

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Navegação
de veículo submarino autónomo
em rede acústica móvel**

Nuno Filipe Leite dos Santos

Licenciado em Engenharia Electrotécnica
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Dissertação submetida para satisfação
dos requisitos do grau de mestre
em Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

**Dissertação realizada sob a orientação de
Professor Doutor Aníbal Castilho Coimbra de Matos,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

Porto, Março, de 2008

Navegação de veículo submarino autónomo em rede acústica móvel

Nuno Filipe Leite dos Santos

**Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
sob a orientação de
Professor Doutor Aníbal Castilho Coimbra de Matos**

(O Presidente do Júri, Professor Doutor Américo Lopes de Azevedo)

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Rua Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal**

Março de 2008

Resumo

Este documento descreve a implementação da navegação de veículos subaquáticos autónomos em redes acústicas móveis. As limitações da tecnologia robótica subaquática são ainda muitas e, a navegação em rede acústica móvel permite ultrapassar parte dessas limitações, o que conduz a um enorme avanço, principalmente do ponto de vista operacional, na diminuição dos custos associados a cada operação. Com a rede acústica móvel deixam de existir limites nas áreas de operação e a intervenção humana torna-se reduzida, sendo apenas necessária para supervisão.

Para a execução da navegação subaquática, em rede móvel, trata-se sobretudo da resolução do posicionamento acústico e, ainda, do algoritmo de estimação de posição, navegação.

O ponto de partida do presente trabalho foi a navegação em rede acústica fixa, que se encontrava implementada. Identificadas as suas limitações, a necessidade da implementação da rede acústica móvel tornou-se prioritária, ainda que o problema de navegação e posicionamento não estivesse solucionado.

Ao longo do trabalho são apresentadas soluções para ultrapassar as dificuldades identificadas inicialmente e outras que foram surgindo com o decorrer do estudo, que se centraram essencialmente no posicionamento acústico e no desconhecimento do algoritmo de navegação a utilizar com redes móveis. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e levam a crer que a implementação prática da navegação em rede acústica móvel será bem sucedida, o que significará um ganho enorme ao nível operacional e permitirá planear e executar missões que até agora eram extremamente complicadas de realizar.

Na parte final do trabalho é feita uma breve análise dos métodos de condução e controlo a utilizar para o seguimento de trajectórias planeadas, como complemento à navegação.

Abstract

This document describes the implementation of the navigation of autonomous underwater vehicles on acoustic mobile networks. The limitations of underwater robotics technology are still many, and the navigation in acoustic mobile networks allows to overcome some of those limitations, leading to a great improvement especially in the reduction of operational costs associated to the execution of each mission. With the acoustic mobile networks there are no bounds in the operational areas and human intervention becomes only necessary for supervision.

For the implementation of underwater navigation, in a mobile network, we need to solve the acoustic positioning and develop the best algorithm of estimation of position, navigation.

The point of departure of this study was the navigation in an acoustic fixed network, which was already implemented and tested. Identified its limitations, the need for the implementation of an acoustic mobile network become a priority.

Throughout this work different solutions are presented to overcome the problems that have been identified initially which focused mainly on acoustic positioning and the lack of a good navigation algorithm for mobile networks. The results were very satisfactory and lead us to believe that the practical implementation of the navigation on mobile network will be successful, which will mean a enormous advantage at the operational level and the possibility of planning and executing missions that until now were extremely difficult to be done.

At the end of the work there is a brief analysis of the methods of guidance and control, to be used for following planned paths. This analysis is a supplement to the acoustic mobile network navigation.

Agradecimentos

O trabalho que realizei, ao longo destes últimos anos, no âmbito das actividades de investigação e desenvolvimento do laboratório OCEANSYS, foi preponderante para a realização deste documento. Gostaria de expressar o meu agradecimento às pessoas que me apoiaram e que estiveram envolvidas em todo este trabalho:

- Ao Prof. Dr. Aníbal Matos, pela disponibilidade, apoio, orientação e dedicação prestada ao longo de todo o trabalho, sem o qual não seria possível a sua realização.
- Ao Prof. Nuno Cruz, pelo apoio prestado e disponibilidade sempre demonstrada.
- Aos colegas, que ainda se encontram presentes no local de trabalho e aos que já saíram, pelo apoio e condições de trabalho criadas.

Conteúdo

Nomenclatura	13
Índice de Tabelas	15
Índice de Figuras	17
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	19
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2 ENQUADRAMENTO	21
2.1 VEÍCULOS SUBMARINOS AUTÓNOMOS	21
2.2 NAVEGAÇÃO	22
2.3 REDE MÓVEL	23
2.4 SISTEMAS UTILIZADOS	25
2.4.1 Veículo submarino autónomo	25
2.4.2 Veículo aquático de superfície autónomo	26
2.4.3 Bóias de navegação e instrumentação	27
2.5 MISSÃO	28
3 NAVEGAÇÃO EM REDE ACÚSTICA FIXA	29
3.1 POSICIONAMENTO ACÚSTICO	29
3.1.1 Método baseado em LBL	29
3.2 FILTRO DE KALMAN	34
3.2.1 Implementação do filtro de Kalman	37
3.3 RESULTADOS	38
4 NAVEGAÇÃO EM REDE ACÚSTICA MÓVEL	41
4.1 POSICIONAMENTO ACÚSTICO	41
4.1.1 Comprimento da baseline constante	42
4.1.2 Comprimento da baseline desconhecido	43
4.2 NAVEGAÇÃO EM REDE ACÚSTICA MÓVEL	44
4.2.1 Implementação do filtro de Kalman	45
4.2.1.1 Resultados obtidos	47
4.2.1.2 Análise de resultados	48
4.2.2 Novo filtro de Kalman	48
4.2.2.1 Resultados obtidos	49
4.2.2.2 Análise de resultados	53
5 CONDUÇÃO E CONTROLO	55
5.1 MODELO DINÂMICO	56
5.1.1 Modelo cinemático	56
5.1.2 Modelo cinemático simplificado do plano horizontal	57
5.2 MÉTODOS DE CONDUÇÃO	58
5.2.1 Método way-point	59
5.2.2 Método line-tracking	61
6 IMPLEMENTAÇÃO	63
6.1 ARQUITECTURA DO SOFTWARE DE BORDO	63
6.2 MÓDULOS IMPLEMENTADOS	64
7 CONCLUSÕES	67
7.1 PRINCIPAIS RESULTADOS	67
7.2 TRABALHO FUTURO	68
Referências	69

Nomenclatura

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LBL	<i>Long BaseLine</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
ROV	Remotely Operated Vehicle
MARES	<i>Modular Autonomous Robot for Environment Sampling</i>
VSA	Veículo submarino autónomo
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Potenciais aplicações da tecnologia VSA	22
Tabela 2.2 – Principais características do MARES	25
Tabela 2.3 – Principais características do Zarco	26
Tabela 2.4 – Principais características das bóias	27

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Exemplo típico de uma missão com rede acústica móvel em rios.....	24
Figura 2.2 – Descrição da estrutura do MARES	25
Figura 2.3 – Fotografia do MARES	25
Figura 2.4 – Desacoplamento do controlo no plano horizontal e vertical.....	26
Figura 2.5 – Descrição da estrutura do Zarco.....	27
Figura 2.6 – Fotografia do Zarco.....	27
Figura 2.7 – Descrição das bóias	28
Figura 2.8 – Fotografia de uma bóia	28
Figura 2.9 – Cenário típico de uma missão	28
Figura 3.1 – Posicionamento acústico com 3 faróis	30
Figura 3.2 – Posicionamento acústico com 2 faróis	31
Figura 3.3 – Ciclo completo de transmissões/detecções	31
Figura 3.4 – Sensibilidade de posicionamento face a erros nas distâncias	33
Figura 3.5 – Sensibilidade de posicionamento em relação à posição aos faróis	33
Figura 3.6 – Cenário de operação desejável.....	33
Figura 3.7 – Movimentação do VSA no referencial fixo	38
Figura 3.8 – Diagrama de blocos de simulação da navegação em rede acústica fixa	38
Figura 3.9 – Trajectória estimada do VSA.....	39
Figura 3.10 – Erro de estimação.....	39
Figura 3.11 - Covariâncias.....	39
Figura 3.12 – Trajectória estimada.....	40
Figura 3.13 – Correntes estimadas	40
Figura 4.1 – Desvio do referencial móvel em relação ao fixo.....	41
Figura 4.2 – Determinação das distâncias entre faróis e o VSA	43
Figura 4.3 – Ciclo completo de transmissões / detecções	43
Figura 4.4 – Diferentes ângulos a ter em conta na navegação móvel	45
Figura 4.5 – Diagrama de blocos da simulação da navegação em rede móvel	45
Figura 4.6 – Orientações do veículo nos referenciais fixo e móvel	46
Figura 4.7 – Trajectória global do VSA	47
Figura 4.8 – Valor do ângulo α estimado e real	47
Figura 4.9 – Trajectória global do VSA	48
Figura 4.10 – Trajectória real	49
Figura 4.11 – Estimação de α	49
Figura 4.12 - Covariâncias.....	50
Figura 4.13 – Trajectória real	50
Figura 4.14 - Covariâncias.....	50
Figura 4.15 – Trajectória global	51
Figura 4.16 – Trajectória do veículo no referencial móvel	51
Figura 4.17 – α estimado vs α real.....	51
Figura 4.18 – Erro de estimação do ângulo α	51
Figura 4.19 – Trajectória global	52
Figura 4.20 – Deslocação do veículo no referencial móvel (fig. direita) <i>versus</i> estimação da posição (fig. esquerda).....	52
Figura 4.21 - Covariâncias.....	52

Figura 4.22 – Trajectória global dos faróis e do VSA.....	52
Figura 4.23 – Trajectória no referencial móvel	52
Figura 4.24 - Covariâncias.....	53
Figura 5.1 – Diagrama de blocos do desacoplamento da condução e do controlo.....	55
Figura 5.2 – Trajectória típica de varrimento do leito de um rio	56
Figura 5.3 – Orientação do veículo, com $v_x = v_y = 0$	59
Figura 5.4 – Orientação do veículo,	59
Figura 5.5 – Orientação do veículo,	59
Figura 5.6 – Orientação do veículo, com $v_x = v_y = 0.5$	60
Figura 5.7 – Trajectória real do veículo com método de condução <i>way-point</i>	60
Figura 5.8 – Trajectória do veículo com método de condução <i>line-tracking</i>	61
Figura 5.9 – Regime permanente, <i>line-tracking</i>	62
Figura 6.1 – Módulos que constituem o software do bordo do MARES	63
Figura 6.2 – Diagrama da máquina de estados da acústica	64
Figura 6.3 – Diagrama do módulo de navegação	65

1 Introdução

1.1 Descrição do problema

O desenvolvimento de sistemas autónomos móveis apresenta diversas dificuldades, sobretudo na resolução do problema global de navegação, que pode ser definido como: *ciência, arte, prática ou tecnologia, de planear e executar a viagem de um ponto de partida até ao ponto de destino.*

Nos sistemas robóticos terrestres a determinação do seu posicionamento é geralmente solucionada com recurso à tecnologia *GPS*, com a qual presentemente já se obtêm resoluções de posição com erros inferiores ao centímetro e uma elevada taxa de actualização. Porém, para sistemas robóticos subaquáticos autónomos, sem qualquer ligação à superfície, o problema de posicionamento, para além de outras condicionantes, aumenta a complexidade destes sistemas, devido à tecnologia *GPS* não funcionar no meio subaquático.

A navegação, em sistemas subaquáticos autónomos, soluciona-se, sobretudo, com a determinação do posicionamento global, recorrendo à comunicação acústica. Os sistemas de comunicação subaquática, baseados na comunicação acústica, recorrem geralmente à utilização de redes acústicas fixas, para a determinação de distâncias e, posteriormente, através de triangulação obtém-se uma posição. Sendo esta a tecnologia que apresenta os melhores resultados, impõe ainda diversas restrições e limitações de operação, que aumentam a dificuldade de execução da utilização prática deste sistemas e, ainda, os custos associados à sua utilização.

A navegação em rede acústica móvel permite suprimir algumas das restrições impostas pela rede acústica fixa, todavia, levantam novas questões que necessitam ser resolvidas. Inicialmente, será necessário determinar o posicionamento numa rede acústica em movimento, posteriormente, identificar o método de programação de missões, sendo a missão o resultado de um conjunto de trajectórias a executar, e, finalmente, determinada a posição e programada a missão, implementar algoritmos de condução. As soluções apresentadas, na presente dissertação, ambicionam diminuir as limitações existentes na navegação de sistemas subaquáticos em redes acústicas fixas, diminuir os custos de operação associados e diminuir o tempo de desenvolvimento destes sistemas.

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação obedece à seguinte estrutura:

O capítulo 2 expõe o enquadramento do presente trabalho, apresentando a tecnologia robótica subaquática, o problema global de navegação associada à tecnologia em causa, as vantagens da rede acústica móvel face à rede acústica fixa e ainda os sistemas que se pretendem utilizar na implementação da navegação em rede acústica móvel.

1. Introdução

O capítulo 3 descreve a navegação em rede acústica fixa. Neste capítulo é apresentado o método de posicionamento acústico baseado em LBL, o filtro de *Kalman* como estimador de estado e, por fim, são mostrados os resultados de simulação para a navegação em rede acústica fixa.

No capítulo 4 descreve-se a implementação da rede acústica móvel, apresentando possíveis resoluções para os problemas de posicionamento acústico e de navegação em rede acústica móvel. Os resultados de simulação obtidos para as soluções propostas são analisados.

O capítulo 5 apresenta alguns métodos de condução e controlo, como complemento à navegação.

O capítulo 6 mostra os detalhes de implementação prática e o trabalho desenvolvido no passado, que serviu de suporte ao desenvolvido.

O capítulo 7 contém as conclusões e recomendações para futuro trabalho.

2 Enquadramento

2.1 Veículos submarinos autónomos

Os veículos submarinos podem ser diferenciados em duas classes distintas: os veículos remotamente operados, conhecidos por ROV, e os veículos subaquáticos autónomos, conhecidos por AUV ou ainda VSA. Antes de se efectuar o enquadramento do problema abordado neste trabalho, será feita uma breve apresentação dos veículos submarinos autónomos, referindo as suas principais valências e as áreas de aplicação.

De forma a compreender o que se fez ao longo das últimas décadas em relação ao desenvolvimento da tecnologia VSA, é apresentada cronologicamente a sua evolução a partir de 1970, uma vez que foi a partir desta década que os avanços nesta área se mostraram mais evidentes. Entre 1970 e 1980 foram desenvolvidos e testados os primeiros protótipos pelas universidades norte-americanas em conjunto com a marinha norte-americana, para aplicações essencialmente militares, tendo sido efectuado um avanço tecnológico enorme nesta década. De 1980 a 1990 foi comprovado o conceito geral da tecnologia VSA e foram igualmente feitos enormes avanços em sistemas cada vez mais pequenos, de baixa potência e técnicas de condução e navegação avançadas. Na década de 90, os VSA, depois dos conceitos testados e validados, tornam-se operacionais e capazes de cumprir tarefas definidas, o que levou a que os potenciais utilizadores da tecnologia começassem a trabalhar em conjunto com os investigadores, aumentando a visibilidade destes sistemas. Apesar de toda a evolução ocorrida estes sistemas e do enorme potencial da tecnologia dos VSA, continuam a ser usados essencialmente no meio académico, uma vez que ainda impõe limitações tecnológicas, que dificultam a sua utilização e operação por pessoas sem uma formação específica [Blid01].

Um VSA pode ser definido como sendo um sistema móvel subaquático com a sua própria energia, com autonomia e inteligência para autonomamente executar tarefas pré-programadas. Ao contrário dos ROV, que são controlados remotamente, via “cordão umbilical”, os VSA não têm qualquer ligação à superfície e devem ser capazes de navegar autonomamente, com os sensores que transportam. Os VSA oferecem enormes vantagens face aos ROV, em termos de custos e segurança operacional. Porém, ainda existem restrições cruciais para que estes sistemas se tornarem completamente autónomos e fiáveis ao nível da robustez da tecnologia de comunicação robótica subaquática, sensores de bordo para navegação no plano horizontal e fontes de energia que permitam maior autonomia [Ura02].

Inicialmente os sistemas robóticos subaquáticos autónomos foram desenvolvidos para fins militares, mas, após a sua colocação ao dispor da comunidade científica, o âmbito de aplicação da tecnologia têm crescido bastante com o gradual aumento das preocupações ambientais e o contínuo transpor de desafios científicos e de engenharia, causados principalmente por condições adversas, particularmente nos oceanos. Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas das mais diversas aplicações da tecnologia em causa [Yuh00].

2. Enquadramento

Ciência	<ul style="list-style-type: none">• Batimetria dos oceanos e rios;• Rápida resposta a eventos geotérmicos e oceanográficos;• Estudo de fontes hidrotermais.
Ambiental	<ul style="list-style-type: none">• Monitorização de zonas envolventes a emissários submarinos;• Acompanhamento de massas de água;• Controlo de dispersão;• Inspeção de estruturas subaquáticas.
Militar	<ul style="list-style-type: none">• Detecção de minas e registo da sua localização;• Veículo de transporte (transporte de sensores de apoio a submarinos).
Indústria	<ul style="list-style-type: none">• Construção e manutenção de estruturas submarinas;• Pesquisas oceânicas e recolha de dados (indústria petrolífera);• Inspeção do casco de navios, de cabos de comunicação subaquáticos e manutenção;• Localização de destroços submersos.
Outros	<ul style="list-style-type: none">• Viagens, de lazer, subaquáticas.

Tabela 2.1 - Potenciais aplicações da tecnologia VSA

2.2 Navegação

Para serem capazes de realizar os diversos tipos de aplicações (Tabela 2.1), os veículos submarinos autónomos necessitam transportar sensores, vulgarmente designados de sensores *payload*, para a recolha de dados específicos para cada aplicação. Porém, para navegar, necessitam igualmente de sensores de bordo que permitam ao veículo, após uma integração de todos os dados de navegação, identificar o estado do veículo dado normalmente pela posição, orientações e derivadas em ordem ao tempo das mesmas. Os sensores transportados a bordo de um veículo autónomo, geralmente para efeitos de navegação, são:

- O sensor de pressão, que permite determinar a profundidade do veículo com uma taxa elevada;
- Inclínómetros e bússola, que determinam a inclinação/rotação e ainda as orientações do veículo, designadas de *roll*, *pitch* e *yaw*;
- Giroscópios para obtenção das velocidades de inclinação, rotação e orientação, velocidades angulares;
- Sensores de medição de velocidade através da rotação dos motores, que fornecem a medida da velocidade do veículo face à água;
- Sonares de efeito Doppler, que medem a velocidade do veículo em relação ao fundo;

2. Enquadramento

- Sensores de inércia para a obtenção de medidas de aceleração;
- E, finalmente, para a determinação da posição a tecnologia mais usada e que produz melhores resultados, é o posicionamento acústico.

As técnicas de navegação dos veículos subaquáticos autónomos mais usadas e mais relevantes são a navegação acústica, o objecto de estudo da presente dissertação, a navegação inercial e também a navegação baseada em mapas geofísicos.

2.3 Rede móvel

Como já foi referido, para se resolver o problema de navegação é essencialmente necessário saber onde se está e para onde se quer ir, o que nos leva, primeiramente, à resolução da determinação do posicionamento.

Os veículos subaquáticos podem mover-se em 3 dimensões, pelo que é necessário determinar a sua posição no plano horizontal (x, y) e também a sua profundidade z . Para a determinação da profundidade do veículo é, normalmente, usado um sensor de pressão que consegue resoluções nas medidas de profundidade na ordem dos milímetros e com elevada taxa de actualização. No cálculo da posição do veículo no plano horizontal são utilizados faróis acústicos para, através da comunicação acústica, se determinar as distâncias aos faróis, conseguindo-se, assim, determinar o posicionamento do veículo.

As principais restrições e limitações da rede acústica fixa, atendendo ao nível da implementação e à sua utilização prática, são as seguintes:

- A qualidade de posicionamento, minimização do erro da posição, depende da geometria da rede acústica. A linha de vista do veículo submarino para os faróis deve estar desimpedida, para que se evitem as comunicações com reflexões de sinais acústicos, que aumentam o erro da medida de distância;
- O posicionamento com rede acústica apresenta uma baixa taxa de actualização de medidas e um erro associado a cada medida, que varia em função da distância;
- A comunicação acústica tem limitações de distância, sendo necessário garantir uma cobertura da rede acústica de toda a área de operação. Quanto maior a área de operação, maior o número de faróis acústicos necessários. Uma alternativa ao número crescente de faróis é um reposicionamento dos mesmos, à medida que a o veículo se desloca;
- O elevado custo associado ao desenvolvimento dos faróis acústicos, que cresce em função do número de frequências de comunicação necessárias;
- Devido à restrição no número de frequências disponíveis para comunicação, associadas ao custo de desenvolvimento e ao alcance das comunicações, a área de operação tem limites máximos;
- O elevado tempo de montagem/desmontagem de um cenário típico de operação;
- Os requisitos mínimos, quer no número de pessoas, quer no material de apoio na execução de cada missão.

2. Enquadramento

As vantagens da navegação da rede móvel para veículos submarinos são:

- Diminuição do tempo de montagem/desmontagem do “cenário” de operação. Este requisito é de extrema importância, pois principalmente para missões efectuadas em alto mar, águas agitadas, os tempos de *setup* podem inviabilizar a operação;
- A área de operação, área definida pelos limites do alcance acústico, deixa de estar limitada. Os faróis acústicos móveis poderão acompanhar a deslocação do veículo submarino;
- A rede acústica autónoma para se deslocar, ainda que se esteja a navegar com algoritmos baseados em rede acústica fixa, sem que seja necessário a intervenção humana, é uma mais valia importante, dado que nas situações em que a comunicação acústica é de baixa qualidade, a rede poderá mover-se sem que seja necessário levantar âncoras e ancorar num local diferente;
- A geometria da rede acústica poderá ser definida em tempo real, permitindo otimizar a qualidade de posicionamento do veículo;
- E, por fim, o número dos faróis acústicos e frequências da rede acústica que é minimizado e independente da área de operação.

As dificuldades na implementação da rede acústica móvel resultam da falta de informação por parte do veículo em relação à posição dos faróis. Como não existe um canal de comunicação entre os faróis e o veículo, dado que as soluções existentes no mercado, os modems acústicos, apresentam baixas taxas de comunicação, na ordem dos bytes/segundo, uma baixa fiabilidade e um consumo e custo elevado, é necessário identificar através da comunicação por frequências acústicas a posição dos faróis. Outra questão relevante de navegação refere-se à determinação da direcção a seguir. A resolução das questões levantadas tem por principal objectivo a navegação em rede acústica móvel de modo a permitir a execução de missões idênticas às apresentadas na Fig. 2.1.

Associado ao problema da navegação subaquática em rede acústica móvel surge a condução, que merece uma atenção especial, na medida em que sem um método adequado de seguimento de trajectórias, a navegação rapidamente poderá divergir, por acção de perturbações externas ao sistema (normalmente modeladas como correntes). Apesar de não ser o principal objecto de estudo deste trabalho, este tópico apresenta-se como um complemento à navegação.

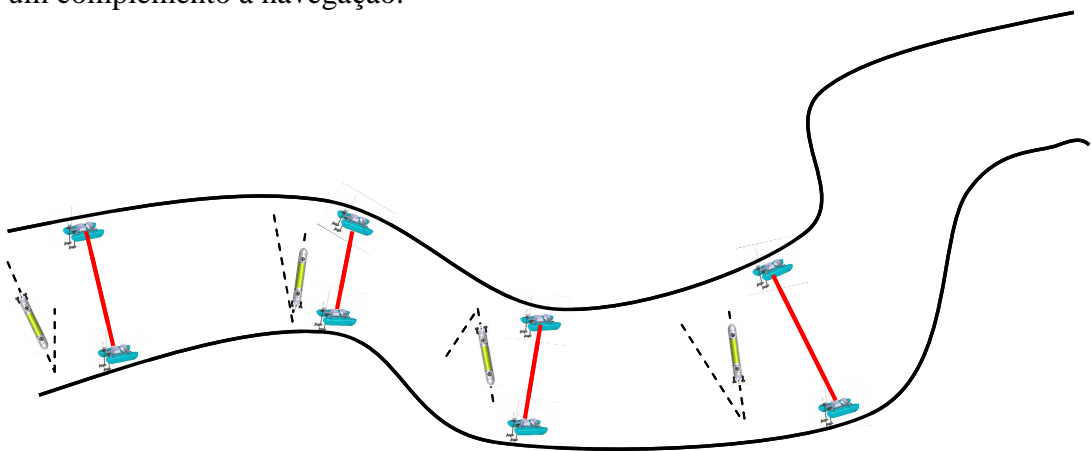


Figura 2.1 – Exemplo típico de uma missão com rede acústica móvel em rios

2. Enquadramento

Antes da abordagem aos problemas identificados na navegação na rede acústica móvel, serão apresentados os sistemas tecnológicos utilizados na implementação da rede acústica fixa existente e futura implementação da rede acústica móvel.

2.4 Sistemas utilizados

2.4.1 Veículo submarino autónomo

O MARES (*Modular Autonomous Robot for Environment Sampling*) foi desenvolvido para poder transportar diversos tipos de sensores *payload*, para monitorização e recolha de dados ambientais, para além dos sensores necessários à navegação. As principais características do veículo são:

- Peso e dimensões reduzidos, que tornam fácil a sua operação. Duas pessoas conseguem operar com o veículo sem que seja necessário qualquer tipo de equipamento para lançar e recolher o veículo da água, como acontece com os VSA de maior dimensão;
- Baterias recarregáveis de lítio, que permitem uma autonomia energética razoável;
- Construção modular, permitindo configurar a qualquer momento a sua dimensão e secções (Fig. 2.2);
- Desacoplamento entre o controlo de profundidade e o plano horizontal e ainda a velocidade de deslocação em relação à água.

Tamanho	1,5 m
Diâmetro	20 cm
Massa	32 kg
Máxima profundidade	100 m
Velocidade horizontal	0-2 m/s
Autonomia	10 h

Tabela 2.2 – Principais características do MARES

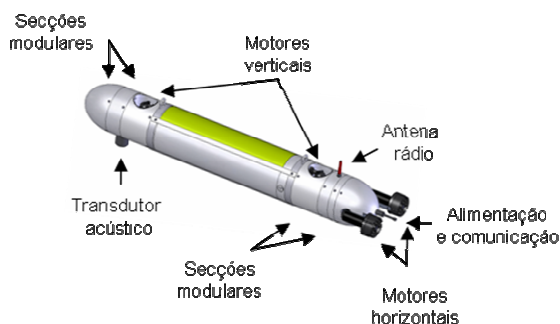


Figura 2.2 – Descrição da estrutura do MARES

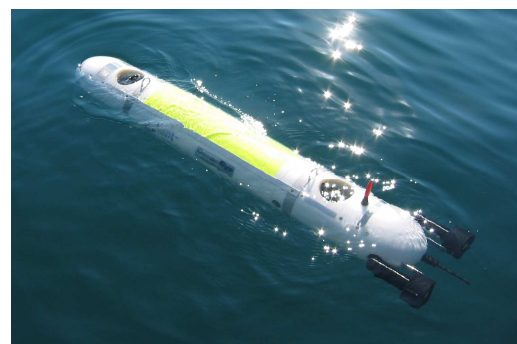


Figura 2.3 – Fotografia do MARES

2. Enquadramento

A principal diferença do MARES para os veículos submarinos autónomos com um motor de propulsão e lemes de superfície, é o desacoplamento entre o controlo nos planos vertical e horizontal (Fig. 2.4), podendo efectuar trajectórias apenas com velocidade em profundidade e velocidade nula de deslocamento horizontal face à água e, permite ainda efectuar orientações com velocidade horizontal, igualmente nula. O desacoplamento entre o controlo vertical e horizontal simplifica significativamente o controlo deste dois modos. A robustez da estrutura, dado que os lemes são normalmente pontos mecânicos críticos, não deixa de ser também uma característica importante. O MARES será o veículo para o qual se implementará a navegação em rede acústica móvel.

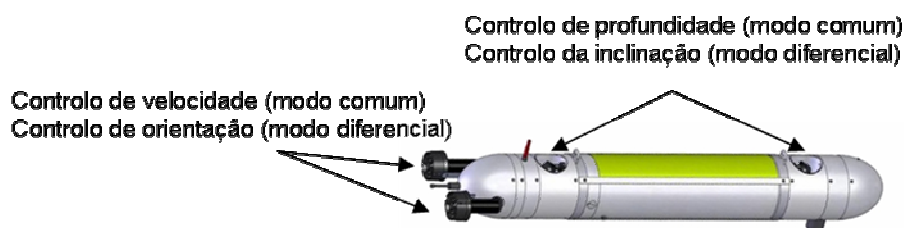


Figura 2.4 – Desacoplamento do controlo no plano horizontal e vertical

2.4.2 Veículo aquático de superfície autónomo

O Zarco é um pequeno veículo aquático de superfície, autónomo, desenvolvido com a forma de *catamaran* para operar em águas “calmas” e possibilitar o transporte de vários tipos de sensores *payload*. O Zarco servirá de transporte a um dos faróis acústicos, permitindo, deste modo, passar a rede acústica de fixa para móvel, tornando possível a execução de missões pré-programadas para a rede acústica ou o controlo remoto em tempo real da sua trajectória/posição.

As principais características do veículo são:

- Construção modular, permitindo modificar a sua dimensão e secções de uma forma fácil e rápida;
- Veículo compacto e robusto;
- Baterias recarregáveis de longa duração;
- Execução de missões autónomas pré-programadas;
- Transmissão de dados para terra em tempo real.

Comprimento	1,5 m
Largura	1 m
Massa	50 kg
Flutuação	50 kg
Velocidade horizontal	[0, 2] m/s

Tabela 2.3 – Principais características do Zarco

2. Enquadramento

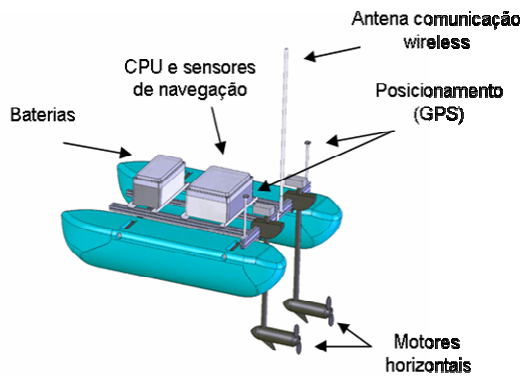


Figura 2.5 – Descrição da estrutura do Zarco



Figura 2.6 – Fotografia do Zarco

2.4.3 Bóias de navegação e instrumentação

As bóias são plataformas de flutuantes, com instrumentação e energia incorporadas. A configuração básica das bóias inclui baterias recarregáveis, um compacto receptor GPS e ainda transmissão de dados via RF em tempo real.

Estas plataformas de flutuação são usadas para transportar os faróis acústicos e, no cenário de operação, são ancoradas de forma a manterem-se fixas até ao final das operações. A capacidade de transmissão de dados em tempo real permite supervisionar o decorrer das operações, com o envio das recepções/detecções acústicas.

Resumindo, as principais características das bóias, são:

- Comunicação de dados em tempo real;
- Capacidade de transporte de vários tipos de sensores;
- Autonomia energética de longa duração;
- Pequena dimensão, podendo uma pessoa transportá-la facilmente;
- Sistema interno de posicionamento, receptor GPS.

Diâmetro	75 cm
Massa	30 kg
Flutuação	20 kg
Altura da antena sobre a superfície da água	1 m

Tabela 2.4 – Principais características das bóias

2. Enquadramento

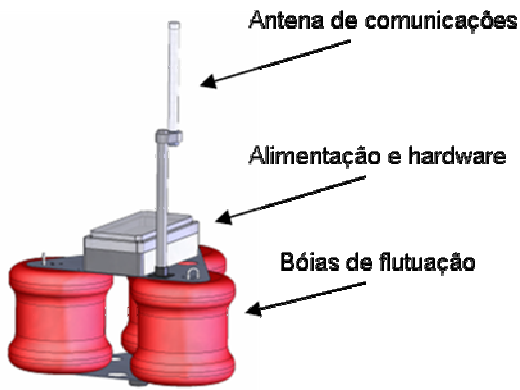


Figura 2.7 – Descrição das bóias



Figura 2.8 – Fotografia de uma bóia

2.5 Missão

A missão, no contexto da presente dissertação, é definida por um *conjunto de trajectórias rectilíneas interligadas entre si, cada uma percorrida a uma dada velocidade*. A posição inicial do veículo é o ponto inicial da missão e o ponto final da última trajectória é o ponto final da missão.

O veículo submarino para se deslocar autonomamente necessita, a priori, de conhecer a trajectória a realizar, pois, devido à inexistência de um canal de comunicação, não é possível definir a trajectória em tempo real. A programação de uma missão é, regra geral, feita em referência a um ponto com latitude e longitude conhecidas, designado por *Home*. As coordenadas de cada ponto são dadas por (x, y) em metros, que corresponde aos desvios (Norte, Este) do ponto *Home*. A missão é, deste modo, especificada num referencial fixo com as coordenadas dadas em distâncias relativamente ao ponto *Home*, por questões de simplificação na programação da missão e de posicionamento. A Figura 2.9 apresenta um cenário típico de uma missão de cobertura de uma dada área, que pode ser feita a várias camadas, realizadas a diferentes profundidades. O ponto *Home* é considerado a posição global do farol 1, que é a origem do referencial fixo, sendo os restantes pontos distâncias para Norte e Este.

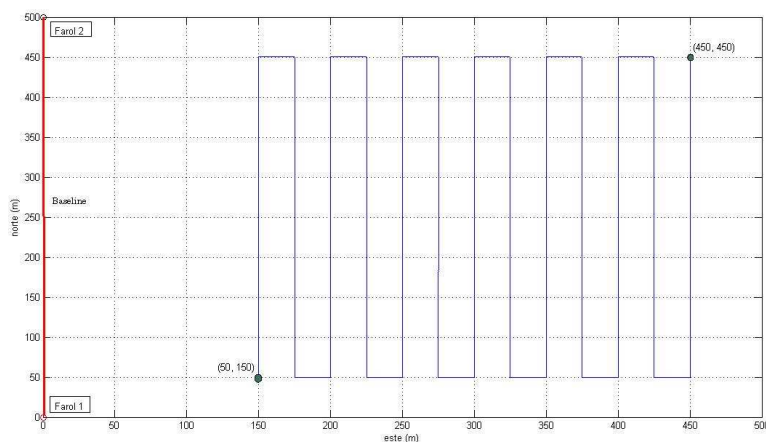


Figura 2.9 – Cenário típico de uma missão

3 Navegação em rede acústica fixa

Apesar do objecto de estudo da dissertação focar, essencialmente, a navegação em redes acústica móveis, para melhor se compreender as diferenças e a origem dos problemas surgidos é necessário perceber como se efectua a navegação em rede acústica fixa. Neste capítulo irá ser apresentado o método de posicionamento utilizado e, após a identificação do posicionamento e das vantagens/desvantagens associadas ao método, é feita uma breve descrição do filtro de *Kalman*, utilizado na estimação do estado do veículo a partir das medidas de posicionamento e dos dados dos restantes sensores de navegação.

3.1 Posicionamento acústico

A comunicação em ambientes subaquáticos é uma dificuldade acrescida. A tecnologia existente para além de ser bastante dispendiosa, ainda apresenta uma baixa taxa de fiabilidade e grandes limitações. Como as ondas electromagnéticas não se propagam a longas distâncias, a melhor escolha para estabelecer comunicação é recorrendo a ondas acústicas, o que implica uma taxa de comunicação bastante inferior, pois a propagação das ondas acústicas é da ordem dos 1500 m/s.

Para a determinação do posicionamento horizontal através da acústica, dado que para o plano vertical a posição z é determinada recorrendo ao sensor de pressão, podem ser usados vários métodos, que diferem entre si principalmente através do número de dispositivos acústicos utilizados e também da geometria da rede acústica. Os métodos de posicionamento acústico mais conhecidos são baseados em LBL (*Long BaseLine*), SBL (*Short BaseLine*), USBL (*Ultra Short BaseLine*) e LUSBL (*Long Ultra Short BaseLine*). Os métodos mencionados apresentam vantagens/desvantagens associadas e, para alguns deles, como é o caso do SBL, não é possível ser utilizado para veículos de pequenas dimensões [Mad04]. Contudo, todos os métodos acústicos baseiam-se na determinação de distâncias entre os faróis acústicos, obtidas através do tempo de propagação das ondas acústicas. Posteriormente, com essas medidas e dependendo do processo de navegação utilizado, navegação esférica ou hiperbólica, é calculada a posição do veículo subaquático.

O método de posicionamento mais utilizado e o que apresenta melhores resultados é o método baseado em LBL [Mad04]. As principais vantagens em relação aos métodos mencionados são:

- Apresenta a melhor precisão, nas medidas das distâncias, independentemente da profundidade do veículo;
- Permite áreas de operação de grande dimensão;
- Constitui o método adequado para veículos de pequenas dimensões.

3.1.1 Método baseado em LBL

3. Navegação em rede acústica fixa

O posicionamento acústico baseado em LBL é constituído por um conjunto de faróis com uma posição bem definida (normalmente ancorados) e por um conjunto emissor/receptor instalado no veículo subaquático. A distância entre o veículo e um farol é medida através de um sinal acústico de interrogação emitido pelo veículo, que fica à espera da resposta à interrogação. Para cada farol o veículo utiliza sinais de interrogação de frequência diferente para que, assim, cada farol possa identificar a quem foi feita a interrogação. Quando os faróis recebem a interrogação do veículo, respondem com uma frequência distinta e o veículo recebe a resposta do respectivo farol determinando posteriormente a distância em relação ao farol, que têm a sua posição bem definida. O número de faróis utilizados é limitado pela área de operação, dado que a rede acústica, formada pelo conjunto de faróis, tem obrigatoriamente de cobrir toda a área e pelo número de frequências disponíveis, $2 \times f$ (sendo f o número de faróis) [MC06].

Com 3 faróis é possível saber qual a posição do veículo no plano horizontal, através da triangulação das 3 distâncias aos faróis assumindo que nenhum deles deixa de operar e que o veículo consegue estabelecer comunicação com todos os faróis. Este método é conhecido por navegação esférica (Fig. 3.1). Por questões de precaução e para existir redundância na rede acústica, caso algum dos faróis pare de comunicar, é necessário instalar um ou mais faróis na rede. Por outro lado, quanto maior o número de faróis, maior terá de ser o número de frequências disponíveis para comunicação e a taxa de actualização da posição do veículo, dependendo esta última condição da implementação da máquina de estados de interrogação acústica.

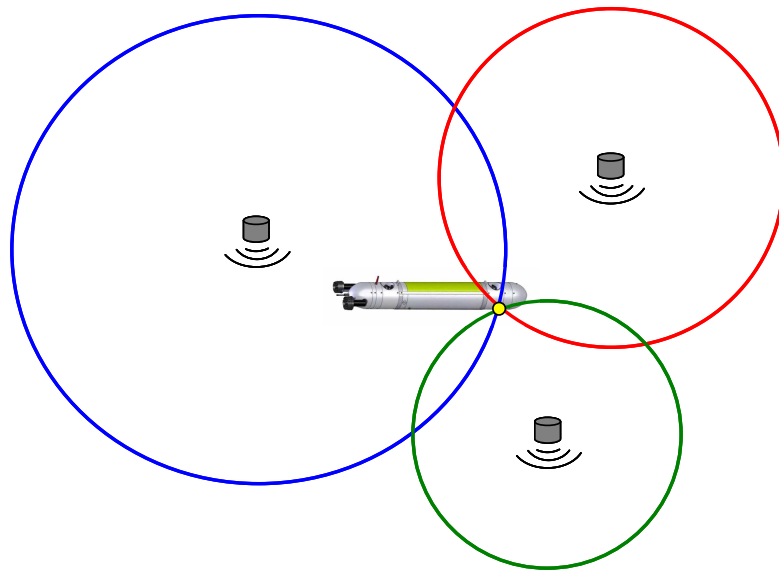


Figura 3.1 – Posicionamento acústico com 3 faróis

Devido ao custo de implementação e de operação, que aumenta quanto maior o número de faróis/frequências necessárias, em regra prescinde-se da redundância da rede acústica e limita-se o número de faróis para o mínimo possível.

Se ao problema anterior, da rede acústica com 3 faróis, se adicionar uma restrição, impedir que o veículo não ultrapasse a linha imaginária formada por 2 faróis, com apenas dois faróis é possível conhecer a posição do veículo (Fig. 3.2).

3. Navegação em rede acústica fixa

A linha imaginária, constituída pelos 2 faróis, é designada de *baseline* e desde que o veículo nunca cruze essa mesma linha, do início ao final da missão, é possível determinar a sua posição no plano $x - y$ com a vantagem de serem necessárias apenas 4 frequências de comunicação [CMMP01]. Um outro factor influente na decisão da utilização de apenas 2 faróis é a diminuição do tempo de actualização da posição diminuir.

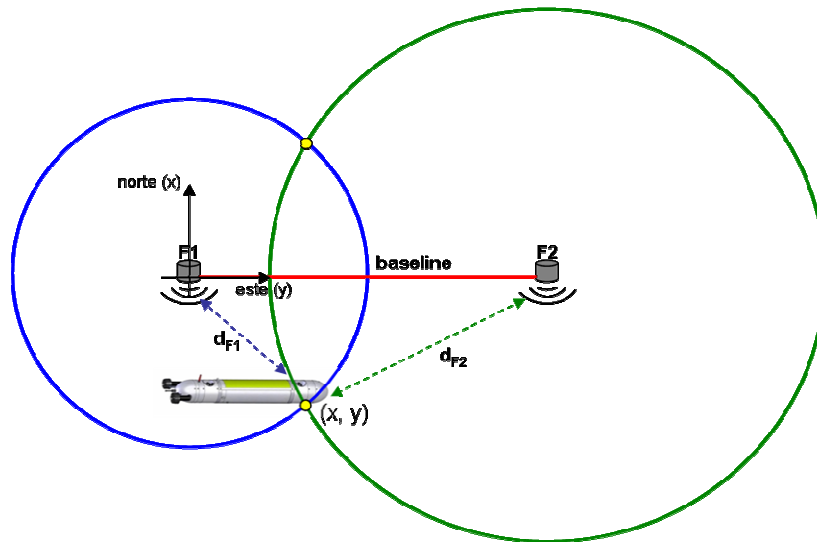


Figura 3.2 – Posicionamento acústico com 2 faróis

Para o método LBL e com apenas 2 faróis, os ciclos de interrogação/resposta podem ser analisados na figura 3.3. Sabendo qual a velocidade de propagação do som na água, que varia em função da salinidade, temperatura e pressão/profundidade, $c = f(S, T, P)$ e os tempos entre a interrogação e a resposta, podem ser determinadas as distâncias do veículo aos faróis, dadas pelas equações 3.1.

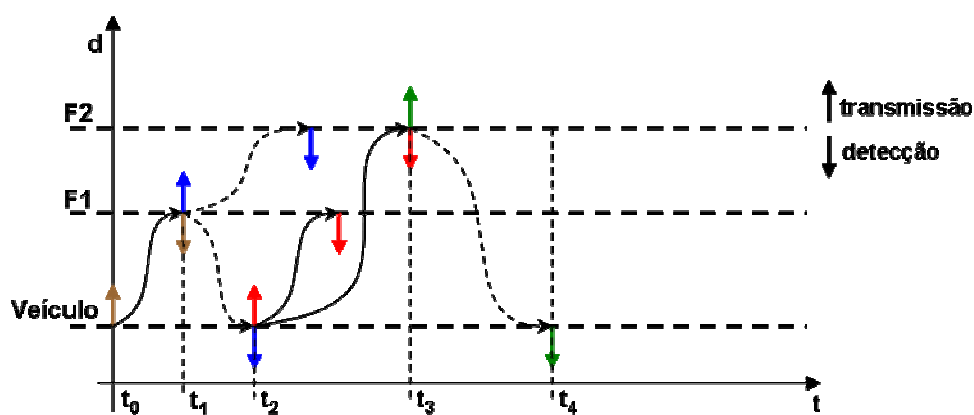


Figura 3.3 – Ciclo completo de transmissões/detecções

$$d_{F1} = \frac{t_2 - t_0}{2} \times c \tag{3.1}$$

$$d_{F2} = \frac{t_4 - t_2}{2} \times c$$

3. Navegação em rede acústica fixa

A figura 3.3 mostra a troca de sinais acústicos num ciclo completo de interrogações, que começa pela interrogação do veículo ao farol 1, t_0 . No instante de tempo t_1 o farol 1 detecta a frequência emitida pelo veículo e transmite um sinal acústico numa outra frequência. No instante t_2 o veículo detecta a resposta do farol 1 e transmite um sinal acústico na frequência que o farol 2 espera receber. Em t_3 o farol 2 detecta a frequência do veículo e transmite numa outra frequência. No instante t_4 o veículo detecta a resposta do farol 2 e o ciclo termina, dando origem ao início de um novo.

As diferentes cores do gráfico especificam os diferentes níveis de frequência envolvidos. Os faróis, apesar de escutarem todos os sinais acústicos, apenas respondem a uma frequência distinta. Todas as configurações da rede acústica, mapas de detecção/transmissão e níveis de detecção, que dependem da potência do sinal transmitido, são programadas no início de cada missão. Conhecendo as distâncias aos faróis e a posição dos mesmos, a posição do veículo é dada pelas equações 3.2.

$$\begin{aligned} x/\text{norte} &= \sqrt{d_{F1}^2 - y^2} \\ y/\text{este} &= \frac{d_{F1}^2 - d_{F2}^2 + b^2}{2b} \end{aligned} \quad (3.2)$$

A precisão do sistema de posicionamento depende da precisão das distâncias medidas aos faróis e da precisão da posição dos faróis. É importante que o veículo conheça com alguma exactidão a posição da bóias e também que o erro das distâncias medidas seja minimizado. Dada a área de operação, onde é esperado que o veículo navegue, a posição dos faróis deve ser escolhida atendendo à minimização da sensibilidade do posicionamento (S) face à distância do veículo aos mesmos faróis. A figura 3.4 ilustra a sensibilidade do método de posicionamento face a erros no cálculo das distâncias aos faróis (e). A figura 3.5 demonstra a sensibilidade de posicionamento do veículo em relação à distância aos faróis [MCMP99].

$$\begin{aligned} \text{norte} &= f_x(d_{F1}, d_{F2}) = x \\ \text{este} &= f_y(d_{F1}, d_{F2}) = y \\ S &= \sqrt{\left(\frac{x - \tilde{x}}{e}\right)^2 + \left(\frac{y - \tilde{y}}{e}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Uma regra prática para definir a melhor área de operação, tendo em conta a minimização dos erros ilustrados nas figuras anteriores, é um quadrado em que a distância mínima aos faróis é $\frac{1}{4}$ da *baseline* e a distância máxima aos faróis é igual ao comprimento da *baseline* (Fig. 3.6).

3. Navegação em rede acústica fixa

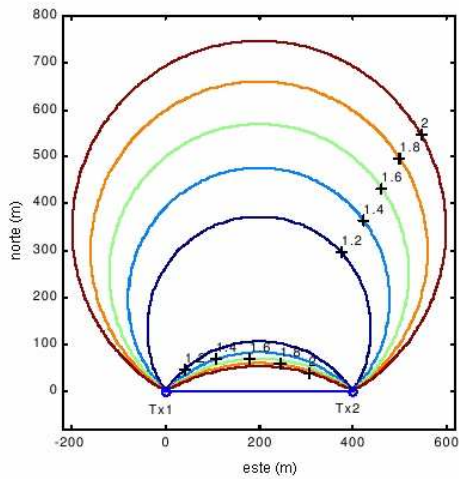


Figura 3.4 – Sensibilidade de posicionamento face a erros nas distâncias

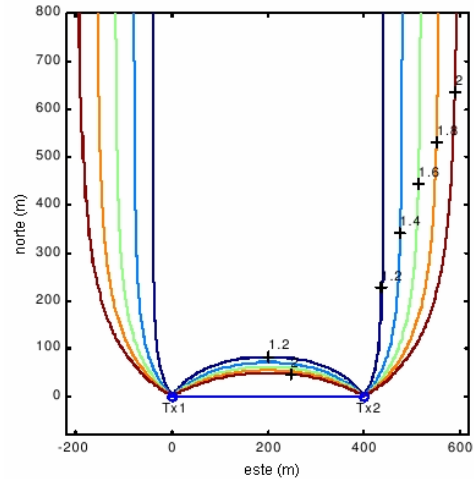


Figura 3.5 – Sensibilidade de posicionamento em relação à posição aos faróis

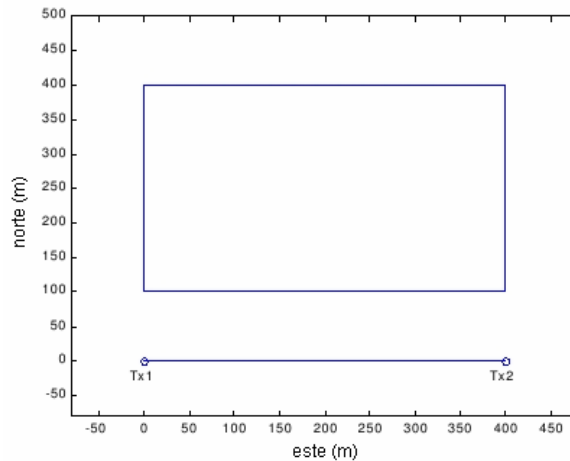


Figura 3.6 – Cenário de operação desejável

A taxa de actualização do posicionamento acústico é limitada pelo tempo de determinação das distâncias, pelos tempos “mortos”, tempo entre uma detecção e transmissão, impostos pelo hardware dos faróis acústicos, e ainda pela taxa sucesso na comunicação acústica, que, dependendo das condições do meio, pode ser reduzida. O resultado de todas estas limitações é uma actualização com uma baixa taxa, na ordem dos segundos, tornando o algoritmo de navegação mais complicado, pois é necessário que este seja relativamente imune a uma medida de distância errada ou até à falta da mesma medida.

3. Navegação em rede acústica fixa

3.2 Filtro de Kalman

Antes de se passar à descrição da implementação do filtro de *Kalman* é apresentado em seguida uma pequena descrição do filtro, das suas equações e o porquê da sua utilização na navegação de um veículo submarino autónomo.

Apesar do filtro ter sido inicialmente desenvolvido e usado por várias pessoas, *Rudolf Kalman* em 1960 foi considerado o seu inventor, sendo, desta forma, atribuído o nome de filtro de *Kalman*.

O filtro de *Kalman* é um estimador recursivo, eficiente, que estima o estado de um sistema dinâmico a partir de uma série de medidas ruidosas ou incertas. É provavelmente um dos métodos mais usados para navegação em aplicações de robótica móvel, sendo um método de estimação estocástica que combina modelos determinísticos e estocásticos de modo a obter estimativas óptimas de variáveis de estado de sistemas lineares. Se um sistema pode ser descrito através de um modelo linear e as incertezas dos sensores e do sistema poderem ser modelados como ruídos Gaussianos brancos, então o filtro de *Kalman* apresenta uma estimativa estatisticamente óptima [WB01].

Apesar de o sistema em causa ser um sistema contínuo, o sistema computacional é actualizado discretamente, ainda que a taxa de actualização seja relativamente baixa, [10, 20] Hz.

As equações apresentadas em seguida, para sistema discretos, têm as seguintes condições necessárias e assumidas:

- O sistema deve ser linear, ou pelo menos linearizável em torno de um ponto nominal;
- O ruído que afecta o sistema e as medições é ruído Gaussiano de média nula e variância constante;
- Os ruídos do sistema e das medições não são correlacionados.

O modelo do sistema e das medidas é o seguinte:

$$\begin{aligned} \underline{x}_k &= F_k \underline{x}_{k-1} + B_k u_{k-1} + w_{k-1} \\ \underline{z}_k &= H_k \underline{x}_k + s_k \\ \underline{w}_k &\in N(\underline{0}, Q_k); \underline{s}_k \in N(\underline{0}, R_k) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Sendo \underline{x} o vector do estado do sistema, F a matriz de transição de estado, B a matriz de acção na entrada u e w o ruído do sistema com distribuição normal de covariância Q . \underline{z} corresponde ao vector das observações/medidas efectuada ao estado \underline{x} , H a matriz do modelo das observações e s o ruído das observações, que se assume uma distribuição normal de ruído branco de covariância R [GELB96].

Para além de uma estimativa de estado, \hat{x} , o filtro de *Kalman* calcula a matriz da covariância do erro de estimação do estado, P . P_0 corresponde ao valor da covariância inicial do erro de estimação do estado.

3. Navegação em rede acústica fixa

As condições iniciais:

$$E[\underline{x}(0)] = \hat{\underline{x}}_0$$
$$E\left[\left(\underline{x}(0) - \hat{\underline{x}}_0\right)\left(\underline{x}(0) - \hat{\underline{x}}_0\right)^T\right] = P_0$$

Assume-se

$$E[\underline{w}_k \underline{z}_j^T] = 0, \quad k, j \in \mathfrak{R}^n$$

Estimação de estado na extrapolação

$$\hat{\underline{x}}_k(-) = F_k \hat{\underline{x}}_{k-1}(+)$$

Covariância do erro

$$P_k(-) = F_k P_{k-1}(+) F_k^T + Q_{k-1}$$

Actualização da estimação do estado

$$\hat{\underline{x}}_k(+) = \hat{\underline{x}}_k(-) + K_k \left[\underline{z}_k - H_k \hat{\underline{x}}_k(-) \right]$$

Actualização do erro da covariância

$$P_k(+) = [I - K_k H_k] P_k(-)$$

Matriz do ganho de *Kalman*

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1}$$

As aplicações do filtro de *Kalman* abrangem diversas áreas de engenharia, tendo um importante papel nos sistemas de engenharia e na teoria de controlo. Para o problema da navegação de veículos subaquáticos autónomos, o filtro de *Kalman* apresenta vantagens acrescidas em relação a outros métodos de estimação, tais como:

- Fácil computação matemática, pois o estado do sistema dinâmico é calculado a partir do estado anterior e da medida actual;
- Informação sobre o estado estimado do sistema, erro das variáveis do estado;
- Permite configurar a resposta em frequência do filtro, através do ajuste das covariâncias dos ruídos.

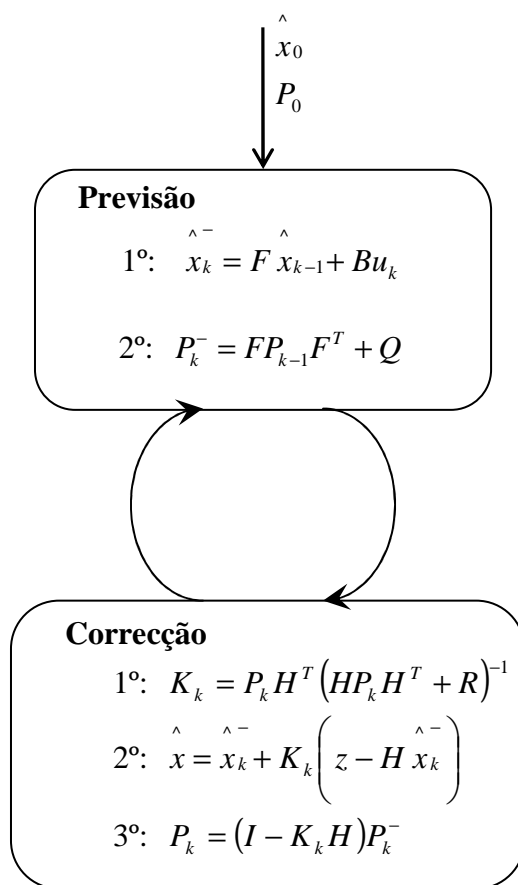
Nos problemas de navegação robótica, a posição horizontal do veículo, no plano (x, y) , é obtida através da navegação em *dead-reckoning* e da posição absoluta do veículo. A navegação em *dead-reckoning* é baseada na extrapolação dos dados de velocidade face à água, calculada em função da velocidade de rotação dos motores

3. Navegação em rede acústica fixa

horizontais, e ainda da orientação do veículo, dada pela bússola, enquanto a posição absoluta do veículo é determinada pelo método de posicionamento acústico.

O filtro de *Kalman* permite “fundir” os dados de *dead-reckoning* e de posicionamento e, em tempo real, estimar a posição do veículo, tirando as vantagens das características de cada tipo de medidas [WB01]. A velocidade do veículo, assim como a orientação, estão disponíveis a uma taxa elevada, contudo, o erro de posição vai aumentando devido ao erro nas medidas e ainda às perturbações externas, como é o caso das correntes, o que conduz a um crescente desvio da posição estimada, face à real, o que traduz um aumento do erro de estimação. Por outro lado, as medidas de posicionamento acústico têm uma baixa taxa de actualização, no entanto, o erro de posição não aumenta em função do tempo. O filtro de *Kalman* estima a posição do veículo à taxa de actualização da velocidade, actualização síncrona, e quando recebe uma medida de distância, evento assíncrono, o filtro efectua o calculo da melhor estimação da posição em tempo real.

As equações do filtro de *Kalman*, podem ser “separadas” em duas componentes, a componente de previsão, actualização síncrona, e a componente de correcção, actualização assíncrona, como já foi analisado.



Quando a posição inicial é conhecida sem erro, o estado estimado é iniciado com essa posição e assim P_0 pode ser inicializada a zero, $\hat{x}_0 = x_0$, $P_0 = 0$. Se x_0 não fosse conhecida ou se subsistisse uma incerteza associada, aí será conveniente inicializar P_0 com um valor superior a zero. Quanto maior a incerteza “maior” P (matriz $n \times n$).

3. Navegação em rede acústica fixa

3.2.1 Implementação do filtro de *Kalman*

Para a componente de previsão, é necessário calcular a matriz F e para isso procedeu-se às seguintes assumpções:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \Rightarrow x(t + \Delta t) = e^{A\Delta t}x(t) = Fx(t) \quad (3.5)$$

Com F a corresponder à matriz do modelo discreto e Δt à taxa de actualização do filtro. Como a taxa de actualização do filtro de *Kalman* é elevada, [10, 20] Hz, procedeu-se à seguinte simplificação:

$$e^{A\Delta t} \cong I + A\Delta t = F \quad (3.6)$$

Para actualização de correcção, o primeiro passo é calcular a matriz K (ganho de *Kalman*) e, para isso, é necessário calcular a matriz de observação H .

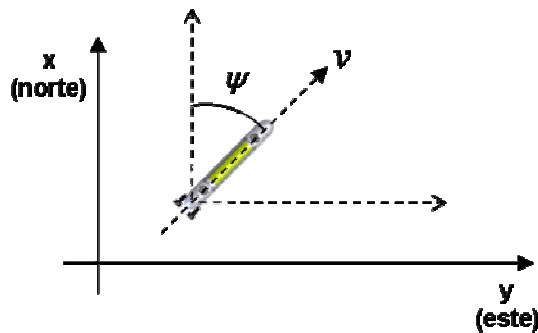
$$H_i = \frac{\partial d_i}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_i}{\partial x} & \frac{\partial d_i}{\partial y} & \frac{\partial d_i}{\partial v_x} & \frac{\partial d_i}{\partial v_y} \end{bmatrix}, d_i = \sqrt{\left(\hat{x} - x_i\right)^2 + \left(\hat{y} - y_i\right)^2}$$

$$H = \begin{bmatrix} \hat{x} - x_{farol} & \hat{y} - y_{farol} & 0 & 0 \\ d_i & d_i & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Onde d_i corresponde à distância do VSA ao farol i .

Assumiu-se que R era relativamente baixo “ignorando” os erros associados às medidas, como erros no tempo de propagação, atrasos do hardware, etc.

Finalmente, para a identificação da matriz A , para posteriormente obter F , e da matriz B , é necessário identificar a dinâmica do sistema. Analisando a figura 3.7, obtêm-se as equações da dinâmica do sistemas [eq. 3.8]. Ainda na mesma figura (3.7), v corresponde à velocidade do veículo no referencial (x, y) e ψ à orientação relativa ao Norte absoluto, medida pela bússola. Na equação 3.8, V_x e V_y correspondem às componentes das velocidades das correntes, respectivamente em x e y .



3. Navegação em rede acústica fixa

Figura 3.7 – Movimentação do VSA no referencial fixo

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= v \times \cos(\psi) + V_x \\
 \dot{y} &= v \times \text{sen}(\psi) + V_y \\
 \dot{V}_x &= 0 \\
 \dot{V}_y &= 0
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Para identificar a matriz A e B, sabe-se que $\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + B(t)$.

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ V_x \\ V_y \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} v \cos(\psi) \\ v \text{sen}(\psi) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Com as equações 3.6, 3.7 e 3.9 estão identificadas todas as matrizes necessárias para a implementação do filtro de *Kalman*.

3.3 Resultados

Não sendo a rede acústica fixa a principal matéria de estudo deste trabalho, são apresentadas apenas duas simulações, que correspondem no primeiro caso a um conhecimento da velocidade de deslocamento face à água e num segundo caso em que não se conhece a velocidade. Na prática, a velocidade é estimada pela rotação dos motores, sendo posteriormente passada ao filtro de *Kalman*, para obtenção de melhores resultados de estimação.

Para a efeitos de simulação o foi programado o seguinte diagrama de blocos.

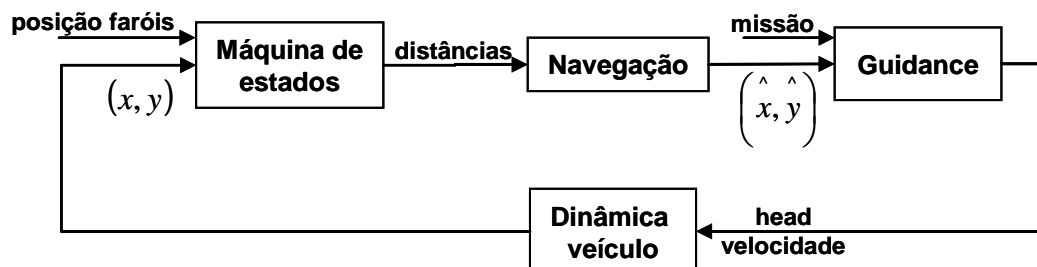


Figura 3.8 – Diagrama de blocos de simulação da navegação em rede acústica fixa

Ambas as simulações foram executadas com uma taxa de simulação de 100 ms para a actualização *dead-reckoning*, uma taxa de 3 s para a actualização de medidas de

3. Navegação em rede acústica fixa

posicionamento e uma velocidade de 0,8 m/s para o veículo. A inicializações do filtro foram feitas com $Q_x=Q_y=0.01$, $Q_{V_x}=Q_{V_y}=0.001$ e $P_x=P_y=P_{V_x}=P_{V_y}=0.001$.

Com a velocidade horizontal e a orientação passada ao filtro de *Kalman* (1º caso), as equações do filtro (modelo discreto) resultam em,

$$x = x + (v \cos(\psi) + V_x) \times \Delta t$$

$$y = y + (v \sin(\psi) + V_y) \times \Delta t$$

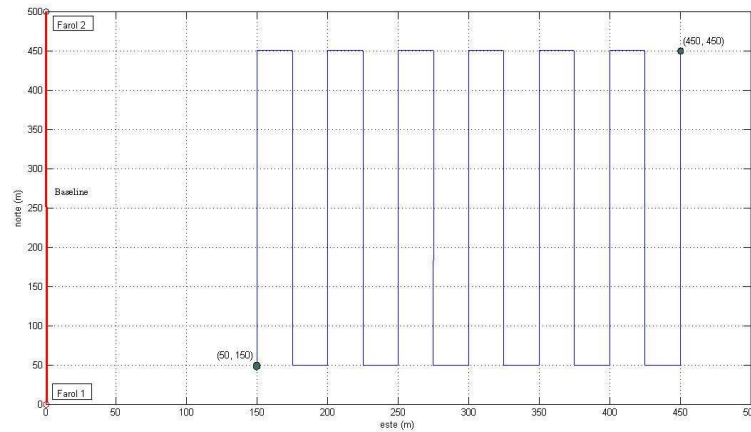


Figura 3.9 – Trajectória estimada do VSA

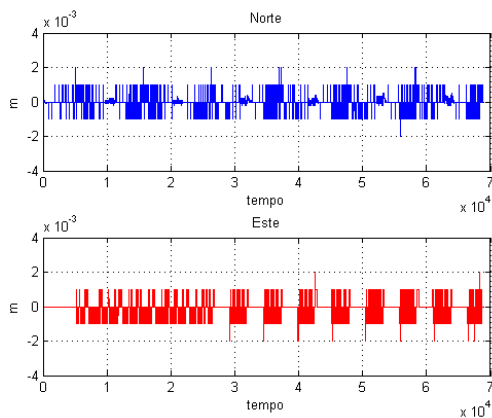


Figura 3.10 – Erro de estimação

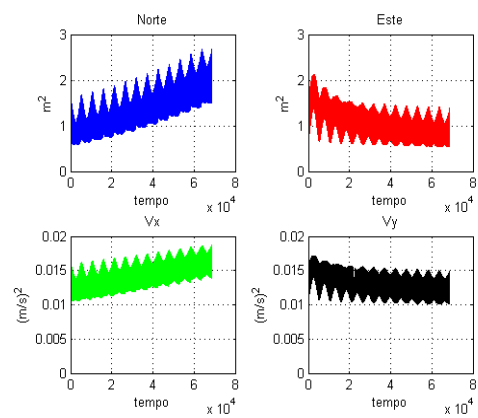


Figura 3.11 - Covariâncias

Na figura 3.9 é apresentado o cenário e a trajetória estimada, que se pode considerar igual à real, pois o erro de estimação em x e y, norte e este, é da ordem da milésima de metro (Fig. 3.10). As covariâncias das variáveis estimadas apresentam valores igualmente baixos, pois como não existem correntes de simulação e como a velocidade não está a ser estimada, V_x e V_y apresentam erros de estimação pequenos. O valor médio da covariância da variável x está a aumentar ao longo do tempo, devido à constante variação da posição real em x.

3. Navegação em rede acústica fixa

Para o 2º caso, em que a velocidade não é conhecida e portanto não é fornecida ao filtro, as equações são:

$$x = x + V_x \times \Delta t$$

$$y = y + V_y \times \Delta t$$

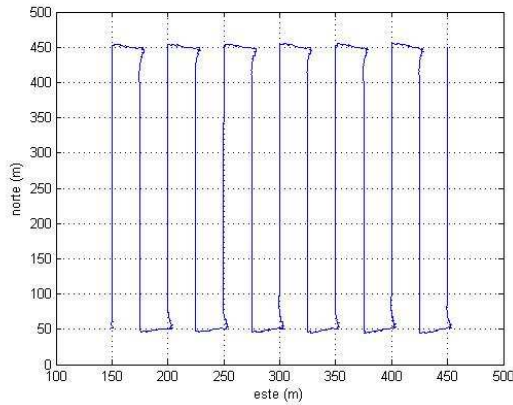


Figura 3.12 – Trajetória estimada

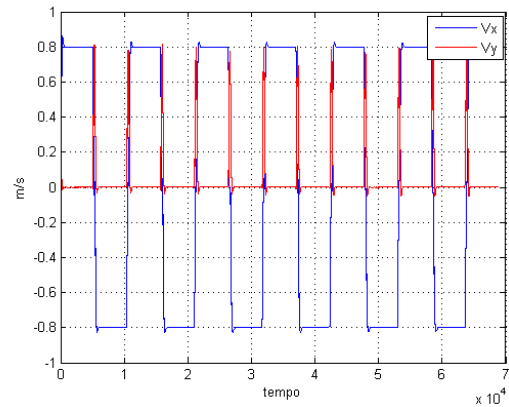


Figura 3.13 – Correntes estimadas

Este segundo caso, em que não se conhece a velocidade do veículo face à água é usado normalmente em algoritmos de *tracking*. São algoritmos usados para supervisionar uma missão quando temos acesso aos tempos de interrogação do veículo aos faróis, consegue-se determinar a sua distância aos mesmos faróis e assim o filtro de *Kalman* estima a velocidade do veículo que é modelizada em correntes V_x e V_y (Fig. 3.13).

4 Navegação em rede acústica móvel

Substituindo as bóias, que transportam os faróis na rede fixa, pelos veículos aquáticos de superfície, temos a rede de navegação móvel, pois, como já foi referido, podem deslocar-se quer autonomamente, quer por comando remoto.

4.1 Posicionamento acústico

Como vimos no capítulo anterior, o posicionamento acústico é calculado com base em distâncias do veículo aos faróis, por triangulação, e o veículo determina a sua posição no referencial fixo, conhecendo naturalmente a posição dos faróis.

Ao contrário da navegação em rede fixa, em que as bóias estavam ancoradas com a sua posição constante e conhecida pelo veículo submarino, na rede móvel o veículo submarino desconhece a posição dos faróis acústicos. Para ultrapassar esta questão foi criada a noção de referencial fixo, (x, y) , e de referencial móvel, (x', y') , (Fig. 4.1).

O referencial fixo é definido pelo sistema de posicionamento global, distâncias para norte e para este, *offsets*, a um ponto conhecido, designado de *home*. O referencial móvel é determinado em cada instante pela *baseline*, linha que une o farol 1 e o farol 2, e a linha perpendicular à *baseline* com a origem do eixo, definido pela posição do farol 1.

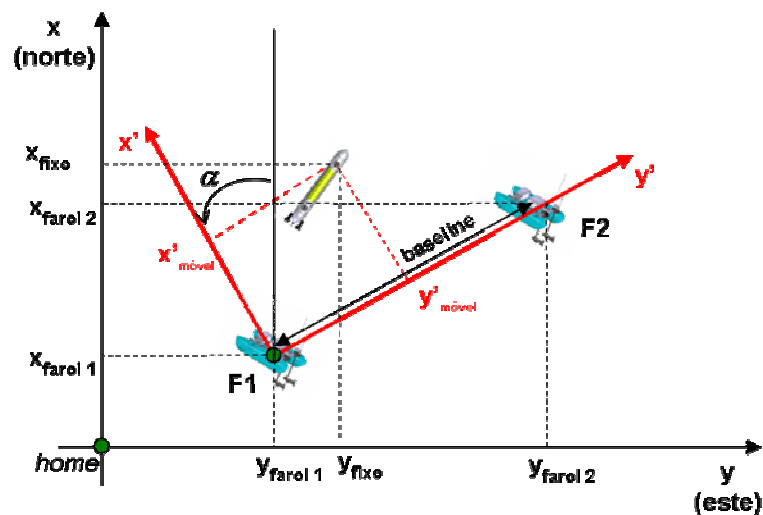


Figura 4.1 – Desvio do referencial móvel em relação ao fixo

Com o referencial móvel, o veículo submarino consegue, através do posicionamento acústico, determinar a sua posição nesse mesmo referencial, e no pós processamento dos dados de missão consegue-se calcular a trajetória do veículo no referencial fixo, dado que a posição dos barcos é facilmente conhecida, através do GPS. As coordenadas do veículo submarino, no referencial fixo, são determinadas a partir das equações 4.1.

4. Navegação em rede acústica móvel

$$\begin{aligned}x_{\text{veículo/fixo}} &= x_{\text{farol 1}} + x'_{\text{móvel}} \times \cos(\alpha) - y'_{\text{móvel}} \times \text{sen}(\alpha) \\y_{\text{veículo/fixo}} &= y_{\text{farol 1}} + x'_{\text{móvel}} \times \text{sen}(\alpha) + y'_{\text{móvel}} \times \cos(\alpha)\end{aligned}\tag{4.1}$$

A resolução do posicionamento acústico, baseado no método LBL, é o mesmo analisado no capítulo anterior, a única diferença é que na rede fixa o posicionamento era feito no referencial fixo, enquanto que, como já se viu, no referencial móvel o posicionamento é determinado no referencial móvel (Fig. 4.1).

Resolvido o problema dos referenciais, levanta-se uma outra questão que está relacionada com o tamanho da *baseline*. Analisando as equações do cálculo das posições com base nas distâncias [eq 3.2], verifica-se que dependem de d_1 , d_2 e de b (*baseline*). Para b constante, como era o caso da rede fixa, em que as bóias se mantinham fixas do início ao fim da missão, para a rede móvel o tamanho de b pode variar e aí ficamos com 3 variáveis desconhecidas.

Será analisado em primeiro lugar o caso em que sabemos qual o tamanho da *baseline* e em seguida o caso em que o tamanho da *baseline* é desconhecido, uma possível resolução do problema.

4.1.1 Comprimento da *baseline* constante

Para o caso em que o comprimento da *baseline* é constante ao longo do tempo, se a missão do veículo submarino for programada no referencial móvel, o sistema de posicionamento acústico utilizado na rede fixa funciona para a rede móvel se as seguintes condições forem satisfeitas:

Condições iniciais, $t = 0$:

- A origem do referencial móvel igual à origem do referencial fixo, o que implica que o referencial fixo terá como origem a posição inicial do farol 1.

Para $t > 0$:

- O comprimento da *baseline* fixa, não variar ao longo do tempo;
- A origem do referencial móvel corresponde em cada instante à posição do farol 1;
- Em último, já referido anteriormente, o veículo não pode cruzar a *baseline*.

Esta solução implica a obrigatoriedade do comprimento constante da *baseline* ao longo do tempo, obrigando a uma coordenação e robustez de controlo a interferências externas, como correntes e vento da parte do controlo dos veículos aquáticos de superfície, que pode impossibilitar a sua execução e consequentemente a quebra da condição imposta.

4.1.2 Comprimento da *baseline* desconhecido

Sendo difícil manter constante o comprimento da *baseline* e dado que existem aplicações em que será necessário ter um comprimento variável, como por exemplo uma missão de varrimento ao longo do leito do rio, com distância entre margens variável, é apresentada uma solução de posicionamento acústico, que para além de determinar distâncias do veículo aos faróis, também determina a distância entre os faróis, o comprimento da *baseline*.

Analisando a figura 4.2 pode-se fazer a relação entre as distâncias e posição, no referencial móvel, (x, y) resultante nas [eq. 4.2]. Como x' e y' dependem de d_{F1} , d_{F2} e de b se b não é conhecido, se varia em função do tempo, é necessário determinar b em cada instante.

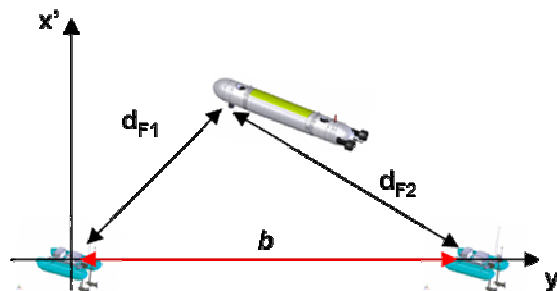


Figura 4.2 – Determinação das distâncias entre faróis e o VSA no referencial móvel

$$\begin{cases} x'^2 + y'^2 = d_{F1}^2 \\ x'^2 + (y' - b)^2 = d_{F2}^2 \end{cases} \quad (4.2)$$

A solução consiste em introduzir, pelo menos, mais uma frequência acústica na comunicação da rede acústica, de forma que os faróis passam adicionalmente a escutar-se entre eles e transmitem mais uma frequência distinta [MC05]. A figura seguinte ajuda a esclarecer a sequência das interrogações acústicas e dos respectivos sinais trocados.

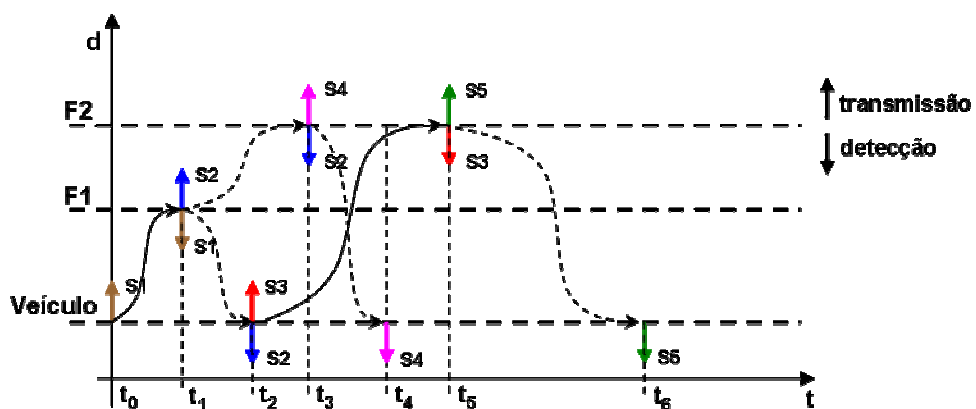


Figura 4.3 – Ciclo completo de transmissões / deteções no referencial móvel com *baseline* desconhecida

4. Navegação em rede acústica móvel

Para a implementação da máquina de acústica são usados dois conceitos de navegação, a esférica, para cálculo das distâncias aos faróis, e a hiperbólica, usada para determinar a distância entre os faróis, a *baseline*. O veículo transmite S1, no instante t_0 e no instante t_1 o farol 1 detecta S1 e transmite S2. Quando é transmitido S2 pelo farol 1 o veículo detecta, em t_2 , S2 e interroga o farol 2 com S3. No instante de tempo t_3 o farol 2 detectou o sinal anteriormente transmitido pelo farol 1 e no mesmo instante transmite S4, que em t_4 é detectado pelo veículo. O sinal S3 enviado pelo veículo para o farol 2, no instante t_5 é detectado pelo mesmo farol e este transmite o sinal S5 que será detectado no instante de tempo t_6 pelo veículo, e assim termina o ciclo da máquina de acústica. Com os sinais trocados e com os tempos medidos obtêm-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned}d_{F1} &= \frac{t_2 - t_0}{2} \times c \\d &= (t_4 - t_0) \times c \\d_{F2} &= \frac{t_6 - t_2}{2} \times c \\d &= d_{F1} + b + d_{F2} \Leftrightarrow b = d - d_{F1} - d_{F2}\end{aligned}$$

Sendo d_{F1} a distância do veículo ao farol 1, d_{F2} a distância do veículo ao farol 2 e b o comprimento da *baseline*. A determinação das coordenadas $(x, y)'$ [eq. 4.3], do referencial móvel, a partir das distâncias e do tamanho da *baseline*, resulta em equações iguais às obtidas em [eq. 3.2], as quais são obtidas:

$$\begin{aligned}d_{F2}^2 &= x'^2 + (b - y')^2 = x'^2 + b^2 - 2by' + y'^2 \Leftrightarrow y'^2 = d_{F2}^2 - x'^2 - b^2 + 2by' \\d_{F1}^2 &= x'^2 + y'^2 = x'^2 + d_{F2}^2 - x'^2 - b^2 + 2by' = d_{F2}^2 - b^2 + 2by'\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}y' &= \frac{d_{F1}^2 - d_{F2}^2 + b^2}{2b} \\x' &= \sqrt{d_{F1}^2 - y'^2}\end{aligned} \tag{4.3}$$

Em suma, as missões dos veículos aquáticos de superfície terão de ser programadas nas coordenadas do referencial fixo, assim como no caso da *baseline* constante. O facto de se ter de coordenar 2 missões, para resultar numa única trajectória, aumenta a complexidade do planeamento das missões e os vários factores a ter em conta.

E seguida serão analisados, mais em detalhe, os limites e as variáveis a ter em atenção na programação de missões, quer para o veículo submarino, quer para os veículos aquáticos de superfície.

4.2 Navegação em rede acústica móvel

A navegação de veículos submarinos em rede acústica móvel, recolhe os dados dos sensores de navegação como, a bússola, sensor de pressão, e ainda a posição do veículo no plano horizontal na rede móvel.

4. Navegação em rede acústica móvel

Um dos principais problemas na implementação da navegação em rede móvel é o facto de que, como já se verificou, a missão do veículo ter de ser programada para o referencial fixo, dado que a posição horizontal deste é determinada para esse referencial.

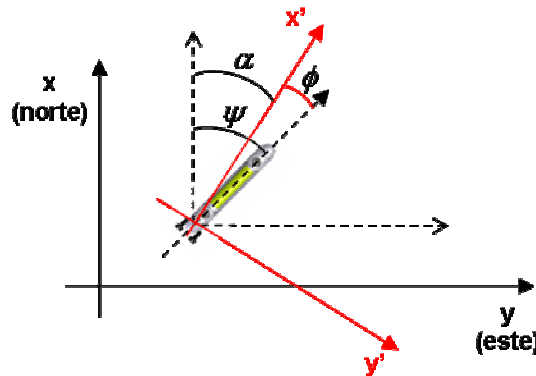


Figura 4.4 – Diferentes ângulos a ter em conta na navegação móvel

Sendo a orientação fornecida pela bússola global, ou seja a orientação no referencial fixo, ψ , para efeitos de navegação é necessário determinar a orientação do veículo face ao referencial móvel, ϕ . Como $\phi = \psi - \alpha$, o problema passa por identificar em cada instante qual a orientação do referencial móvel, α . Para a estimação da orientação do referencial móvel, foi necessário alterar a equação da dinâmica do filtro de *Kalman* para que o ângulo α se torne uma variável de estado a ser estimada.

4.2.1 Implementação do filtro de *Kalman*

Para a implementação da navegação em rede acústica móvel, foi utilizada a mesma dinâmica, apresentada para a rede fixa, apenas o diagrama de blocos, implementado foi diferente, o que resultou nas seguintes equações.

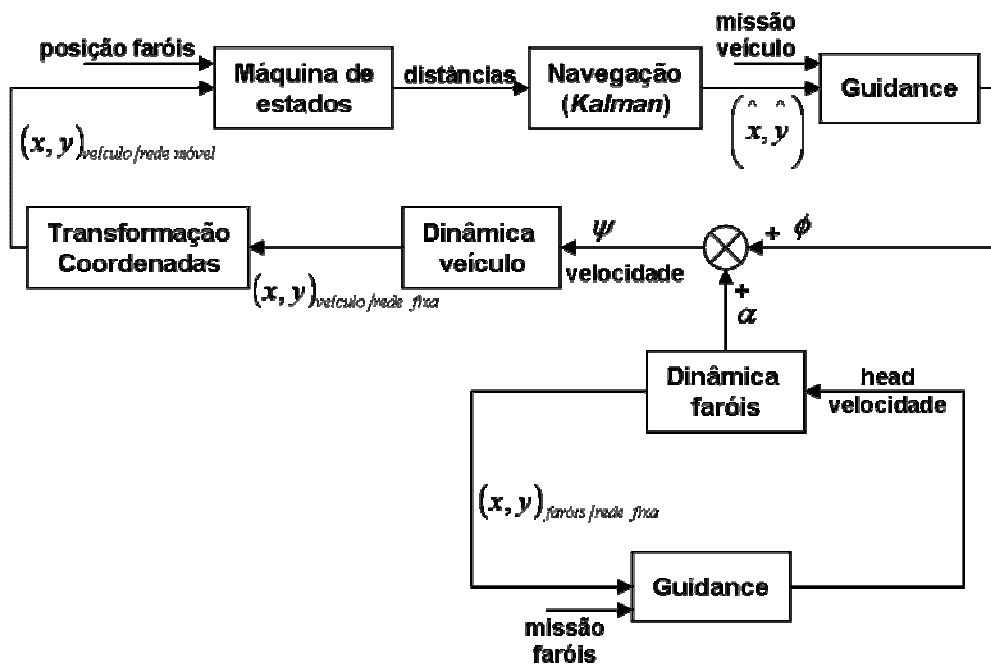


Figura 4.5 – Diagrama de blocos da simulação da navegação em rede móvel

4. Navegação em rede acústica móvel

Para melhor se perceber o diagrama de blocos, analisemos a seguinte figura.

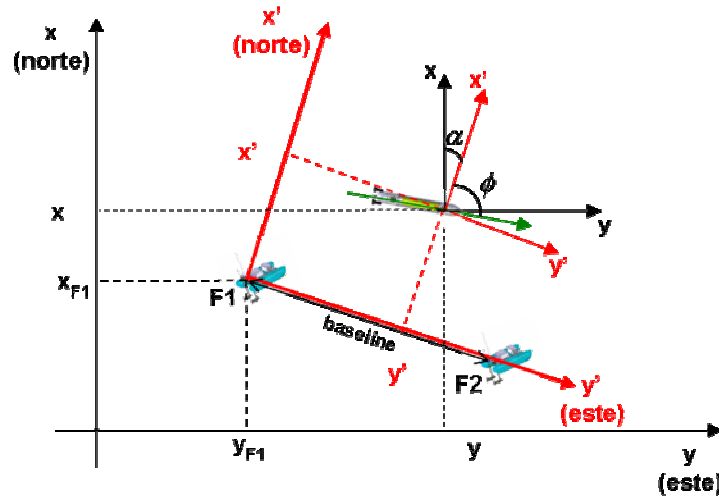


Figura 4.6 – Orientações do veículo nos referenciais fixo e móvel

O bloco de transformação de coordenadas, de duas dimensões, efectua as seguintes equações:

$$\begin{aligned} x_{veículo/móvel} &= (x_{veículo/fixo} - x_{F1}) \times \cos(-\alpha) - (y_{veículo/fixo} - y_{F1}) \times \text{sen}(-\alpha) \\ y_{veículo/móvel} &= (x_{veículo/fixo} - x_{F1}) \times \text{sen}(-\alpha) + (y_{veículo/fixo} - y_{F1}) \times \cos(-\alpha) \end{aligned} \quad (4.4)$$

O bloco de navegação implementa a dinâmica [eq. 4.5] do veículo, a mesma analisada anteriormente [eq. 3.8].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \times \cos(\psi) + V_x \\ \dot{y} &= v \times \sin(\psi) + V_y \\ \dot{V}_x &= 0 \\ \dot{V}_y &= 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Para $\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + B(t)$ obtém-se,

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ V_x \\ V_y \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} v \cos(\psi) \\ v \sin(\psi) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

4. Navegação em rede acústica móvel

Para o cálculo do ângulo do referencial móvel face ao fixo, α , utilizado nas equações do bloco de transformação de coordenadas, utilizou-se a equação 4.7 que assume que a posição dos faróis acústicos, (x_{F1}, y_{F1}) e (x_{F2}, y_{F2}) , é conhecida pelo veículo.

$$\alpha = \psi - \text{tg}^{-1} \left(\frac{y_{F2} - y_{F1}}{x_{F2} - x_{F1}} \right) \quad (4.7)$$

4.2.1.1 Resultados obtidos

Para o primeiro teste, não foi feita a realimentação do ângulo α pois a cada instante era calculado em função da posição dos faróis acústicos. A orientação global passada ao filtro era calculada da seguinte forma,

$$\psi = \phi + \alpha = \text{arctg} \left(\frac{y'_{i+1} - y'_i}{x'_{i+1} - x'_i} \right) + \text{arctg} \left(\frac{y_{\text{farol 2}} - y_{\text{farol 1}}}{x_{\text{farol 2}} - x_{\text{farol 1}}} \right)$$

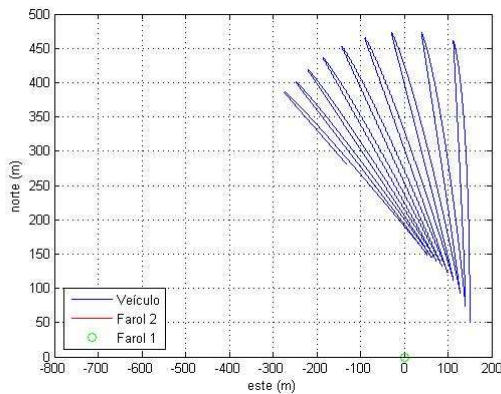


Figura 4.7 – Trajectória global do VSA

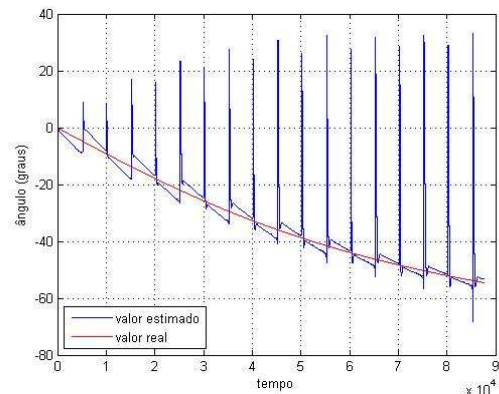


Figura 4.8 – Valor do ângulo α estimado e real

Com a realimentação do ângulo α , ou seja, o ângulo ψ era calculado em cada instante,

$$\psi = \phi + \alpha = \text{arctg} \left(\frac{y'_{i+1} - y'_i}{x'_{i+1} - x'_i} \right) + \hat{\alpha}$$

$\hat{\alpha}$ corresponde ao ângulo estimado pelo filtro de *Kalman*, daí a simulação ter sido feita com realimentação de α . A realimentação de α , corresponde à situação real, pois como não sabemos a posição dos faróis em tempo real, como se fez no caso anterior, é necessário utilizar o valor de α estimado pelo filtro e verificar se a estimação é feita correctamente.

4. Navegação em rede acústica móvel

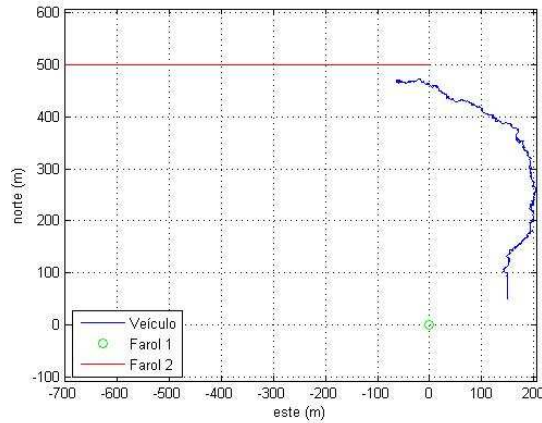


Figura 4.9 – Trajectória global do VSA

4.2.1.2 Análise de resultados

Os primeiros testes feitos sem realimentação do ângulo α , resultaram numa estimação do ângulo (Fig. 4.8) de acordo com o esperado. O regime transitório apresenta variações de elevada ordem, contudo no regime permanente o ângulo estimado é próximo do real. Com a realimentação do α (Fig. 4.9), a trajetória do veículo diverge após a primeira inversão de sentido da trajetória, o que resulta da indução de instabilidade provocadas pelas oscilações do regime transitório. Na primeira inversão de sentido, a variação de α é acentuada, e como $\psi = \phi + \alpha$, resulta num aumento brusco de ψ , orientação global, e o filtro de *Kalman* diverge.

Dado que a dinâmica implementada não resolve o problema, foi necessário desenvolver novas equações para a dinâmica do filtro de *Kalman*.

4.2.2 Novo filtro de *Kalman*

Como o problema na dinâmica anterior residia no regime transitório, para a nova dinâmica forçou-se a dinâmica do ângulo α a zero. Na nova dinâmica [eq. 4.9], a estimação de α incorpora o efeito das correntes V_x e V_y a que o sistema está sujeito. O estado x e a matriz de transição A , do novo filtro de *Kalman* passam a ser definidas pelas equações 4.10.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \times \cos(\psi - \alpha) \\ \dot{y} &= v \times \sin(\psi - \alpha) \\ \dot{\alpha} &= 0 \end{aligned} \tag{4.8}$$

O estado x e a matriz A ,

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & v \sin(\psi - \alpha) \\ 0 & 0 & -v \cos(\psi - \alpha) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

4. Navegação em rede acústica móvel

4.2.2.1 Resultados obtidos

As condições de simulação para os vários cenários apresentados foram:

- Programação de uma missão no referencial móvel, para o veículo submarino, com dois pontos, (50, 150) e (450, 150). O veículo desloca-se a velocidade constante entre estes dois pontos;
- taxa de actualização *dead-reckoning* de 10 Hz;
- período de actualização de distâncias de 3 s;
- e velocidade de deslocação do veículo face à água de 0.8 m/s.

A primeira simulação representa um cenário em que a rede acústica se encontra parada com $\alpha \approx -22^\circ$. É simulada uma posição inicial errada, que o filtro terá de compensar e um α também errado. Estas situações acontecem na prática quando devido a efeitos de correntes, a rede acústica se desloca e as configurações do veículo ficam erradas. É necessário que nestes casos o filtro seja capaz de estimar a posição correcta quando as inicializações se encontram erradas, dentro de valores limites.

A simbologia utilizada anteriormente para a covariância do ruído do sistema, matriz Q , pode ser definida como:

$$Q = \begin{bmatrix} \text{cov}_{pos} & 0 & 0 \\ 0 & \text{cov}_{pos} & 0 \\ 0 & 0 & \text{cov}_\alpha \end{bmatrix}$$

O que daqui em diante os valores das covariâncias das simulações serão declaradas como $\text{cov}_{\text{posição}}$ e cov_α .

As covariâncias do filtro de *Kalman*, para este cenário foram, $\text{cov}_{\text{posição}}=0.1$; $\text{cov}_\alpha=0.1$.

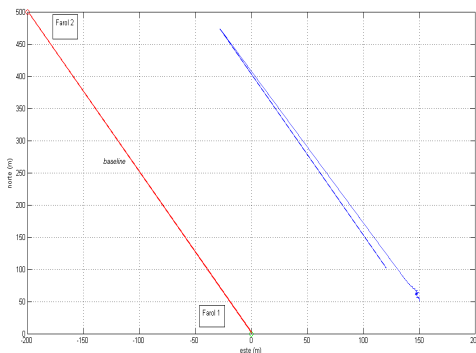


Figura 4.10 – Trajetória real

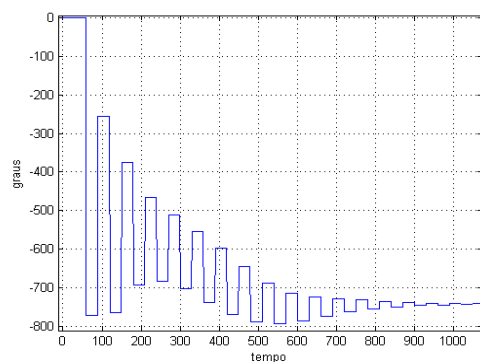


Figura 4.11 – Estimação de α

4. Navegação em rede acústica móvel

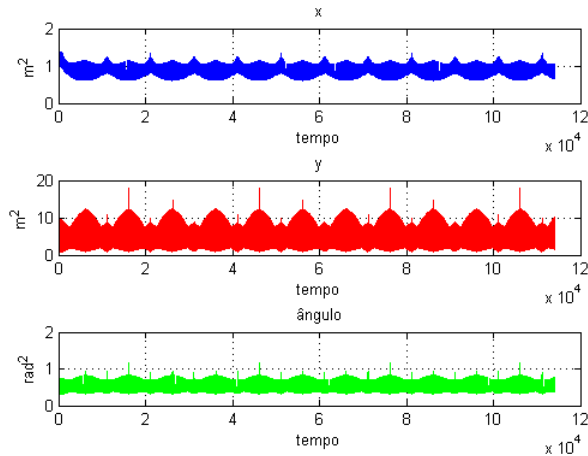


Figura 4.12 - Covariâncias

O filtro de Kalman, demonstrou um bom comportamento, conseguindo estimar o ângulo α (Fig. 4.11) e conseqüentemente a trajetória do veículo. A covariância de y apresenta valores elevados, pois o filtro de *Kalman* foi inicializado com covariâncias de posição de 0.1, $cov_{\text{posição}}=0.1$.

Para obter covariâncias de posição mais baixas inicializou-se o filtro com $cov_{\text{posição}}=0.01$; $cov_{\alpha}=0.001$. Os resultados obtidos para as covariâncias (Fig. 4.14) diminuiram bastante, contudo a trajetória efectuada, figura 4.13, piorou pois o veículo na fase inicial deslocou-se em sentido oposto, o que se torna desvantajoso dado que falha uma medida de acústica, quando o veículo se afastava, o filtro pode não convergir jamais.

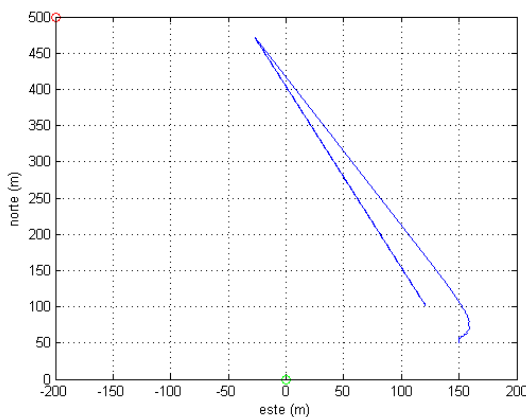


Figura 4.13 – Trajetória real

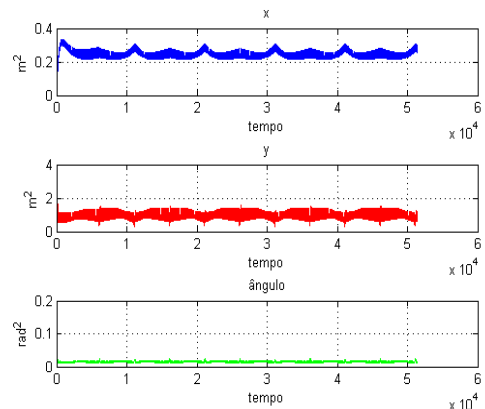


Figura 4.14 - Covariâncias

O segundo cenário apresenta a simulação do α a aumentar / variar ao longo do tempo, com um farol parado e um outro a deslocar-se a uma velocidade correspondente a 20% do valor da velocidade do veículo, ou seja 0.1m/s. O filtro foi iniciado com $cov_{\text{posição}}=0.01$ e $cov_{\alpha}=0.01$.

4. Navegação em rede acústica móvel

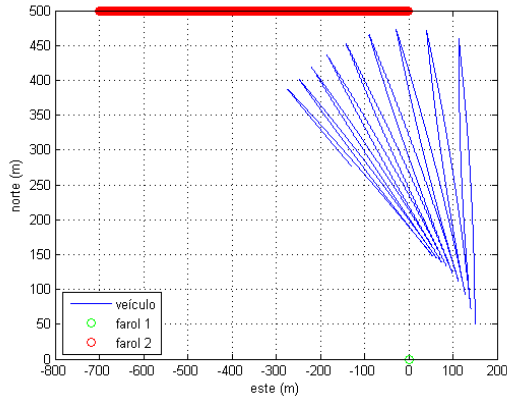


Figura 4.15 – Trajetória global

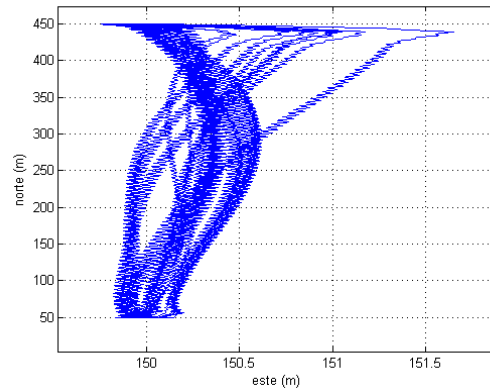


Figura 4.16 – Trajetória do veículo no referencial móvel

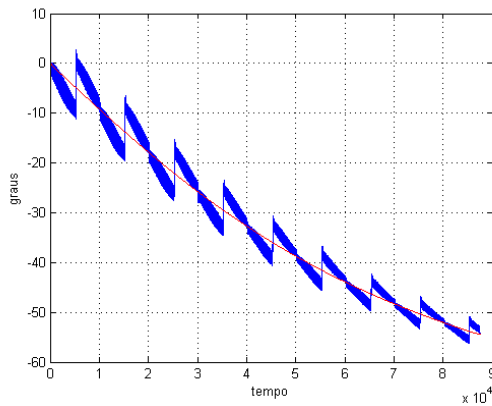


Figura 4.17 – α estimado vs α real

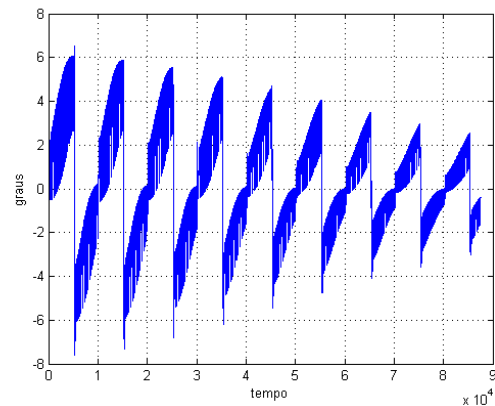


Figura 4.18 – Erro de estimação do ângulo α

O comportamento do filtro com o ângulo α crescente, é bastante satisfatório, apresentando erros de estimação, figura 4.18, de poucos graus. Na figura 4.16 é apresentada a trajetória do veículo no referencial móvel, que tem um erro máximo de 1.5m face à trajetória desejada.

Outra questão relevante foca-se no comportamento do filtro de *Kalman* face a correntes externas. Por razões de segurança, o filtro deve ser capaz de estimar a posição do veículo compensando as correntes existentes. Tipicamente as missões podem ser realizadas com correntes que se podem chegar a variar entre 10 a 20% da velocidade, face à água, do veículo.

Os resultados apresentados simulam correntes na ordem dos 13% e 20%, respectivamente.

4. Navegação em rede acústica móvel

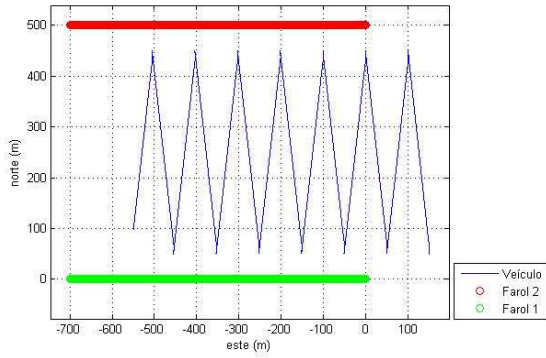


Figura 4.19 – Trajectória global

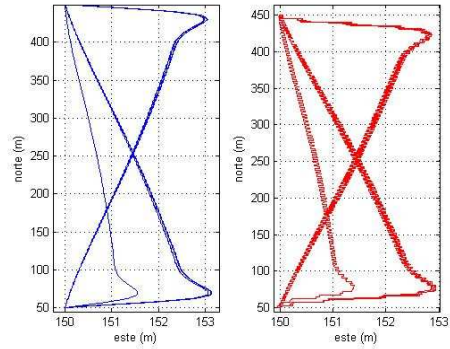


Figura 4.20 – Deslocação do veículo no referencial móvel (fig. direita) *versus* estimação da posição (fig. esquerda)

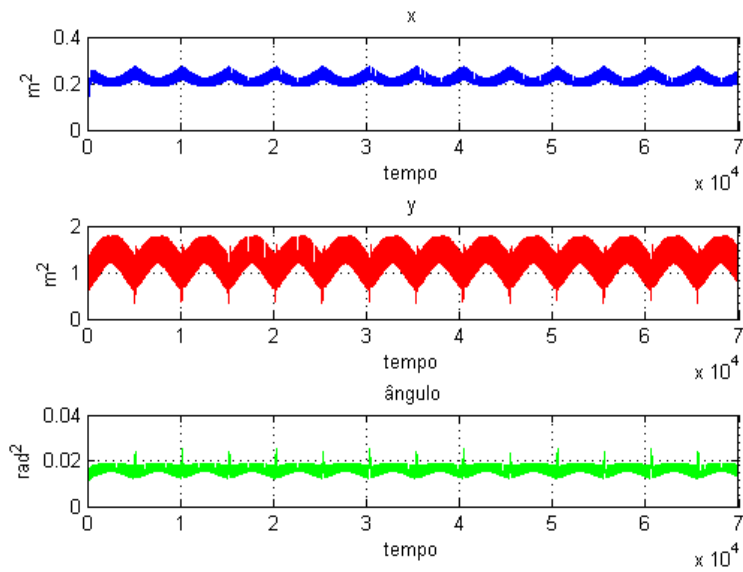


Figura 4.21 - Covariâncias

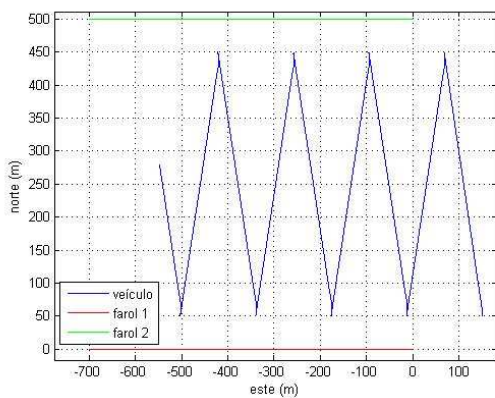


Figura 4.22 – Trajectória global dos faróis e do VSA

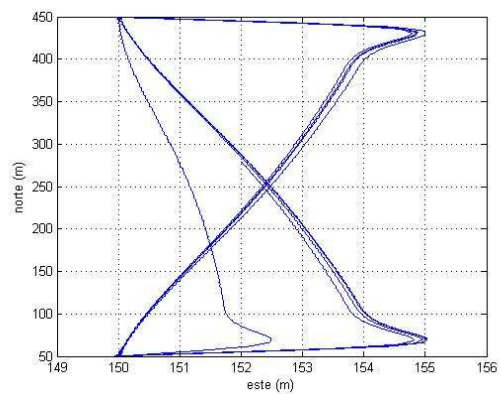


Figura 4.23 – Trajectória no referencial móvel

4. Navegação em rede acústica móvel

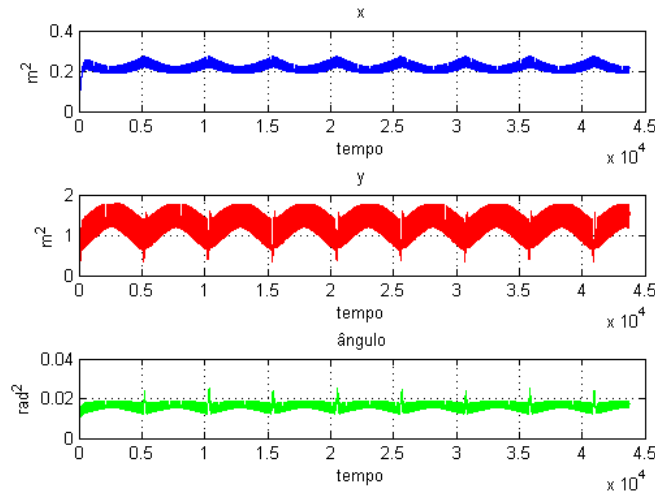


Figura 4.24 - Covariâncias

O comportamento do filtro face a correntes é novamente bastante satisfatório, apresentando erros de posicionamento (Fig. 4.20 e 4.23), maiores, quanto maior for a corrente, perpendicular à velocidade do veículo, como era de esperar. A trajectória global do veículo (Fig. 4.22) é descrita como uma onda triangular, e o período dessa onda é dado pela velocidade de deslocação da rede acústica móvel.

4.2.2.2 Análise de resultados

Analisando os resultados apresentados, rapidamente se conclui que a nova dinâmica do filtro de *Kalman* apresenta resultados de estimação bastante satisfatórios, com a estimação do ângulo α a ser feita com erros na ordem das unidades de grau ($\pm 6^\circ$, valor máximo). Com uma inicialização errada do filtro de *Kalman*, este consegue rapidamente convergir e estimar o estado correcto e o comportamento face a correntes externas demonstra uma boa resposta, tornando, como era desejável, a trajectória real do veículo submarino triangular.

A apreciação global da dinâmica implementada para o novo filtro de *Kalman* é a que apresenta resultados bastante positivos, com erros de estimação de pequena ordem.

5 Condução e controlo

Para um sistema se deslocar de um ponto inicial para um ponto final, precisa de ser dirigido para atingir o objectivo final. O acto de dirigir pode ser condicionado por objectivos para cada manobra a executar, como por exemplo, minimização do tempo de execução, caminho mínimo, velocidade constante, seguimento de uma trajectória, etc.

Para dirigir um veículo é necessário conhecer a técnica de condução e, dependendo da mesma técnica de condução, qual o controlo a aplicar aos actuadores. Com uma taxa de actuação elevada, é possível desacoplar a condução, que determina os valores do estado desejado do veículo, do controlo, normalmente implementado por PID que com o estado desejado e o estado estimado, determina as forças a aplicar aos actuadores (Fig. 5.1).

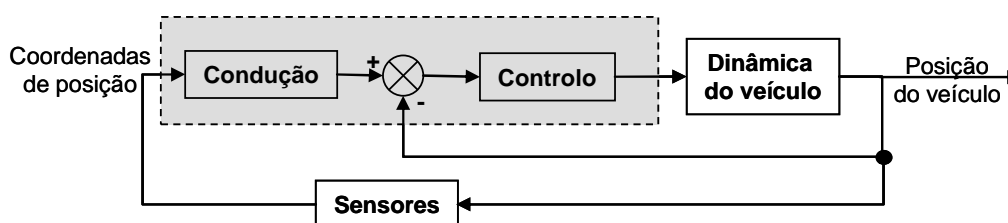


Figura 5.1 – Diagrama de blocos do desacoplamento da condução e do controlo

O desacoplamento entre a condução e controlo, evidenciado na figura 5.1, separa a condução, que segundo o método especificado define os valores de referência da orientação e da velocidade, enquanto que o controlo assegura que os valores de referência de orientação e de velocidade são fornecidos aos actuadores. A condução pode ser vista como um ciclo lento que tem por duração, normalmente, a execução de uma manobra, enquanto que o controlo é feito a uma taxa elevada. A separação das duas escalas temporais, simplifica a abordagem ao problema de condução e controlo.

As missões típicas a executar consistem no seguimento de uma trajectória rectilínea, que “adicionada” à trajectória dos faróis acústicos resulta na trajectória global do veículo submarino (Fig. 5.2). Para que a trajectória global do veículo submarino se aproxime da projectada é crucial que o cumprimento de ambas as missões se faça de acordo com o esperado. A figura 5.2 apresenta um cenário típico de varrimento do leito de um rio, em que a velocidade de varrimento é imposta pela deslocação da *baseline*.

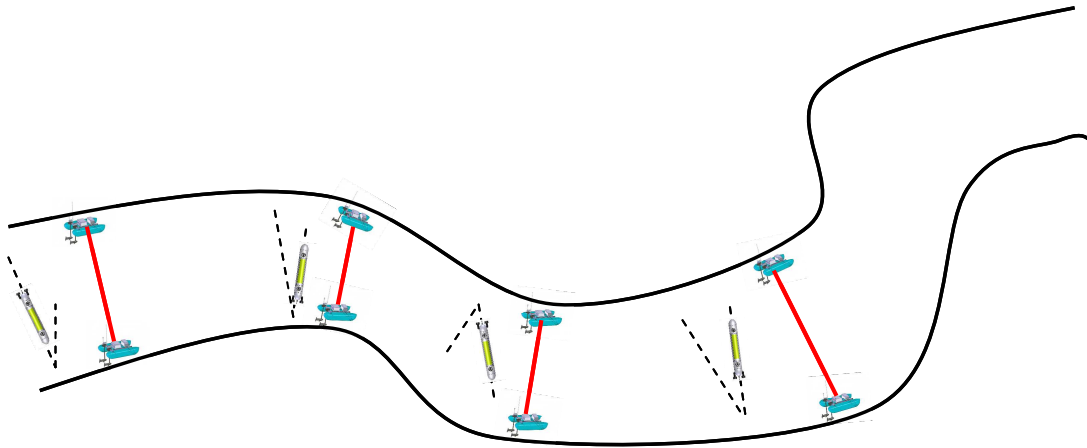


Figura 5.2 – Trajectória típica de varrimento do leito de um rio

Para o seguimento de trajetórias rectilíneas, a uma profundidade constante, apenas se examinará o problema de condução para o plano horizontal. Antes da abordagem aos vários métodos de condução, é apresentado o modelo dinâmico do veículo submarino subaquático.

5.1 Modelo dinâmico

Para uma correcta e realista identificação do movimento do veículo subaquático, na água, é necessário analisar a dinâmica do movimento de corpos rígidos no mesmo meio.

O movimento de um corpo na água está sujeito a um conjunto de forças adicionais, inerentes a este meio. Pelo menos, duas forças opostas podem determinar a sua flutuação, o seu peso e a impulsão da água. Para além destas forças, o corpo estará também sujeito a forças actuadoras, que determinam o seu movimento na água, a forças de atrito, originadas pelo movimento do corpo, e por fim a perturbações externas, normalmente modeladas como forças provocadas pelas correntes em x e y [San06].

5.1.1 Modelo cinemático

Para veículos aquáticos, e em especial para subaquáticos, é desejável derivar as equações de movimento para uma origem arbitrária num sistema de coordenadas local fixo ao corpo de forma a tirar vantagens das propriedades geométricas do veículo [Fos95].

O comportamento dinâmico do veículo é descrito através das leis de Newton para os momentos linear e angular, e se forem formuladas com base num sistema de coordenadas fixo ao corpo, as forças e momentos hidrodinâmicos e cinéticos permanecem constantes face às mudanças da orientação do veículo no referencial fixo face à terra. As equações cinemáticas podem ser deduzidas da seguinte forma:

5. Condução e controlo

$$\dot{x} = J(x)\dot{q} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(x_2) & 0 \\ 0 & J_2(x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Onde $x_1 = (x, y, z)^T$ que corresponde ao vector de posição, $x_2 = (\phi, \theta, \psi)^T$ ao vector dos ângulos de Euler (*roll*, *pitch* e *yaw* respectivamente), ambos em relação ao referencial inercial, $q_1 = (u, v, w)^T$ ao vector de velocidade linear e por fim $q_2 = (p, q, r)^T$ ao vector de velocidade angular. J_1 está relacionada com a matriz de rotação, enquanto que J_2 estabelece a relação da velocidade angular entre o referencial inercial e o referencial fixo ao veículo. Derivando as equações de movimento e assumindo que o veículo é um corpo rígido e que a terra está fixa ao espaço, podem-se eliminar as forças que actuam entre elementos de massa individuais e as forças devidas ao movimento da terra em relação a um referencial fixo às estrelas.

A equação que descreve a dinâmica do veículo é descrita pela equação 5.2.

$$M\ddot{q} + C(\dot{q})\dot{q} + D(\dot{q})\dot{q} + g(x) = B(\dot{q})u \quad (5.2)$$

Onde $x \in \mathfrak{R}^n$, $q \in \mathfrak{R}^n$ e $u \in \mathfrak{R}^p$. n é o numero de graus de liberdade e p é o numero de entradas, *inputs*, de controlo. M é a matriz de inércia, $n \times n$, que inclui a massa acrescentada pela hidrodinâmica, massa do fluído deslocado pelo movimento do veículo na água, C é a matriz não linear que inclui os termos para o efeito Coriolis, forças centrífugas e massa acrescentada, e por fim D é uma matriz $n \times n$ com os termos de dissipação como amortecimento potencial, amortecimento de viscosidade e fricção de superfície. B é uma matriz $n \times p$ que contém as características do propulsor e g um vector $n \times 1$ com as forças de gravidade e de impulsão da água [Fos91].

5.1.2 Modelo cinemático simplificado do plano horizontal

Para o controlo no plano horizontal é considerado o modelo de 3 graus de liberdade [Fos95]. Esse modelo deriva do modelo geral de um corpo submerso [eq. 5.2] se for considerado que:

- o veículo é simétrico no plano horizontal, x-y ($I_{xy} = I_{yx} = 0$), e ainda,
- que são ignoradas as correntes, *roll* e *pitch* ($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$).

Nesse caso, o movimento do veículo é dado pelas seguintes equações,

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - y_G \dot{r} - x_G r^2) &= X \\ m(\dot{v} - ur - x_G \dot{r} - y_G r^2) &= Y \\ I_z \dot{r} + m \left[x_G (\dot{v} + ur) - y_G (\dot{u} - vr) \right] &= N \end{aligned} \quad (5.3)$$

5. Condução e controlo

Onde X , Y e N representam as forças externas e os momentos que actuam no veículo. Considerando que o referencial fixo do corpo encontra-se no centro de massa do veículo ($x_G = y_G = 0$), as equações 5.3 podem ser apresentadas como,

$$\begin{aligned}m\left(\dot{u} - vr\right) &= X \\m\left(\dot{v} - ur\right) &= Y \\I_z \dot{r} &= N\end{aligned}$$

Considerando que as componentes horizontais da corrente na água são constantes, u e v podem ser considerados como as componentes da velocidade do veículo em relação à água. Neste caso as forças externas X e Y apenas dependem da velocidade do veículo face à água e dos actuadores do veículo. Assim sendo, a evolução da posição do veículo no referencial fixo à terra é dado pelas seguintes equações,

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi) + v_x \\ \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi) + v_y\end{aligned}$$

Onde v_x e v_y são consideradas as componentes da correntes da água. Assumindo que o veículo se desloca, em relação à água, apenas no sentido longitudinal, pode considerar-se que v é desprezável face a u , o que resulta no modelo cinemático simplificado:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\psi) + v_x \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + v_y \end{cases} \quad (5.4)$$

5.2 Métodos de condução

Quando o veículo navega, está sujeito a perturbações induzidas pelas correntes, explicitas no modelo simplificado do veículo submarino [eq. 5.4], afectando a trajectória percorrida e consequentemente aumentando o erro de posição, quanto maior for o vector da corrente perpendicular ao sentido da velocidade de deslocação do veículo, maior será o erro de posicionamento.

Em seguida são apresentados diferentes métodos de condução, e serão apresentadas, igualmente, as vantagens e desvantagens, tendo como principal objectivo, de cada método, a execução de uma manobra com requisitos definidos no planeamento da missão.

5. Condução e controlo

5.2.1 Método *way-point*

O método de condução *way-point* consiste em calcular, a cada instante, a orientação de referência [eq. 5.5] do ponto actual para o ponto final da manobra. Resulta num “apontar”, em cada instante, para o ponto final da trajectória, com a velocidade de deslocamento face à água constante [MC07].

$$\psi_{ref} = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_f - y}{x_f - x} \right) \quad (5.5)$$

Analisando o modelo simplificado do plano horizontal, dado pelas equações 5.4, e assumindo um valor normalizado de 1 para a velocidade u , obtemos as seguintes figuras que correspondem à orientação instantânea, do veículo, face a correntes.

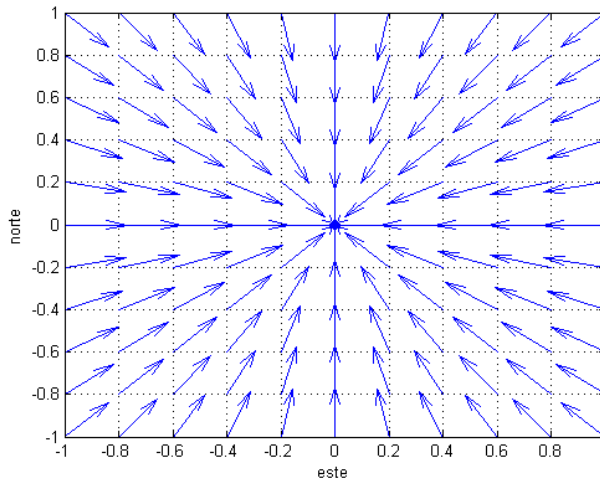


Figura 5.3 – Orientação do veículo, com $v_x = v_y = 0$

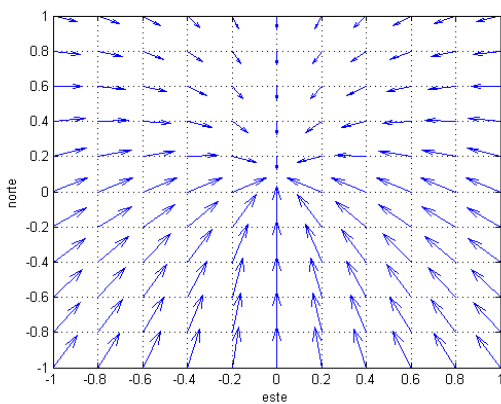


Figura 5.4 – Orientação do veículo, com $v_x = 0.5$; $v_y = 0$

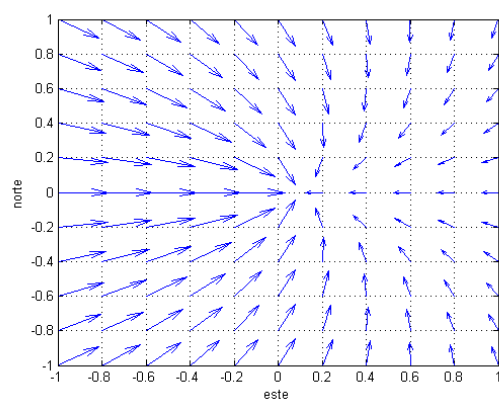


Figura 5.5 – Orientação do veículo, com $v_x = 0$; $v_y = 0.5$

5. Condução e controlo

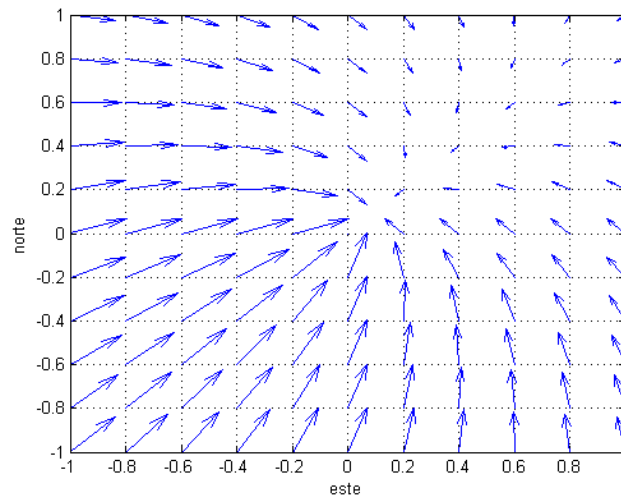


Figura 5.6 – Orientação do veículo, com $v_x = v_y = 0.5$

Analisando as orientações, verifica-se que as trajectórias serão curvilíneas, excepto quando $v_x = v_y = 0$ (Fig. 5.3). Quando existem correntes em v_x ou v_y , ou ainda nas duas componentes, as trajectórias apenas são rectilíneas quando o veículo se desloca no sentido directo ou inverso ao vector da corrente.

Como uma missão é composta por várias trajectórias rectilíneas, em diversas direcções, quando se utiliza o método de condução *way-point* o veículo não irá seguir a trajectória desejada quando existirem correntes. A figura 5.7 exemplifica uma trajectória rectilínea que foi programada para o veículo executar, e com o método de condução *way-point* podemos verificar qual será a trajectória real do veículo, face a uma corrente perpendicular à sua velocidade.

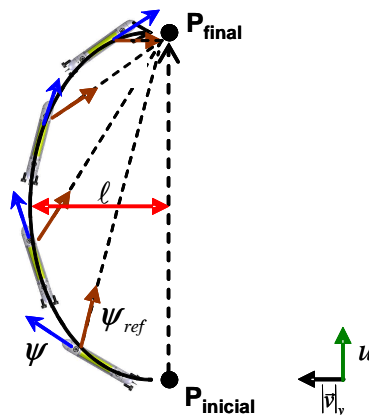


Figura 5.7 – Trajectória real do veículo com método de condução *way-point*

u - vector da velocidade do veículo

$|\vec{v}|_y$ - vector da velocidade de corrente em y

ψ - orientação real

ψ_{ref} - orientação de referência (*way-point*)

5. Condução e controlo

Na figura anterior o valor de ℓ aumentará quanto maior a dimensão de $|\vec{v}|_y$ face a $|\vec{v}|_x$.

A presente técnica deve ser utilizada quando a corrente perpendicular ao deslocamento do veículo, no caso da figura anterior $|\vec{v}|_y$, for nula/reduzida e também quando o objectivo principal da manobra não é minimizar o erro de posicionamento em relação à trajectória planeada. Caso a o valor da corrente $|\vec{v}|_y$ seja elevado, face a $|\vec{v}|_x$, o veículo divergirá e dificilmente conseguirá atingir o ponto final, pois este método não apresenta qualquer compensação a correntes.

Para missões em que seja necessário seguir trajectórias rectilíneas, independentemente das correntes, é necessário escolher um algoritmo robusto e compensatório dessas mesmas correntes.

5.2.2 Método *line-tracking*

O método de condução *line-tracking*, como o próprio nome indica, tenta minimizar o erro entre da trajectória real e a planeada. Para casos em que é necessário seguir uma dada trajectória, independentemente das correntes externas, o método analisado anteriormente não é suficiente.

O método de condução e controlo *line-tracking* projecta a sua posição actual na linha da trajectória planeada, P_i , e ainda um outro ponto na mesma linha d metros à frente, P_{i+1} , ao contrário do método *way-point*, que apontava sempre para o ponto final da trajectória. Apontando para esse ponto consegue-se corrigir a orientação do veículo de forma a compensar correntes, ficando com erro constante ao longo da manobra, regime permanente. A figura 5.8 demonstra os parâmetros envolvidos no presente método.

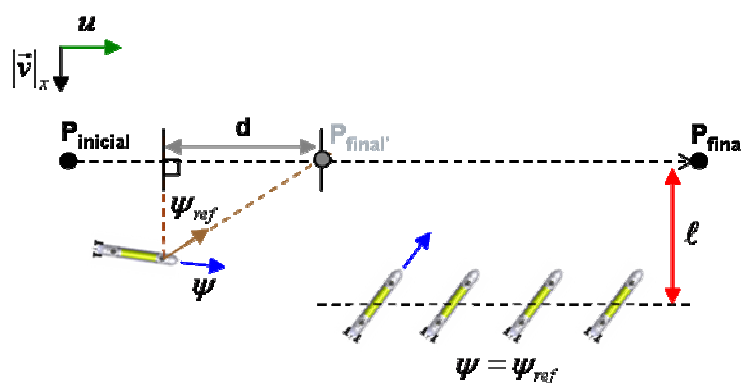


Figura 5.8 – Trajectória do veículo com método de condução *line-tracking*

u - vector da velocidade longitudinal do veículo;

$|\vec{v}|_x$ - vector da velocidade da corrente em y;

ψ - orientação real;

5. Condução e controlo

ψ_{ref} - orientação de referência, calculada segundo o método *line-tracking*.

O ângulo da orientação de referência, calculada pelo método *line-tracking* é dado pela equação 5.6.

$$\psi_{ref} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{y_{Pi+1} - y}{x_{Pi+1} - x} \right) \quad (5.6)$$

A principal vantagem deste método prende-se com o facto de se ter um só parâmetro para configurar, d , o que permite suavizar ou aumentar o ângulo de “ataque” para aproximação à linha, e também a compensação de correntes. Uma vantagem adicional deste método é o facto de que se o veículo se afastar bastante, devido a elevadas correntes, o *arctg* limita o ângulo de orientação *line-tracking*, deixando de ser necessário a verificação de limites de ψ .

A principal desvantagem é o erro, sempre existente, no regime permanente, ℓ , que resulta numa trajectória real paralela à desejada.

Para análise do comportamento em regime permanente, em seguida é encontrada a dependência da distância à linha, d , em função da velocidade, v_y (Fig. 5.9), e ainda da velocidade do veículo face à água u , [eq. 5.7].

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\psi) + v_x \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + v_y \\ \dot{y} = 0 \Rightarrow \sin(\psi) = -\frac{v_y}{u} \\ \cos(\psi) = \sqrt{1 - \sin^2(\psi)} = \sqrt{1 - \frac{v_y^2}{u^2}} = \frac{\sqrt{u^2 - v_y^2}}{u} \\ \text{tg}(\psi) = \frac{\sin(\psi)}{\cos(\psi)} = -\frac{v_y}{\sqrt{u^2 - v_y^2}} = -\frac{y}{d} \end{cases}$$

$$y = d \times \frac{v_y}{\sqrt{u^2 - v_y^2}} \quad (5.7)$$

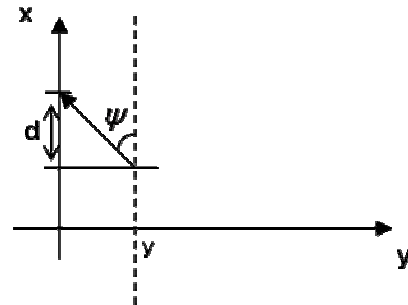


Figura 5.9 – Regime permanente, *line-tracking*

Para a eliminação do erro em regime permanente, a solução proposta é aplicar um controlo PI [eq. 5.8] ao ângulo ψ . Sabendo que, $\psi = \text{tg}^{-1} \left(-\frac{y}{d} \right)$ e o controlo proporcional e integral do ψ é dado por,

$$\psi = -\text{tg}^{-1} \left(k_p \times y + k_i \int_0^t y dt \right) = -\text{tg}^{-1} \left(\frac{1}{d} \times y + k_i \int_0^t y dt \right) \quad (5.8)$$

6 Implementação

6.1 Arquitectura do software de bordo

O trabalho desenvolvido no passado consistiu no levantamento de requisitos e na implementação do software de bordo para o MARES. Um dos principais requisitos do software foi a sua construção modular (Fig. 6.1) de modo a permitir futuras alterações de qualquer módulo mantendo os restantes intactos. A construção modular facilita a alteração de algoritmos de navegação, substituindo os respectivos módulos, e ainda, a identificação da origem de problemas de software. Quando um módulo “falha” é necessário que o restante software continue em execução permitindo assim um conjunto de funcionalidades mínimas (funcionalidades críticas, como por exemplo a comunicação, a leitura dos sensores e também a actuação dos motores) a bordo do veículo.

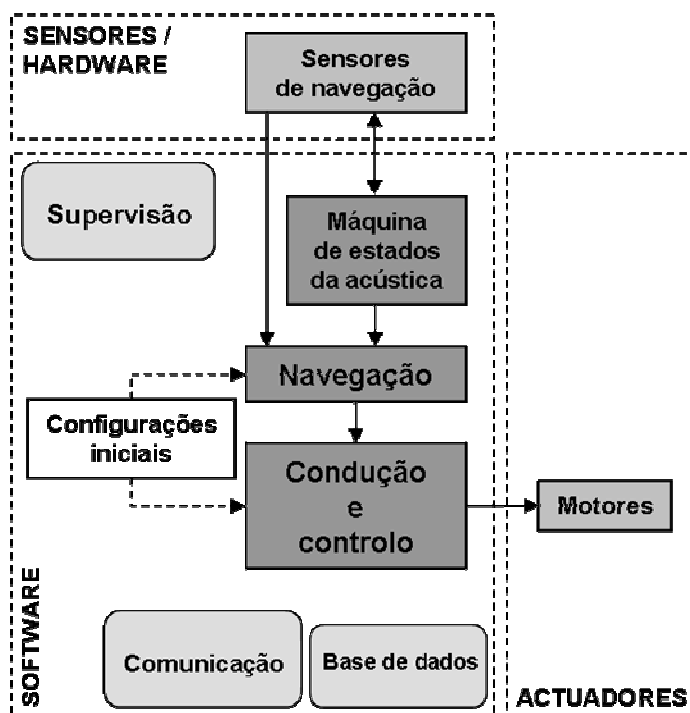


Figura 6.1 – Módulos que constituem o software do bordo do MARES

Os módulos de supervisão, comunicação e base de dados estão interligados entre si e com os restantes. O módulo de supervisão tem por principal requisito supervisionar todo o software e em caso de anomalias “abortar” a missão. O módulo de comunicação é o responsável por estabelecer a comunicação entre o veículo e o exterior, quando este se encontra à superfície, e por fim o módulo da base de dados é o responsável por guardar todos os dados, quer de sensores *payload*, que têm por principal missão a

6. Implementação

recolha de dados, quer de todo o software, que permite posteriormente analisar o comportamento do veículo e do próprio software.

A comunicação entre os módulos é feita através de *sockets* IP, sobre o protocolo UDP. Um módulo para receber dados apenas necessita de abrir um porto de comunicação e para enviar, escreve os dados para um ou mais portos.

A plataforma computacional do veículo é baseada na tecnologia PC-104 e é utilizado o sistema operativo Linux. O software de bordo foi desenvolvido nas linguagens de programação C/C++ para obter o máximo de desempenho do processador.

6.2 Módulos implementados

Para a implementação da navegação em rede acústica móvel, os módulos a substituir, da navegação em rede acústica fixa, foram o da navegação e o da máquina de estados da acústica.

O novo módulo da máquina de estados da acústica tem de ser capaz de fornecer, à navegação, a distância entre os faróis, sendo para isso necessário programar o diagrama de blocos apresentado na figura 6.2. A separação do evento da distância entre os faróis e do comprimento da *baseline* é feita porque estes dois eventos são independentes. Na prática estão implementados por dois *threads* ficando cada um à escuta do seu evento.

O novo módulo de navegação (Fig. 6.3) implementa o filtro de *Kalman*, com as novas equações da dinâmica, que é constituído por actualização assíncronas, medidas de distâncias, e actualizações síncronas, bússola, sensor de pressão e velocidade. Os dois ciclos de actualização são implementados por dois *threads* que integram os dados dos sensores de navegação *dead-reckoning* e posicionamento acústico através do filtro de *Kalman*.

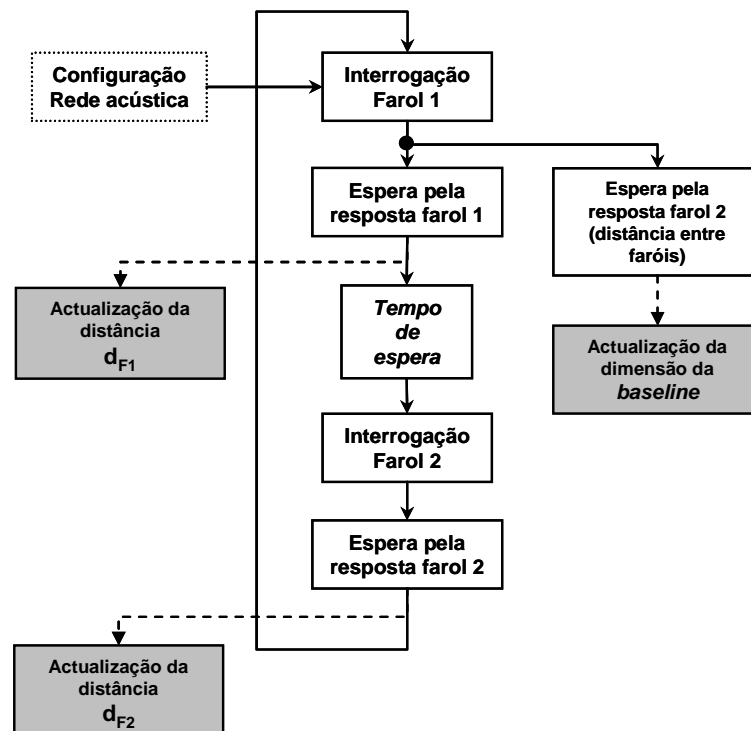


Figura 6.2 – Diagrama da máquina de estados da acústica

6. Implementação

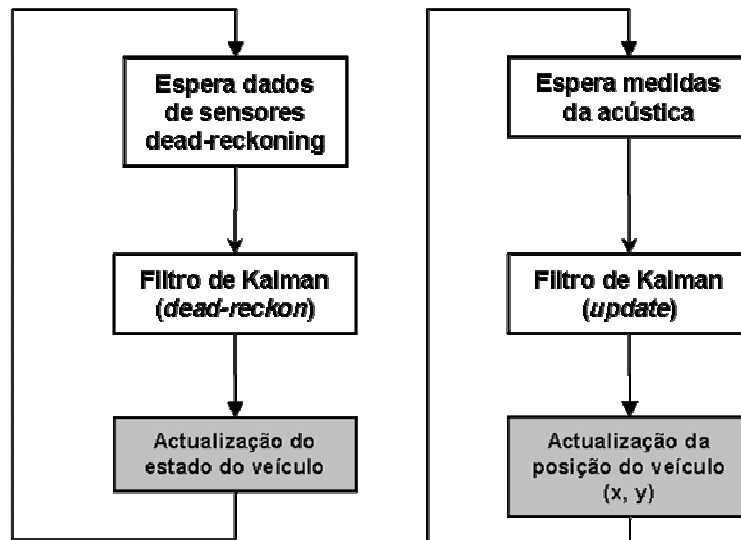


Figura 6.3 – Diagrama do módulo de navegação

7 Conclusões

7.1 Principais resultados

A navegação em rede acústica móvel, conclui-se que, é exequível e com valores obtidos, através de simulação, bastante satisfatórios para os vários cenários possíveis. A implementação da navegação em rede acústica móvel, permite eliminar limitações até agora existentes, impostas pela rede acústica fixa, que se podem resumir como, diminuição de tempos de montagem/desmontagem do cenário de operação e equipamento de suporte (como o barco necessário anteriormente para ancorar os faróis), áreas de operação ilimitadas e capacidade de controlar remotamente, em tempo real, a posição dos faróis acústicos.

Inicialmente para a implementação da navegação em rede acústica móvel foram identificados dois principais problemas, ao nível do posicionamento acústico e da estimação da orientação do veículo na rede móvel. Com o comprimento da *baseline* desconhecido, a solução proposta passa por utilizar pelo menos mais uma frequência de comunicação acústica utilizada para os faróis comunicarem entre si e o veículo, navegação hiperbólica.

Para a navegação, depois de ter sido analisado o comportamento do filtro de *Kalman* utilizado na navegação da rede acústica, chegou-se à conclusão que seria necessário implementar um nova dinâmica para o filtro. O regime transitório apresentado apresentava variações elevadas, na estimação em malha aberta, e quando a realimentação da orientação do referencial móvel, em relação ao fixo, foi feita, o filtro as mesmas oscilações induziam erros no filtro que por sua vez divergia. Para a novas equações da dinâmica, capítulo 4.2.2, o filtro apresenta bons resultados para os diversos cenários de operação com que nos podemos deparar.

A trajectória global do veículo será um somatório da sua trajectória no referencial móvel e da trajectória do referencial móvel em relação ao fixo. Os vários factores a ter em conta na especificação de missões são:

- A especificação de missões, do veículo submarino, terá de ser feita no referencial móvel;
- Para o instante $t = 0$ a origem do referencial fixo deve ser igual à origem do referencial móvel, ou seja, o ponto *Home*, definido no início da missão, será igual à posição do farol acústico 1.
- A velocidade de deslocação do referencial móvel em relação ao fixo, não deve ultrapassar os 20% da velocidade do veículo em relação ao móvel. Este requisito é importante para assegurar uma correcta navegação;
- O veículo, com apenas 2 faróis acústicos, não poderá cruzar a *baseline* ao longo das operações;

7.2 Trabalho futuro

A determinação do comprimento da *baseline*, solução proposta no capítulo 4.1.2, para apresentar uma melhor robustez e imunidade a valores erradamente obtidos, pode ser efectuada através de um novo filtro de *Kalman*. A sua estimação não foi introduzida no filtro proposto no capítulo 4.2.2 pois com mais uma variável de estimação o filtro não apresentaria o mesmo comportamento. Com esse novo filtro e *Kalman* sabendo que a variação do comprimento da *baseline* é pequena ao longo do tempo, pode ser implementado um filtro passa-baixo, mexendo nas covariâncias do filtro.

Os métodos de condução e controlo foram ligeiramente abordados no capítulo 6, contudo como se viu, face a correntes o erro de posicionamento aumenta, tornando-se crucial utilizar métodos de condução compensatórios dessas mesmas correntes. O método apresentado, *line-tracking*, actua sobretudo no modo diferencial do veículo, que é o modo menos eficiente. O modo comum, velocidade longitudinal, é mais eficiente mas para além de existirem limitações de velocidades máximas dos motores, a potência consumida também é um factor a ter em conta. Ainda não sendo totalmente evidente, e estudado, uma solução optimizada de condução, poderá passar pelo controlo, em simultâneo, do modo diferencial e comum.

A apresentação de resultados práticos não foi feita devido à falta de tempo na preparação da missão, que envolve todo o suporte necessário quer material quer humano para a sua realização. Apesar do avançado do software ter já sido implementado e testado não foi possível até à data realizar um missão prática de navegação em rede acústica móvel. No entanto, brevemente, toda a teoria apresentada será testada na prática e pelos resultados de simulação obtidos, espera-se que os resultados práticos sejam bastante satisfatórios.

Referências

- [Blid01] D. Richard Blidberg. “*The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV); A Brief Summary. Autonomous Undersea Systems Institute*”. In *Proceedings of ICRA 2001*, Seoul, Korea, Maio de 2001.
- [CLV05] Joseph Curcio, John Leonard, Jerome Vaganay, Andrew Patrikalakis, Alexander Bahr, David Battle, Henrik Schmidt and Matthew Grund. “*Experiments in Moving Baseline Navigation using Autonomous Surface Craft*”. In *Proceedings of IEEE OCEANS’2005 Europe*, Brest, France, Junho de 2005.
- [CMMP01] Nuno Cruz, Luis Madureira, Aníbal Matos, and Fernando Lobo Pereira. “*A versatile acoustic beacon for navigation and remote tracking of multiple underwater vehicles*”. In *Proceedings of OCEANS’2001*, Honolulu, USA, Novembro de 2001.
- [GELB96] A. Gelb, J. Kasper Jr, R. Nash, C. Pric and A. Sutherland Jr. “*Applied Optimal Estimation*”. The MIT Press. Cambridge, MA, USA. 1996.
- [MC05] Aníbal Matos and Nuno Cruz. “*AUV navigation and guidance in a moving acoustic network*”. In *Proceedings of IEEE OCEANS’2005 Europe*, Brest, France, Junho de 2005.
- [Mad04] Luís António Dias Madureira. “*Sistema de navegação acústica para múltiplos veículos subaquáticos*”. *Master’s thesis*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [MC07] Aníbal Matos and Nuno Cruz. “*Coordinated operation of Autonomous Underwater and Surface Vehicles*”. In *Proceedings of the MTS-IEEE OCEANS’2007*, Outubro de 2007.
- [MC06] Aníbal Matos and Nuno Cruz. “*Simultaneous acoustic navigation of multiple AUVs*”. In *Proceedings of the MCMC’2006*, Lisboa, Setembro de 2006.
- [MCMP99] A. Matos, N.Cruz, A. Martins and F. L. Pereira. *Development and implementation of a low-cost lbl navigation system for na AUV*. In *Proceedings of IEEE OCEANS’2005 Europe*, Brest, France, Junho de 2005.
- [Fos91] Thor Inge Fossen. *Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles*. PhD Thesis, Norwegian Institute of Technology, 1991.
- [Fos95] Thor Inge Fossen. “*Guidance and Control of Ocean Vehicles*”. Jonh Wiley & Sons, 1995.

Referências

- [Yuh00] J. Yuh. “*Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey*”. In *Autonomous Robots*, vol 8, pag. 7-24, 2000.
- [San06] António Manuel Nogueira Santos. “*WaveSim – Ambiente de simulação para veículos aquáticos*”. *Master’s thesis*, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2006.
- [Ura02] Tamaki Ura. “*Development of autonomous underwater vehicles in Japan*”. In *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 1. 2002
- [WB01] Greg Welch, Gary Bishop. “*An Introduction to the Kalman Filter*”. By ACM. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science. 2001.