f) \quad (5.7)$$

Para águas mais profundas, é natural conjecturar que o nível de ruído devido à agitação do mar é mais baixo, uma vez que este é originário na superfície do mar. Como qualquer outro sinal acústico, o ruído vindo da superfície terá perdas de absorção e de dispersão. Portanto, é suficiente considerar os valores gerados pela Eq. (5.7) como um limite superior da intensidade do ruído em profundidades maiores.

Tabela 5.2: Valores típicos do coeficiente de estado de agitação do mar

Estado de agitação ( $e_a$ )	Altura das ondas	Descrição
0	0 m	Superfície é um espelho
0.5	< 0.1 m	Ondas capilares
1	0 - 0.1 m	Pequenas ondulações aparentes
2	0.1 - 0.5 m	Ondulações maiores mas ainda suaves
3	0.5 - 1.2 m	Formação de carneirinhos na superfície
4	1.2 - 2.4 m	Ondas moderadas, formação de <i>spray</i>
5	2.4 - 4.0 m	Ondas agitadas
6	4.0 - 6.0 m	Ondas muito agitadas

## 5.4 Utilização da potência nos sensores para TDoAs com alta redundância

É possível, em aplicações reais do sistema descrito neste trabalho, que, especialmente nos primeiros movimentos iterativos, as diferenças de tempo de chegada do sinal nos diversos pares de sensores apresentem alta redundância (ou seja, seus valores sejam muito próximos). Essa redundância tende a ficar maior quanto mais afastados estiverem os sensores da posição real da fonte acústica. Em casos extremos, a única informação útil que se consegue extrair é a direção de chegada do sinal acústico, sendo perdida a informação de distância. Uma alternativa para esses casos é a utilização da variação do nível do sinal acústico nos diferentes sensores.

A potência média,  $E_i$ , do sinal acústico medido pelo  $i$ -ésimo sensor é dada por

$$E_i = \frac{\eta}{\delta_{if}^2} E_f + E_N \quad (5.8)$$

Uma vez medida a intensidade do sinal no sensor, não se sabe o quanto do sinal captado é ruído e quanto é sinal da fonte que se quer localizar. Torna-se interessante, portanto, calcular o gradiente espacial da potência dada em (5.8). Com a suposição de que o ruído é estatisticamente independente do sinal de interesse e que sua potência não varia no espaço, seu efeito no gradiente pode ser desprezado, obtendo-se:

$$\nabla(E_i) = \nabla\left(\frac{\eta}{\delta_{if}^2}\right) E_f$$

onde

$$\nabla\left(\frac{\eta}{\delta_{if}^2}\right) = \nabla\left(\frac{\eta}{\|P - P_f\|^2}\right) = -\frac{2\eta(P - P_f)}{\|P - P_f\|^4}$$

e, portanto,

$$\nabla(E_i) = -\frac{2\eta(P - P_f)}{\|P - P_f\|^4} E_f$$

É possível estimar o gradiente de  $E_i$  a partir de medidas diferenciais de cada par de sensores, escolhendo-se um sensor referencial e medindo-se a diferença de potência entre esse sensor e cada outro sensor. Tem-se então  $\nabla_\beta(E)$  em relação à base vetorial  $\beta$ , definida pelos vetores associados aos pares de sensores, como ilustrado na Fig. 5.5 para o caso 2-D. Basta em seguida fazer a mudança de base para a base vetorial normal, conforme indicado na Fig. 5.5.

Tomamos como exemplo uma rede de quatro sensores. Seja  $R$  o sensor de referência, e sejam  $\{1, 2, 3\}$  os demais sensores. Nesse caso, definem-se

$$\begin{aligned}\Delta E_u &= E_R - E_1 \\ \Delta E_v &= E_R - E_2 \\ \Delta E_N &= E_R - E_3\end{aligned}$$

sendo  $u$ ,  $v$  e  $w$  os vetores com origens em  $R$  e terminados nas posições dos sensores 1, 2 e 3, respectivamente. A base vetorial do espaço  $\mathbb{R}^3$  é  $\beta = \{u', v', w'\}$ , formada pelos vetores normalizados dos pares de sensores com o sensor de referência. Assim, pode-se aproximar o gradiente de  $P$  na base  $\beta$  por

$$\nabla_\beta(E) \approx \frac{\Delta E_u}{\|u\|} u' + \frac{\Delta E_v}{\|v\|} v' + \frac{\Delta E_N}{\|w\|} w'$$

Seja  $M$  a matriz normal de mudança da base  $\beta$  para a base  $\{i, j, k\}$ , dada por

$$M = \begin{pmatrix} | & | & | \\ u' & v' & w' \\ | & | & | \end{pmatrix}$$

então  $\nabla(E)$  pode ser aproximada por

$$\nabla(E) \approx M \nabla_\beta(E) \tag{5.9}$$

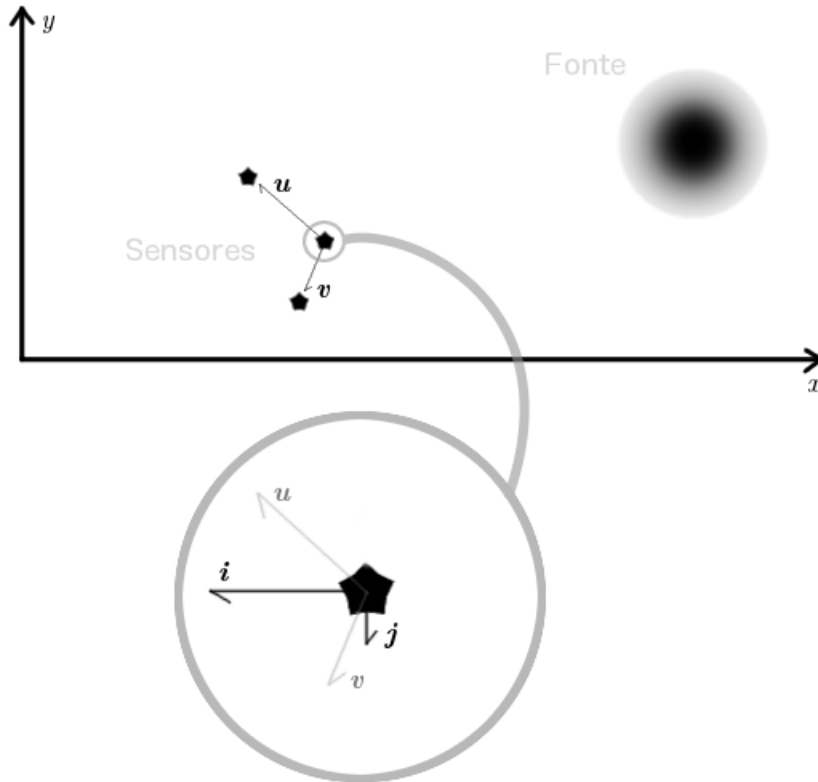


Figura 5.5: Mudança de base da medida diferencial de potência para a base normal.

Logo, podemos estimar a posição da fonte emissora através da seguinte minimização:

$$P_f = \arg \min_P \left[ P - P_R - \frac{1}{2\eta E_f} \|P - P_f\|^4 M \nabla_\beta (E) \right]$$

O problema acima é resolvido utilizando técnicas numéricas de otimização. Note que a equação acima apresenta dois mínimos, sendo um trivial, em  $P = P_R$ , e o outro localizado na posição real da fonte emissora, e que é necessário conhecer ou estimar previamente a potência média do sinal acústico na sua fonte. Para diversas aplicações de busca de emissor, essa variável é conhecida. Essa técnica é sensível à mudança no nível de ruído, especialmente se essa variação não atingir todos os sensores. Destaca-se também que a absorção do som pelos diversos componentes da água do mar não foi considerada nesse problema. Por essas duas razões, prefere-se o uso da técnica TDoA para a aplicação da localização acústica submarina.

## 5.5 Exemplo Hipotético de Aplicação do Sistema

Considere o problema de localização de um avião que caiu no mar, em que dados de rastreamento via satélite conseguiram uma estimativa imprecisa da posição da queda. Assim, a busca é restrita a uma região, que é grande demais para que mergulhos de ROVs (*Remote Operated Vehicles*) operados manualmente sejam efetivos. Um intervalo curto de tempo disponível para essa busca também é um complicador, já que os transmissores das caixas pretas de aviões comerciais geralmente duram até 30 dias em condições normais. Com essas duas restrições, faz-se necessária uma solução altamente eficiente e rápida.

Propõe-se, então, o uso de uma rede de ROVs adaptados com a instalação de hidrofones capazes de detectar sinais de alta frequência, como os emitidos por caixas pretas de aviões comerciais. Essas caixas pretas geralmente emitem um tom em 38 kHz por 10 ms a cada segundo com uma potência de aproximadamente 160 dB ref 1  $\mu\text{Pa}$  [1]. É possível calcular a distância máxima efetiva dos sensores para que seja otimizado o plano de busca.

Considere, por exemplo, condições boas do mar ( $e_a \approx 2$ ), salinidade de 35 ppt, sensores colocados a uma profundidade de 500 m, acidez de 8 pH e temperatura ambiente de 8 graus Celsius [21]. Nessas frequências mais altas, como foi visto no capítulo anterior, a maior fonte de ruído ambiente é originária da agitação do mar. Sob essas condições, o nível de ruído, em dB, é dado por

$$E_N(2, 38 \text{ kHz}) = 56 + 19 \log(2) - 17 \log(38) \approx 61.72 \text{ dB ref } 1 \mu\text{Pa}$$

O coeficiente de absorção pode ser calculado com base na Eq. (5.2). Conhecendo-se as potências do sinal e do ruído e o coeficiente de absorção, podemos determinar a distância máxima efetiva do sistema,  $l_{\max}$ , por meio da Eq. (5.6), considerando

$$\begin{aligned}\kappa_f &= E_f - E_N = 160 - 61.72 = 92.28 \text{ dB} \\ r_{\min} &= 3 \text{ dB} \\ \alpha &= 9.86 \text{ dB/km}\end{aligned}$$

Logo,  $l_{\max} = 4.87 \text{ km}$ .

Assim, podemos desenvolver um plano de ação para a localização efetiva de uma caixa preta submersa, composto das seguintes etapas:

1. Etapa de prelocalização: rede de sensores espalhados (distância menor que  $l_{\max}$  entre os sensores), a fim de maximizar a área de busca. Quando um

dos sensores detectar o sinal de interesse (tom de 38 kHz), ir para a etapa de localização. Quanto maior a distância entre os sensores, mais eficiente é a busca. Por outro lado, se o cálculo de  $l_{\max}$  estiver errado, devido a suposições erradas de variáveis do ambiente, é possível que haja áreas cegas no local de busca. Uma alternativa mais econômica, porém mais lenta, é o uso de um único sensor móvel. Dessa maneira, é necessário um planejamento inteligente de sua rota para que não haja nenhuma área cega no local de busca.

2. Etapa de localização: uso do sistema desenvolvido neste trabalho para a localização precisa da caixa preta. Nesta etapa torna-se necessário o uso de múltiplos sensores múltiplos. Porém, para este caso específico, onde o alvo é fixo, é possível a localização utilizando somente um sensor móvel. Para isso, movimenta-se o único sensor até detectar o sinal acústico em múltiplas posições. Faz-se então a triangulação para a localização final do emissor. Note, porém, que este método repetitivo não é eficaz para alvos móveis.

Um exemplo de localização de um alvo móvel é o rastreamento de seres vivos, como baleias. Normalmente, as baleias cantam a 180 dB ref  $1 \mu\text{Pa}$ . Utilizando parâmetros similares nas equações acima, é razoável dizer que a distância máxima de detecção do sinal acústico emitido por esse animal seria de aproximadamente 11 km. Portanto, torna-se possível a pesquisa sobre os padrões migratórios desses animais, sem a interferência direta no ambiente deles.

# Capítulo 6

## Conclusões

Foi apresentado neste trabalho o desenvolvimento teórico de um sistema capaz de localizar um emissor acústico. Foi proposta a utilização de uma rede móvel de sensores, sendo a localização realizada a partir de medidas das diferenças de tempo de chegada dos sinais adquiridos em cada par de sensores, tomando um deles como referência. A partir dessas medidas temporais, é possível estimar os ângulos de chegada da onda sonora nos diversos sensores. Com suficientes dados de ângulo de chegada, torna-se possível a estimação da posição real da fonte acústica.

A partir dessa idéia básica, resolveu-se o problema de localização de duas maneiras distintas. A primeira foi através da implementação de uma simulação de Monte Carlo Sequencial, que simula a emissão do sinal para diversas posições da fonte até encontrar a localização ótima. Pela natureza desse algoritmo, foi discutida a possibilidade de paralelização da sua implementação entre os diversos nós da rede sensorial. O segundo algoritmo que tornou possível a resolução do problema de localização 3-D submarina foi o gradiente descendente. Como o problema é naturalmente convexo, a descida por gradiente é possível, devendo-se observar, porém, que a derivada é sempre sensível a variações provocadas pelo ruído. Como o algoritmo é naturalmente sequencial, a sua paralelização pode acarretar problemas de borda, criados pelas partições do espaço de busca. Para evitar efeitos indesejados, prefere-se o uso do método de Monte Carlo Sequencial para resolver o problema da localização submarina quando a paralelização for importante.

Foco principal deste trabalho, o movimento da rede sensorial foi analisado de diversas formas. Inicialmente, foi considerada a transformação da rede de forma generalizada, que não apresenta limitação quanto ao número de sensores. Em seguida, foi discutida a solução mais simples por meio do emprego do *simplex*, que em três dimensões corresponde a um tetraedro regular. Este limita a rede a quatro sensores, sendo

esse o número mínimo para a criação de um volume fechado. O uso dessa solução mais simples, no entanto, requer o emprego de um modelo de movimento iterativo e transitório, que dita para onde cada sensor da rede será movido a cada iteração. O movimento adequado e eficiente é o que possibilita a localização bem sucedida mesmo com medidas iniciais não adequadas.

Para fins de teste dos algoritmos desenvolvidos, foi feita uma simulação ideal com a presença de ruído aditivo, em que foram desprezados os efeitos do canal acústico submarino e da reverberação na propagação do sinal sonoro emitido. Assim, foram obtidos diversos valores importantes de parâmetros do sistema desenvolvido neste trabalho. Um desses valores é a energia mínima acima do nível de ruído que o sinal em cada sensor deve ter para que o sistema seja funcional. Esse dado é muito útil, por exemplo, para o cálculo da distância máxima de detecção, quando se conhece a potência do sinal acústico a 1 metro da fonte. Com o conhecimento dessa distância máxima, torna-se possível a execução de uma estratégia de localização usando duas etapas, empregadas distintamente antes e depois da detecção do sinal acústico alvo.

Após a simulação ideal, foram discutidas diversas adaptações do sistema para sua utilização em ambientes reais, considerando as perdas sofridas pelo sinal acústico durante a propagação. A inclusão de um detetor de sinal não ruidoso, embora não melhore a porcentagem de acertos do sistema, é indicada para a implementação da localização acústica em duas etapas, antes e depois da detecção do sinal. O emprego do coeficiente de absorção é útil tanto para cálculos mais precisos de distância quanto para aumentar a confiança sobre decisões relacionadas ao nível de ruído proveniente de diversas fontes submarinas. Por fim, foi vista também uma alternativa ao uso da TDoA para a localização acústica. O emprego do gradiente espacial da potência do sinal emitido, embora não tenha sido testado, promete bons resultados, podendo ser combinado com o método tradicional baseado em medidas da TDoA.

O problema interessante e atual de localização de *transponders* de 38 kHz (as chamadas caixas pretas dos aviões comerciais), que emitem a cada segundo um tom nessa frequência específica, foi considerado uma aplicação do sistema. Foi visto, com algumas suposições gerais do ambiente submarino, que uma estratégia de duas etapas pode ser utilizada para a rápida recuperação desse aparelho, crucial para o entendimento de acidentes aéreos e de suas causas.

Por fim, foi discutida brevemente a possibilidade de paralelização de todos os códigos de localização entre os nós da rede sensorial. Como é esperado que essa rede seja autônoma, todos os cálculos e estimativas serão feitos localmente. Logo, deve-se explorar o poder computacional de cada nó. O único fator limitante é a velocidade da troca de dados entre cada par de sensores, que pode ser controlada impondo um



limite para a distância entre eles, uma vez que a atenuação pelo canal submarino aumenta com a distância e com a frequência. Portanto, o tamanho do *simplex* máximo é limitado pela largura de banda do sinal de comunicação entre sensores.

# Referências Bibliográficas

- [1] KELLAND, N. C. “Deepwater Black Box Retrieval”, *Hydro International Archive*, November 2009, v. 13, n. 9, 2009. Disponível em: <[http://www.hydro-international.com/issues/articles/id1130-Deepwater\\_Black\\_Box\\_Retrieval.html](http://www.hydro-international.com/issues/articles/id1130-Deepwater_Black_Box_Retrieval.html)>.
- [2] CAMILLI, R., REDDY, C. M., YOERGER, D. R., et al. “Tracking Hydrocarbon Plume Transport and Biodegradation at Deepwater Horizon”, *Science*, v. 330, n. 6001, pp. 201–204, 2010. doi: 10.1126/science.1195223. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/content/330/6001/201.abstract>>.
- [3] HIGGS, N. D., GATES, A. R., JONES, D. O. B. “Fish Food in the Deep Sea: Revisiting the Role of Large Food-Falls”, *PLoS ONE*, v. 9, n. 5, pp. e96016, 05 2014. doi: 10.1371/journal.pone.0096016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1371%2Fjournal.pone.0096016>>.
- [4] IMAM, N., BARHEN, J. “Acoustic Source Localization via Distributed Sensor Networks using Tera-scale Optical-Core Devices”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 123, n. 5, pp. 3745, 2008. ISSN: 00014966. doi: 10.1121/1.2935292. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/123/5/10.1121/1.2935292>>.
- [5] LÜ, L.-G., CHEN, H.-X., YUAN, Y.-L. “Spatial and Temporal Variations of Sound Speed at the PN Section”, *Journal of Oceanography*, v. 60, n. 4, pp. 673–679, 2004. ISSN: 0916-8370. doi: 10.1007/s10872-004-5760-3. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10872-004-5760-3>>.
- [6] AJDLER, T., KOZINTSEV, I., LIENHART, R., et al. “Acoustic source localization in distributed sensor networks”, *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004.*, v. 2, pp. 1328–1332, 2004. doi: 10.1109/ACSSC.2004.1399368. Dis-

ponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1399368>>.

- [7] EROL, M., VIEIRA, L. F. M., GERLA, M. “AUV-aided localization for underwater sensor networks”. In: *WASA 2007 - The 2nd International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications*, pp. 44–54, 2007. ISBN: 076952981X. doi: 10.1109/WASA.2007.143.
- [8] AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D., MELODIA, T. “Underwater acoustic sensor networks: Research challenges”, *Ad Hoc Networks*, v. 3, pp. 257–279, 2005. ISSN: 15708705. doi: 10.1016/j.adhoc.2005.01.004.
- [9] CAYIRCI, E., TEZCAN, H., DOGAN, Y., et al. “Wireless sensor networks for underwater surveillance systems”, *Ad Hoc Networks*, v. 4, pp. 431–446, 2006. ISSN: 15708705. doi: 10.1016/j.adhoc.2004.10.008.
- [10] JAFFE, J., SCHURGERS, C. “Sensor Networks of Freely Drifting Autonomous Underwater Explorers”. In: *WUWNet '06: Proceedings of the ...international workshop on Underwater networks*, pp. 93–96, 2006. ISBN: 1-59593-484-7. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1161039.1161058>. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1161039.1161058>>.
- [11] HEIDEMANN, J., WILLS, J., SYED, A. “Research challenges and applications for underwater sensor networking”, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.*, pp. 228–235, 2006. ISSN: 1525-3511. doi: 10.1109/WCNC.2006.1683469. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1683469>>.
- [12] MIRZA, M. A., SHAKIR, M. Z., SLIM-ALOUINI, M. “A GPS-free passive acoustic localization scheme for underwater wireless sensor networks”. In: *Proceedings - 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, MASS 2011*, pp. 879–884, 2011. ISBN: 9780769544694. doi: 10.1109/MASS.2011.104.
- [13] TIAN, C., LIU, W., JIN, J., et al. “Localization and synchronization for 3D underwater acoustic sensor networks”. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, v. 4611 NCS, pp. 622–631, 2007. ISBN: 978-3-540-73548-9. doi: 10.1007/978-3-540-73549-6\\_61.

- [14] OTHMAN, A. “GPS-less localization protocol for underwater acoustic networks”, *2008 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN '08)*, 2008. doi: 10.1109/WOCN.2008.4542532.
- [15] GRUBER, M. H. J., HAYES, M. H. “Statistical Digital Signal Processing and Modeling”, *Technometrics*, v. 39, pp. 335, 1997. ISSN: 00401706. doi: 10.2307/1271141. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1271141?origin=crossref>>.
- [16] GUSTAFSSON, F., GUNNARSSON, F. “Positioning using time-difference of arrival measurements”, *2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03).*, v. 6, 2003. ISSN: 1520-6149. doi: 10.1109/ICASSP.2003.1201741.
- [17] LIU, J. S., CHEN, R. “Sequential Monte Carlo Methods for Dynamic Systems”, *Journal of the American Statistical Association*, v. 93, pp. 1032–1044, 1998. ISSN: 01621459. doi: 10.2307/2669847.
- [18] WOLFE, P. “Convergence Conditions for Ascent Methods. II: Some Corrections”. 1971. ISSN: 0036-1445.
- [19] PARKS, H., WILLIS, D. “An Elementary Calculation of the Dihedral Angle of the Regular n-Simplex”, *The American Mathematical Monthly*, v. 109, n. 8, pp. 756–758, 10 2002.
- [20] STOJANOVIC, M. “Underwater Wireless Communications: Current Achievements and Research Challenges”. <http://www.mit.edu/~millitsa/resources/pdfs/newsletter-oes.pdf>, 2006. Acessado em: 2006-11-20.
- [21] AINSLIE, MICHAEL A., M. J. G. “A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 103, pp. 1671–1672, 1998. ISSN: 00014966. doi: 10.1121/1.421258.
- [22] HILDEBRAND, J. A. “Anthropogenic and Natural Sources of Ambient Noise in the Ocean”, *Marine Ecology Progress Series*, v. 395, pp. 5–20, 2009. ISSN: 0171-8630. doi: 10.3354/meps08353. Disponível em: <<http://www.int-res.com/articles/theme/m395p005.pdf>>.
- [23] KNUDSEN V.O., ALFORD R. S., E. J. W. “Underwater Ambient Noise”, *Journal Of Marine Research*, v. 7, pp. 410–429, 1948.

# Apêndice A

## Pseudocódigo da simulação em ambiente ideal

Descrevemos abaixo a simulação realizada em ambiente ideal por meio de pseudocódigo, onde, para facilitar a leitura, serão utilizadas funções vetores. As partes do pseudocódigo cercadas por linhas verticais são utilizadas apenas para fins de simulação.

$m \leftarrow 4$  ▷  $m$  é a quantidade de sensores.  
 $c \leftarrow 1500$  ▷  $c$  é a velocidade do som na água

$W \leftarrow$  largura da caixa de busca

$L \leftarrow$  comprimento da caixa de busca

$D \leftarrow$  profundidade da caixa de busca

$f.\text{sig} \leftarrow$  sinal acústico da fonte emissora

**for** cada sensor da rede, como  $s$  **do**

$s.\text{pos} \leftarrow \frac{1}{10} \{\text{rand}(W), \text{rand}(L), \text{rand}(D)\}$

**end for**

$f.\text{pos} \leftarrow 2 \sum_{i=1}^m s_i.\text{pos}$  ▷ Ponto máximo:  $\frac{8}{10} \{W, L, D\}$

Note que a soma acima cria uma rede subótima de sensores pois praticamente todas as medidas são redundantes pela definição já enunciada.

**for** cada sensor da rede, como  $s$  **do**

$\delta \leftarrow \|s.\text{pos} - f.\text{pos}\|$

$\tau \leftarrow \frac{\delta}{v_s}$

$f_s \leftarrow f.\text{sig}$  atrasado por  $\tau$

$s.\text{sig} \leftarrow \frac{\eta}{\delta^2} f_s + \text{randn}(P_n)$

**end for**

**busca**  $\leftarrow$  Monte Carlo Sequencial ou descida por gradiente, definidos anteriormente

**while** estimativa,  $e$ , do algoritmo muda substancialmente **do**

**for** cada permutação de par de sensores,  $s_i$  e  $s_j$  **do**

$\text{TDoA}[i][j] \leftarrow \arg \max_{\tau} (s_i.\text{sig} \star s_j.\text{sig})(\tau)$

**end for**

$e \leftarrow \text{busca}(\text{TDoA}, e, W_r, L_r, D_r)$

**if**  $\text{busca}$  é Monte Carlo Sequencial **then** reduza  $\{W, L, D\}$  para  $\{W_r, L_r, D_r\}$  de acordo com  $e$  e posições de sensores atuais

**end if**

Cria novo arranjo de sensores em forma de *simplex* centrado em  $e$ . Assim, cada sensor será movido, tornando necessário nova medida.

**for** cada sensor da rede, como  $s$  **do**

$\delta \leftarrow \|s.\text{pos} - f.\text{pos}\|$

$\tau \leftarrow \frac{\delta}{v_s}$

$f_s \leftarrow f.\text{sig}$  atrasado por  $\tau$

$s.\text{sig} \leftarrow \frac{\rho}{\delta^2} f_s + \text{randn}(P_n)$

**end for**

**end while**

Com posições e sinais atualizados, repete-se a busca. Para-se quando a estimativa da posição do emissor não mudar após uma iteração.