Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP



Rui Manuel Ferreira Gomes

Modelização e Controlo de Veículos Subaquáticos

MEEC
Porto, 2002

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

DEEC

Controlo e Modelização de Veículos Subaquáticos

Rui Manuel Ferreira Gomes

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

UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA
CDU

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores (Área de Informática Industrial)

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor Fernando Manuel Ferreira Lobo Pereira e pelo Engº João Tasso de Figueiredo Borges de Sousa, ambos do departamento de Engenharia Electrotécnica de computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Porto, Setembro de 2002

À minha família

Resumo

Embora o mercado para sistemas baseados em veículos operados remotamente seja muito mais significativo na indústria petrolífera do que para qualquer outra, tem-se constatado, um pouco por todo o mundo, uma crescente importância das actividades de inspecção de infra-estruturas subaquáticas e de outros serviços, sendo de realçar a arqueologia, o salvamento, a instalação e manutenção de cabos de telecomunicações e de energia, inspecção de condutas , a desminagem, a investigação oceanográfica, o apoio a obras subaquáticas, a inspecção de cais, pilares de pontes e paredes de barragens, monitorização de tanques de água potável e a inspecção de cascos de navios.

Esta dissertação pretende apoiar o projecto de controladores para veículos subaquáticos para facilitar as tarefas de inspecção referidas. Como tal, neste trabalho são abordadas as questões que se prendem com a modelização de veículos subaquáticos, nomeadamente a modelização de um veículo operado remotamente (ROV) do Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas (LSTS). O trabalho de modelização é dividido em três grandes componentes: movimento do corpo rígido, propulsores e perturbações. É ainda implementada uma simulação agregando estes componentes, constituindo assim uma base de trabalho para a síntese de controladores.

Um ponto fulcral no cumprimento da tarefa de inspecção por parte de um veículo subaquático é o seu posicionamento e o seguimento de trajectórias. Sendo o modelo do veículo não linear, é feita neste trabalho uma revisão dos principais controladores não lineares consagrados na literatura. Também são efectuadas algumas simulações com dois controladores não lineares e um linear, sendo, à luz das aplicações endereçadas, apresentada uma análise comparativa dos controladores de linearização por realimentação de estado, "sliding modes" e PIDs.

Para obter um melhor desempenho das actividades de inspecção é ainda projectado um controlador para o sistema integrado envolvendo o ROV e um "Pan&Tilt" suportando uma câmara de vídeo. Uma vez que a resposta deste sistema é bastante mais rápida do que a da plataforma de inspecção, poder-se-á usar com vantagem o seu controlo para cancelar o efeito das perturbações que o sistema de controlo da plataforma eventualmente não tenha conseguido compensar.

O trabalho realizado nesta dissertação enquadrou-se nas actividades de Investigação e Desenvolvimento do Grupo de Engenharia de Decisão e Controlo (GEDC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, nomeadamente no projecto IES, financiado pelo programa PRAXIS XXI da Fundação para a Ciência e para a Tecnologia (FCT).

Abstract

Although the market for inspection systems based on remotely operated vehicles is much more significant in the oil and gas industry than in any other, there has been a growing interest in the use of such systems for other applications involving the inspection of underwater structures as well as other services. Examples of those include archeology, human and object salvage, power and communications cables deployment and maintenance, pipeline inspection, de-mining, oceanographic research, underwater civil works follow up, inspection of quays, bridges and dam walls, monitoring water tank and ship hull inspections.

The main goal of this dissertation concerns the design of control systems for underwater vehicles as part of inspection systems to address most of the mentioned applications. Therefore, in this work, we address issues concerning the modeling of underwater vehicles and, more specifically, a remotely operated vehicle (ROV) of the Systems and Underwater Technologies Laboratory (LSTS). The modeling effort is organized into three main components: underwater rigid body motion, thrusters, and disturbances. All these components where integrated in a MATLAB simulation based environment which was instrumental as a framework to support control systems design.

The underwater vehicle motion, and, in particular, its positioning and trajectory tracking, pose a number of issues which are critical in the fulfillment of the requirements set out for the inspection activities. Since the model of the vehicle is highly nonlinear, a survey of the main results of the nonlinear control literature is presented. A linear controller (PID) and, by using distinct approaches, more precisely state feedback linearization and sliding modes, two nonlinear controllers are designed having in mind the considered application requirements. The corresponding simulation results are presented and used in order to support a comparative analysis.

In order to improve the performance of inspection activities, a controller for the Pan&Tilt unit supporting a video camera is also designed. Since the response of this system is much faster than that of the ROV platform, its control can compensate with advantage the effect of disturbances that were not eliminated by the platform control system.

The work presented on this dissertation is part of the R&D activities of the Decision and Control Engineering Group (GEDC) of the Engineering Faculty of the Porto University, more precisely within the IES project, funded by the PRAXIS XXI program of the Portuguese Science and Technology Foundation (FCT).

Agradecimentos

Esta dissertação não poderia ser concluída sem a colaboração de um grupo de pessoas às quais ficarei eternamente grato.

Assim quero começar por agradecer ao Professor Doutor Fernando Manuel Ferreira Lobo Pereira, que na qualidade de orientador desta dissertação, encorajou, motivou, e teceu comentários que foram de grande importância para a realização deste trabalho. Agradeço ainda o voto de confiança que depositou em mim, pois ele motivou a condução da minha própria investigação.

Ao Engº João Tasso de Figueiredo Borges de Sousa que na qualidade de Co-orientador também deu as suas contribuições para os resultados desta dissertação.

Aos colegas do Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas (LSTS), Aníbal Matos, Nuno Cruz, Patrícia Ramos, Sérgio Fraga, Luís Madureira, Márcio Correia e Alexandre Sousa, pelo espírito de equipa que se manifestou nas missões de teste que se realizaram ao longo do tempo para validar os desenvolvimentos dos veículos do LSTS. Ao Sérgio Fraga um agradecimento especial pelas discussões frutuosas em favor desta dissertação.

Não posso deixar de agradecer à minha família, em particular à minha esposa e ao meu irmão pelo apoio demonstrado.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e ao Instituto de Sistemas e Robótica (ISR) pela cedência de equipamento e instalações para a realização deste trabalho.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através do programa PRAXIS XXI pelo apoio financeiro dado para a realização desta dissertação.

Índice

Resumo iii
Abstract v
Agradecimentos vii
Índice ix
Lista de figuras xiii
Lista de tabelas xv

1 Introdução 1

1.1 Objectivos 2

1.2 Sistemas Baseados em ROVs 3
1.2.1 Aplicações 3
1.2.2 Navegação e Posicionamento 6

1.3 Breve Historial do Controlo de Sistemas 6

1.4 Resultados e Contribuições 10

1.5 Organização da Tese 11

2 O Projecto IES 13

2.1 Introdução 13

2.2 O Sistema IES 14

2.3 Subsistemas 15
2.3.1 Sensores 15
2.3.2 Actuadores 19
2.3.3 Sistema Computacional 20
2.3.4 Fonte de Alimentação 21
2.3.5 Cordão Umbilical 22
2.3.6 Hardware de Integração 22
2.3.7 Consola de Operação 23

2.4 Projecto de Controlo de Sistemas Autónomos 23
2.4.1 Introdução 23
2.4.2 Metodologia 24
2.4.3 Estrutura 24

2.5 Projecto de Manobras 25

2.6 Conclusões 26

3 Métodos de Controlo Não Linear 27

3.1 Introdução 27

3.2 Problemas de Controlo 27

3.3 Métodos Baseados em Técnicas Lineares 29
3.3.1 Controlo por Linearização 29

3.3.2 Regulador via Controlo Integral 30
3.3.3 Gain Scheduled Control (H_∞) 31
3.3.4 Realimentação de Estado por Linearização Exacta 34
3.4 Métodos Baseados em Técnicas de Lyapunov 36
3.4.1 Controlador de Lyapunov 36
3.4.2 Backstepping 40
3.4.3 Sliding Modes 42

4 Modelização de Veículos Subaquáticos **49**

4.1 Introdução 49
4.2 Notação e Sistemas de Coordenadas 49
4.2.1 Nomenclatura 49
4.2.2 Sistemas de Coordenadas 50
4.2.3 Ângulos de Euler 51
4.3 Equação Geral do Movimento 52
4.4 Matrizes Constituintes do Modelo 53
4.4.1 Matriz de Inércia 54
4.4.2 Matriz de Coriólis e Centripta 57
4.4.3 Matriz de Amortecimento Hidrodinâmico 59
4.5 Forças e Momentos de Restabelecimento 60
4.5.1 O Vector $g(\eta)$ 60
4.5.2 Forças e Binários Aplicados 62
4.6 Sistema de Propulsão 64
4.6.1 Modelo da Hélice 64
4.6.2 Modelo do Motor DC 66
4.7 Perturbações Externas 69
4.7.1 Ondas 70
4.7.2 Correntes 72
4.7.3 Cabo 73
4.8 Sistemas de Identificação 73
4.9 Simulação 75
4.10Conclusões 78

5 Controlo de Veículos Subaquáticos **81**

5.1 Introdução 81
5.2 Considerações de Arquitectura 81
5.3 Controlo de Posição 83
5.3.1 Linearização por Realimentação de Estado 83
5.3.2 Sliding Modes 88
5.3.3 PID 95
5.4 Seguimento de Trajectórias 96
5.5 Controlo do Pan&Tilt 96
5.6 Conclusões 102

6 Conclusões e Trabalho Futuro **105**

Bibliografia **109**

A Modelo Usado para Simulação **113**

A.1 Modelo de 6 Graus de Liberdade 113

A.2 Modelo Reduzido Usado para Controlo 114

A.3 Parâmetros do Modelo 114

B O ROV do Projecto IES **117**

Lista de figuras

2.1- Imagem do ROV do LSTS 16
2.2- Imagem de uma tubagem 17
2.3- Imagem de uma fissura (a) 17
2.4- Imagem de um pedaço de betão danificado 17
2.5- Diagrama do sistema IES 18
2.6- Arquitectura de Controlo do IES 25
3.1- Sistema Realimentado 33
3.2- Exemplo de uma função de Lyapunov 37
3.3- Campo vectorial de um sistema não linear 40
3.4- Representação da superfície de deslizamento (n=2) 44
3.5- Aparecimento do efeito de "Chattering" 46
3.6- A zona de transição $(n = 2)$ 47
3.7- Interpolação do controlo na camada fronteira 48
4.1- Referenciais inercial e móvel 51
4.2- Medidas do centro de massa do ROV (em cm) 55
4.3- Coeficientes de massa acrescentada para formas geométricas a duas dimensões 57
4.4- Forças de Restabelecimento 61
4.5- Experiência para medir a distância entre o centro de impulção e o centro de massa 62
4.6- Forças aplicadas ao veículo e sua localização (em cm) 64
4.7- Parâmetros K_T e K_Q para uma hélice do veículo NEROV 65
4.8- Diagrama de blocos de um motor DC 67
4.9- Modelo matlab para simular um motor DC 69
4.10- Resultados da simulação do modelo Matlab (velocidade em $rad\ s^{-1}$ e corrente em A) 70
4.11- Característica típica de um motor DC 71
4.12- Exemplo de uma função espectral $S(\omega)$ das ondas com um pico 72
4.13- Características de propagação de uma onda 73
4.14- Resultados da simulação do modelo do ROV num movimento em frente (posições em m e orientações em rad) 77
4.15- Representação das principais forças que actuam no veículo no movimento para a frente 77
4.16- Resultados da simulação do modelo do ROV num movimento para o lado direito (posições em m e orientações em rad) 78
4.17- Representação das principais forças que actuam no veículo no movimento para o lado 79
4.18- Comparação entre os dados de navegação do ROV em ambiente real e em ambiente de simulação (posições em m e orientações em rad) 79
5.1- Protótipo de uma manobra elementar 82
5.2- Resultados da simulação da estabilização do ROV pelo controlador de realimentação de estado às condições iniciais $(x_i, y_i, z_i, \psi_i) = (2m, 2m, 2m, \pi/2rad)$ (actuação nos motores em $Volt$) 87
5.3- Diagrama de blocos da lei de controlo baseada em Sliding Modes 89
5.4- Resultados da simulação da estabilização do ROV pelo controlador de sliding modes às

condições iniciais $(x_i, y_i, z_i, \psi_i) = (2m, 2m, 2m, \pi/2rad)$ (actuação nos motores em $Volt$) 90
5.5- Comparação dos dois sinais de controlo u1 e u2 antes de alterar os parâmetros do modelo (1) e depois de aumentar os parâmetros do modelo mais 50% (2) (em $Volt$) 91
5.6- Resultados da simulação da estabilização do ROV pelo controlador de sliding modes às condições iniciais $(x_i, y_i, z_i, \psi_i) = (50m, 0m, 0m, 0rad)$ (actuação nos motores em $Volt$) 92
5.7- Arquitectura de controlo para o controlo em horizonte deslizante 93
5.8- Algoritmo para o escalonador de referências 94
5.9- Resultados da simulação da regulação do ROV para a posição $x = -50m$ com condições iniciais nulas e sujeito ao controlo deslizante (posições em m, orientações em rad e actuações em $Volt$) 94
5.10- Resultados da simulação da estabilização do ROV pelos controladores PID às condições iniciais $(x_i, y_i, z_i, \psi_i) = (2m, 2m, 2m, \pi/2rad)$ (actuação nos motores em V) 95
5.11- Inspecção de uma parede (em m) 97
5.12- Referências de posição a aplicar ao controlador (posições em m e orientação em rad) 98
5.13- Comparação entre a trajectória desejada e a simulada (em m) 98
5.14- Dinâmica do Pan&Tilt 99
5.15- Resposta do modelo do Pan&Tilt 100
5.16- Referenciais envolvidos no cálculo dos ângulos de referência do Pan&Tilt 101
5.17- Resultados da simulação do sistema Plataforma-Pan&Tilt (posições em m e orientação em rad) 102
5.18- Cenário possível de controlo do Pan&Tilt 103
B.1- Projecções do veículo 117

Lista de tabelas

2.1- Principais características do ROV do sistema IES 15
2.2- Principais características dos sensores de navegação 17
2.3- Características da câmara de vídeo 19
3.1- Tabela de resultados do teorema de Lyapunov 39
4.1- Lista de coordenadas de um sistema de 6 graus de liberdade 50
4.2- Parâmetros da experiência 63
4.3- Parâmetros do motor DC 68
4.4- Movimentos elementares possíveis para o ROV 75
A.1- Coeficientes hidrodinâmicos 115
A.2- Parâmetros dos motores DC e Hélice 115
A.3- Centro de gravidade, centro de flutuação e inércia 115
A.4- Posição dos propulsores em relação ao centro de gravidade 115
A.5- Parâmetros dos motores DC e Hélice 115

Capítulo 1
Introdução

Portugal, sendo um país que faz fronteira com o oceano Atlântico, foi-se desenvolvendo com o decorrer do tempo nas mais diversas actividades económicas como a pesca, os transportes marítimos, etc, e como tal, tem um conjunto considerável de portos bem como outras infra-estruturas subaquáticas. A necessidade de inspeccionar essas infra-estruturas, torna-se importante do ponto de vista de manutenção. É neste cenário que cada vez mais são usados veículos subaquáticos operados remotamente dado que, por exemplo, é muito mais vantajoso inspeccionar o casco de um navio que está submerso do que desloca-lo para um estaleiro para proceder à sua inspecção. Outras estruturas a serem inspeccionadas poderão ser pontes, cais, paredões, barragens, etc.

Sendo cada vez mais levadas a sério, as questões ambientais revestem-se de um carácter fundamental. Neste campo torna-se necessário recolher os mais diversos dados tais como temperatura, salinidade, turbidez, oxigénio dissolvido, condutividade, e outros. As conclusões obtidas por biólogos e oceanógrafos a partir desses dados contribuem para o bem da sociedade em geral e do ambiente em particular.

Existe ainda um terceiro sector onde a inspecção de infra-estruturas subaquáticas é crucial: As infra-estruturas de exploração de petróleo [18]. À medida que a profundidade de captação de petróleo aumenta, deixa de ser possível a inspecção e o acompanhamento de trabalhos pelos mergulhadores. Esta impossibilidade é obviamente uma impossibilidade física que só pode ser resolvida com recurso a veículos subaquáticos, sejam eles veículos autónomos ou teleguiados.

O mercado potencial da inspecção de infra-estruturas subaquáticas em Portugal é vasto dado existirem grande número de infra-estruturas costeiras e fluviais em diferentes estágios do ciclo de vida: barragens (um número significativo das quais num estágio avançado de idade), túneis, portos, navios, protecções costeiras e emissários subaquáticos. O controlo dos fundos dos rios e das zonas costeiras para estudo dos movimentos de sedimentos e areias constituem outros segmentos relevantes. Embora, este mercado assuma actualmente uma expressão diminuta, prevê-se explosão do mesmo por dois motivos fundamentais: introdução de legislação em conformidade com directivas comunitárias endereçando quer o impacto ambiental quer as normas de inspecções periódicas de infra-estruturas existentes, e a intensificação de construções subaquáticas. A actual pequena dimensão deste mercado deve-se às limitações da oferta promovida pelo conjunto de

pequenas empresas activas no país que recorrem, de um modo geral, ao aluguer de equipamento aos grandes grupos europeus. A prestação deste tipo de serviços é muito dispendiosa devido à deslocação de equipamentos e técnicos.

1.1 Objectivos

São objectivos desta tese, a modelização e o controlo de veículos subaquáticos, nomeadamente do veículo operado remotamente (ROV) do Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquática da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este ROV está a ser desenvolvido para facilitar operações de inspecção.

O quadro de inspecção que se pretende para o sistema é o seguinte. Existe um operador sem experiência de pilotagem deste tipo de veículos que, de preferência deverá ser a mesma pessoa que tem conhecimento para interpretar os dados da inspecção. O sistema permite ao operador dois cenários possíveis para pilotar o veículo. Um deles permite que o operador conduza o veículo pelos pontos que mais lhe interessam de forma a poder inspeccionar o que pretender com a maior flexibilidade possível. O outro cenário possível é a programação de uma trajectória desejada. Em qualquer dos casos, os dados são sempre armazenados e a análise dos mesmos pode ser feita assim que o veículo conclui a sua missão, ou pode ser feita à medida que o veículo executa a missão. Existe ainda um terceiro cenário que assenta nos dois anteriores e que permite que o operador possa interromper os dois tipos de pilotagem para focar um pormenor que lhe pareceu importante. Nesse caso o veículo pára, para permitir ao operador uma inspecção mais detalhada. Portanto, os requisitos de controlo para este sistema deverão ser tais que devem permitir que o veículo se movimente com alguma exactidão para permitir que o operador do sistema possa visualizar as imagens com algum conforto (sem perturbações). As perturbações a que a plataforma de inspecção pode estar sujeita, como as correntes, as ondas e as forças do cabo, devem ser atenuadas através do sistemas de controlo do sistema. Para melhorar o conforto de visualização das imagens fornecidas pela plataforma de inspecção, o Pan&Tilt[1] deve ter um controlador que compense as perturbações que o sistema de controlo da plataformas não consegue cancelar.

Em resumo, os objectivos desta dissertação são:

- Projectar um controlador para que a plataforma possa seguir trajectórias de forma fiável.
- Projectar um controlador para o Pan&Tilt para controlar a orientação da câmara do veículo.

Para cumprir com os objectivos desta dissertação, começou-se por

- Estudar o modelo dos veículos subaquáticos bem como as perturbações a que está sujeito.
- Estudar os sistemas de controlo mais usados para este tipo de aplicações.
- Realizar uma simulação do modelo que permita ser usada como "framework" para o teste de

[1] É um sistema de orientação da câmara de vídeo (será explicado no capítulo 2)

controladores para o sistema.

- Realizar uma missão com o veículo para serem feitos testes para posterior comparação com o modelo desenvolvido e consequentemente validar esse modelo.
- Dimensionar um controlador de realimentação de estado e outro de sliding modes para estabilizar a plataforma e seguir trajectórias.
- Realizar uma simulação de um controlador de realimentação de estado e outro de sliding modes.
- Testar a robustez de cada um à variação de parâmetros do modelo.
- Comparar a performance dos controladores não lineares com os controladores baseados em PIDs.
- Dimensionar um controlador para o Pan&Tilt.
- Simular o controlador do Pan&Tilt.

1.2 Sistemas Baseados em ROVs

A utilização de ROVs na inspecção subaquática tem sido objecto de vasta actividade de I&D em prestigiadas instituições. Dados os seus objectivos, os tópicos de I&D relevantes podem ser organizados nos seguintes capítulos: Arquitectura do Sistema, Navegação e Posicionamento, Modelização e Controlo, e Recolha de Dados.

Em grande parte dos países do mundo existem veículos subaquáticos do tipo ROV. Estes veículos podem ter dimensões grandes ou pequenas, podem ter mais ou menos sensores mediante os requisitos de operação para que foram projectados.

Estes veículos podem ter as mais diversas características como o tipo de alimentação. Pode ser eléctrica ou a combustíveis (nucleares). Quanto aos sensores e actuadores, depende essencialmente da aplicação a que se propõe o ROV. Em termos de sensores, existem dois tipos de sensores. Sensores de navegação e sensores de aquisição de dados.

1.2.1 Aplicações

As aplicações de pesquisa referentes à tecnologia subaquática ganharam especial importância na década de oitenta devido às crescentes actividades de exploração de óleo e gás em águas com profundidades elevadas. Nessas profundidades, as operações de instalação, inspecção e reparo de equipamentos deixam de ser auxiliadas por mergulhadores, devido à limitação da resistência humana, sendo a solução expandir a capacidade tecnológica dos veículos de operação remota (ROV) não tripulados, com propulsores controlados da superfície, baseados em imagens transmitidas por câmaras de vídeo através de cordões umbilicais.

A exploração de petróleo e de gás natural no mar tem sido responsável pelo grande avanço nas áreas de controlo avançado, automação, comunicação e processamento de sinais. A utilização de ROVs tornou-se prática obrigatória em tarefas de inspecção, reparo e instalação de estruturas off-

shore. Na Petrobras, utilizam-se ROVs desde 1977 [4]. Um problema básico para a operação de tais veículos é a navegação. A tendência moderna é localizar o veículo através de fusão sensorial, com todos os sensores a bordo do mesmo. O processamento de sinais, por exemplo através do filtro estendido de Kalman, representa uma técnica necessária neste domínio que depende ainda criticamente do desenvolvimento de novos sistemas de sensorização e de comunicação subaquática (por exemplo, transmissão acústica de sinais de vídeo).

As tarefas de intervenção em águas profundas com ROVs dotados de um ou mais manipuladores são naturalmente complexas. Em geral, são necessários dois operadores para a tele-operação, um para controlar o veículo e outro para comandar os manipuladores. As constantes perturbações que actuam sobre o ROV (corrente, interacção ambiente-manipulador-ROV e cordão umbilical) fazem com que uma atenção extrema seja exigida do operador. É também necessária uma boa destreza para manter o veículo em "station-keeping", como se fosse uma plataforma fixa para realizar uma dada intervenção. A tendência actual é a implementação de controlo para veículos e manipuladores, através do qual o operador utilizaria apenas comandos de alto nível.

Existem vários pontos no mundo onde se registam operações com ROVs. Eles estão essencialmente relacionados com a indústria petrolífera.

Os ROVs podem ser classificados como ROVs de observação e de intervenção. Estima-se que existam cerca de 400 ROVs de intervenção (work class) a servir essa indústria. Alguns dos locais onde se pode verificar actividade na utilização de ROVs é:

- Na Europa - Existem cerca de 100 sistemas destes na área do Reino Unido e Noruega. As profundidades de operação nesta zona são inferiores a 150m.
- Na Ásia - Na parte ocidental da Austrália são feitos estudos a 1600m de profundidade. Esses estudos prendem-se com a procura de novas reservas de gás natural.
- América do Sul - A maioria das operações ocorrem na bacia de Campos no Brasil. A Petrobras continua a corrida para a extracção de petróleo a profundidades cada vez mais baixas. Esta empresa detém o record de extracção mais profunda (1747m) e já está a preparar outra ainda mais profunda (1835m)
- Ártico - A Rússia explora águas com profundidades até 400m em mares gelados onde existem as maiores reserva de gás.
- África - No golfo da Guiné (ocidente de África) a empresa Exxon está a fazer uma perfuração a cerca de 1474m.

As aplicações dos ROVs são as mais diversas. Entre outras aplicações, destacam-se a observação, o apoio à perfuração e à construção subaquática, inspecção de canalizações, entrincheiramento de cabos, reboque de veículos autónomos para projectos especiais.

O Instituto Francês de Investigação para a exploração do mar (IFREMER) desenvolveu um ROV (VICTOR 6000) [3] para explorar o fundo dos oceanos. Este é um ROV de operação a

muito alta profundidade e é controlado remotamente. A sua gama máxima de operação é de 6000 metros. O VICTOR pode capturar imagem de muito alta qualidade e permite configurar o tipo e o número de sensores que pode levar para uma determinada missão.

A empresa Deepocean Engineering [2], que aliás foi a empresa a quem foi comprado o ROV do Laboratório de Sistemas e de Tecnologias subaquáticas fornece um vasto conjunto de veículos para as mais variadas aplicações. A sua classificação é feita em termos da profundidade de actuação. Assim, dispõem de veículos para actuação perto da costa (inshore) e para longe da costa (off-shore).

Os veículos de actuação perto da costa são usados essencialmente em águas pouco profundas como tanques, diques, barragens, rios, lagos e o mar perto da costa. Algumas das aplicações para este tipo de veículos são:

- Inspecção, recolhas de amostras e limpeza de reservatórios de água
- Pesquisa de peixes e mariscos
- Inspecção de diques e barragem
- Inspecção de isutores subaquáticos (descarga de esgotos)
- Recuperação de objectos perdidos
- Arqueologia
- Documentação de vídeo
- Etc

Os veículos de actuação longe da costa, operam essencialmente em águas com elevada profundidade. Este veículos são projectados para serem operados a partir de um barco, e incorporam várias câmaras, sonares, manipuladores e ferramentas diversas para conseguirem cumprir tarefas como:

- Inspecção de condutas, túneis, cabos de energia ou de telecomunicações
- Inspecção de isutores subaquáticos (descarga de esgotos)
- Verificação e instalação de protecção catódica
- Inspecção de âncoras
- Inspecção de plataformas de extracção de petróleo, gás natural, etc
- Inspecção de cascos de navios
- Pesquisa de recursos piscatórios
- Pesquisas oceanográficas
- Arqueologia, procura de tesouros perdidos

A mesma empresa disponibiliza ainda ROVs para aplicações militares. Eles foram projectados para serem operados a partir de cais, paredões ou embarcações. Algumas das aplicações são:

- Identificação e classificação de objectos
- Detecção e neutralização de minas
- Inspecção de cascos de navios
- Detecção e remoção de contrabando
- Recuperação de objectos perdidos

- Recuperação de corpos e provas diversas
- Vigilância de portos marítimos

1.2.2 Navegação e Posicionamento

A navegação e o posicionamento de veículos subaquáticos envolve a integração das funções de localização e de pilotagem, as quais fornecem os sinais de referência ao sistema de controlo. A ideia é estimar as variáveis de estado do sistema a partir das medidas obtidas pelo sistema. Normalmente essas medidas estão corrompidas com ruído. Este problema de estimação tem vindo a ser estudado na literatura e sob certas condições, a teoria dos filtros de Kalman pode ser aplicada com sucesso nestas aplicações [46]. No âmbito deste projecto, dois tipos de locomoção vão ser conjugados: autónoma e tele-operação [11] para conceitos arquitecturais subjacentes à integração) cujo sistema de navegação se baseará nas duas classes fundamentais existentes recorrendo respectivamente: a dados sensoriais e a informação externa.

Quanto à primeira, existem sonares, vídeo, sistemas de navegação inerciais (INS), bússolas magnéticas, sensores de profundidade e outros [28] [31]. Os sistemas de navegação inercial, efectuam uma dupla integração das acelerações do veículo para actualizar a estimativa da sua posição. O Systron Donner MotionPak é um dos sistemas mais precisos do mercado e fornece informação sobre todas as acelerações lineares e angulares. Obviamente, a estimativa de posição assim obtida acumula erros cuja variância aumenta com o tempo (ver análise detalhada em [31]) de modo que, embora estes erros sejam parcialmente compensáveis, torna-se necessária a incorporação de informação externa sempre que o grau de incerteza ultrapassar a tolerância permitida pelos requisitos da aplicação considerada.

Quanto à segunda, faróis de rádio e acústicos são as principais fontes de sinais externos. Para funcionamento à superfície, existem os sistemas Loran, Omega, Navsat e GPS, sendo este último o sistema global mais popular e cuja versão diferencial permite o posicionamento com grande rigor [8] [7] [33]. Neste, a posição é calculada através das medidas dos tempos para os sinais percorrerem as distâncias a quatro satélites Quando aliado a outro sistema de sinais externos, a grande precisão e o pequeno volume, peso e consumo do GPS, torna-o apropriado para apoiar a navegação de ROVs. Também disponíveis comercialmente, encontram-se uma grande variedade de sistemas designados de "long" (LBL), "short" (SBL) e "ultra-short" (USBL) "base line" que, utilizando diversas variantes de técnicas de triangulação permitem o posicionamento de veículos subaquáticos autónomos ou tele-operados [14].

1.3 Breve Historial do Controlo de Sistemas

Ao longo do tempo, o controlo de sistemas sofreu transformações muito grandes. Os

engenheiro romanos, mantinham o nível de água dos seus aquedutos por intermédio de válvulas que abriam e fechavam mediante o nível da água. Na idade média foram desenvolvidos métodos de operação de moinhos de vento automáticos. Os moinhos de vento Holandeses do século 17 mantinham-se orientados para o vento mediante a utilização de um cata-vento auxiliar que fazia mover a parte superior do moinho.

O exemplo de um sistema de controlo mais famoso do tempo da revolução industrial, é o "flyball governor" do James Watt (1769). Este sistema regulava o fluxo de vapor para manter sempre a mesma velocidade de uma máquina apesar da variação de carga da mesma.

Embora a história do controlo seja bastante rica no passado longínquo, muitas das contribuições para o seu desenvolvimento foram conseguidas maioritariamente no século anterior. Um motivo muito forte para estas contribuições foi a 2^aGuerra Mundial.

Foi nos anos 30 que a teoria do controlo clássico começou a desenvolver-se gradualmente. Foi a necessidade de desenvolver um amplificador estável para repetidores de telefones que conduziu o trabalho de Black para a teoria da regeneração e da estabilidade no domínio das frequências (Nyquist), onde o trabalho de Laplace (1749-1827), Fourier (1768-1830), Cauchy (1789-1857), e outros, foi explorado. Simultaneamente com o desenvolvimento do amplificador realimentado, o controlo realimentado de processos industriais tornou-se standard. O controlador PID foi descrito por Calendar em 1936. Esta tecnologia era baseada num extenso trabalho experimental e assentava na aproximação linear da dinâmica do sistema a controlar. A segunda guerra mundial levou ao desenvolvimento da teoria de controlo devido à necessidade de ter controlo de vários sistemas de combate e defesa, bem como o desenvolvimento de servomecanismos para posicionamento de armas. Durante os anos 40 foram estabelecidos os conceitos de resposta em frequência e função de transferência. Por esta altura aparece o primeiro computador analógico. N. B. Nichols desenvolve o seu diagrama de Nichols para o projecto de sistemas de controlo e em 1948 W. R. Evans publica a técnica de alocação de pólos.

Durante os anos 50 o trabalho de controlo incidia no plano s e na obtenção das características desejáveis para a resposta ao degrau num sistema realimentado. Ferramentas rápidas de projecto de controladores tornaram-se comuns, mas eram baseadas na consulta de gráficos. Estas ferramentas davam um apoio importante na resolução de pequenos problemas de controlo. Estes métodos ficaram conhecidos por "Controlo Clássico". Infelizmente estas técnicas eram difíceis de aplicar a sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output). Eram necessárias técnicas de análise e projecto mais sofisticadas. Com o advento da era espacial, apareceram novos problemas de controlo que, aliado ao grande desenvolvimento do computador, os anos 60 assistiram a uma abordagem alternativa ao problema de controlo, o espaço de estados. A isto seguiu-se publicações de Wiener, Bellman, Pontryagin, Kalman, em controlo óptimo e à teoria da estimação

de forma a se poder tratar o problema multivariável de forma genérica. Era o começo de uma nova era da história do controlo: O controlo moderno. Durante este período novos conceitos teóricos e ferramentas foram introduzidos tais como a noção de controlabilidade, observabilidade e optimalidade, o controlador linear quadrático (LRQ), o filtro de Kalman, etc. Outra importante contribuição para a estabilidade de sistemas não-lineares foi a de Lyapunov.

Nos anos 80, O controlo atingiu um nível mais elevado de sofisticação. Contudo, mesmo com as suas potencialidades e vantagens, o controlo moderno tinha algumas lacunas em alguns aspectos fundamentais. Por um lado havia pouca intuição no uso de técnicas do domínio das frequências do controlo clássico. Por outro não existiam muitas ferramentas para analisar a robustez e a estabilidade de sistemas modelizados com incerteza nos parâmetros. No início dos anos 80 J. Doyle e outros mostraram a importância de relacionar os pontos singulares com a frequência em sistemas multivariáveis. Doyle prosseguiu o trabalho de Rosenbrock e MacFarlane os quais contribuíram nos anos 70 para a generalização das aplicações no domínio das frequências para sistemas multivariáveis à semelhança do que se fazia no controlo clássico. Durante os anos 80 apareceu um conjunto interessante de ferramentas de síntese de controlo tais como LQG/LTR e H_2/H_∞ propiciando o aparecimento de uma nova teoria de controlo que usa as melhores características do controlo clássico e do controlo moderno.

Nos últimos anos, foram desenvolvidos métodos poderosos para resolver problemas complexos agregando-os na framework LMI (Linear Matrix Inequalities). A importância dos LMIs nos sistemas e no controlo assenta na grande variedade de problemas que podem ser formulados como problemas de optimização convexa ou quase-convexa. A teoria foi desenvolvida atingiu um elevado nível de sofisticação e foram feitas generalizações para o caso dos sistemas não lineares nas framework de gain-scheduled control e linear parameters varing (LVP).

Em paralelo houve um grande esforço de investigação na área de controlo não linear. Esta motivação aparece do facto de que grande parte dos problemas reais contém efeitos não lineares. Tradicionalmente, os engenheiros de controlo concentravam-se na performance do sistema em torno do ponto de funcionamento do sistema quando o sistema podia ser aproximado por um sistema linear. A limitação desta abordagem é que apenas se pode garantir estabilidade local (num ponto de funcionamento), e portanto é bastante limitativo para a maioria dos sistemas reais onde podem ocorrer grandes desvios em relação a esse ponto. Existem muitos outros efeitos que não podem ser descritos por modelos lineares. Exemplos desses efeitos não lineares serão múltiplos pontos de equilíbrio, variações periódicas das variáveis de estado ou ciclos limites, bifurcações e outras dinâmicas complexas que não podem ser descritas pelos modelos lineares. Mesmo assim, é importante referir que existe um grande número de ferramentas que foram desenvolvidas para os sistemas lineares. Pode-se dizer que até ao momento os sistemas lineares são a única classe

de modelos que dispõem de uma teoria matemática completa. Alguns factores tornam o estudo de sistemas não lineares bastante mais difícil do que o dos sistemas lineares. Existe um factor de diferença que é o facto dos sistemas não lineares não satisfazerem o princípio da sobreposição, o que significa que a saída do sistema é diferente da soma individual de várias respostas de vários sinais de entrada. Ao contrário do caso linear o efeito total do ruído de medida dos sensores, perturbações externas e entradas de referência não pode ser obtido simplesmente pela análise do efeito de cada uma das entradas separadamente. A análise dos sistemas não lineares é também mais complicada devido ao facto da estabilidade interna e da estabilidade da entrada para a saída (input-output) não serem equivalentes. Existe ainda um surpreendente contraste com os sistemas lineares, onde a estabilidade e detectabilidade de uma dada realização são suficientes para garantir a equivalência. Por isso, em geral, a estabilidade da entrada para a saída de um sistema não linear é dependente da entrada. Um problema adicional aparece do facto do princípio da separação não se verificar para sistemas não lineares. Isso implica que o projecto de controladores não pode ser feito simplesmente colocando um regulador baseado em espaço de estados em conjunto com um observador. Para controlar sistemas não lineares, são poucos os métodos que se podem aplicar. Portanto, a caracterização de sistemas não lineares com estruturas especiais é a abordagem normalmente usada.

As últimas décadas testemunharam muita actividade na teoria do controlo de sistemas não lineares tanto do ponto de vista interno como do ponto de vista da entrada para a saída (Kokotovi'c e Arcak, 2001). O trabalho de Lyapunov foi o precursor de uma análise rigorosa e métodos de controlo para sistemas não lineares. Presentemente, as ferramentas disponíveis para projectar controladores para sistemas não lineares são a linearização, escalonamento de ganhos (gain-scheduling), linearização por realimentação de estado, o critério de Popov, teoremas de pequenos ganhos, controlo por superfícies de deslizamento (sliding modes), Lyapunov, backstepping e forwarding, controlo adaptativo, estabilidade da entrada para a saída e abordagens de geometria diferencial [44] [42] [50] [32].

No início dos anos 70 Brockett, Jurdjevic, Hermann, Isidori, Krener, Sussmann e outros introduziram métodos de geometria diferenciável no contexto do controlo de sistemas não lineares para generalizar noções da teoria de controlo linear tais como a controlabilidade e a observabilidade. Desde então, várias conclusões levaram ao desenvolvimento de ferramentas teóricas para o projecto de leis de controlo para uma grande classe de sistemas de controlo não lineares. Existem alguns livros que descrevem o controlo de sistemas não lineares sob o ponto de vista da geometria diferenciável [30] [45].

Outro campo importante da teoria de controlo não linear que também viu uma grande actividade de investigação, foi a aplicação das técnicas de Lyapunov para a estabilização de

sistemas não lineares e identificação e controlo adaptativo. Os métodos de controlo não linear estão a ser implementados cada vez mais na prática e com grande sucesso. De facto, no caso dos sistemas físicos que não são lineares, foi provado que é mais vantajoso usar a estrutura física do sistema em consideração para controlo. Um exemplo clássico é o "Computed Torque Control" na indústria da robótica.

1.4 Resultados e Contribuições

Sendo que para controlar qualquer sistema é necessário o seu modelo, começou-se por modelizar o ROV. Para dar um carácter mais prático ao modelo estudado foi implementada uma simulação em MATLAB, e para validar o modelo encontrado foi feita uma missão com o veículo para adquirir dados de navegação para poder comparar com o modelo computacional. Pela comparação desses dados, verificou-se que existem alguns erros mas que no geral, nota-se uma tendência de seguimento dos dados simulados face aos reais.

Do ponto de vista de controlo da plataforma, assumiu-se que o modelo adquirido é real, e foram implementados três controladores. Dois eram multivariáveis e o terceiro era desacoplado. Os controladores multivariáveis foram baseados em linearização por realimentação de estado e sliding modes. O terceiro controlador foi baseado em quatro simples PIDs controlando cada um o seu grau de liberdade independentemente.

As principais conclusões a tirar são as seguintes:

- O controlador que deu melhores resultados face à variação dos parâmetros do modelo foi o controlador de sliding modes.
- O controlador de linearização por realimentação de estado não permitiu alocar os pólos da equação diferencial do erro em posições desejadas, sendo esta a principal desvantagem a apresentar.
- Os parâmetros dos controladores PID têm que ser afinados sempre que se altera a trajectória desejada, porque existem acoplamentos entre alguns graus de liberdade e que os controladores não estão à espera sendo uma fonte de perturbações a que cada PID está sujeito.

Do ponto de vista do controlo do Pan&Tilt, partiu-se do princípio que o controlo da plataforma era um dado adquirido e como tal dimensionou-se um controlador PID para controlar a orientação da câmara. Considerou-se um cenário em que o ROV esta parado para inspeccionar um detalhe que pareceu importante ao operador do sistema quando executava a trajectória de inspecção desejada. Assim, se a plataforma se afastasse da sua posição desejada por acção de diverso tipo de perturbações como correntes, ondas e cabo, verificou-se que o controlador do Pan&Tilt conseguiu compensar esses efeitos, proporcionando melhores condições para a prática das inspecções como era o objectivo inicial.

São contribuições deste trabalho a:

- a modelização de veículos subaquáticos.
- a identificação de alguns parâmetros do veículo.
- a síntese de alguns tipos de controladores não lineares.
- a implementação de uma simulação baseada em MATLAB da modelização, do controlo não linear do ROV e do Pan&Tilt do sistema IES.
- a análise comparativa entre os vários controladores implementados.
- a contribuição para o projecto IES

1.5 Organização da Tese

A estrutura desta dissertação segue de perto o programa que é descrito na secção 1.1. Assim, no segundo capítulo começa-se por apresentar o ROV do projecto IES. Para ter uma ideia das capacidades do ROV são apresentados todos os seus sistemas constituintes, quer em termos de hardware quer em termos de software.

Os veículos subaquáticos são normalmente sistemas não lineares com incertezas significativas nos parâmetros. Para proceder ao controlo em posição e ao seguimento de trajectórias, são usadas técnicas de controlo não lineares. No terceiro capítulo é feita uma síntese das técnica de controlo para sistemas não lineares. As mais usadas no controlo de veículos subaquáticos são: Lyapunov, realimentação de estado, backstepping, sliding modes e escalonamento de ganho). Estas técnicas são apresentadas sumariamente. Também são estudados os métodos baseados em técnicas lineares.

No capítulo 4, é estudado o modelo de um veículo subaquático. O modelo é partido em 4 componentes principais: o modelo do corpo rígido, o modelo dos motores DC, o modelos das hélices e por fim o modelo das perturbações. Estes componentes do modelo são agregados numa única simulação baseada em MATLAB. Os resultados dessa simulação são comparados com os resultados obtidos pelo ROV numa operação real.

No Capítulo 5, são implementados dois controladores não lineares diferentes; realimentação de estado e sliding modes. Esses controladores são sintetizados e também implementadas as simulações correspondentes. Os resultados dessas simulações são apresentados. Depois, estes controladores são comparados com controladores baseados em PIDs. Seguidamente o controlador baseado em sliding modes é sujeito a uma trajectória parametrizada no tempo.

Tendo em consideração que o posicionamento da plataforma já é um dado adquirido, foi implementado um outro controlador para controlar a orientação da câmara. Para o fazer, começou-se por desenvolver o modelo dinâmico e cinemático do Pan&Tilt. Os resultados da simulação são

também apresentados.

Por fim, no capítulo 6 são tiradas algumas conclusões em relação ao trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação. São ainda traçadas algumas direcções em termos de trabalho futuro.

Capítulo 2
O Projecto IES

2.1 Introdução

Este projecto tem em vista o desenvolvimento de um sistema de Inspecção de Estruturas Subaquáticas - IES. O sistema é constituído por um veículo controlado remotamente e uma consola de operação. O veículo transporta o equipamento de inspecção adequado e é tele-operado a partir da superfície através de um cordão umbilical.

Este sistema pretende responder à necessidade de tornar mais eficiente um grande leque de tarefas de inspecção de infra-estruturas no meio subaquático. A APDL (Administração dos Portos do Douro e Leixões) é uma das empresas que, dado o elevado número e extensão de infra-estruturas submersas que possui, mais sentirá o benefício de usar este sistema na execução das tarefas de manutenção e de inspecção. Esta motivação levou a APDL a assumir o papel de parceiro promotor do consócio do projecto IES.

Adicionando a esta necessidade da APDL a experiência e "know-how" em tecnologia subaquática da equipa de investigação da FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) e do ISR (Instituto de Sistemas e Robótica), e a experiência em processamento de imagem por parte da NTUA (National Technical University of Athens) foi formado um consócio tendo em vista o desenvolvimento do sistema em questão.

O Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas (LSTS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em íntima cooperação com o Instituto de Sistemas e Robótica desenvolve sistemas envolvendo veículos subaquáticos. Um desses veículos é um ROV que está associado ao projecto IES. Como potencial utilizador dos resultados do projecto IES, o CIMAR também integra o consócio.

O projecto IES consiste na concepção e na implementação de um sistema aberto, avançado, de baixo custo, versátil, e de elevada operacionalidade para a inspecção de estruturas subaquáticas [35]. A figura 2.1 apresenta uma imagem do ROV em questão. Os veículos remotamente operados também chamados frequentemente de ROVs (Remotely Operated Vehicles) não são tripulados. Existem muitas aplicações para ROVs entre as quais se destacam observações oceanográficas, operações em ambientes inóspitos, inspecções de infra-estruturas subaquáticas e até aplicações militares. O controlo de posição assim como o seguimento de trajectórias tem sido um dos

grandes desafios nas aplicações baseadas em ROVs. Contudo avanços recentes em sistemas de navegação e de comunicações permitiram que as aplicações baseadas em ROVs possam recolher dados de forma fiável. Algumas características deste ROV podem ser observadas na tabela 2.1. O largo espectro de actividades de inspecção da APDL, que vão desde a detecção e avaliação de danos em estruturas subaquáticas, à inspecção de cascos de navios e acompanhamento de obras subaquáticas, tornam este sistema de aplicação geral.

Nos sistemas comerciais actualmente existentes, as funcionalidades disponíveis para o utilizador são bastante limitadas uma vez que este apenas controla directamente cada um dos actuadores do veículo e observa os resultados da inspecção.

Estes sistemas são fechados por natureza dependendo fortemente do fabricante para a alteração dos sensores e actuadores instalados. Dado que o veículo é apenas uma plataforma de sensores e actuadores ligados directamente ao cordão umbilical, este consiste necessariamente num cabo com bastantes condutores e portanto com um diâmetro considerável. Sendo assim, o cabo de ligação influencia fortemente a "manobrabilidade" do veículo, com consequências mais relevantes para veículos de pequenas dimensões e de baixa potência como o que se pretende desenvolver.

Por outro lado, a simplicidade dos sistemas tradicionais não permite a disponibilização de funcionalidades complexas que permitam facilitar a tarefa de inspecção por parte do utilizador. Apenas encontramos modos de controlo simples (como controlo automático de orientação ou profundidade), dependendo bastante a eficiência da inspecção do treino e habilidade do operador.

Desta forma desenvolveu-se um sistema aberto, capaz de disponibilizar funcionalidades avançadas para o operador que facilite a tarefa de inspecção e permitam a operação do veículo por pessoal não especializado.

A abordagem seguida neste projecto consiste em dotar um pequeno ROV comercialmente disponível de capacidades de processamento e de recolha de dados sensoriais necessárias à implementação de sistemas de controlo avançados requeridos pelos modos de tele-operação avançada, tele-programação e operação autónoma, permitindo automatizar algumas actividades fastidiosas de navegação, pilotagem, e de controlo de movimento. Deste modo, o operador fica liberto das tarefas especializadas e exigentes de pilotar o ROV para as mais específicas de inspecção de uma dada infra-estrutura subaquática.

2.2 O Sistema IES

Uma missão típica definida pela APDL consiste no varrimento autónomo de uma parede para a inspecção desta em tempo real, por forma a permitir a intervenção do inspector no curso da operação do ROV. Esta poderá ser decomposta nas seguintes actividades:

Característica	Valor
Massa	102Kg
Comprimento	1,20m
Largura	0,67m
Altura	0,60m
Graus de liberdade (gd)	4
Velocidade (todos os gd)	1m/s

Tabela 2.1- Principais características do ROV do sistema IES

- Movimentação da plataforma para o local início da inspecção seguida da estabilização desta com a câmara de vídeo apontada na direcção perpendicular à parede.
- Execução de varrimento definido pelo operador.
- Interrupção e recomeço da operação autónoma através de comandos de alto nível.
- Recolha da plataforma uma vez concluída a missão.

Uma vez carregada a missão no computador de bordo, todos os sistemas são verificados antes do lançamento do veículo. A combinação dos dados dos diversos sensores é utilizada para determinar a posição do veículo em coordenadas globais. Parâmetros respeitantes à segurança (estanquicidade e energia) e à precisão da navegação são monitorizados durante a missão, sendo esta abortada no caso da segurança estar em risco. Os dados recolhidos são armazenados a bordo e processados após a recuperação do veículo.

Foram já executadas missões para recolha de imagem no Porto de Leixões. Algumas dessas imagens pode ser observadas na figuras 2.2, 2.3 e 2.4 [9].

Nestas imagens pode-se verificar a existência de corrosão nas infra-estruturas subaquáticas. Tanto a poluição da água como o avançado crescimento marinho que cobre as infra-estruturas impossibilitam a visão. Este problema é minimizado com uma correcta iluminação.

2.3 Subsistemas

O sistema IES, cujo diagrama se apresenta na figura 2.5, contempla:

- Sensores
- Actuadores
- Sistema computacional
- Fonte de alimentação
- Cordão umbilical
- Hardware de integração
- Consola de operação

2.3.1 Sensores

Basicamente existem dois tipos de sensores: sensores de navegação e sensores de dados.

Os sensores de navegação incluem: unidade de movimento inercial, sensor de velocidade



Figura 2.1- Imagem do ROV do LSTS

baseado no efeito de Doppler (DVL), célula de profundidade, bússola magnética, inclinómetros, altímetro, e um encoder óptico em cada motor. A navegação é também apoiada por um sistema de posicionamento acústico.

Em termos de sensores de dados, destaca-se uma câmara de vídeo apoiada numa unidade "Pan&Tilt" e um sistema de iluminação constituem a versão mais simples do sistema de recolha de dados. Para além deste sensor, existem outros de relevância não inferior como os sensores de temperatura, humidade e de pressão que estão instalados em todos os cilindros. Estes cilindros são os compartimentos onde estão instalados todos os sistemas electrónicos.

Sensores de navegação

Alguns dados sobre os sensores de navegação são apresentados na tabela 2.2[2].

A bússola magnética mede a orientação do veículo face ao campo magnético terrestre. Está ainda equipada com inclinómetros pelo que também fornece dados de inclinação transversal e longitudinal. A principal desvantagem deste sensor é a sua baixa cadência de dados bem como a sua vulnerabilidade a outras influências magnéticas que não as do campo magnético da terra.

O altímetro é um dispositivo electrónico que envia um sinal acústico no meio aquático e espera pelo seu eco. Se este sensor for orientado para o fundo, o tempo de ida e volta desse sinal acústico mede a distância ao fundo. É importante ter esta medida para não haver colisões com o fundo.

Para medir a profundidade de navegação, foi usado um sensor de pressão. O princípio desta medida baseia-se no facto da pressão no meio aquático variar linearmente com a profundidade[3].

[2] Os parâmetros $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ são as posições e orientações do veículo e serão explicados mais à frente no capítulo 4

[3] Assume-se que a densidade da água é constante face às variações de profundidade



Figura 2.2- Imagem de uma tubagem



Figura 2.3- Imagem de uma fissura (a)



Figura 2.4- Imagem de um pedaço de betão danificado

Sensor	Dados obtidos	Taxa de dados
Bússola	ϕ, θ, ψ	16Hz (PNI) 3Hz (AOSI)
Pressão	z	do AD (PC104)
DVL	Vel relativa à água e ao fundo	1Hz
Altímetro	Distância ao fundo	10Hz
Inercial	$p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$	100Hz
Acústica	x, y	1Hz
Encoder	Vel. motor (rpms)	50Hz

Tabela 2.2- Principais características dos sensores de navegação

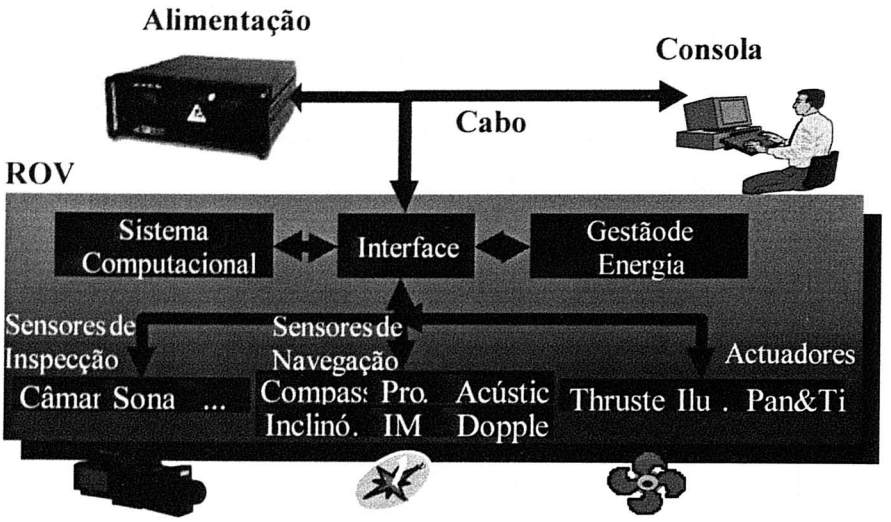


Figura 2.5- Diagrama do sistema IES

Este sensor permite medir com uma exactidão de 2cm até um máximo de fim de escala de 100m.

Todos os motores do veículo estão equipados com encoders ópticos. Estes sensores permitem que se faça a leitura da velocidade do motor. Esta medida é importante visto que por vezes costuma-se implementar uma malha de controlo de hierarquicamente inferior para remover imprecisões do modelo do mesmo.

O sensor inercial [25] mede as acelerações nos 3 graus de liberdade possíveis. Esses dados são usados em conjunto com todos os outros dados de navegação para dar origem aos dados de navegação finais. A taxa de dados fornecida por ele é bastante elevada.

A odometria, o recurso a inclinómetros e bússolas e a utilização de sensores inerciais constituem uma forma de saber o espaço percorrido pelo veículo. No entanto, estes métodos têm algumas desvantagens porque recorrem à integração de valores (no caso dos sensores inerciais duas vezes), e consequentemente vão acumulando erros, que serão tanto maiores quanto maior for o tempo decorrido desde o início da missão. As correntes marítimas (que estes sensores não contabilizam) podem também levar a desvios significativos entre a posição fornecida por estes métodos e a posição real. É então necessário dar ao veículo um conjunto de pontos de referência que lhe permitam corrigir a posição fornecida por aqueles métodos. Isto é feito colocando faróis acústicos na sua área de operação em locais por ele conhecidos. Interrogando estes faróis o veículo pode determinar a sua distância a cada um deles. Os sinais trocados entre o veículo e os faróis são de natureza acústica, dadas as boas características de propagação do som na água. Utilizando um algoritmo de triangulação ele é capaz de determinar a sua posição, com um erro que não cresce com o tempo. É usual recorrer-se ao uso destes faróis apenas para conhecer a posição do veículo

Característica	Valor
Resolução	PAL 460 TVL (NTSC 470 TVL)
Luminosidade mínima	0.05 Lux
Zoom	18:1
Alimentação	11-30V/0.4A
Interface	RS 232
Massa	1.8Kg (ar) 0.35Kg (água)

Tabela 2.3- Características da câmara de vídeo

no plano horizontal, uma vez que a sua profundidade, como já foi dito anteriormente, pode ser determinada sem erros cumulativos utilizando sensores de pressão. Importa ainda referir que o sistema de navegação envolve a fusão dos dados de todos os sensores instalados usando para tal um filtro de Kalman.

Sensores para recolha de dados Em termos de sensores de dados, temos os sensores de temperatura, humidade e de pressão que estão instalados no interior de todos os cilindros do sistema IES. A função do sensor de temperatura é a de monitorizar todo e qualquer incremento anormal de temperatura dos sistemas electrónicos instalados a bordo. Por outro lado, o sensor de pressão permite prever a entrada de água nos cilindros estanques uma vez que a pressão aumenta quando a água entra. Existe ainda um sensor de humidade que verifica constantemente se a água está presente ou não no interior dos cilindros. Assim, com este tipo de dados, podemos ter uma ideia da operacionalidade do sistema.

Sendo este sistema um sistema de inspecção, não poderíamos deixar de apresentar o sensor principal, a câmara de vídeo. Este sensor está montado na parte frontal do veículo as características são apresentadas na tabela 2.3.

Pode-se verificar que esta câmara é muito sensível, dada a sua capacidade de recolher imagens coloridas mesmo com muito baixos índices de luminosidade. Outra característica importante é a compensação de sinal devido ao comprimento elevado de cabo de transmissão.

O altímetro também pode ser visto como um sensor de dados uma vez que se pode recolher dados de batimetria.

2.3.2 Actuadores

Os principais actuadores do sistema IES são os motores. O ROV está equipado com 4 motores DC que compõem o sistema de propulsão. Cada motor disponibiliza uma potência de 1/8CV ($\cong$100W).

Os motores têm um papel muito importante na área do posicionamento e controlo do veículo. Existem duas questões principais que devem ser consideradas. Uma deles é a zona morta do motor e a outra é a saturação do motor. Estas questões serão abordadas mais à frente na secção 4.6.2.

Para que o sistema de visão possa adquirir imagens de forma correcta, o ROV tem que estar equipado com um sistema de iluminação adequado. Testes efectuados pelo LSTS revelaram a necessidade de ter um conjunto de 4 lâmpadas. Cada lâmpada consome cerca de 150W o que perfaz um total de 600W em iluminação.

Existe ainda um sistema a que se dá o nome de Pan&Tilt na literatura inglesa, que não é mais do que um sistema que permite orientar uma câmara segundo dois graus de liberdade. Este sistema é composto por dois motores (normalmente DC) e duas caixas de velocidades. Esta funcionalidade é muito importante quer do ponto de vista de controlo quer do ponto de vista energético porque é mais fácil orientar a câmara do que o próprio ROV. O Pan&Tilt disponibiliza ainda as duas medidas de orientação da câmara o que implica que se possa fechar a malha e controlar a sua orientação ficando assim menos sensível a perturbações, como correntes, ondas, etc.

2.3.3 Sistema Computacional

O sistema computacional é constituído por uma stack PC104 com o sistema operativo em tempo real QNX. Este sistema computacional não é mais do que um computador compatível com o PC da IBM, mas com dimensões reduzidas. O software foi desenvolvido em C++ [43]. A stack PC104 está alojada no cilindro inferior do ROV e controla todo o hardware do ROV através dos protocolos de comunicação série CAN (Controller Area Network) e RS232. O sistema tem que ter capacidade para ler todos o dados disponibilizados pelos sensores analógicos, e portanto necessita de uma carta AD (analógico-digital). O sensor inercial tem um protocolo série síncrono SDLC (Synchronous Data Link Control), o que implica que na stack se tenha que instalar ainda outra carta de SDLC. A comunicação com a consola é feita à custa de uma rede ethernet 10Mbit/s. A transmissão da imagem é feita através da mesma rede ethernet, com recurso à compactação de imagem.

Em resumo, na stack estão instaladas as seguintes cartas:

- CPU - Computador de serviço no ROV
- Ethernet - Rede de comunicação entre o PC do ROV e o PC da consola
- AD - Conversor analógico-digital para medir variáveis analógicas
- CAN - Rede de comunicações série usada na comunicação com alguns dos sensores e dos actuadores
- RS232 - Rede de comunicações série usada na comunicação com alguns dos sensores e dos actuadores
- SDLC - Rede de comunicações série usada na comunicação com o sensor inercial
- FrameGraber - Adquire imagens para serem enviadas pela rede ethernet.

Uma funcionalidade importante do sistema computacional é a de executar o software de controlo e de navegação do veículo. Basicamente a ideia é a de que a stack PC104 recebe comandos de alto nível da consola de operação e o software de bordo encarrega-se de os executar.

O registo de todos os dados em disco bem como a comunicação com a consola de operação é outra função do software do computador de bordo.

2.3.4 Fonte de Alimentação

O sistema de alimentação do ROV é constituído por dois sistemas principais: A fonte de alimentação que se encontra externamente ao veículo, e a distribuição de potência que está localizada no interior do ROV. A fonte de alimentação destina-se a fornecer energia ao veículo enquanto que a distribuição de potência, tal como o nome indica, tem como objectivo de adaptar os níveis de tensão para que cada componente possa ser alimentado correctamente.

A fonte de alimentação que foi projectada tem como principais vantagens o seu baixo custo e a sua fiabilidade.

Basicamente existem dois circuitos de alimentação. O primeiro fornece uma tensão de saída de 130V sobre uma potência de 1Kw. Esta linha de alimentação destina-se a alimentar única e exclusivamente os motores e as lâmpadas do ROV. A potência de 1Kw é suficiente uma vez que os equipamentos consumidores instalados são 4 motores de 100w cada e 4 lâmpadas de 150w. De notar que os motores nunca estão simultaneamente à plena carga porque cada um propulsiona o ROV segundo uma determinada direcção.

A outra linha de alimentação é usada para alimentar toda a electrónica de bordo do ROV. O nível de tensão desta linha é de 48V. Como é necessário baixas tensões tais como +5V, +15V, -15V, +12V, -12V e +24V, é preciso usar uma forma de adaptação de níveis que têm que ser feitas a bordo do ROV. A potência fornecida por esta linha ronda os 80W.

A fonte de alimentação está ainda equipada com um circuito detector de correntes de fugas das linhas de alimentação para o casco do ROV. Esta detecção é muito importante, porque no caso de existir uma ligação defeituosa no veículo que interligue a alimentação e o seu casco, pode provocar uma descarga eléctrica para eventuais utilizadores que estejam em contacto com o casco. Em caso de ocorrência de uma corrente de fugas superior a 2mA, a fonte de alimentação é automaticamente desactivada.

A alimentação da electrónica de bordo é feita por intermédio de conversores DC-DC cuja principal função é a de adaptar os níveis de tensão para outros que permitam a correcta alimentação de cada equipamento. A existência deste sistema justifica-se por duas razões principais: A primeira tem que ver com o número excessivo de condutores que o cordão umbilical teria de suportar se fossem transmitidos todos os níveis de alimentação necessários. A segunda, está relacionada com as perdas que ocorreriam nas várias linhas, uma vez que a potência de perdas é proporcional a corrente ao quadrado. Como a corrente na linha de 48V do cordão umbilical é menor dada a razão de transformação dos conversores, assim, a potência de perdas vem reduzida.

2.3.5 Cordão Umbilical

A transmissão das alimentações para o veículo é assegurada por intermédio de um cabo subaquático intitulado de "Cordão Umbilical". Para além da alimentação, este cabo permite a transmissão de vídeo e rede ethernet para a superfície para se poder visualizar o meio subaquático e comunicar com a consola respectivamente.

Do ponto de vista de modelização e controlo a presença deste cabo no sistema IES é uma desvantagem. Quando o ROV está em operação, o cabo aplica forças no veículo que são muito difíceis de modelizar. Essa dificuldade leva a que muitas vezes se use um modelo simplificado. Em termos de controlo, o que se obtém é um conjunto de perturbações que o controlador vai ter que compensar sem ter conhecimento das mesmas. Isto implica obviamente uma redução de desempenho do sistema realimentado.

2.3.6 Hardware de Integração

Tanto os sensores como os actuadores atrás abordados, necessitam de algum hardware de integração. No caso dos sensores é necessário implementar circuitos de condicionamento e aquisição de sinal, enquanto que nos actuadores tem-se que adaptar os níveis da alimentação do sistema da secção 2.3.4 para proceder à correcta actuação.

A actuação nos motores é feita por intermédio de um conversor de potência DC-DC de 4 quadrantes. Este circuito permite controlar a tensão média de alimentação do motor de forma a poder controlar a velocidade do motor DC. Associado a este conversor, está outro circuito, com o nome de controlador de PWM (Pulse Width Modulation). Este controlador tem como função gerar um sinal PWM de 0 a 100% para excitar o conversor de potência. Este sistema tem uma interface CAN por onde se pode enviar comandos ao motor.

Também foi endereçado um controlador de intensidade luminosa, para permitir a variação da intensidade luminosa das lâmpadas. Esta questão pode ser importante quando o veículo está na presença de águas muito turvas, o que pode implicar uma redução da intensidade luminosa. Neste circuito estão contemplados sensores de corrente para medir a corrente em cada circuito de lâmpadas. Esta funcionalidade permite detectar se uma lâmpada está fundida durante uma missão e pode detectar ainda se existem ligações defeituosas. Tanto o envio de comandos para o controlador das lâmpadas como o retorno da corrente nas lâmpadas é feito através da rede CAN.

Da mesma forma, o Pan&Tilt requer um controlador de Pan&Tilt. Este controlador usa o mesmo principio de funcionamento que o controlador de PWM, gerando os níveis de tensão necessários para orientar a câmara convenientemente.

Para que se possa manter um registo das diversas tensões de alimentações, foi montado um sistema monitor de tensões que não faz mais do que ler todas as tensões de alimentação.

Esta informação permite detectar se o sistema está a funcionar convenientemente ou não, e é introduzida na rede CAN a pedido pelo sistema computacional.

O sensores de temperatura, de pressão e de humidade em todos os cilindros são condicionados e digitalizados noutro circuito. Tal como anteriormente, todos esses dados são devolvidos a pedido. A velocidade dos motores também é medida através deste circuito.

Tal como já foi dito antes, a bússola tem interface série. Tendo em consideração que a mesma está localizada numa zona em que não existe nenhum porto série ao contrário da rede CAN, foi desenvolvido um conversor RS232/CAN, permitindo assim ligá-la através da rede CAN.

2.3.7 Consola de Operação

Para que uma operação do ROV seja facilmente executada por um operador sem experiência prévia, neste tipo de veículos, é necessária a implementação de várias funcionalidades que a seguir se descreve [20]:

1- Agregação dos comandos de movimentação do veículo num único dispositivo. Um simples "joystick" apresenta estas características, até porque constitui um instrumento largamente difundido, pelo que o seu manuseamento se torna bastante fácil.
2- Agregação e apresentação de informação proveniente do computador de bordo do ROV de um modo gráfico. A informação apresentada deverá ser relevante para a operação do veículo, tal como:
   - Indicação da profundidade do veículo
   - Indicação da orientação
   - Indicação das perturbações existentes no nivelamento lateral e longitudinal do veículo ("Roll" e "Pitch")
   - Indicação do estado actual dos motores em termos de percentagem de actuação
   - Indicação do posicionamento do veículo num mapa do cenário de operação
   - Apresentação de imagem vídeo proveniente do ROV
3- Apresentação de comandos para os instrumentos do veículo
   - Interface gráfica que permita ao operador o envio de comandos para o computador de bordo do ROV para calibrações diversas dos sensores (a calibração do sensor de profundidade é um exemplo)
   - Interface gráfica que permita o fácil manuseamento de instrumentos operacionais tais como as luzes instaladas a bordo do veículo.
4- Disponibilização de alguns dados decorrentes da operação na "World Wide Web".
5- Programação de manobras.

2.4 Projecto de Controlo de Sistemas Autónomos

2.4.1 Introdução

Um aspecto fundamental do projecto IES consiste na metodologia adoptada, nomeadamente,

a que respeita à validação de sistemas e de conceitos [40]. Para além da articulação de uma equipa multidisciplinar e da disponibilidade de um protótipo e de meios de simulação e de teste, foi também crucial para este projecto a consideração desde muito cedo de uma arquitectura de controlo conceptual que foi sendo progressivamente refinada. É indiscutível que o controlo de um sistema de elevada complexidade requer a sua organização numa hierarquia distribuída [49]. Contudo, o facto de não estarem ainda consolidadas metodologias baseadas em quadros formais adequados torna difícil o projecto de sistemas autónomos. A experiência neste projecto revelou a importância do rigor na adopção do seguinte conjunto de princípios inspirados no processo de engenharia de sistemas:

- Decomposição dos problemas de controlo em subproblemas elementares. Esta tarefa produz um conjunto completo de manobras elementares admissíveis [48].
- Concepção da arquitectura de controlo utilizando as manobras elementares como blocos de base. Estas têm de preencher os requisitos a satisfazer em todos os níveis hierárquicos.
- Manutenção de uma representação uniforme da arquitectura de controlo em todas as fases do projecto: concepção, simulação, avaliação e implementação [47].
- Reutilização de sistemas, evitando a repetição de tarefas executadas anteriormente.

2.4.2 Metodologia

A arquitectura de controlo endereça o conjunto de propriedades do sistema que não podem ser definidas por qualquer dos seus módulos constituintes. A concepção informal da arquitectura envolve as seguintes etapas:

- Projecto da arquitectura conceptual - identificação das manobras e definição dos serviços intermédios que coordenam a execução destas.
- Mapeamento da arquitectura conceptual na arquitectura de software - selecção dos modelos de coordenação para a arquitectura conceptual. A implementação dos mecanismos do software básico da arquitectura fornece uma estrutura em torno da qual se desenvolve de forma incremental a modelização e o controlo.
- Desenvolvimento incremental da arquitectura - substituição progressiva de blocos vazios na arquitectura por modelos e controladores que podem ser desenvolvidos isoladamente.

2.4.3 Estrutura

A arquitectura de controlo está organizada nas seguintes camadas e respectivas "interfaces" [35] [40]:

- Organização ou Estratégica. Esta camada suporta a resolução de problemas de decisão e controlo "top-down" produzindo referências de controlo com base em informação global à priori. A organização da missão e o planeamento de tarefas são exemplos destas actividades.
- Coordenação ou Táctica. As estratégias realimentadas conjuntas para os diversos subsistemas que interagem para executar uma dada actividade são geradas nesta camada. Na literatura, as subcamadas de Supervisão e a de Manobra são consideradas [49].
- Regulação ou Funcional. Incluindo as leis de controlo usuais, tais como, estabilização,

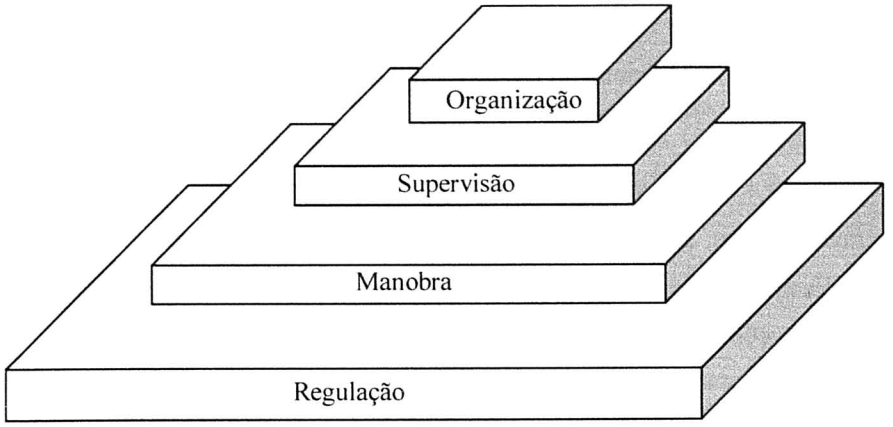


Figura 2.6- Arquitectura de Controlo do IES

regulação e seguimento de caminhos, etc., associadas aos comandos de baixo nível, este nível faz o "interface" directo com o "hardware" do veículo cujos modelos dinâmicos são especificados em termos de equações diferenciais.

A título de exemplo, considera-se, no âmbito do sistema IES, a execução de uma missão de inspecção de uma parede subaquática [35], para a definição da correspondente arquitectura de controlo ilustrada na figura 2.6. Consideremos as seguintes manobras: movimentação para o local de início da inspecção, posicionamento linear e angular da plataforma, estabilização desta, varrimento da parede, e deslocação do veículo para o local de recuperação. Note-se que, durante o varrimento, o operador poderá comandar o veículo por tele-operação. Cada segmento é, por sua vez, organizado num conjunto de manobras elementares, cada uma delas requerendo a coordenação de um conjunto de recursos (i.e., actuadores, sensores, serviços computacionais, etc.,). A arquitectura de controlo consiste pois numa estrutura que permite articular a execução das manobras de forma a garantir a coerência global da missão. Esta articulação envolve a verificação dos conjuntos de condições que viabilizam o início, a terminação e a continuidade da execução de cada manobra.

2.5 Projecto de Manobras

Todos os movimentos são compostos de manobras elementares. A primeira etapa do projecto consiste em encontrar um conjunto completo de manobras. Cada uma destas é definida como uma solução típica de uma classe de problemas de controlo. princípios de engenharia de sistemas combinados com a teoria do controlo são utilizados para considerar e classificar todas as manobras elementares necessárias [40] [47].

O projecto de um controlador para uma manobra elementar no quadro de sistemas híbridos

envolve as seguintes fases:

- Expressão da especificação da manobra como conjunto a atingir e/ou restrições a satisfazer
- Formulação de um problema de controlo
- Derivação das condições de síntese
- Síntese do controlador a partir destas condições.

No contexto mais simples, a síntese de uma manobra elementar consiste em encontrar uma estratégia de controlo, possivelmente em função do estado, de tal modo que a equação da dinâmica do sistema, as suas restrições são satisfeitas e, possivelmente, um dado critério de desempenho é optimizado. Contudo, em geral, tal quadro não é suficiente. Na síntese de manobras que envolvem sistemas dinâmicos fisicamente independentes, por exemplo, o movimento coordenado de vários veículos autónomos, torna-se imperativo utilizar uma formulação do problema mais completa em que o sistema dinâmico é híbrido, ou seja, a evolução da variável de estado deve-se, não só à componente diferencial e à satisfação das restrições, mas também à ocorrência de acontecimentos discretos.

As manobras requerendo a coordenação de múltiplos sistemas ou veículos são exemplos da insuficiência das manobras elementares para, de forma isolada, realizarem todas as acções subjacentes a uma manobra prática genérica, uma vez que, tipicamente, esta envolve a interacção de vários sistemas dinâmicos. A coordenação das manobras elementares que compõe a manobra complexa efectua-se através do controlo do um sistema dinâmico associado ao grupo (ou equipa) resultante da articulação lógica e física dos subsistemas envolvidos permitida pela comunicação entre eles [47]. A verificação da correcção de uma manobra efectua-se através da constatação à priori da existência de controlos admissíveis.

2.6 Conclusões

Neste capítulo, foi apresentada uma descrição do Projecto IES bem como um conjunto de questões colocadas no projecto de sistemas de controlo para veículos subaquáticos.

Foi apresentado todo o hardware constituinte, desde os sensores aos actuadores, a consola de operação, fonte de alimentação, passando pela arquitectura de controlo.

A necessidade de controlar vários sistemas dinâmicos de forma coordenada impõe a consideração de um quadro de sistemas híbridos. Importa sublinhar, o papel crítico de um conjunto de princípios de projecto e, intimamente relacionada, as questões arquitecturais que, ao endereçar as propriedades globais do sistema, dita a forma de organização mais adequada do problema global de controlo em subproblemas, bem como a sua articulação.

Capítulo 3
Métodos de Controlo Não Linear

3.1 Introdução

Na formulação de qualquer problema de controlo, existem discrepâncias entre o sistema real e o modelo matemático usado para sintetizar o controlador. Estas discrepâncias podem ser fruto de dinâmicas não modelizadas, parâmetros imprecisos ou do uso de modelos simplificados. O engenheiro deve garantir que o controlador resultante tenha o desempenho esperado tendo em consideração o modelo aproximado.

Neste capítulo é apresentada uma síntese sobre controladores que podem ser usados em sistemas não lineares. As técnicas de controlo dividem-se em dois conjuntos principais. As técnicas baseadas no controlo linear, seja ele por linearização em torno de um ponto de funcionamento ou aproximações de 1^aordem quer por linearização exacta. A outra classe de técnicas são baseadas nas técnicas de Lyapunov como o método directo de Lyapunov, "backstepping" e por fim o controlo com recurso a múltiplas superfícies de controlo "sliding modes".

3.2 Problemas de Controlo

Dependendo do objectivo do projecto de controlo, existem diversas formulações do problema de controlo. Alguns dos tipos mais importantes de problemas são a estabilização, o seguimento de trajectórias e a rejeição de perturbações. Cada um destes leva à formulação de um conjunto de problemas de controlo. Em cada problema tem-se uma versão da realimentação nas variáveis de estado que podem ser medidas. Na resolução do problema de controlo, existem objectivos adicionais de projecto tais como especificações na resposta do sistema ou nas restrições no controlo. Estas especificações são na maioria das vezes conflituosas e o engenheiro tem que fazer um opção. Quando se entra em consideração com incerteza dos parâmetros do modelo, devem ser definidos controladores robustos. No controlo robusto, as incertezas do modelo são caracterizadas como perturbações do modelo em torno do modelo nominal.

Os problemas principais de controlo são:

1- Estabilização

Considere o sistema não linear

$$\dot{x} = f(t, x, u)$$

com $x \in \Re^n$ e $u \in \Re^m$. O problema da estabilização consiste em encontrar uma lei de controlo

$$u = \gamma(t, x) \tag{3.1}$$

tal que a origem $x = 0$ seja um ponto de equilíbrio assimptoticamente estável do sistema realimentado

$$\dot{x} = f(t, x, \gamma(t, x)).$$

Quando este problema for resolvido, pode-se estabilizar o sistema não só na origem como em qualquer ponto p. para isso faz-se uma mudança de variável $y = x - p$. A lei de controlo 3.1 é normalmente chamada de realimentação estática, uma vez que u é uma função de x e t sem memória. Por vezes usa-se uma realimentação dinâmica da forma

$$u = \gamma(t, x, z)$$

onde z é a solução do sistema dinâmico

$$\dot{z} = g(t, z, x)$$

actuado por x.

2- Seguimento de trajectórias
Considere-se o sistema

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x, u, w) \\ y &= h(t, x, u, w) \\ y_m &= h_m(t, x, u, w) \end{aligned}$$

onde x, u, w, y e y_m representam respectivamente as variáveis de estado, o controlo, as perturbações, a saída do sistema realimentado e a saída medida. O objectivo deste problema é encontrar uma lei de controlo u de forma que a saída do sistema realimentado siga uma referência y_R. Ou seja, à medida que o tempo tende para infinito, o erro tende para 0.

$$e(t) = y(t) - y_R(t) \to 0, \quad t \to \infty.$$

Uma classe importante de problemas de seguimento é aquela em que o sinal de referência y_R é constante. Este problema designa-se por regulação. Também aqui a lei de controlo pode ser estática ou dinâmica. A lei de controlo pode ter um seguimento local ou global dependendo da natureza local ou global dos valores do erro e da ordem de grandeza do nível de perturbações. Por exemplo, para um problema típico, quando se diz que temos seguimento local, isto significa que os erros a eliminar são de tal modo pequenos que o estado de funcionamento do sistema está sempre na vizinhança de um dado ponto de operação dito nominal. Por outro lado, o seguimento global é conseguido para quaisquer condições iniciais, sinais de referência e perturbações.

3- Rejeição ou atenuação de perturbações

Caso existam perturbações pode não ser possível o seguimento assimptótico. Nesses casos, a atitude tomada é a de atenuar as perturbações de forma a que o erro de seguimento seja limitado

superiormente por uma tolerância $e > 0$.

$$\|e(t)\| \leq e, \quad t \rightarrow \infty$$

3.3 Métodos Baseados em Técnicas Lineares

Dados os efeitos hidrodinâmicos, o ROV é um sistema não-linear cuja modelização se torna essencial para permitir o desenvolvimento de sistemas de controlo de forma a garantir os requisitos apesar das perturbações muito significativas [26] [17] [14]. O apoio da simulação desempenha um papel fundamental nesta actividade. A precisão do controlo e estabilização do movimento do ROV vai impor as características do controlador e do sistema de navegação. Apesar da forte não linearidade do modelo e da dificuldade típica na obtenção de uma boa representação deste, existem já um conjunto de técnicas de controlo avançadas (optimização linear quadrática, H_∞, sliding-modes, feedback linearization, Lyapunov, Backsteping) que permitem projectar controladores que satisfaçam requisitos apropriados para muitos problemas práticos. Nesta secção será feita uma descrição sumária de alguns métodos de projecto de controladores bem como uma análise comparativa entre eles.

3.3.1 Controlo por Linearização

Considere-se o sistema não linear

$$\dot{x} = f(x, u) \tag{3.2}$$

onde $f(0,0) = 0$ e $f(x,u)$ é contínua e diferenciável em $\Re^n \times \Re^p$. A ideia é calcular uma acção de controlo $u = \gamma(x)$ de forma a estabilizar o sistema. Linearizando o sistema 3.2 em torno do ponto $(0,0)$ dá origem ao sistema linear

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

onde

$$\begin{aligned} A &= \left.\frac{\partial f}{\partial x}(x,u)\right|_{x=0,u=0} \\ B &= \left.\frac{\partial f}{\partial u}(x,u)\right|_{x=0,u=0}. \end{aligned}$$

Assume-se que o sistema (A, B) é controlável. Para controlar o novo sistema, basta escolher uma estratégia de controlo do tipo $u = Kx$, e escolher um vector K de forma a que os pólos do sistema realimentado estejam todos situados no semi-plano esquerdo do plano complexo.

$$\mathrm{Re}(A + BK) < 0$$

3.3.2 Regulador via Controlo Integral

Considere-se o problema de regulação para o seguinte sistema

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u) \\ y &= h(x) \end{aligned}$$

onde f e h são continuamente diferenciáveis em $\Re^n \times \Re^p$ e $\Re^n$ respectivamente. Seja y_R uma referência constante. O objectivo é encontrar uma lei de controlo de forma que

$$y(t) \rightarrow y_R, \quad t \rightarrow \infty.$$

A regulação do sistema será atingida estabilizando o sistema num ponto de equilíbrio onde $y = y_R$. Para manter a condição de equilíbrio no sistema é necessário que exista um par (x_{ss}, u_{ss}) de forma que:

$$\begin{aligned} 0 &= f(x_{ss}, u_{ss}) \\ 0 &= h(x_{ss}) - y_R \end{aligned}$$

Assume-se que as equações anteriores têm uma única solução. Para prosseguir com o projecto do controlador é necessário integrar o erro $e = y - y_R$, adicionando uma nova variável satisfazendo

$$\dot{\sigma} = e. \tag{3.3}$$

O novo sistema vem,

$$\dot{x} = f(x,u) \tag{3.4}$$

$$\dot{\sigma} = h(x) - y_R. \tag{3.5}$$

Para sistemas de múltiplas saídas ($p > 1$), a equação 3.3 representa um conjunto de p integradores onde cada componente do erro de seguimento é integrada. A lei de controlo é projectada como uma função de x e σ de tal maneira que o sistema realimentado tenha o ponto de equilíbrio $(\bar{x}, \bar{\sigma})$ com $\bar{x} = x_{ss}$. Assim, é possível linearizar o sistema 3.4-3.5 em torno do ponto $(x = x_{ss}, \sigma = \sigma_{ss})$ obtendo o sistema

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \xi + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} v = \breve{A}\xi + \breve{B}v$$

com um novo vector de estado

$$\xi = \begin{bmatrix} x - x_{ss} \\ \sigma - \bar{\sigma} \end{bmatrix}$$

e um novo sinal de controlo

$$v = u - u_{ss}.$$

As matrizes A, B e C são dadas por

$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial f}{\partial x}(x,u)\Big|_{x=x_{ss},u=u_{ss}} \\ B &= \frac{\partial f}{\partial u}(x,u)\Big|_{x=x_{ss},u=u_{ss}} \\ C &= \frac{\partial h}{\partial x}(x,u)\Big|_{x=x_{ss}}. \end{aligned}$$

Suponha-se que (A,B) é controlável e que

$$rank\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = n+p.$$

Então $(\breve{A},\breve{B})$ é controlável. Assim sendo, pode-se calcular uma matriz

$$K = [K_1, K_2]$$

de forma a que a matriz $\breve{A}+\breve{B}K$ tenha os pólos no semi-plano esquerdo do plano complexo. K_1 e K_2 tem dimensões $p \times n$ e $n \times n$ respectivamente. A lei de controlo vem

$$u = K_1(x - x_{ss}) + K_2(\sigma - \bar{\sigma}) + u_{ss}$$

Se escolhermos $\bar{\sigma}$ da forma

$$\bar{\sigma} = K_2^{-1}(u_{ss} - K_1 x_{ss}) \equiv \sigma_{ss}$$

a lei de controlo vem simplificada

$$u = K_1 x + K_2 \sigma.$$

A explicação da robustez da regulação quando se usa controlo integral deve-se ao facto do controlador forçar a convergência para um ponto de equilíbrio assimptoticamente estável. No limite, estes sinais são constantes e para o integrador $\dot{\sigma} = e$ ter saída constante σ, a entrada e tem que ser 0. Portanto, a inclusão do integrador força o erro a ir para 0 no ponto de equilíbrio. A incerteza nos parâmetros faz mudar o ponto de equilíbrio, mas a condição $e = 0$ será mantida no ponto de equilíbrio. Contudo, como esta estabilização é local, é necessário impor que as condições iniciais $(x(0),\sigma(0))$ estejam suficientemente perto do ponto de equilíbrio (x_{ss},σ_{ss}).

3.3.3 Gain Scheduled Control (H_∞)

A desvantagem do projecto de controladores através da linearização do sistema em torno de um ponto de funcionamento é que o controlador só assegura estabilidade apenas em torno desse ponto. Nesta secção é apresentada uma técnica chamada de escalonador de ganhos (gain scheduled control) que permite que se controle o sistema em vários pontos de funcionamento. Após a linearização do sistema em torno de vários pontos, projecta-se um controlador linear para

cada ponto e por fim implementa-se a família de controladores como se de um controlador se tratasse mas com os seu parâmetros a serem alterados em função da evolução do sistema [22] [12] [32]. Este método leva naturalmente às especificações do projecto do controlador no domínio das frequências. Para além disso ainda fornece orientações para desenvolver controladores que sejam robustos na presença de incertezas do modelo. Sistematizando, este método consiste nos seguintes passos:

1- Linearização do sistema em torno de vários pontos de funcionamento dando assim origem a vários modelos do sistema.
2- Projectar um controlador para cada modelo referido no ponto anterior.
3- Interpolar os parâmetros dos controladores lineares do ponto anterior de forma a que o sistema linearizado tenha a performance adequada em malha fechada em todos os pontos de funcionamento onde é suposto o sistema operar. A interpolação é feita de acordo com o estado do sistema, e a família resultante de controladores lineares é chamada de controlador de ganho escalonado.
4- Implementação do controlador de ganho escalonado no sistema não linear original.

Dado um sistema não linear do tipo

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u) \\ y &= x \end{aligned}$$

onde $f : \Re^n \times \Re^p \rightarrow \Re^n$ é uma função C^1 e o vector $(x_0, u_0) \in \Re^n$ é chamado um ponto de equilíbrio se $f(x_0, u_0) = 0$.

A linearização em torno do ponto de equilíbrio é um sistema com:

$$\begin{aligned} A &= \left.\frac{\partial f}{\partial x}(x,u)\right|_{x=x_0} \\ B &= \left.\frac{\partial f}{\partial u}(x,u)\right|_{x=x_0} \\ C &= I \end{aligned}$$

As especificações para o controlador linear são as seguintes:

- o sistema realimentado deve ter erro nulo em regime permanente em todas as variáveis controladas.
- a largura de banda do sistema deve ser compatível com a largura de banda dos motores.
- os pólos em malha fechada devem ter algum amortecimento. As margens de ganho e de fase devem ser respectivamente de 6dB e 45^{o}em todas as variáveis controladas.

Considerando o sistema da figura 3.1 onde

- w é o vector de referências desejadas
- z é o vector dos erros
- y é o vector das medidas feitas para controlar

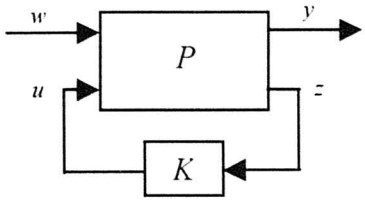


Figura 3.1- Sistema Realimentado

- u é o vector dos controlos que serão aplicados na planta P

Vamos assumir que T_{zw} representa uma matriz equivalente à função de transferência em malha fechada entre w e z. A síntese baseada em H_∞ consiste em encontrar entre todos os controladores lineares disponíveis qual o que dá origem a uma malha fechada estável. Ou seja, é necessário encontrar o vector K que minimiza a norma infinita $\|T_{zw}\|_\infty$. De notar que a norma infinita de T_{zw} é igual a $\sup\{\sigma_{\max}(T_{zw}(jw)) : w \in \Re\}$, onde $\sigma_{\max}(.)$ calcula o máximo valor singular de uma matriz.

Supõem-se que o sistema pode ser representado por

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u \\ z &= C_1 x + D_{12} u \\ y &= x \end{aligned}$$

e assume-se que (A, B_2) é estabilizável, D_{12} tem colunas linearmente independentes, o sistema com entrada em u e saída em z não tem zeros no eixo imaginário. O resultado matemático na síntese do controlador H_∞ é apresentado a seguir.

Teorema 3.1 *Supondo $\gamma > 0$ um número positivo e calculando a matriz Hamiltoniana*

$$H(\gamma) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} H_{11} &= A - B_2(D_{12}^T D_{12})^{-1} D_{12}^T C_1 \\ H_{12} &= \gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2(D_{12}^T D_{12})^{-1} B_2^T \\ H_{21} &= -C_1^T(I - D_{12}(D_{12}^T D_{12})^{-1} D_{12}^T) C_1 \\ H_{22} &= -A^T + C_1^T D_{12}(D_{12}^T D_{12})^{-1} B_2^T. \end{aligned}$$

Então existe um controlador estabilizante K tal que $\|T_{zw}\| < \gamma$, se e só se:

1- $H(\gamma)$ não tem valores próprios no eixo imaginário e existe uma base para o sub-espaço $\chi_(H(\gamma))$ de $H(\gamma)$ da forma $[X_1', X_2']'$, onde X_1 e X_2 são matrizes quadradas de dimensão apropriada e X_1 é invertível.
2- $X(\gamma) = X_2 X_1^{-1}$ é semi positiva definida.

Neste caso,

$$K = -(D_{12}^T D_{12})^{-1} \left[D_{12}^T C_1 + B_2^T X(\gamma) \right].$$

Na prática, este teorema é usado da seguinte forma. Primeiro, é calculada uma matriz K de controlo usando as formulas anteriores mas com $\gamma = \infty$. Depois a norma infinita da matriz da função de transferência T_{zw} é calculada, que por sua vez fornece um limite superior γ_u na performance conseguida. Depois o teorema é usado para fazer uma pesquisa no intervalo $[0, \gamma_u]$ para encontrar o valor óptimo de γ. Quando se obtém um intervalo suficientemente pequeno onde o valor óptimo de γ deve estar incluído, a busca é terminada. A matriz de realimentação de estado K é calculada usando o limite direito do intervalo nas fórmulas acima apresentadas. De notar que este controlo não é óptimo uma vez que não foi usado o valor óptimo de γ.

3.3.4 Realimentação de Estado por Linearização Exacta

Neste método é escolhida uma lei de controlo que, quando aplicada ao sistema não linear torna o sistema em malha fechada linear. Depois por alocação de pólos na equação do erro pode-se dimensionar convenientemente a dinâmica do sistema realimentado.

No processo da procura de uma lei de controlo que lineariza o sistema, pode-se colocar uma questão. Em que condições é que se pode encontrar uma lei de controlo nestas condições? A resposta é que nem sempre se encontra essa lei para todos os sistemas não lineares. Na verdade, se os sistemas não lineares tiverem uma propriedade estrutural, é sempre possível encontrar a lei de controlo pretendida. Um exemplo de uma classe de sistemas é:

$$\dot{x} = Ax + B\beta^{-1}(x) \left[u - \alpha(x) \right] \tag{3.6}$$

onde A tem dimensão $n \times n$, B tem dimensão $n \times p$, o par (A, B) é controlável, e as funções $\alpha : \Re^n \rightarrow \Re^p$ e $\beta : \Re^n \rightarrow \Re^{p \times p}$. Assume-se que a matriz $\beta(x)$ é não singular.

Se a equação de estado tiver a forma da equação 3.6, então pode-se linearizar a equação de estado através da equação de controlo

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v$$

obtendo o sistema

$$\dot{x} = Ax + Bv$$

Se agora escolhermos um controlo $v = Kx$ de tal maneira que $Re(A + BK) < 0$ garante-se a estabilidade do sistema não linear.

Vamos supor que o sistema não linear não tem a estrutura de 3.6. Será que isto significa que não se pode linearizar o sistema via realimentação? Não é verdade. A representação no espaço de estados não é única. Ela depende da escolha das variáveis de estado. Portanto, se se fizer a

escolha certa das variáveis de estado o sistema pode ficar na forma 3.6.

A vantagem deste método é o facto de se poder usar a teoria linear para dimensionar o controlador caso o sistema seja linearizável.

Estes resultados são baseados no cancelamento exacto dos termos não lineares α e β. Por motivos de natureza prática como o uso de modelos simplificados, incertezas nos parâmetros e erros de cálculo computacional, este cancelamento exacto é quase impossível. Neste caso, a lei de controlo implementada é dada por

$$u = \hat{\alpha}(x) + \hat{\beta}(x)Kx$$

A equação do sistema realimentado vem

$$\dot{x} = Ax + B\beta^{-1}(x)\left[\hat{\alpha}(x) + \hat{\beta}(x)Kx - \alpha(x)\right].$$

Se se somar e subtrair BKx na equação anterior, obtemos

$$\dot{x} = (A + BK)x + B\delta(x) \tag{3.7}$$

onde

$$\delta(x) = \beta^{-1}(x)\left((\hat{\alpha}(x) - \alpha(x)) + \hat{\beta}(x)\right) - Kx$$

pela equação do sistema realimentado 3.7, podemos verificar que o termo de incerteza $\delta(x)$ entra como uma perturbação do sistema realimentado. Como $Re(A+BK) < 0$ espera-se que não haja problemas se o erro $\delta(x)$ for pequeno.

Vamos analisar a estabilidade do sistema realimentado. Seja $P = P^T > 0$ a solução da equação de Lyapunov

$$P(A + BK) + (A + BK)^T P = -Q$$

onde $Q = Q^T > 0$. Suponha-se que na vizinhança do ponto de equilíbrio o termo de erro $\delta(x)$ satisfaz $\|\delta(x)\|_2 < \gamma_1 \|x\|_2 + \gamma_2$ para $\gamma_1 \geq 0$ e $\gamma_2 \geq 0$. Usando uma função de Lyapunov

$$V(x) = -x^T Px$$

como função candidata para o sistema de malha fechada, obtém-se:

$$\begin{aligned}
\dot{V}(x) &= -x^T Qx + 2x^T PB\delta(x) \\
\dot{V}(x) &\leq -\lambda_{\min}(Q)\|x\|_2^2 + 2\|PB\|_2 \gamma_1 \|x\|_2^2 + 2\|PB\|_2 \gamma_2 \|x\|_2^2
\end{aligned}$$

Se $\gamma_1 < \lambda_{\min}(Q)/4\|PB\|$ temos que

$$\dot{V}(x) \leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(Q)\|x\|_2^2 + 2\|PB\|_2 \gamma_2 \|x\|_2^2$$

$$\dot{V}(x) \leq -\frac{1}{4}\lambda_{\min}(Q)\|x\|_2^2, \quad \forall \|x\|_2 > \frac{8\|PB\|_2\gamma_2}{\lambda_{\min}(Q)}$$

o que mostra que as soluções do sistema serão limitadas por um limite proporcional a γ_2. Mais ainda, se $\delta(0) = 0$, pode-se tomar $\gamma_2 = 0$. Nesse caso, a origem será exponencialmente estável se $\gamma_1 < \lambda_{\min}(Q)/4\|PB\|$.

3.4 Métodos Baseados em Técnicas de Lyapunov

3.4.1 Controlador de Lyapunov

A teoria de Lyapunov é usada para estudar a estabilidade de sistemas não lineares, bem como estimar a região de atracção. Contudo, pode ainda ser usada para sintetizar controladores.

Dado um sistema não linear representado em espaço de estados, o dimensionamento de um controlador de Lyapunov envolve dois passos bem definidos:

1- Construir uma função de Lyapunov V para o sistema realimentado
2- Construir um controlador de forma que $\dot{V} < 0$.

Um controlador com estas características garante a estabilidade do sistema realimentado.

Existem vários conceitos de estabilidade: Estabilidade local e global, estabilidade assimptótica e uniforme.

Um ponto de equilíbrio $x^* = 0$ diz-se localmente estável se todas as soluções do sistema partem de uma vizinhança do ponto de equilíbrio e permanecem próximo do mesmo ponto. No caso da estabilidade global, as soluções do sistema podem partir de qualquer ponto do espaço de estados e permanecem sempre próximo do ponto de equilíbrio.

A estabilidade segundo Lyapunov é apresentada na seguinte definição:

Definição 1 *Estabilidade segundo Lyapunov*
O ponto de equilíbrio $x^* = 0$ diz-se estável em $t = t_0$ se para cada $e > 0$ existir uma bola $\delta(t_0, e)$ de forma que

$$\|x(t_0)\| < \delta \Longrightarrow \|x(t)\| < e, \forall t \geq t_0 \tag{3.8}$$

Esta definição de estabilidade não é muito exigente uma vez que não impõem que as trajectórias do sistema tendam assimptoticamente para o ponto de equilíbrio. De notar que a estabilidade é definida no instante t_0. A estabilidade uniforme é um conceito que garante que o ponto de equilíbrio não perde estabilidade. Isto significa que o parâmetro δ não pode depender de t_0 de forma a que a expressão 3.8 se verifique para todo o t_0.

Definição 2 *Estabilidade assimptótica*
O ponto de equilíbrio $x^* = 0$ diz-se assimptoticamente estável em $t = t_0$ se:

- $x^* = 0$ é estável e

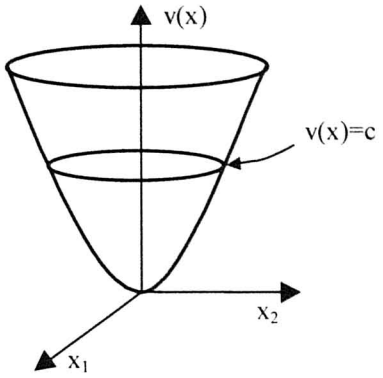


Figura 3.2- Exemplo de uma função de Lyapunov

- $x^* = 0$ é localmente atractiva, isto é, deve existir um bola $\delta(t_0)$ de tal forma que:

$$\|x(t_0)\| < \delta \Longrightarrow \lim_{t\to\infty} x(t) = 0 \tag{3.9}$$

Tal como na definição 1 a estabilidade assimptótica uniforme é definida em t_0. A estabilidade assimptótica uniforme é obtida quando:

- $x^* = 0$ é uniformemente estável e
- $x^* = 0$ é uniformemente localmente atractiva, isto é, deve existir um bola δ independente de t_0 de tal forma que se verifique a expressão 3.9.

A dificuldade desta técnica de controlo baseada em Lyapunov, reside na escolha da função de Lyapunov (passo 1), uma vez que uma boa escolha desta pode determinar se o controlador (passo 2) é bom ou não. Outra forma de dizer isto, é que para uma determinada função de Lyapunov V, o controlador pode dar origem a que $\dot{V}$ não seja negativa em toda a região de interesse. Todas as funções em que $\dot{V} < 0$ são designadas por *funções de controlo de Lyapunov*.

A forma de aquisição destas funções pode ser calculada de forma a optimizar as incertezas do modelo [5]. De qualquer forma, este processo é normalmente complicado, e como tal vai-se partir do pressuposto que existe uma lei de controlo de Lyapunov previamente escolhida e mostrar-se-á a interpretação geométrica deste tipo de controlador.

Na figura 3.2 é apresentado um gráfico de uma possível função de Lyapunov. Esta função tem que atender a um conjunto de requisitos para se poder concluir quanto à estabilidade do sistema. Esses requisitos estão escritos a seguir sob a forma de definições. As conclusões que se podem tirar quanto à estabilidade estão escritas no teorema 3.2.

A ideia deste método, é encontrar uma função de *medição de energia* do sistema de forma a que possa ser estudada a taxa de variação da energia para chegar à estabilidade. Para tornar isto

mais preciso, é necessário definir exactamente o que se entende por *medição de energia.* Para tal, tem-se que apresentar um conjunto de definições e começar por definir uma bola B_e de raio e

$$B_e = \{x \in \Re^n : \|x\| < e\}. \tag{3.10}$$

Definição 3 *Função localmente positiva definida (lpdf)*
Uma função contínua $V : \Re^n \times \Re_+ \rightarrow \Re$ é uma função localmente positiva definida se existir uma função $\alpha : \Re_+ \rightarrow \Re$ não decrescente e contínua tal que,

1- $\alpha(0) = 0, \alpha(p) > 0, \forall p > 0.$
2- $V(0,t) = 0, \forall t \geq 0.$
3- $V(x,t) \geq \alpha(\|x\|), \forall t > 0, \forall x \in B_e.$

Definição 4 *Função positiva definida (pdf)*
Uma função contínua $V : \Re^n \times \Re_+ \rightarrow \Re$ é uma função positiva definida se satisfaz as condições da definição anterior, e adicionalmente $\alpha(p) \rightarrow \infty$ quando $p \rightarrow \infty$.

Definição 5 *Função decrescente*
Uma função contínua $V : \Re^n \times \Re_+ \rightarrow \Re$ é decrescente se para $e > 0$ e para uma função contínua não decrescente, $\beta : \Re_+ \rightarrow \Re$,

$$V(x,t) \leq \beta(\|x\|) \ \forall x \in B_e, \forall t > 0. \tag{3.11}$$

Usando estas definições, o teorema seguinte permite-nos concluir quanto à estabilidade de um sistema apenas pelo estudo da sua função de energia. De forma simples, este teorema diz que quando $V(x,t)$ é localmente positiva definida e $\dot{V}(x,t) \leq 0$, então podemos concluir quanto à estabilidade do ponto de equilíbrio.

Teorema 3.2 *Teorema de Lyapunov*
Seja $V(x,t)$ uma função não negativa com derivada $\dot{V}$ nas trajectórias do sistema.

1- Se $V(x,t)$ é localmente positiva definida e $\dot{V}(x,t) \leq 0$ localmente em x e em todo o t, então a origem do sistema é localmente estável.
2- Se $V(x,t)$ é localmente positiva definida e decrescente e $\dot{V}(x,t) \leq 0$ localmente em x e em todo o t, então a origem do sistema é uniformemente localmente estável.
3- Se $V(x,t)$ é localmente positiva definida e decrescente, e $-\dot{V}(x,t)$ é localmente positiva definida, então a origem do sistema é uniformemente localmente assimptoticamente estável.
4- Se $V(x,t)$ é positiva definida e decrescente, e $-\dot{V}(x,t)$ é positiva definida, então a origem do sistema é globalmente uniformemente assimptoticamente estável.

A tabela 3.1 resume dos resultados do teorema de Lyapunov.

O teorema 3.2 apresenta condições suficientes para a estabilidade do sistema. Não dá qualquer informação de como obter a função $V(x,t)$ e como tal, o processo da sua procura pode ser complicado. Para além disso, sabe-se que num sistema genérico, se existir um ponto de equilíbrio estável, então existe uma função $V(x,t)$ que satisfaz as condições do teorema. De qualquer

	$\mathbf{V(x,t)}$	$-\dot{\mathbf{V}}\mathbf{(x,t)}$	**Conclusões**
1	lpdf	≥ 0 localmente	Estável
2	lpdf, decrescente	≥ 0 localmente	Uniformemente Estável
3	lpdf, decrescente	lpdf	Uniformemente Assimptoticamente Estável
4	pdf, decrescente	pdf	Globalmente Uniformemente Assimptoticamente Estável

Tabela 3.1- Tabela de resultados do teorema de Lyapunov

forma este teorema tem uma aplicação limitada dado o facto de ser complicado gerar funções de Lyapunov computacionalmente.

Na figura 3.3 é apresentado um possível campo vectorial de um sistema não linear bem como as curvas de nível da função de Lyapunov. Este gráfico permite saber qual a trajectória do sistema sabendo apenas a condição inicial do sistema. Essa trajectória pode ser conseguida apenas seguindo as setas em cada ponto do estado.

No caso da dinâmica do sistema ser dada por

$$\dot{x} = f(x,t) \tag{3.12}$$

então para cada estado, o sistema tem apenas uma e uma só direcção a seguir. Porém, se depender também da entrada,

$$\dot{x} = f(x,u,t) \tag{3.13}$$

então em cada estado, o sistema pode seguir várias direcções (ver ponto P da figura 3.3) dependendo da actuação u. A ideia deste controlador é a de escolher a direcção que favorece a convergência para o ponto $x = 0$. Sabendo que o gradiente da função $V(x)$ dá a direcção do maior crescimento da função de energia, então, se calcularmos o produto interno do gradiente da função $V(x)$ com o vector velocidade $f(x,u,t)$ e impusermos que este seja inferior a zero, então garante-se que se escolhe o caminho que aponta mais para o ponto $x = 0$, ou seja, para curvas de nível correspondentes a energias mais baixas.

Normalmente usa-se uma função de Lyapunov que foi calculada para um sistema nominal, ou seja, sem incertezas, e depois usa-se essa função para controlar sistemas com incertezas. Para que se possa garantir que mesmo assim o sistema realimentado é estável, é necessário impor outra condição. Esta condição é chamada na literatura inglesa de "matching condition" e é dada por

$$\nabla V(x) \cdot f(x,t) + \nabla V(x) \cdot \triangle(x,t) \leq 0$$

onde $\triangle(x,t)$ são as contribuições de incertezas do modelo. Esta condição é necessária para garantir que $\dot{V} < 0$ em toda a área de interesse [5].

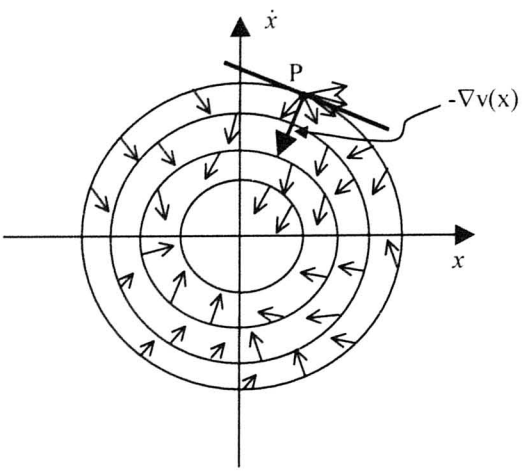


Figura 3.3- Campo vectorial de um sistema não linear

3.4.2 Backstepping

Para colmatar a dificuldade de encontrar uma função de Lyapunov, surgiu o método de backstepping. O método de backstepping é um método recursivo que combina a escolha de uma função de Lyapunov com uma lei de controlo. Neste método, o problema do projecto de um controlador para o sistema completo é partido numa sequência de problemas mais pequenos. Da exploração da flexibilidade extra que existe nos sistemas de ordem reduzida, o método de backstepping consegue resolver muitas vezes o problema de estabilização, seguimento e controlo robusto, sob condições menos restritivas que do que as condições de outros métodos.

Vamos considerar o sistema 3.14

$$\begin{cases} \dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\xi + \delta_\eta(\eta, \xi) \\ \dot{\xi} = f_a(\eta, \xi) + g_a(\eta, \xi)u + \delta_\xi(\eta, \xi) \end{cases} \tag{3.14}$$

sujeito a um domínio $D \subset \Re^{n+1}$. Vamos supor que $g_a(\eta, \xi) \neq 0$, que f, g, fa e ga são funções conhecidas e que δ_η e δ_ξ são funções de termos incertos. Parte-se também do princípio que as funções δ_η e δ_ξ satisfazem as inequações

$$\|\delta_\eta(\eta, \xi)\|_2 \leq \alpha_1 \|\eta\|_2 \tag{3.15}$$

$$|\delta_\xi(\eta, \xi)|_2 \leq \alpha_2 \|\eta\|_2 + \alpha_3 |\xi| \tag{3.16}$$

A inequação 3.15 restringe a classe de incerteza porque restringe o limite superior de $\delta_\eta(\eta, \xi)$ fazendo-o depender apenas em η. Assumindo que a variável de controlo dessa equação é ξ, supõem-se que se consegue encontrar uma realimentação de estado $\phi(\eta)$ que lineariza a primeira

equação do sistema 3.14. Supõem-se ainda que se tem uma função de Lyapunov $V(\eta)$ tal que

$$\frac{\partial V}{\partial \eta}\left[f(\eta)+g(\eta)\phi(\eta)+\delta_\eta(\eta,\xi)\right] \leq -c\left\|\eta\right\|_2^2 \tag{3.17}$$

para todo o $(\eta,\xi) \in D$ e para uma constante c positiva. Esta inequação garante que $\eta = 0$ é um ponto de equilíbrio assimptoticamente estável do sistema realimentado.

Supõe-se ainda que $\phi(\eta)$ satisfaz as inequações

$$\left|\phi(\eta)\right| \leq \alpha_4 \left\|\eta\right\|_2, \qquad \left\|\frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right\|_2 \leq \alpha_5. \tag{3.18}$$

Considere-se a função de Lyapunov

$$V_a(\eta,\xi) = V(\eta) + \frac{1}{2}\left[\xi-\phi(\eta)\right]^2$$

Simplificando a notação, derivada de V_a ao longo das trajectórias de 3.14 vem

$$\begin{aligned}\dot{V}_a &= \frac{\partial V}{\partial \eta}\left[f+g\phi+\delta_\eta\right] + \frac{\partial V}{\partial \eta} g(\xi-\phi) \\ &\quad +(\xi-\phi)\left[f_a+g_a u+\delta_\xi - \frac{\partial \phi}{\partial \eta}(f+g\xi+\delta_\eta)\right]\end{aligned}$$

Se escolhermos a lei de controlo como sendo

$$u = \frac{1}{g_\alpha}\left[\frac{\partial \phi}{\partial \eta}(f+g\xi) - \frac{\partial V}{\partial \eta} g - f_a - k(\xi-\phi)\right], \quad k>0$$

e usando 3.17, obtém-se

$$\dot{V}_a \leq -c\left\|\eta\right\|_2^2 + (\xi-\phi)\left[\delta_\xi - \frac{\partial \phi}{\partial \eta}\delta_\eta\right] - k(\xi-\phi)^2.$$

Usando as restrições 3.15, 3.16 e 3.18, pode ser mostrado que

$$\begin{aligned}\dot{V}_a &\leq -c\left\|\eta\right\|_2^2 + 2\alpha_6\left\|\eta\right\|_2\left|\xi-\phi\right| - (k-\alpha_3)(\xi-\phi)^2 \\ \dot{V}_a &= -\begin{bmatrix}\left\|\eta\right\|_2 \\ \left|\xi-\phi\right|\end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} c & -\alpha_6 \\ -\alpha_6 & (k-\alpha_3)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\left\|\eta\right\|_2 \\ \left|\xi-\phi\right|\end{bmatrix}\end{aligned}$$

para um $\alpha_6 \geq 0$. Escolhendo

$$k > \alpha_3 + \frac{\alpha_6^2}{c}$$

vem

$$\dot{V}_a \leq -\sigma\left[\left\|\eta\right\|_2^2 + \left|\xi-\phi\right|^2\right]$$

Estes resultados podem ainda ser generalizados para sistemas de múltiplas entradas.

O problema principal deste método é gerar, para sistemas complexos, uma complexidade computacional muito grande no cálculo da função de Lyapunov e na correspondente lei de controlo. Esta é a principal razão de não se usar backstepping no controlo de veículos

subaquáticos.

3.4.3 Sliding Modes

Tal como já foi dito antes, a dinâmica de um veículo subaquático apresenta modelos de ordem superior e tem incertezas consideráveis nos parâmetros. As técnicas de controlo linear que são amplamente usadas, não tiram partido dos modelos não lineares que a análise hidrodinâmica dos veículos subaquáticos nos dá. Alguma informação importante da dinâmica do sistema é desprezada quando o sistema é linearizado em torno de um ponto de funcionamento a menos que o estado do sistema se mantenha perto desse ponto.

As técnicas lineares podem trazer estabilidade a sistemas não lineares de ordem superior como por exemplo os veículos subaquáticos, mas é necessário um conjunto de vários controladores lineares para obter boa performance. O uso de um único controlador linear irá provocar uma performance do sistema inconsistente que varia com a velocidade do mesmo. Para melhorar a performance do sistema controlado é necessário usar um conjunto de controladores lineares, cada um deles linearizado em torno de um ponto de funcionamento, e à medida que a velocidade do sistema altera, os controladores são alterados (ver secção anterior). Esta abordagem torna-se um pouco impraticável para um veículo que se pode deslocar em várias direcções, porque não há pontos de funcionamento óbvios em torno dos quais se possa linearizar. Uma solução seria ter um número muito grande de controladores lineares projectados para diferentes combinações de velocidades ao longo de cada eixo.

Idealmente, seria desejável sintetizar uma lei de controlo não linear que usasse o modelo exacto directamente sem recorrer a qualquer tipo de linearização. Isto implicaria que apenas um controlador fosse usado em vez de vários à medida que a velocidade se altera. A metodologia de sliding modes satisfaz estes requisitos [26] [51] [52] [53].

O controlo baseado em sliding modes é um caso particular de sistemas de controlo de estrutura variável (VSCS). Um VSCS é caracterizado por um conjunto de leis de controlo e uma regra de decisão. A regra de decisão chamada de função de comutação, tem como entrada uma medida do comportamento do sistema e disponibiliza à saída o controlador que deverá ser usado nesse instante. Um sistema de estrutura variável pode ser visto como um conjunto de subsistemas onde cada subsistema tem uma estrutura de controlo fixa onde pode ser usada numa determinada região do espaço de estados. Uma das vantagens de introduzir esta complexidade adicional no sistema é a de poder ganhar a possibilidade de combinar propriedades boas de cada estrutura do sistema. Mais ainda, o sistema pode ser projectado de forma a ter propriedades não presentes em cada uma das estruturas.

No controlo baseado em sliding modes, o VSCS é dimensionado de forma a actuar e depois

restringir o estado do sistema de maneira a permanecer dentro de uma vizinhança da zona de comutação. Há duas vantagens principais desta abordagem. Primeiro, o comportamento dinâmico do sistema pode ser adaptado pela escolha de uma função de comutação. Em segundo lugar, a resposta do sistema realimentado fica totalmente insensível a uma determinada classe de incertezas. A propriedade de invariância torna claramente esta metodologia uma forte candidata para controlo robusto. Adicionalmente, esta capacidade de projectar directamente o desempenho do sistema, torna o controlo baseado em sliding modes atractivo do ponto de vista de projecto.

O controlo baseado em sliding modes envolve dois passos. No primeiro dimensiona-se a função de comutação de tal maneira que satisfaça as especificações de projecto. O segundo está relacionado com a selecção de uma lei de controlo que torne a função de comutação atractiva para o estado do sistema.

Basicamente a ideia é transformar o problema de estabilização do sistema de ordem n num problema de estabilização de um processo de primeira ordem.

Considerando o sistema de ordem n

$$X^{(n)} = f(X) + b(X)u \tag{3.19}$$

onde $X = [x, \dot{x}, ..., x^{(n-1)}]^T$ é o estado do sistema e u é o controlo a aplicar ao mesmo. A função $f(X)$ da equação 3.19 (é normalmente uma função não linear) não é conhecida exactamente, mas essa imprecisão é limitada superiormente por uma função contínua de X, $F(X)$. Da mesma forma, o ganho de controlo $b(X)$ também é desconhecido mas da mesma forma é limitado superiormente por uma função contínua de X. O problema de controlo é arranjar uma trajectória para X de forma a levar o sistema para o estado desejado $X_d = [x_d, \dot{x}_d, ..., x_d^{(n-1)}]^T$ mesmo na presença das imprecisões de modelo.

Seja $\tilde{x}$ o vector do erro de seguimento da variável X

$$\tilde{x} = x - x_d = [\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, ..., x^{(n-1)}]^T.$$

O erro generalizado, s, é definido como uma função linear das coordenadas do vector de erro, $\tilde{x}$,

$$s(X,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \tag{3.20}$$

onde λ é uma constante positiva que será interpretada mais à frente. A superfície $s(t) = 0$ é designada de superfície de deslizamento no espaço de estados $\Re^n$. No caso de $n = 2$ a superfície vem

$$s = \tilde{x} + \lambda\tilde{x}. \tag{3.21}$$

Esta dinâmica tem uma característica de passa-baixo. O perfeito seguimento é conseguido quando se mantém o sistema a deslizar ao longo da superfície de deslizamento $s(t) = 0$. De notar

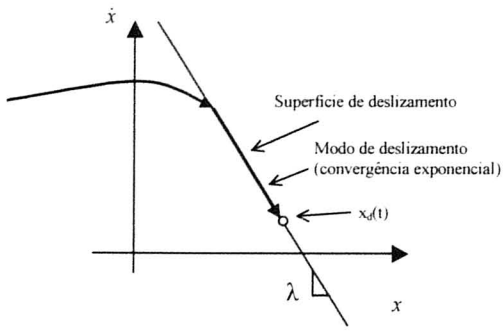


Figura 3.4- Representação da superfície de deslizamento (n=2)

que isto não significa que todos os elementos de X sejam 0 para t>0, mas sim que a dinâmica de 3.20 é conseguida. Isto significa que $\tilde{X} \rightarrow 0$ se o estado do sistema está na superfície de deslizamento. No caso da equação 3.21, a superfície de deslizamento corresponde a uma linha que passa num ponto $(x_d, \dot{x}_d)$ e tem declive $-\lambda$. A figura 3.4 apresenta o movimento da superfície de deslizamento, bem como a verificação da condição de deslizamento durante a realização da trajectória desejada. O estado do sistema $(x, \dot{x})$ não segue perfeitamente $(x_d, \dot{x}_d)$ mas mantém-se na linha $s = 0$. Isto significa que a dinâmica da malha fechada é

$$\dot{\tilde{x}} + \lambda \tilde{x} = 0 \tag{3.22}$$

e consequentemente o erro de seguimento tende para 0 com uma constante de tempo de $1/\lambda$ mediante a expressão

$$\tilde{x}(t) = \tilde{x}(0) e^{-\lambda t}.$$

Uma coisa importante a ter em consideração é que a evolução da superfície de deslizamento é determinada pela equação $s(t) = 0$ e não pela expressão associada ao modelo. Isto implica que todo o processo de controlo seja invariante em relação às variações dos parâmetros do modelo.

Pode-se demonstrar que o sistema é estável se s convergir para 0. A convergência de $\tilde{X}$ aparece directo da convergência de s. A convergência de s pode ser assegurada se se escolher uma lei de controlo que garanta a verificação da condição de deslizamento [44]

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt} s^2(X, t) \leq -\eta |s| \tag{3.23}$$

onde η é uma constante positiva que está relacionada como o tempo de que demora o estado do sistema a atingir a superfície de deslizamento. Este critério de estabilidade aparece da teoria de Lyapunov e do trabalho de Filipov, e está associada à função de Lyapunov $s^2(t)$.

Para um dado modelo com incertezas nos parâmetros, uma superfície de deslizamento e um critério de estabilidade pode-se obter uma lei de controlo adequada. Essa lei de controlo tem

duas componentes. A primeira compensa directamente as partes conhecidas do modelo. Esta componente a que se dá o nome de controlo equivalente u_{eq} e é calculada a partir da resolução da equação 3.22. De seguida apresenta-se um exemplo demonstrativo desta temática.

Exemplo 3.1 *Para o sistema*

$$\ddot{x} + a(t)\dot{x}^2 \cos(3x) = u, \quad 1 \leq a(t) \leq 2$$

calcular o controlo equivalente.

Colocando o sistema na forma

$$\ddot{x} = f + u$$

obtém-se que:

$$f = -a(t)\dot{x}^2 \cos(3x).$$

Mas como os parâmetros do modelo não são completamente conhecidos, existe um estimativa do modelo que pode ser por exemplo

$$\hat{f} = -1.5\dot{x}^2 \cos(3x)$$

o que leva a que

$$F = 0.5\dot{x}^2 \cos(3x)$$

já que

$$\left|\hat{f} - f\right| \leq F.$$

Para que o sistema siga a referência desejada, define-se uma superfície de deslizamento $s(t)$

$$s = \tilde{x} + \lambda\tilde{x}.$$

Derivando s *obtemos*

$$\dot{s} = \ddot{x} - \ddot{x}_d + \lambda\,\tilde{x} = f + u - \ddot{x}_d + \lambda\,\tilde{x}\ .$$

Isto significa então que o controlo equivalente vem

$$\hat{u}_{eq} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - \lambda\,\tilde{x}\ .$$

De notar que esta componente de controlo é uma estimativa já que o os parâmetros da mesma são estimados.

Para satisfazer a condição de deslizamento mesmo com incertezas do modelo, acrescenta-se um termo descontínuo na superfície $s = 0$ da forma

$$u = \hat{u}_{eq} - K\,\mathrm{sgn}(s) \tag{3.24}$$

onde

$$\mathrm{sgn}(s) = \begin{cases} +1 & \text{se } s > 0 \\ -1 & \text{se } s < 0 \end{cases}.$$

Pode-se então dizer que a lei de controlo é composta por duas componentes: uma de compensação e uma descontínua.

$$u = u_c + u_d$$

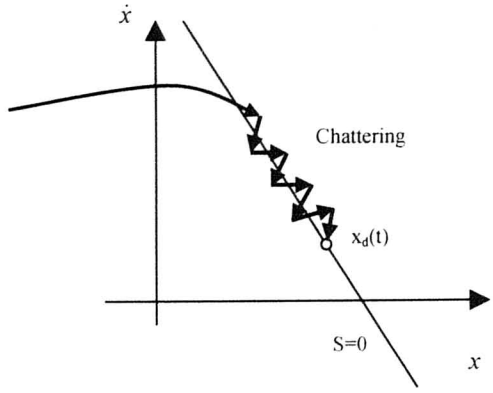


Figura 3.5- Aparecimento do efeito de "Chattering"

$$u_c = u_{eq} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - \lambda\,\dot{\tilde{x}}$$
$$u_d = -K\,\mathrm{sgn}(s)$$

A parte descontínua da lei de controlo é comum no controlo robusto e reflecte a imprecisão do modelo do processo. O controlo em modo de deslizamento é conhecido como um controlo em estrutura variável. Isto significa que a lei de controlo aplicada varia de acordo com os valores do erro generalizado.

O valor de K é calculado a partir dos limites máximos de incerteza dos parâmetros do sistema F e é dado por

$$K = F + \eta$$

e η é dado pela condição de deslizamento 3.23. Ainda na sequência do exemplo anterior,

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}s^2 = \dot{s}s = (f - \hat{f} - K\,\mathrm{sgn}(s))s = (f - \hat{f})s - K\,|s| \leq -\eta\,|s|\,.$$

Uma vez que a implementação prática das comutações da lei de controlo 3.24 não é instantânea, surge um problema que é designado por "chattering". Este efeito que se apresenta na figura 3.5 e aparece devido a atrasos na actuação. O aparecimento deste efeito é bastante indesejado na maioria dos sistemas. Em geral o "chattering" deve ser eliminado para o controlador poder funcionar convenientemente. Este problema pode ser resolvido ou pelo menos atenuado através da suavização da lei de controlo na zona de transição (boundary layer) que existe em torno da superfície deslizamento. Como definição da zona de transição, temos

$$B(t) = \{x, |s(x,t)| \leq \Phi\} \qquad \Phi \geq 0$$

onde Φ representa a espessura da zona de transição e $\varepsilon = \Phi/\lambda^{n-1}$ é a sua largura. A figura 3.6 mostra a zona de transição que envolve a superfície de deslizamento. Fora desta zona, é definida uma lei de controlo que garante que a zona de transição é atractiva. As trajectórias que partem do

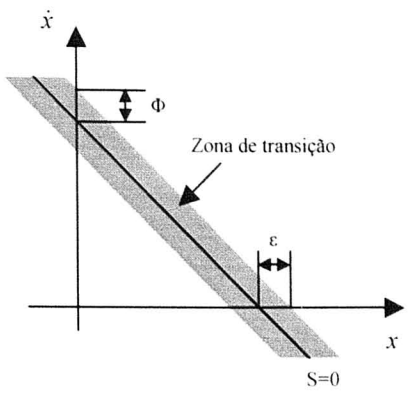


Figura 3.6- A zona de transição ($n = 2$)

interior de $B(t)$ permanecem no seu interior para todo o $t \geq 0$.

Tal como já foi dito antes, a lei de controlo em modo de deslizamento garante a invariância em relação aos parâmetros. Contudo, exige do actuador uma elevada frequência de actuação. A introdução da zona de transição permite evitar esta desvantagem. A introdução da zona de transição é equivalente à substituição da função $\mathrm{sgn}(s)$ por uma função de saturação $\mathrm{sat}(s/\Phi)$.

$$\mathrm{sat}(s/\Phi) = \begin{cases} \mathrm{sgn}(\frac{s}{\Phi}) & \text{se } \left|\frac{s}{\Phi}\right| \geq 1 \\ \frac{s}{\Phi} & \text{se } \left|\frac{s}{\Phi}\right| < 1 \end{cases}$$

A figura 3.7 mostra o gráfico dessa função. Esta função pode ser vista como uma interpolação da lei de controlo na zona de transição. A função de saturação é igual à função de sinal fora da zona de transição e é uma função linear dentro dessa zona. A largura ε caracteriza o erro associado à aproximação suave do termo descontínuo da lei de controlo em modo de deslizamento pela função de saturação.

Em vez de termos uma lei de controlo descontínua, obtemos uma outra com um comportamento mais suave.

$$u_c = u_{eq} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - \lambda\,\tilde{x} - K(\frac{s}{\Phi})$$

O parâmetro λ, que determina o declive da recta de deslizamento é extremamente importante quando o modelo usado apenas aproxima a dinâmica do sistema. λ representa a frequência mais baixa da parte não modelizada da dinâmica do sistema. Quanto maior for λ melhor, mas há certos limites que devem ser observados [44].

Em resumo, são necessárias duas fases para o projecto de um controlador de sliding modes. A primeira fase passa por construir uma superfície de comutação $\sigma(x,t) = 0$ tal que o

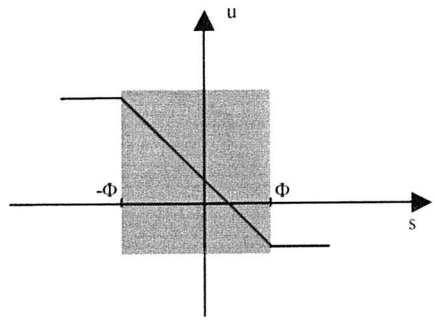


Figura 3.7- Interpolação do controlo na camada fronteira

sistema restringido a essa superfície tenha o comportamento desejado em termos de estabilidade, regulação, seguimento, etc. Na segunda, o objectivo é projectar um controlador comutado $u(x,t)$ de forma que os vectores tangentes à trajectória do sistema $x(t)$ apontem para a superfície. Esta segunda parte é conseguida definindo uma função de Lyapunov $V(t,x,\sigma)$. Diferenciando esta função de maneira a que a variável de controlo se torne explícita, e se forçar esta derivada a ser negativa ajustando os ganhos do controlador, obtém-se então o controlador esperado. A escolha da função de Lyapunov determina a estrutura de controlo que poderá ser utilizada.

Outros autores como o Slotine e o Fossen utilizam múltiplas superfícies de controlo (MSS) em veículos subaquáticos. Esta metodologia foi refinada em [23] e [24] para evitar a diferenciação do modelo usando um banco de filtros de primeira ordem. Este controlador foi testado numa plataforma móvel (MOB - Mobile Offshore Base) e deu muito bons resultados no posicionamento de múltiplos módulos em relação aos outros.

No capítulo 5 será feita uma simulação com este controlador e serão apresentados os respectivos resultados.

Capítulo 4
Modelização de Veículos Subaquáticos

4.1 Introdução

O objectivo deste capítulo é o de sintetizar as equações do modelo de um veículo aquático genérico. No entanto, incidirei nos veículos subaquáticos estudando as possíveis simplificações. Darei ainda algumas noções de cada parâmetro dessas equações, bem como algumas indicações de como obter esses mesmos parâmetros.

Para tal começarei por dar uma introdução da notação e dos sistemas de coordenadas na secção 4.2. Nas secções seguintes, darei uma explicação de cada uma das matrizes que compõem o modelo do corpo rígido bem como algumas explicações de como os obter.

Seguidamente será abordado o modelo do sistema de propulsão. Este modelo é composto por duas partes: o motor DC e a hélice. É então feita uma simulação em MATLAB que agrega todas as partes do modelo do veículo. São feitas algumas simulações que são comparadas com dados reais que permitem validar o modelo.

Também, é dada uma ideia das perturbações a que um veículo subaquático pode estar sujeito. O capítulo encerra com algumas conclusões.

4.2 Notação e Sistemas de Coordenadas

4.2.1 Nomenclatura

Para poder determinar a posição e orientação de um veículo subaquático, são necessárias 6 coordenadas independentes. Essas coordenadas estão listadas na tabela 4.1 segundo a nomenclatura adoptada pela SNAME[4].

As três primeiras coordenadas e as suas derivadas correspondem à posição e ao movimento de translação segundo x, y e z, enquanto que as três últimas e suas derivadas, descrevem a orientação e o movimento de rotação em torno desses eixos. Na última coluna estão ainda representadas as forças e momentos em todos os graus de liberdade que podem actuar num veículo.

[4] SNAME - Society of Naval Architects and Marine Engineers

Graus de Liberdade	Tipo de Movimento	Posição e ângulo	Vel. Linear e angular	Forças e momentos
1	Movimento segundo x (Surge)	x	u	X
2	Movimento segundo y (sway)	y	v	Y
3	Movimento segundo z (heave)	z	w	Z
4	Rotação segundo x (roll)	ϕ	p	K
5	Rotação segundo y (pitch)	θ	q	M
6	Rotação segundo z (yaw)	ψ	r	N

Tabela 4.1- Lista de coordenadas de um sistema de 6 graus de liberdade

4.2.2 Sistemas de Coordenadas

No estudo do movimento de AUVs é conveniente definir dois sistemas de coordenadas diferentes. O referencial do veículo (Body-Fixed) que está solidário com o veículo. A origem deste referencial é normalmente escolhida a coincidir com o centro de gravidade do veículo ou outro ponto de interesse. Tipicamente os eixos deste referencial são (ver figura 4.1):

- x0 - Eixo longitudinal (aponta para a frente)
- y0 - Eixo transversal (aponta para o lado direito)
- z0 - Eixo normal (aponta para baixo)

O movimento do referencial do veículo (Body-Fixed) é descrito em relação a um referencial inercial (Earth-Fixed). Para veículos aquáticos em geral, é normal considerar que as acelerações de um ponto à superfície da terra podem ser desprezáveis o que implica que o movimento da terra não afecta o movimento dos veículos aquáticos de baixa velocidade. Como tal, o referencial da terra pode ser considerado inercial. Esta análise, sugere que a posição e orientação do veículo seja descrita em relação ao referencial inercial enquanto que as velocidades linear e angular sejam referenciadas ao referencial do veículo. Existem ainda algumas questões de natureza prática que estão relacionadas com o uso destes referenciais. Estas prendem-se com o facto dos sensores de navegação que estão normalmente instalados num veículo, fornecerem medidas em relação ao próprio veículo.

O movimento geral de um veículo num sistema de 6 graus de liberdade pode ser descrito pelos seguintes vectores:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

onde:

- η é o vector posição (η_1) e orientação(η_2) no referencial inercial
- v o vector velocidade linear (v_1) e angular (v_2) no referencial do veículo e
- τ o vector das forças (τ_1) e momentos (τ_2) aplicados ao veículo no referencial do veículo.

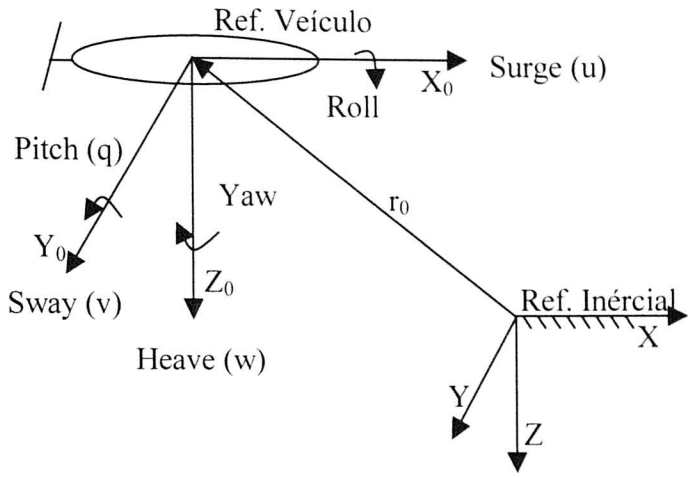


Figura 4.1- Referenciais inercial e móvel

4.2.3 Ângulos de Euler

A trajectória de um veículo em relação ao referencial inercial é dada por uma transformação de velocidade

$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v \tag{4.2}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

com

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

$$J_1^{-1}(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\theta & -s\theta \\ c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\phi c\theta \\ c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\theta & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

$$J_2^{-1}(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & c\theta s\phi \\ 0 & -s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}. \tag{4.7}$$

onde $s\cdot = \sin(\cdot)$, $c\cdot = \cos(\cdot)$ e $t\cdot = \tan(\cdot)$

$J(\eta_2)$ é a matriz de transformação que está relacionada através das funções dos ângulos de Euler: "roll" (ϕ) "pitch" (θ) e "yaw" (ψ). Notar que $\dot{\eta}$ está expressa no referencial inercial enquanto que v_1 está no referencial do veículo. Esta transformação não é mais do que uma transformação de coordenadas entre os referenciais do veículo e inercial.

Exemplo 4.1 *Tendo em consideração as matrizes de rotação em torno dos eixos principais de um referencial são*

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

qual é a matriz de mudança de coordenadas do referencial do veículo para o inercial?

Para resolver este problema usa-se a composição de três matrizes de rotação. Assim, o referencial inercial, depois de transferido para a origem do referencial do veículo e depois de ter rodado sobre z, sobre y e sobre x, dá origem ao referencial do veículo. Esta sequência de rotações pode ser escrita da seguinte maneira:

$$J_1(\eta_2) = R_z^T R_y^T R_x^T. \tag{4.8}$$

Se este cálculo for feito encontramos exactamente a matriz 4.4.

Como estas matrizes de rotação pertencem a $SO(3)$[5], pode-se dizer que

$$J_1^{-1}(\eta_2) = R_x R_y R_z$$

o que dá origem à matriz 4.5.

Nota: Como $J_2(\eta_2)$ tem uma singularidade em $\theta = \pm 90^o$, já não se pode afirmar que $J_2^{-1}(\eta_2) = J_2^T(\eta_2)$. Essa singularidade pode ser resolvida usando quaterniões [16]. Quaterniões é outra forma de representar a cinemática em que o problema das singularidades não se põem. Os quaterniões não vão ser estudados neste trabalho uma vez que o ROV nunca chega a valores de $\theta = \pm 90^o$ já que a actuação do veículo não permite que o veículo se incline para a frente 90^o.

4.3 Equação Geral do Movimento

A equação da dinâmica de um corpo rígido é obtida através das leis de Newton [17], e em coordenadas no referencial do veículo vem:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \tag{4.9}$$

$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v \tag{4.10}$$

em que:

[5] $SO(3)$ é o espaço das matrizes skew-symmetric em que $R = R^T$ (ver [17])

- M é a matriz de inércia total do sistema
- $C(v)$ é a matriz de coriólis e centripta
- $D(v)$ é a matriz de amortecimento hidrodinâmico
- $g(\eta)$ são as forças e momentos de restabelecimento
- τ são as forças e momentos aplicados ao sistema.

Esta equação foi derivada a partir das leis de newton nomeadamente usando os dois axiomas de Euler.

$$\begin{array}{cc} \text{(translacção)} & \dot{p} = F = m\dot{v} \\ \text{(Rotação)} & \dot{h} = M = I\dot{w} \end{array}$$

Estes axiomas dizem que a 2^alei de Newton pode ser expressa em termos dos momentos linear e angular. Nestas expressões, as forças (F) e os momentos (M) estão referidos ao centro de massa do veículo.

Outra forma alternativa para encontrar a equação da dinâmica do sistema é usar o formalismo de Lagrange. Este formalismo descreve o sistema à custa da contabilização das energias cinética e potencial. Portanto o primeiro passo é calcular uma expressão para as energias cinética T e potencial V. Depois calcula-se a Lagrangeana L de acordo com

$$L = T - V.$$

Por fim, aplica-se a equação de Lagrange

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \eta} = J^{-T}(\eta)\tau$$

que dá origem a seis equações diferenciais que correspondem justamente à dinâmica do sistema. A aplicação da equação de Lagrange a essas energias é válida em qualquer referencial desde que sejam usadas coordenadas generalizadas. As coordenadas generalizadas para um veículo movendo-se em 6 graus de liberdade são

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T .$$

A explicação de cada uma das matrizes que compõem o modelo vem exposta nas secções seguintes.

4.4 Matrizes Constituintes do Modelo

Como se pode ver pela equação 4.9, são três as matrizes constituintes do modelo. A matriz de inércia M, a matriz das forças de Coriólis e centripta $C(v)$ e a matriz de amortecimento hidrodinâmico $D(v)$. Cada uma destas matrizes é explicada de seguida.

4.4.1 Matriz de Inércia

A matriz de inércia total, enquadra duas contribuições distintas:

$$M = M_{RB} + M_A \tag{4.11}$$

- M_{RB} é a matriz de inércia do corpo rígido
- M_A é a matriz da massa acrescentada

A matriz M_{RB} entra com a massa e os momentos de inércia do corpo rígido, enquanto que a matriz M_A contabiliza o deslocamento de água durante o movimento.

As equações do movimento podem ser simplificadas se a origem do referencial for coincidente com o centro de massa do veículo. Isto implica que o tensor de inércia[6] I é diagonal. Se este não for o caso, é sempre possível rodar o sistema de coordenadas no referencial do veículo de forma a conseguir obter um tensor de inércia diagonal. A desvantagem desta solução, é que o novo sistema de coordenadas difere dos eixos longitudinal, lateral e normal do veículo.

É importante ainda falar do conceito de massa acrescentada. É usual este conceito ser entendido como sendo uma quantidade de água ligada ao veículo de forma a que o conjunto veículo e água formam um sistema com massa superior. Isto não é verdade uma vez que o movimento do veículo vai forçar todo o fluído a oscilar com diferentes amplitudes em todas as partículas. A massa acrescentada deve ser vista como forças e momentos devido à pressão induzida no veículo devido ao movimento harmónico do corpo que é proporcional à aceleração do corpo. Consequentemente a força da massa acrescentada tem uma fase de 180^oem relação ao movimento harmónico do corpo.

Na sua forma mais geral,

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

e

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

[6] Será explicado mais à frente

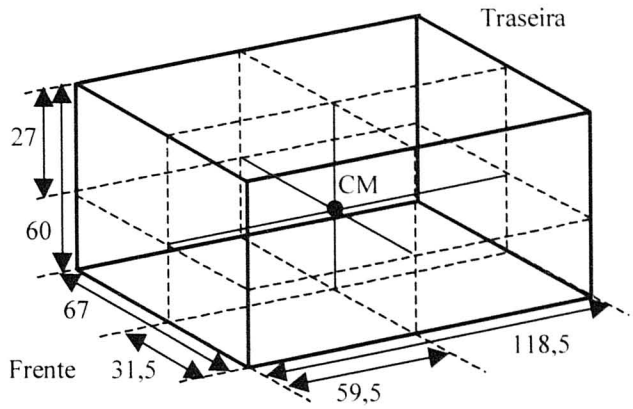


Figura 4.2- Medidas do centro de massa do ROV (em cm)

o que resulta:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{v}} & -X_{\dot{w}} & -X_{\dot{p}} & mz_G - X_{\dot{q}} & -my_G - X_{\dot{r}} \\ -Y_{\dot{u}} & m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{w}} & -mz_G - Y_{\dot{p}} & -Y_{\dot{q}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ -Z_{\dot{u}} & -Z_{\dot{v}} & m - Z_{\dot{w}} & my_G - Z_{\dot{p}} & -mx_G - Z_{\dot{q}} & -Z_{\dot{r}} \\ -K_{\dot{u}} & -mz_G - K_{\dot{v}} & my_G - K_{\dot{w}} & I_{xx} - K_{\dot{p}} & -I_{xy} - K_{\dot{q}} & -I_{xz} - K_{\dot{r}} \\ mz_G - M_{\dot{u}} & -M_{\dot{v}} & -mx_G - M_{\dot{w}} & -I_{xy} - M_{\dot{p}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & -I_{yz} - M_{\dot{r}} \\ -my_G - N_{\dot{u}} & mx_G - N_{\dot{v}} & -N_{\dot{w}} & -I_{xz} - N_{\dot{p}} & -I_{yz} - N_{\dot{q}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}. \tag{4.14}$$

Para calcular a matriz M_{RB} é necessário calcular ou medir todos os seu parâmetros constituintes. Assim, a massa m do veículo é fácil de encontrar porque basta medi-la com uma balança.

O centro de massa poderia ser calculado através da expressão vectorial,

$$r_G = \frac{1}{m} \int_V r \rho_A dV \tag{4.15}$$

mas na prática, é mais fácil fazer alguns testes práticos para obter as distâncias do centro geométrico ao centro de massa. Uma possível forma de o fazer seria equilibrar o veículo em cima de uma vara de forma a que não caísse para nenhum dos lados. Quando esse equilíbrio fosse conseguido, a distância entre essa linha e o centro geométrico do veículo, teríamos a distância do centro de massa nessa direcção. Depois ter-se-ia que repetir o experimento para as três direcções do espaço.

Fazendo algumas experiências práticas, encontrou-se os valores apresentados na figura 4.2.

O tensor de inércia I é dado pelos seguintes parâmetros:

$$\mathrm{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

onde:

$$I_{xx} = \int_V \rho(r)(y^2 + z^2)dxdydz \tag{4.17}$$

$$I_{xy} = -\int_V \rho(r)(xy)dxdydz. \tag{4.18}$$

O tensor de Inércia é o equivalente à massa no caso do movimento unidimensional. No caso tridimensional, a oposição ao movimento de rotação aparece em várias direcções. Basicamente aparece uma inércia de oposição à rotação em torno do eixo dos x que é I_{xx}, do eixo dos y que é I_{yy} e do eixo dos z que é I_{zz}. Para além disso, existem ainda os produtos de inércia $I_{i,j}$ com $i \neq j$ que são os momentos de inércia do corpo rodar em torno de combinações lineares dos eixos (i, j).

Para calcular todos os parâmetros do tensor de inércia seria necessário considerar que o veículo era composto por um conjunto de sólidos conhecidos com densidade também conhecida para proceder ao cálculo dos parâmetros nas equações 4.17 e 4.18.

A forma de cálculo dos termos da matriz M_A assenta no facto de se assumir que os mesmos são constantes com a frequência das ondas e é baseado no cálculo da energia cinética dos fluídos uma vez que qualquer movimento do veículo provoca o movimento do fluído. Quando o veículo se move para a frente, o fluído tem que se deslocar da frente para trás. Como tal, a passagem de fluído, tem energia cinética que não existiria se o veículo não estivesse em movimento.

Em geral, o movimento de veículos subaquáticos movendo-se em 6 graus de liberdade a alta velocidade é altamente não linear e acoplado. Mesmo assim, nas aplicações com ROVs, a velocidade de operação é muito baixa e, se ainda o veículo tiver três planos de simetria, então podem ser desprezados os elementos fora da diagonal principal da matriz M_A.

A estrutura da diagonal principal é muito atractiva porque os elementos fora dela são muito difíceis de obter, quer teoricamente quer na prática. A prática revela que o uso da diagonal dá bons resultados na maioria das aplicações.

As expressões que permitem obter os coeficientes hidrodinâmicos diagonais de massa acrescentada da matriz M_A são:

$$-X_{\dot{u}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{11}(y, z)dx \cong 0.10m \tag{4.19}$$

$$-Y_{\dot{v}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{22}(y, z)dx \tag{4.20}$$

$$-Z_{\dot{w}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{33}(y, z)dx \tag{4.21}$$

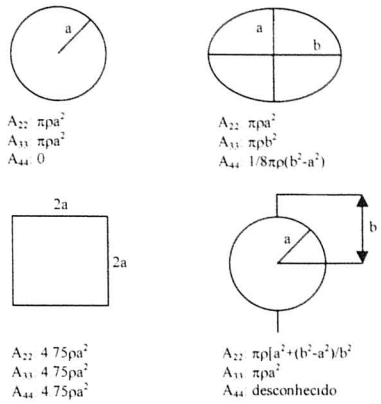


Figura 4.3- Coeficientes de massa acrescentada para formas geométricas a duas dimensões

$$-K_{\dot{p}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{44}(y,z)dx \tag{4.22}$$

$$-M_{\dot{q}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{55}(y,z)dx \tag{4.23}$$

$$-N_{\dot{r}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{66}(x,y)dx. \tag{4.24}$$

onde A_{22}, A_{33} e A_{44} dependem da secção transversal do veículo e são normalmente aproximadas por valores similares aos da figura 4.3. Não existem indicações de como calcular $M_{\dot{q}}$ e $N_{\dot{r}}$. O cálculo destes coeficientes hidrodinâmicos relacionados com a massa acrescentada podem ser encontradas em [29].

4.4.2 Matriz de Coriólis e Centripta

Esta matriz, como o próprio nome indica, entra no modelo com termos relacionados com as forças de coriólis e centripta.

Analogamente à matriz de inércia, também a matriz $C(v)$ tem duas componentes:

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \tag{4.25}$$

- $C_{RB}(v)$ é a matriz das forças de coriólis e centripta relacionada com o movimento da massa do veículo
- $C_A(v)$ é uma matriz idêntica à anterior mas relativa à massa acrescentada.

Genericamente,

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_G q + Z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_{Gq}) \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p - I & I_{yz}r + I_{xy}p - I_{yy}q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_{zz}r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q - I_{xx}p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p - I_{yy}q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_{xx}p & 0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

e

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

com

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a_2 &= X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 &= X_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 &= X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b_2 &= X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w + K_{\dot{q}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b_3 &= X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w + K_{\dot{r}}p + M_{\dot{r}}q + N_{\dot{r}}r. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Também neste caso, é possível proceder a algumas simplificações se o veículo tiver três planos de simetria, resultando assim a seguinte matriz:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Tanto a matriz $C_{RB}(v)$ como $C_A(v)$ dependem parâmetros que foram previamente calculados anteriormente aquando do cálculo da matriz M_{RB} inércia. Portanto, todos os dados necessários estão já disponíveis.

4.4.3 Matriz de Amortecimento Hidrodinâmico

Em geral, o amortecimento de veículos subaquáticos em 6 graus de liberdade, são extremamente não lineares e acoplados. Todavia, se considerarmos que o sistema é desacoplado, ou seja, que tem três planos de simetria e que os termos quadráticos e de ordem superior são desprezáveis, podemos obter uma aproximação. Esta aproximação pode ser interessante se o veículo se deslocar a baixa velocidade. Isto sugere uma matriz $D(v)$ diagonal com apenas termos de amortecimento linear e quadrático. A matriz $D(v)$ vem,

$$\begin{aligned} D(v) \;=\; & -diag\left[X_{u|u|}\,|u| + X_u,\; Y_{v|v|}\,|v| + Y_v,\; Z_{w|w|}\,|w| + Z_w,\right. \\ & \left. K_{p|p|}\,|p| + K_p,\; M_{q|q|}\,|q| + M_q,\; N_{r|r|}\,|r| + N_r\right]. \end{aligned} \tag{4.30}$$

O amortecimento hidrodinâmico tem várias contribuições entre as quais se destacam:

- O amortecimento potencial (potencial damping) devido às oscilações da ondulação nos veículos

Quando um corpo é forçado a oscilar com a frequência das ondas dará origem a forças e momentos de massa acrescentada, amortecimento e de restabelecimento. Contudo, a contribuição dos termos de amortecimento potencial comparados com outros termos dissipativos, como o amortecimento viscoso, são desprezáveis quando se opera a profundidades elevadas. Ou seja, se estivéssemos a falar de embarcações, o amortecimento potencial seria importante. No caso dos veículos subaquáticos este efeito pode ser desprezado.

- A fricção devido aos fluxos laminares

A componente linear da fricção devido aos fluxos laminares é importante quando se considera o movimento de baixa frequência de um veículo. Por isso, este movimento deve ser considerado quando se dimensiona um sistema de controlo. Para além da fricção linear existe também uma contribuição de alta frequência devido ao fluxo turbulento. Esta contribuição é normalmente designada por fricção quadrática ou não linear.

- O amortecimento devido ao movimento das ondas (wave drift damping)

O amortecimento devido ao movimento das ondas pode ser interpretado como a resistência acrescentada das embarcações que avançam sobre as ondas. Este tipo de amortecimento é derivado da teoria das ondas de 2^aordem. Este amortecimento é a maior contribuição para o amortecimento total na direcção de 'surge'. Isto acontece devido ao facto das forças do movimento das ondas serem proporcionais ao quadrado da altura das ondas. No caso dos veículos subaquáticos, esta componente não tem muita influência.

- O amortecimento devido aos turbilhões (vortex shedding)

O paradoxo de Alambert diz que nenhuma força hidrodinâmica actua num corpo rígido que se

move com velocidade constante num fluído não viscoso e completamente submerso. Num fluído viscoso, aparecem forças de fricção adicionais, e tal sistema não é conservativo. As forças de amortecimento viscoso devido a turbilhões pode ser modelizada através de

$$f(U) = -\frac{1}{2}\rho C_D(Rn) A \left|v\right| v \tag{4.31}$$

onde:

- v é a velocidade do veículo,
- A é a secção transversal do veículo
- ρ é a densidade da água.
- $C_D(Rn)$ é o coeficiente de drag e depende do número de Reynolds, que é dado por,

$$Rn = \frac{vD}{v} \tag{4.32}$$

em que:

- D é o comprimento característico do corpo e
- v é o coeficiente de viscosidade cinemático ($v = 1.56e-6$ para água salgada a 5^{o}C com salinidade 3.5%)

A obtenção do coeficiente de drag $C_D(Rn)$ faz-se por intermédio de um gráfico apresentado na pag 44 da referência [17]. Esse gráfico relaciona o coeficiente de drag com o número de Reynolds. A equação 4.31 é chamada de força de drag O drag quadrático em 6 graus de liberdade, é expresso da seguinte forma:

$$D_M(v)v = \begin{bmatrix} \left|v\right|^T D_1 v \\ \left|v\right|^T D_2 v \\ \left|v\right|^T D_3 v \\ \left|v\right|^T D_4 v \\ \left|v\right|^T D_5 v \\ \left|v\right|^T D_6 v \end{bmatrix}. \tag{4.33}$$

D_i ($i = 1..6$) são matrizes de 6×6 que dependem de ρ, C_D e A. Notar que C_D e A serão diferentes para diferentes elementos da matriz.

4.5 Forças e Momentos de Restabelecimento

4.5.1 O Vector $g(\eta)$

Na terminologia hidrodinâmica as forças gravitacional e de flutuação, são chamadas de forças de restabelecimento. A força gravitacional f_G actua no centro de massa (CG) do veículo $r_G = [x_G, y_G, z_G]$. Da mesma forma, a força de flutuação f_B actua no centro de flutuação (CB) do sistema $r_B = [x_B, y_B, z_B]$. A figura 4.4 mostra as forças envolvidas.

As forças de restabelecimento em coordenadas no referencial do veículo representadas com

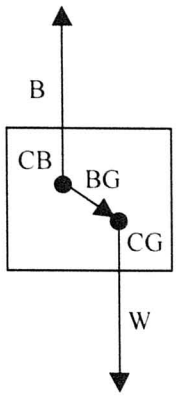


Figura 4.4- Forças de Restabelecimento

ângulos de Euler são:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W-B)s\theta \\ -(W-B)c\theta s\phi \\ -(W-B)c\theta c\phi \\ -(y_G W - y_B B)c\theta c\phi + (z_G W - z_B B)c\theta s\phi \\ (z_G W - z_B B)s\theta + -(x_G W - x_B B)c\theta c\phi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta s\phi - (y_G W - y_B B)s\theta \end{bmatrix}, \tag{4.34}$$

mas se o veículo for neutro, $(W = B)$ a expressão anterior vem simplificada:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -BG_y W c\theta c\phi + BG_z W c\theta s\phi \\ BG_z W s\theta + BG_x W c\theta c\phi \\ -BG_x W c\theta s\phi - BG_y W s\theta \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

onde BG é o vector entre o centro de gravidade CG e o centro de flutuação CB.

Mais uma vez é necessário calcular ou medir os parâmetros associados ao vector $g(\eta)$. O centro gravitacional CG já foi calculado na secção 4.4.1.

O centro de flutuação é um pouco mais complicado de calcular dada a forma irregular do ROV. Contudo, foi feito um experimento numa piscina que permitiu medir esse centro. Esse experimento consistiu em introduzir o veículo numa piscina de forma a que ficasse ligeiramente flutuante. Depois, rodou-se o veículo dentro da água 90^o. Como era de esperar a força de restabelecimento do veículo forçava o mesmo a rodar para a posição inicial. Para equilibrar o veículo na posição sugerida (90^o), aplicou-se uma vara de aço com um peso P como sugere a figura 4.5. Este peso tem a capacidade de se movimentar ao longo das varas para ajustar o momento por ele produzido.

A ideia é que o somatório dos momentos aplicados ao veículo seja nulo. P_{barra1} e P_{barra2}

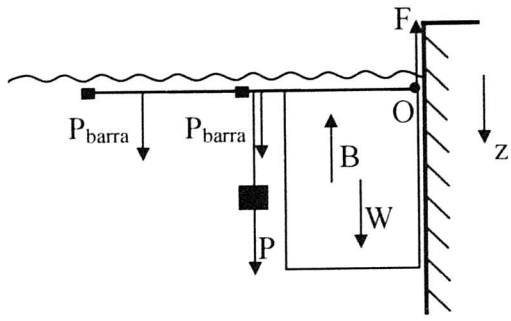


Figura 4.5- Experiência para medir a distância entre o centro de impulção e o centro de massa

correspondem ao peso de cada barra. P corresponde ao peso da massa deslizante. Se considerarmos que a distância da aplicação da força i é x_i face ao ponto O, a equação dos momentos em relação ao ponto O vem

$$P_{barra1}\, x_{P_{barra1}} + P_{barra2}\, x_{P_{barra2}} + P\, x_P + W\, x_W = B\, x_B.$$

Partindo dos valores da tabela 4.2, obtêm-se que $x_B = 38.5m$, ou seja, a posição do centro de flutuação encontra-se 5.5cm acima do centro de massa.

O peso W é dado por

$$W = mg \tag{4.36}$$

enquanto que a força de flutuação B é dada por

$$B = \rho g \nabla \tag{4.37}$$

em que ∇ é o volume ocupado pelo veículo.

O vector BG é o vector que liga o centro gravitacional e o centro de flutuação.

$$BG = \begin{bmatrix} x_G - x_B \\ y_G - y_B \\ z_G - z_B \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

4.5.2 Forças e Binários Aplicados

As forças e binários aplicadas ao ROV são provenientes dos propulsores instalados. Um sistema propulsor é composto por um motor (DC) e uma hélice. Os sistemas de propulsão serão estudados na secção seguinte. Assume-se que a força produzida pelos 4 propulsores (ver figura 4.6) é:

- F_1 - Propulsor traseiro esquerdo
- F_2 - Propulsor traseiro direito

Parâmetros	
$P_{barra1} = 12N$	$x_{P_{barra1}} = 1.6m$
$P_{barra2} = 9N$	$x_{P_{barra2}} = 0.8m$
$P = 39N$	$x_P = 0.87m$
$W = 2020N$	$x_W = 0.33m$
$B = 2020N$	

Tabela 4.2- Parâmetros da experiência

- F_3 - Propulsor lateral
- F_4 - Propulsor vertical

então, pode-se dizer que as forças e momentos produzidos no ROV serão:

$$\tau = \begin{bmatrix} F_1 + F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ -F_3 D_{3z} + F_4 D_{4y} \\ F_1 D_{1z} + F_2 D_{2z} - F_4 D_{4x} \\ -F_1 D_{1y} - F_2 D_{2y} + F_3 D_{3x} \end{bmatrix} \tag{4.39}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -D_{3z} & D_{4y} \\ D_{1z} & D_{2z} & 0 & -D_{4x} \\ -D_{1y} & -D_{2y} & D_{3x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \tag{4.40}$$

onde D_{ij} são as distâncias entre o ponto de aplicação da força i e o centro de massa na direcção j. Estas distâncias podem ser encontradas na figura 4.6.

Todos os actuadores instalados no ROV têm as mesmas características excepto o lateral. O sistema de propulsão lateral é constituído por um motor e duas hélices que estão montadas no mesmo eixo do motor, uma de cada lado (ver figura B.1). Como o fluxo de água passa nas duas hélices, não se pode dizer que a força gerada pelas duas é o dobro. Mas também não se pode dizer que é equivalente a ter apenas uma hélice, porque apenas uma parte do fluxo produzido por uma delas passa na outra. Podemos imaginar dois casos limite que nos ajuda a compreender este efeito. Um em que as duas hélices estão afastadas ao ponto de não haver influência hidrodinâmica entre as duas. Nesse caso, a força de propulsão seria exactamente duas vezes a força de uma hélice. Por outro lado se as duas hélices estiverem muito próximas, o que vai acontecer é que a força produzida pelas duas será igual à força de apenas uma já que o fluxo de água passa na globalidade pelas duas.

É ainda necessário relacionar a força produzida por uma hélice em função de outras variáveis. Este tópico será estudado na secção seguinte.

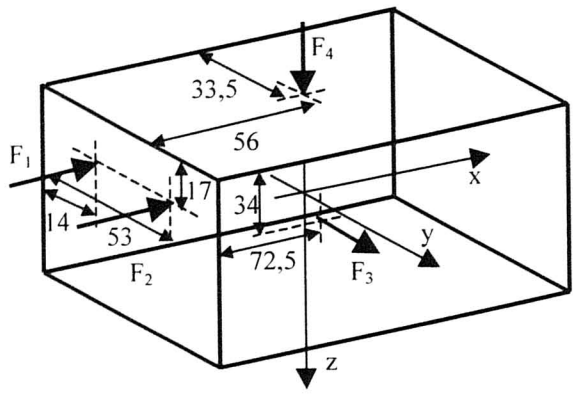


Figura 4.6- Forças aplicadas ao veículo e sua localização (em cm)

4.6 Sistema de Propulsão

O sistema de propulsão de um veículo subaquático (thruster) é composto por uma hélice (propeller) e um motor (normalmente um motor de corrente contínua). O motor actua na hélice de forma a obter a força de propulsão desejada.

4.6.1 Modelo da Hélice

Em geral, as forças e momentos gerados pelo propulsor são um pouco complicadas de obter. Essas forças e momentos dependem da velocidade do veículo e da velocidade de rotação da hélice.

Existem vários tipos de hélices: hélices de ângulo fixo (fixed pitch), ou de ângulo variável (controllable pitch). As hélices podem ainda ser instaladas isoladamente ou no interior de um tubo (ducted). No presente caso são usadas hélices de ângulo fixo instaladas no interior de um tubo.

Uma hélice gera duas forças. Uma delas é a força de propulsão. Esta força tem uma direcção do eixo de rotação da hélice e o sentido varia mediante o sentido de rotação da hélice. A outra é o momento (Q) que o motor tem que aplicar na hélice para que a hélice rode com a velocidade desejada. Uma aproximação de 1^aordem da força (T) [27] [6] é dada por:

$$T = \rho D^4 K_T(J_0)\,|n|\,n \tag{4.41}$$

$$J_0 = \frac{V_A}{nD} \tag{4.42}$$

onde:

- ρ é a densidade da água
- D é o diâmetro da hélice
- n é a velocidade de rotação (em rotações por segundo)
- K_T é uma constante dependente da hélice
- J_0 é o coeficiente de avanço

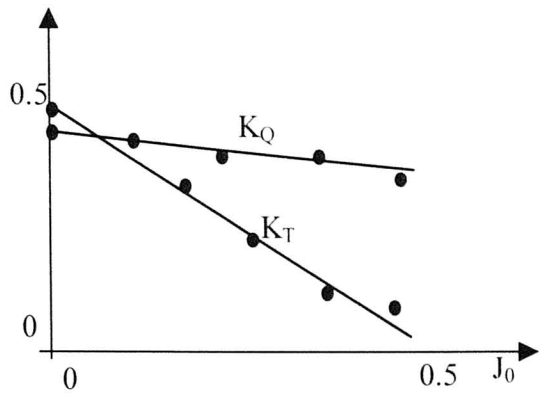


Figura 4.7- Parâmetros K_T e K_Q para uma hélice do veículo NEROV

- V_A é chamada a velocidade de avanço.

A velocidade de avanço está relacionada com a velocidade do veículo da seguinte maneira

$$V_A = (1 - w)V. \tag{4.43}$$

onde w (wake) é um parâmetro que traduz a diferença (em termos de razão) entre a velocidade do veículo e a velocidade de passagem de líquido na hélice (tipicamente toma valores entre 0.1 e 0.4). Isto significa que a velocidade do veículo é apenas 10 a 40% da velocidade da água que sai pela hélice.

Da mesma forma, o momento (Q) produzido pela hélice é dado por:

$$Q = \rho D^5 K_Q(J_0)\,|n|\,n. \tag{4.44}$$

Normalmente $K_T(J_0)$ $K_Q(J_0)$ são obtidos de um gráfico para um determinado tipo de hélice. O gráfico da figura 4.7 foi obtido para um sistema propulsor do veículo NEROV [41] [17].

Este gráfico é obtido à custa de alguns experimentos. A amplitude de variação de J_0 é bastante pequena quando o sistema está a funcionar em operação normal. Apenas quando se encontra em grandes acelerações ou desacelerações é que esse ponto de funcionamento se move para pontos mais distantes da origem do gráfico 4.7.

Olhando para a figura, constata-se que os parâmetros K_T e K_Q podem ser aproximados pelas seguintes rectas:

$$K_T = \alpha_1 + \alpha_2 J_0 \tag{4.45}$$

$$K_Q = \beta_1 + \beta_2 J_0 \tag{4.46}$$

onde α_1, α_2, β_1 e β_2 são 4 constantes.

As expressões finais das forças e momentos vêm

$$T = \rho D^4(\alpha_1 + \alpha_2 J_0)\,|n|\,n \tag{4.47}$$

$$Q = \rho D^5(\beta_1 + \beta_2 J_0)\,|n|\,n. \tag{4.48}$$

Pode-se ainda dizer que o rendimento da hélice em água sem perturbações (open water) é dado por

$$\eta_0 = \frac{J_0}{2\pi}\frac{K_T}{K_Q}. \tag{4.49}$$

Um teste em água sem perturbações é feito normalmente numa piscina para obter os parâmetros dum sistema propulsor. Nessa piscina está montado um sistema mecânico [13] com sensores de força e de binário para medir as forças e binários produzidos pelo sistema propulsor. Uma vez que a velocidade de avanço da corrente de água pode ser medida, os parâmetros K_T, K_Q e η_0 podem ser calculados a partir das expressões 4.49 e 4.50.

$$K_T = \frac{T}{\rho D^4\,|n|\,n} \quad K_Q = \frac{Q}{\rho D^5\,|n|\,n} \tag{4.50}$$

Para vários valores de V_A é possível coleccionar vários pontos dando origem a um gráfico como o da figura 4.7.

4.6.2 Modelo do Motor DC

As equações do modelo de um motor DC são compostas por duas equações principais, 4.51 e 4.52. A equação 4.51 está relacionada com os parâmetros eléctricos do motor. Esta dinâmica deve-se ao facto da corrente no motor demorar algum tempo a atingir o seu valor final. Diz-se então que esta equação introduz uma constante de tempo eléctrica.

A equação 4.52 entra com as considerações mecânicas do motor como a inércia do veio e da hélice.

$$L_a\frac{di_a}{dt} = -R_a i_a - K_e\omega + u_a \tag{4.51}$$

$$J\frac{d\omega}{dt} = K_M i_a - Q \tag{4.52}$$

onde:

- L_a é a indutância da armadura
- R_a é a resistência da armadura
- i_a é a corrente na armadura
- u_a é a tensão de alimentação do motor
- J é o momento de inércia do veio e da hélice
- Q é o binário de carga (hélice)
- ω é a velocidade de rotação
- K_M é a constante de binário do motor DC (já que o binário motor é proporcional à corrente).

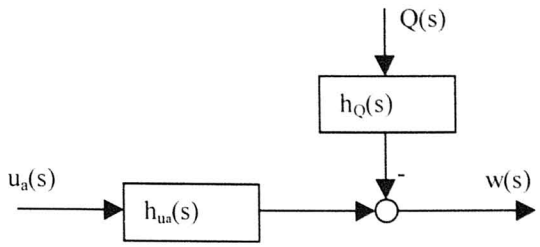


Figura 4.8- Diagrama de blocos de um motor DC

- K_e é a constante eléctrica do motor DC (uma vez que a força electromotriz do motor é proporcional à velocidade de rotação)

De notar que foram desprezados os atritos do motor.

Das equações diferenciais anteriores pode-se chegar à seguinte função de transferência

$$w(s) = \frac{\frac{K_M}{JL_a}u_a(s) - \frac{1}{J}\left(s + \frac{R_a}{L_a}\right)Q(s)}{\left(s^2 + \frac{R_a}{L_a}s + \frac{K_eK_M}{JL_a}\right)}. \tag{4.53}$$

Nesta expressão da velocidade podem-se identificar duas contribuições para a velocidade de rotação do motor. Uma que é positiva e outra que é negativa. A que é positiva advém da tensão de entrada. A segunda, que é negativa, aparece devido ao facto que quando o binário de carga do motor aumenta, a velocidade do motor diminui ligeiramente porque as perdas do motor aumentam.

Estas duas parcelas podem ser vistas em termos de diagramas de blocos na figura 4.8.

As funções de transferência $h_{u_a}(s)$ e $h_Q(s)$ representam as duas contribuições para a velocidade de rotação do motor de tal forma que:

$$h_{motor} = h_{u_a}(s) + h_Q(s) \tag{4.54}$$

com:

$$h_{u_a}(s) = \frac{\frac{K_M}{JL_a}u_a(s)}{\left(s^2 + \frac{R_a}{L_a}s + \frac{K_eK_M}{JL_a}\right)} \tag{4.55}$$

$$h_Q(s) = -\frac{\frac{1}{J}\left(s + \frac{R_a}{L_a}\right)Q}{\left(s^2 + \frac{R_a}{L_a}s + \frac{K_eK_M}{JL_a}\right)} \tag{4.56}$$

Uma forma alternativa de representar o modelo do motor é a representação em espaço de estados.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU. \end{aligned}$$

Parâmetro	Valor (unidades originais)	Valor (unidades SI)
Velocidade Nom.	2500 (rpm) (*0.1047=)	262 (rad/s)
Potência Nom.	1/8 (HP)	93 (W)
Tensão Nom.	130 (V)	130 (V)
Corrente Nom.	1 (A)	1 (A)
R_a	13 (Ω)	13 (Ω)
L_a	41 (mH)	41 (mH)
K_M	57 (oz-in/A) (*7.06E-3=)	0.4 (Nm/A)
K_e	42 V/Krpm (*9.55E-3=)	0.4 ($Vrad^{-1}s$)
Binário Nom.	50 (oz-in) (*7.06E-3=)	0.35 (Nm)
Momento Inércia	0.036 (oz-in-s^2) (*7.06E-3=)	0.254E-3(Nms^2)
Peso	9 (lbs) (*0.4536=)	4.08 (Kg)

Tabela 4.3- Parâmetros do motor DC

Assim, a equações 4.51 e 4.52 podem ser escritas na forma matricial da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ \frac{K_M}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ Q \end{bmatrix} \tag{4.57}$$

$$\begin{bmatrix} Yi_a \\ Y\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix}. \tag{4.58}$$

Para obter o modelo numérico do motor é necessário introduzir os parâmetros do mesmo. Na tabela 4.3 estão listados esses parâmetros quer nas unidades que aparecem nas folhas de características do motor quer no sistema internacional.

A partir destes parâmetros é agora possível obter a função de transferência do motor DC em termos numéricos.

$$h_{u_a}(s) = \frac{\frac{0.4}{0.000254 \cdot 0.041}}{\left(s^2 + \frac{13}{0.041}s + \frac{0.4 \cdot 0.4}{0.000254 \cdot 0.041}\right)} u_a(s) \tag{4.59}$$

$$h_{u_a}(s) = \frac{38410.0}{s^2 + 317.07s + 15364.} u_a(s) \tag{4.60}$$

$$h_Q(s) = -\frac{\frac{1}{0.000254}\left(s + \frac{13}{0.041}\right)}{\left(s^2 + \frac{13}{0.041}s + \frac{0.4 \cdot 0.4}{0.000254 \cdot 0.041}\right)} Q(s) \tag{4.61}$$

$$h_Q(s) = -3937.0 \frac{s + 317.07}{s^2 + 317.07s + 15364.} Q(s) \tag{4.62}$$

Resolvendo a equação do denominador das funções de transferências anteriores, obtém-se os dois pólos $s = -257.4$ e $s = -59.7$. Estes pólos correspondem a duas constantes de tempo $\tau_1 = 4ms$ e $\tau_2 = 17ms$. A primeira corresponde à constante de tempo eléctrica e a segunda à constante mecânica.

No caso da representação do espaço de estados, temos o seguinte modelo numérico:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{dw}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -317.07 & -9.756 \\ 1574.8 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 24.4 & 0 \\ 0 & -3937.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ Q \end{bmatrix} \tag{4.63}$$

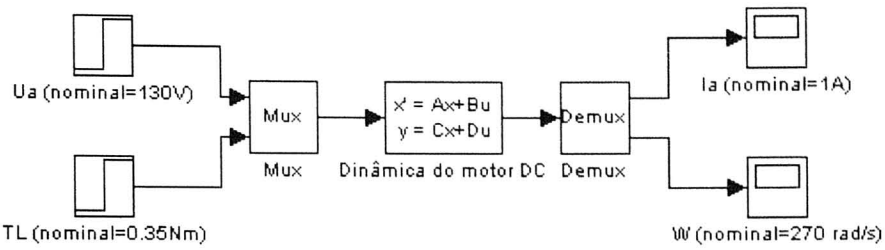


Figura 4.9- Modelo matlab para simular um motor DC

$$\begin{bmatrix} Yi_a \\ Yw \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ w \end{bmatrix}. \tag{4.64}$$

Para validar este modelo, foi feita uma simulação em MATLAB. O modelo implementado foi o da figura 4.9. Este modelo conduziu aos resultados apresentados na figura 4.10.

Nesta simulação, foi aplicada a tensão nominal do motor em $t = 0$. Em $t = 0.5s$, é aplicado um binário de carga correspondente à carga nominal. Como se pode ver pelos resultados, no início da simulação a velocidade do motor é um pouco superior à velocidade nominal. Quando a carga aumenta, o valor da velocidade de rotação decresce para valores próximos da velocidade nominal, o que leva a concluir que o modelo revela valores aceitáveis.

Pode-se ainda verificar que a constante de tempo do sistema é da ordem dos $20ms$ o que é próximo dos $17ms$ calculados.

Os motores têm um papel muito importante na área do posicionamento e controlo do veículo. Existem duas questões principais que devem ser consideradas. Uma delas é a zona morta do motor. Isto significa que o motor só começa a rodar a partir do momento em que se aplica uma tensão superior à tensão mínima representada na figura 4.11. Isto significa que o motor tem uma não linearidade que influencia a performance da resposta do sistema realimentado. A outra tem a ver com a saturação do motor. Isto significa que a partir de certa altura não é possível actuar mais no motor. Esta limitação é uma limitação física uma vez que não é possível aplicar uma tensão superior à tensão máxima.

4.7 Perturbações Externas

Os veículos aquáticos genéricos estão sujeitos a três tipos de perturbações: ondas, ventos e correntes. No caso dos veículos subaquáticos, o vento não influência directamente o seu movimento excepto em veículos que possam ter uma parte não submersa, que não é o caso dos ROVs.

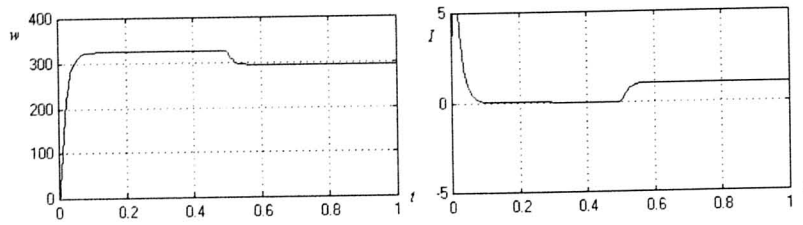


Figura 4.10- Resultados da simulação do modelo Matlab (velocidade em $rad\ s^{-1}$ e corrente em A)

Nesta secção assume-se que as perturbações podem ser somadas à equação geral da dinâmica do veículo, e portanto pode-se aplicar o princípio da sobreposição.

Não é objectivo desta secção apresentar detalhadamente este tópico, mas apenas dar uma breve introdução de cada tipo de perturbação.

4.7.1 Ondas

As ondas são um efeito provocado pelo vento. As ondas aparecem a partir de um processo iterativo. Quando o vento sopra, à superfície da água é formada uma leve ondulação. Essa ondulação provoca um aumento da força de drag o que provoca o aumento das pequenas ondas. Este processo continua até que as ondas quebram dissipando a sua energia. Sabe-se que um mar em desenvolvimento ou tempestade, começa com altas frequências que criam um espectro da onda com um pico a frequências elevadas. Um mar cujas ondas quebram já à muito tempo, é considerado um mar completamente desenvolvido. Depois do vento parar, as ondas param de quebrar e dá-se o processo inverso dando origem ao aparecimento de ondas largas sem rebentar (swell). Estas ondas formam um espectro da onda com um pico mais pequeno. A frequência de pico de um espectro de uma onda é normalmente referida como frequência modal.

Se o swell de uma tempestade interage com ondas de outra tempestade pode-se observar duas frequências modais no mesmo espectro de onda, mas por simplicidade costuma-se considerar apenas o caso de haver apenas uma frequência modal.

As ondas são geralmente representadas pela soma de um largo conjunto de componentes. A amplitude A_i de cada componente i está relacionada com a função de densidade espectral $S(\omega_i)$ [37] da seguinte forma

$$A_i^2 = 2S(\omega_i)\Delta\omega.$$

onde ω_i é a frequência da onda da componente i e $\Delta\omega$ é a diferença entre duas frequências consecutivas. Um exemplo de uma função de densidade espectral pode ser observada na figura 4.12.

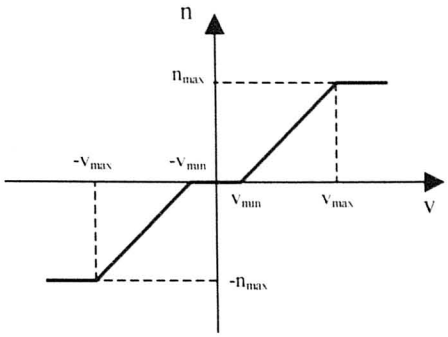


Figura 4.11- Característica típica de um motor DC

O número da onda k_i é definido por

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}.$$

onde λ_i representa o comprimento de onda da onda i. A figura 4.13 apresenta alguns parâmetros de uma onda que se propaga com velocidade $c = \lambda/T = w/k$. Ainda nessa figura, λ representa o comprimento de onda, H a sua altura, A a sua amplitude, T o seu período e $\zeta(x,t)$ a sua elevação.

A função de elevação da onda que se propaga na direcção do eixo dos x é escrita como uma soma de componentes sinusoidais.

$$\zeta(x,t) = \sum_{i=1}^{N} A_i \cos(w_i - k_i x + e_i)$$

onde e_i é a fase da onda. Esta fase tem carácter aleatório estando uniformemente distribuída. Existem várias formas de calcular a função densidade espectral $S(\omega)$:

- Densidade espectral segundo Neumann

Esta função foi apresentada em 1952. Esta função depende apenas de um parâmetro, a velocidade do vento V

$$S(\omega) = C\omega^{-6} \exp\left(-2g^2\omega^{-2}V^{-2}\right) \quad (m^2 s)$$

onde C é uma constante empírica e g é a aceleração da gravidade.

- Densidade espectral segundo Bretschneider

Esta função é mais sofisticada que a anterior, mas depende de dois parâmetros.

$$S(\omega) = \frac{1.25}{4}\frac{\omega_0^4}{\omega^5} H_S^2 \exp\left(-1.25\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^4\right) \quad (m^2 s)$$

Os parâmetros são a frequência modal ω_0 e a altura significativa da onda H_S. Esta função foi desenvolvida para mares do atlântico norte, unidireccionais, de grande profundidade e sem swell.

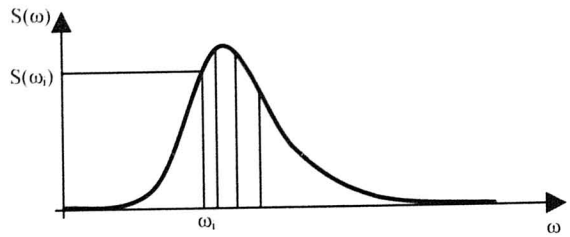


Figura 4.12- Exemplo de uma função espectral $S(\omega)$ das ondas com um pico

- Densidade espectral segundo Pierson-Moskowitz

Esta função foi desenvolvida independente das duas funções anteriores. Foi essencialmente criada para mares do atlântico norte completamente desenvolvidos.

$$S(\omega) = A\omega^{-5} \exp\left(-B\omega^{-4}\right) \quad (m^2 s)$$

com

$$\begin{aligned} A &= 0.0081g^{-2} \\ B &= 0.74\left(\frac{g}{V}\right)^4 \end{aligned}$$

onde V é a velocidade do vento a uma altura de 19.4m acima da superfície da água e g é a constante de gravidade.

O facto de se conhecer o modelo das ondas não significa que se possa incluir directamente no modelo das perturbações do sistema. Com efeito, é necessário estudar melhor como é que as ondas afectam o movimento do ROV. Isto será objecto de trabalho futuro.

4.7.2 Correntes

São várias as contribuições para as correntes das águas:

- As correntes nas camadas de água superficiais são essencialmente geradas pelos ventos.
- As diferenças de temperatura e de salinidade.
- A força de Coriólis tende a virar as correntes para a direita no hemisfério norte e ao contrário no hemisfério sul.
- Grande parte das correntes oceânicas tem uma componente das marés que está relacionada com as interacções planetárias como a gravidade.

A velocidade das correntes pode ser escrita como uma soma de várias componentes.

$$V_C = V_t + V_{tw} + V_s + V_{set-up} + V_d$$

onde

- V_m representa a contribuição das marés.

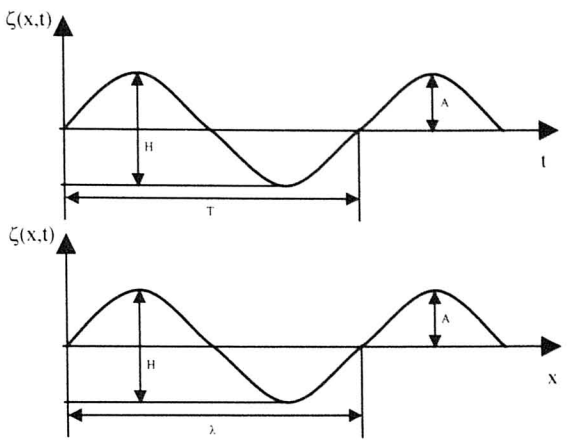


Figura 4.13- Características de propagação de uma onda

- V_{tw} componente gerada pelo vento.
- V_s componente gerada por correntes não lineares.
- V_{set-up} componente gerada pelo arranque de tempestades.
- V_d componente provocada por grandes alterações de densidade na água.

4.7.3 Cabo

Num sistema baseado num ROV, as perturbações introduzidas pelo seu cabo podem ser consideráveis. Na literatura não se encontra muito trabalho feito neste campo, talvez pela complexidade do problema em si. Para analisar as perturbações que o cabo produz no veículo, seria necessário calcular o modelo hidrodinâmico do cabo [15]. Sendo o cabo um elemento distribuído, o cálculo do modelo hidrodinâmico é muito complicado de o obter. Existe ainda uma abordagem alternativa à modelização do cabo. Em vez de calcular o modelo do cabo, a ideia era medir as forças produzidas por ele na plataforma de inspecção. Ou seja, era necessário instalar um sensor ou um conjunto de sensores que medissem as forças produzidas no veículo. Esta solução permitiria compensar as perturbações provenientes do cabo.

4.8 Sistemas de Identificação

Para obter os parâmetros do modelo de um veículo subaquático costuma-se recorrer a um sistema mecânico que permite fazer testes para identificação. Esse sistema tem o nome de PMM (Planar Motion Mecanism) [13]. O Instituto Marítimo da Dinamarca [1] faz testes de identificação dos mais diversos veículos aquáticos. O tanque onde realizam os testes tem uma dimensão de 240m×12m×5.5m. Este sistema permite excitar o veículo na água para se poder identificar parâmetros. Para tal, o veículo é fixado ao PMM através de umas barras verticais com os sensores

de força montados na parte de baixo, ou seja, no veículo. Com esta instalação é possível desprezar as forças provocadas pela água nas barras. Considera-se desprezável as correntes provocadas pelas barras no veículo.

Os testes que normalmente são realizados são os seguintes:

- Testes da hélice em água sem perturbações (open water)
- Testes de resistência e auto propulsão
- PMM no plano vertical
- PMM no plano horizontal

O objectivo dos testes em água sem perturbações, é medir a característica da hélice e do tubo onde a hélice está montada (ductos). Para tal é necessário instalar sensores de força e de binário na hélice para fazer as medições necessárias. Estes testes permitem ainda determinar qual o regime de funcionamento para o qual a hélice tem mais rendimento bem como verificar a influência dos ductos para a força produzida pelo propulsor. Aproveitando a infra-estrutura de teste pode-se também verificar se a hélice suporta as forças mesmo em regimes de sobrecarga.

O objectivo do teste de resistência é medir a resistência do veículo ao movimento sem o sistema de propulsão montado. O objectivo do teste de auto propulsão, é medir a performance do sistema de propulsão com as perturbações deixadas para trás pelo casco do veículo (in the wake of the hull). Normalmente neste teste levanta-se uma questão importante. Incluir ou não incluir os ductos e lemes no casco ou no sistema de propulsão? Sob o ponto de vista da propulsão, os ductos e os lemes fazem parte do sistemas de propulsão. Por outro lado, no contexto de manobras, os ductos e os lemes fazem parte do casco. Embora normalmente a hélice do veículo pode ser desmontada, o mesmo não se passava com os ductos e os lemes, pelo que os testes de resistência têm que ser feitos sem desmontar absolutamente nada. Para compensar a sua contribuição na resistência total, a resistência dos ductos e dos lemes são medidas nos testes em água sem perturbações. Depois entra-se com um factor de correcção para contabilizar esta diferença.

Num teste de auto propulsão, é necessário instalar sensores dinamómetros de força e momento em cada veio da hélice. Devido a restrições práticas, o que normalmente se faz é medir a corrente e a tensão no motor para poder estimar o binário bem como a potência entregue à hélice. Os testes de resistência e auto propulsão são combinados com os testes horizontais do sistema PMM.

O objectivo do sistema de PMM é o de determinar os coeficientes das equações do modelo do veículo. Nesta infra-estrutura de teste são feitos dois tipos de testes: estacionários e dinâmicos. No teste estacionário, o veículo é acoplado ao carrinho rebocador do sistema PMM na direcção longitudinal do tanque. O veículo é rebocado a velocidade constante. Nos testes dinâmicos, o sistema PMM força o veículo a mover-se segundo uma trajectória sinusoidal com uma determinada amplitude e frequência para cada grau de liberdade. Estes testes são efectuados quer no plano vertical quer no plano horizontal.

Experiência	Actuação em	Movimento
1	u_1 e u_2	Segundo x (para a frente)
2	$u_1 - u_2 \neq 0$	Rotação em yaw (em torno de z)
3	u_L	Segundo y (para o lado)
4	u_v	Segundo z (para baixo)

Tabela 4.4- Movimentos elementares possíveis para o ROV

Depois de recolhidos os dados destas experiências, são usadas técnicas de identificação para adaptar os parâmetros do modelo do veículo.

4.9 Simulação

Os sub-modelos anteriormente apresentados foram agregados num modelo completo realizado em MATLAB. Os sub-modelos considerados foram o modelo do corpo rígido submerso, o modelo do motor e o modelo das hélices. As perturbações externas serão acrescentadas posteriormente em trabalho futuro.

Assim sendo, fizeram-se algumas simulações para ter um ideia se o modelo está correcto. Pelo que foi visto antes, pode-se concluir que as entradas e as saídas do modelo do ROV são respectivamente as tensões aplicadas aos motores (u_1, u_2, u_L e u_V) e a posição e a orientação do veículo no referencial inercial (x, y, z, ϕ, θ e ψ). Com os quatro actuadores disponíveis no ROV os movimentos mais básicos que se podem obter são os apresentados na tabela 4.4. Dada a extensão dos dados experimentais, são apresentados aqui resultados referentes às experiências 1 e 3 explicando o porquê desses resultados.

Movimento para a frente

Para forçar o movimento do ROV para a frente foi aplicado sensivelmente a mesma actuação aos motores traseiros. Os resultados dessa simulação são apresentados na figura 4.14.

Podemos verificar pela figura que ao fim de 20s o ROV desloca-se até aos 28m. Um aspecto de grande relevância é o facto de aparecer um ângulo de pitch de média inferior a -0.1rad ($\theta \simeq 6^o$). Este efeito aparece devido ao facto das forças provocadas pelos actuadores traseiros não estarem devidamente aplicadas no centro de massa do veículo e portanto há um braço vertical de 10cm que gera um momento de rotação em pitch. O valor do braço pode ser verificado através das figuras 4.2 e 4.6. Associado a este momento de rotação está uma outra força de grande relevância que força o veículo a deslocar-se para baixo. Essa força chama-se na literatura inglesa força de "lift" e é equivalente à força que sustenta as aeronaves no ar e aparece quando uma superfície se desloca num fluído com um ângulo de ataque diferente de 0 face à direcção do movimento da superfície. A consequência deste efeito associado ao momento de rotação provocado pelo braço vertical, leva a que o veículo afunde 3.2m à medida que se desloca para a frente até à posição

$x = 28m$. Este valor é mais ou menos coerente porque foram feitos alguns testes em piscina e verificaram-se aproximadamente estes valores. Pode-se ainda verificar pela figura que o veículo sofreu um pequeno desvio para a direita enquanto se deslocava para a frente. O motivo disto prende-se essencialmente com dois efeitos. Um é o facto dos braços horizontais das forças dos actuadores serem ligeiramente diferentes (17.5cm para 21.5cm). O outro seria o desequilíbrio das forças de drag aplicados em cada peça constituinte da estrutura do veículo. Vejamos na figura 4.15 as principais forças aplicadas no veículo. Existem as duas forças de actuação do veículo, F_1 e F_2 e ainda as forças de drag $F_{d\,e}$ e $F_{d\,DVL}$ respectivamente do cilindro de electrónica e do sensor de efeito de doppler. Uma vez que a área de exposição ao fluído do cilindro e do sensor de efeito de doppler são praticamente as mesmas, e considerando que o coeficiente de drag para aquelas formas também são os mesmos, temos um certo equilíbrio de forças em termos hidrodinâmicos. Portanto o efeito de rodar para o lado esquerdo à medida que se desloca para a frente, deve-se essencialmente aos braços das forças de actuação. Este desequilíbrio terá que ser ajustado no sistema de controlo para fazer o veículo seguir em frente sem se deslocar para o lado. De notar ainda que o movimento em "roll" foi praticamente nulo, o que leva a concluir que este grau de liberdade não está acoplado com o movimento em frente.

Movimento para o lado

Da mesma forma, foi feita outra simulação mas para evidenciar o movimento lateral. Como tal, foi aplicada uma tensão no motor lateral para gerar uma força lateral máxima. Os resultados podem ser observados na figura 4.16. Nesta figura, pode-se verificar que existe um forte acoplamento entre os graus de liberdade y e ψ. Quando se actua no motor lateral, o veículo roda muito significativamente para o lado direito. Existem duas forças principais que explicam este fenómeno. Uma delas é a própria força de actuação do "thruster", que pelo facto de estar aplicada mais à frente (na direcção x) do centro de massa do veículo, gera um momento que tende a rodar o veículo para a direita (ver figura 4.17). Por outro lado existe a força de drag que actua no cilindro de electrónica. Tanto uma como a outra geram um momento de rotação para a direita, somando-se num único efeito. De notar que aqui não foi considerada a força de drag do DVL já que, quando o veículo se desloca de lado, esse sensor está de certa forma encoberto do fluxo de água lateral devido ao cilindro de electrónica estar na sua frente. Ver a vista de trás do apêndice B.

Para ser possível a validação do modelo, foram feitas experiências com o ROV em ambiente real. O ROV foi actuado para seguir várias trajectórias. Para se poder comparar a performance do modelo e do sistema real, foi aplicado ao modelo os mesmos comandos (de tensão) que foram aplicados à plataforma de inspecção. A comparação dos resultados é mostrada na figura 4.18. Pode-se verificar que o modelo tem algumas disparidades de valores em alguns graus de

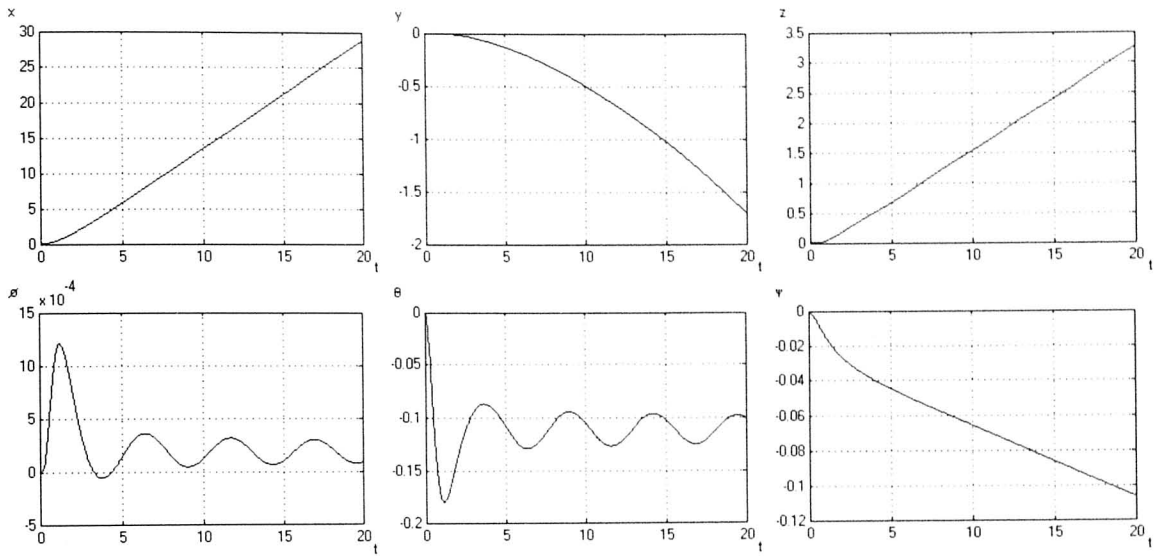


Figura 4.14- Resultados da simulação do modelo do ROV num movimento em frente (posições em m e orientações em rad)

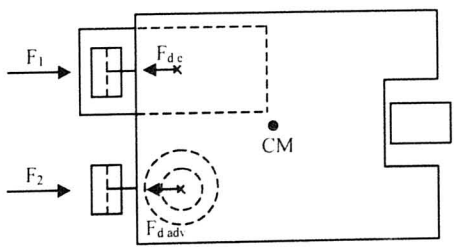


Figura 4.15- Representação das principais forças que actuam no veículo no movimento para a frente

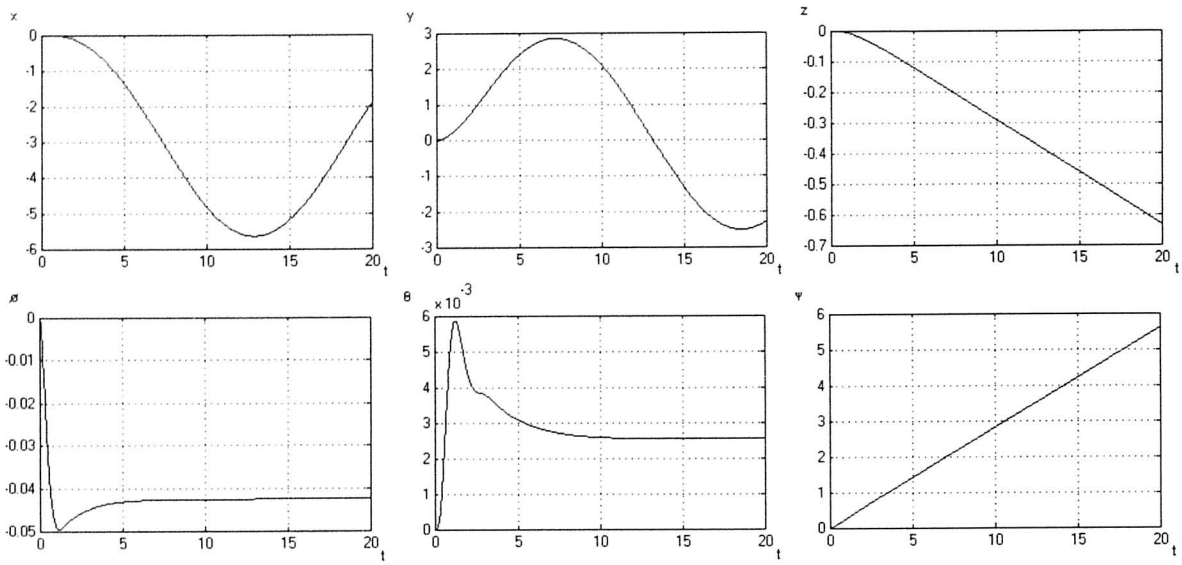


Figura 4.16- Resultados da simulação do modelo do ROV num movimento para o lado direito (posições em m e orientações em rad)

liberdade, mas de qualquer forma observa-se um certo seguimento do comportamento real por parte da simulação. Esta comparação não é completamente justa uma vez que pela altura da escrita desta dissertação, ainda não estavam integrados os dados de todos os sensores, pelo que o vector de estado disponível no ROV não estava ainda afinado. Contudo já permite verificar que o modelo tende a seguir o comportamento do veículo. Por outro lado, quem trabalha na área da modelização de veículos aquáticos sabe que é muito difícil obter um modelo que traduza perfeitamente a realidade, especialmente quando se trata de veículos cuja simetria foi perdida devido à inclusão desregrada de sensores e actuadores.

4.10 Conclusões

Neste capítulo foram estudadas as equações do modelo de um veículo aquático genérico bem como as possíveis simplificações. Foram apresentadas ainda algumas formas de obter cada parâmetro dessas equações, quer por cálculos quer por experiências. O modelo do veículo é composto pelo modelo do corpo rígido, pelos motores DC e pela hélice [54] [34]. Foram feitas algumas simulações em MATLAB que permitiram comparar os resultados da simulação com dados reais que permitiram validar o modelo. Embora não tenha sido acrescentado o modelo das perturbações na simulação, neste capítulo foi dada uma ideia das perturbações a que o veículo está sujeito, ficando a sua inclusão no modelo do MATLAB para trabalho futuro.

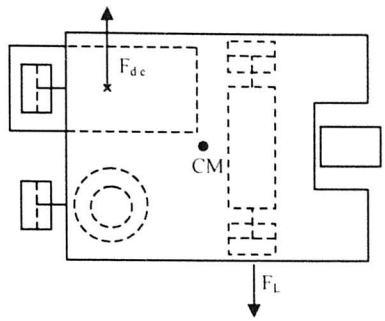


Figura 4.17- Representação das principais forças que actuam no veículo no movimento para o lado

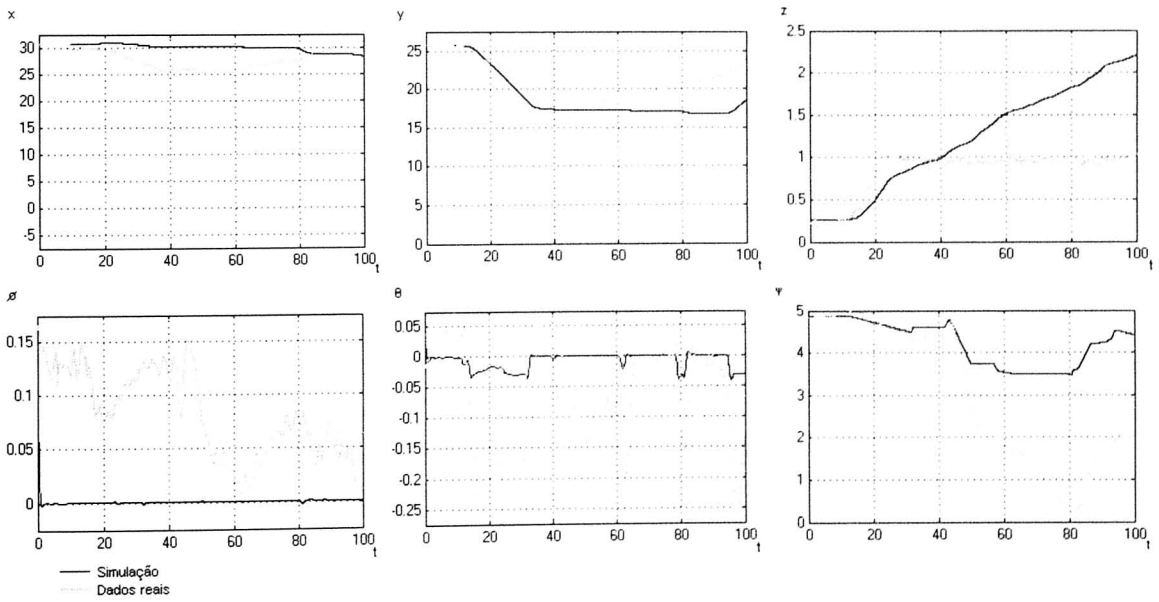


Figura 4.18- Comparação entre os dados de navegação do ROV em ambiente real e em ambiente de simulação (posições em m e orientações em rad)

Outra forma de obter o modelo do ROV seria usar um sistema PMM. A ideia deste sistema é, por intermédio de um sistema mecânico, excitar o veículo e registar os dados de navegação para depois usar técnicas de identificação para obter os parâmetros para o veículo. A desvantagem desta solução tem a ver com o seu custo, já que um serviço deste tipo é extremamente dispendioso.

Capítulo 5
Controlo de Veículos Subaquáticos

5.1 Introdução

Uma vez conhecidas as equações do modelo do veículo, o objectivo seguinte consiste em obter as forças a aplicar no veículo de forma a que siga uma determinada trajectória. Se dispuséssemos de um modelo da dinâmica do sistema perfeito, seria fácil encontrar as forças a aplicar no sistema a partir do próprio modelo. Na prática é preciso projectar uma lei de controlo de tal forma que sejam atenuadas as incertezas do modelo do sistema. De notar ainda que deverá ser tomado cuidado no projecto da lei de controlo para assegurar que o sistema global converge para a trajectória na presença de diversas perturbações, ruído dos sensores e erros de modelização.

Neste capítulo começa-se por apresentar a arquitectura de controlo que é usada no ROV do sistema IES. Seguidamente são sintetizados dois controladores não lineares: a linearização por realimentação de estado e sliding modes. Este controladores serão acompanhados por simulações para validar os mesmos. Depois será apresentado um controlador em horizonte deslizante. Este controlador é usado para motivar a necessidade de geração de trajectórias baseada em geometria diferenciável.

Para mostrar a vantagem dos controladores não lineares nomeadamente o de sliding modes face aos lineares, será feita uma simulação com controladores PID.

Tendo o posicionamento e o seguimento de trajectórias da plataforma de inspecção garantido, podemos passar para o controlo da orientação da câmara (Pan&Tilt). Neste caso será apresentado um cenário de operação onde faz sentido o controlo da orientação da câmara. Para tal será apresentada não só a dinâmica como a cinemática do Pan&tilt. Por fim, será feita uma simulação demonstrativa da compensação das perturbações que a plataforma não consegue compensar.

5.2 Considerações de Arquitectura

Para que um operador do sistema IES possa definir os seus objectivos em termos de inspecção e monitorização automática é necessário que haja um sistema de geração de trajectórias [21]. Por trajectória entende-se uma curva parametrizada no tempo que representa a evolução da variável de estado do sistemas quando sujeito a uma actuação. Este conceito de sistema de geração de

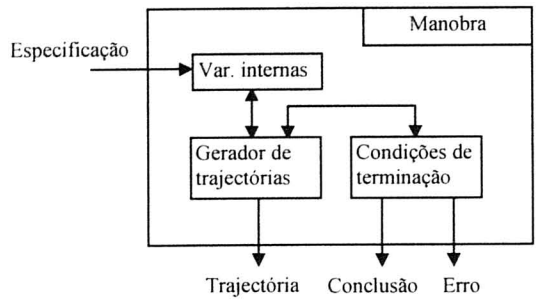


Figura 5.1- Protótipo de uma manobra elementar

trajectórias envolve alguns passos até que a trajectória desejada esteja completamente definida.

Assim, o primeiro passo é permitir ao operador definir os seus objectivos em termos de movimento do veículo, tendo em consideração que um dos principais requisitos do projecto IES é que o operador não seja um especialista em controlo ou na pilotagem deste tipo de sistemas. Por isso o sistemas de geração de trajectórias deverá fornecer ferramentas ao operador para facilitar a sua tarefa de definição do movimento para ir ao encontro dos seus objectivos. Esta é a parte mais alta da hierarquia do sistemas de automação em questão.

Na especificação do movimento pretendido para o sistema, e por questões de simplicidade, o que se fez no projecto IES foi decompor o movimento num conjunto de manobras elementares. Estas manobras elementares constituem uma base canónica discreta a partir da qual se podem compor movimentos mais complexos. O uso desta base de manobras elementares permite por um lado uma boa interface entre o utilizador e o sistema automático e, por outro, mostrar as capacidades e funcionalidades do mesmo.

Após a definição do movimento desejado por parte do operador, segue-se a geração das trajectórias. Este processo consiste em criar uma trajectória realizável a partir da especificação do operador. Isto acontece porque a trajectória especificada pode não ser possível para o ROV. Ou, no caso de ser possível, pode ser ineficiente do ponto de vista energético. Na figura 5.1 apresenta-se um protótipo de uma manobra elementar. Os blocos principais da manobra são:

- Variáveis internas - são as variáveis que guardam os parâmetros da manobra. Estas variáveis determinam em conjunto com as condições de terminação se a manobra está completa ou não.
- Condições de terminação - são as especificações das condições de terminação normal ou com erro.
- Gerador de trajectórias - é o responsável pelo cálculo de uma trajectória realizável para a trajectória corrente.

O conceito de composição do movimento à custa de manobras elementares, leva à implementação de uma arquitectura de controlo baseada em três camadas [10] [19]:

- Camada de Coordenação. Esta é a camada com maior nível de automação. Ela é responsável pela captação dos objectivos do piloto do sistema e a sua tradução em manobras elementares. Assim, consoante as manobras complexas definidas, esta camada deverá instanciar as manobras elementares que melhor cumpram os requisitos operacionais, bem como definir o seu correcto sequenciamento. Só poderá ser começada uma nova manobra elementar após conclusão com sucesso da anterior. Esta camada é ainda responsável pela monitorização da correcta execução do plano de movimento e, caso uma das manobras não se complete com sucesso, deverá efectuar um novo rescalonamento de manobras elementares ou então optar por um modo de execução seguro, caso se verifique a impossibilidade da continuação do planeamento realizado previamente.
- Camada de Manobra. Esta camada controla e observa os sub-sistemas responsáveis pela execução segura das manobras elementares. Após a instanciação das manobras elementares pela camada de coordenação, uma manobra envia sinais básicos de comando para a camada de regulação e recebe eventos relativos à sua conclusão ou eventual falha. O controlo das manobras elementares é dado em termos de um autómato híbrido.
- Camada de Regulação. Esta camada lida com sinais contínuos e faz a interface com o hardware dos veículos. Esta camada contém vários controladores de baixo nível e é responsável pelo processamento dos dados sensoriais e pela detecção de falhas nos sistemas. As leis de controlo implementadas a este nível corresponde a comandos básicos como controlo de posição e de velocidade ou manter uma determinada rota.

Em resumo, a decomposição do movimento em manobras elementares é uma abordagem que trás vantagens porque lida com a complexidade do projecto IES. Assim, em primeiro lugar deve-se definir um conjunto de manobras elementares que permitam construir qualquer manobra complexa. Depois deve-se verificar se existem controladores para cada manobra elementar porque essas manobras vão estar sujeitas a perturbações (ondas, correntes e cabo) e para garantir a sua exequibilidade deverá existir um controlador por manobra. Em particular, se garantir a execução de cada manobra elementar, então garante-se a execução do movimento pretendido para o sistema.

5.3 Controlo de Posição

5.3.1 Linearização por Realimentação de Estado

O problema do controlo de posição de sistemas consiste em calcular as forças a aplicar no centro de massa do veículo de forma a que ele siga uma determinada referência. Esta estratégia de controlo deverá ser robusta em relação a erros de condições iniciais, ruído e erros de modelização.

Para resolver este problema, temos que considerar o modelo da dinâmica de um veículo subaquático (que já foi estudado anteriormente) mas no referencial inercial

$$M_\eta \ddot{\eta} + C_\eta(v,\eta)\dot{\eta} + D(v,\eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) = \tau_\eta. \tag{5.1}$$

Temos ainda que dispor de uma referência $\eta_d(t)$ (e que pode ser função do tempo) que queremos seguir. Se o modelo do sistema fosse perfeito e $\eta(0) = \eta_d(0)$ e $\dot{\eta}(0) = \dot{\eta}_d(0)$ poderíamos resolver

o problema escolhendo

$$\tau_\eta = M_\eta \ddot{\eta} + C_\eta(v,\eta)\dot{\eta} + D(v,\eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) \tag{5.2}$$

porque tanto η como η_d satisfazem a mesma equação diferencial 5.1. Nessa altura, $\eta(t) = \eta_d(t)$ para $t \geq 0$. Este é um exemplo de uma lei de controlo em malha aberta. Infelizmente esta lei não é muito robusta caso haja uma perturbação do sistema ou nas condições iniciais, o veículo nunca corrigirá esse erro. Isto é muito indesejável e, por essa razão, será introduzida uma realimentação no sistema.

A alteração da equação da dinâmica para o referencial inercial, deve-se ao facto de haver a necessidade de especificar neste, as referências de posição. A transformação de referencial para a equação 4.9 é conseguida derivando a relação 4.10, obtendo

$$\ddot{\eta} = \dot{J}(\eta)v + J(\eta)\dot{v}.$$

Resolvendo em ordem a $\dot{v}$ obtêm-se

$$\dot{v} = J^{-1}(\eta)\left(\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)v\right).$$

Tendo em conta que

$$v = J^{-1}(\eta)\eta$$

e substituindo v e $\dot{v}$ na equação 4.9, obtemos o modelo 5.1 em coordenadas inerciais. As novas matrizes do modelo vêm:

$$\begin{aligned}
M_\eta &= J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta) \\
C_\eta(v,\eta) &= J^{-T}(\eta)\left[C(v) - MJ^{-1}(\eta)\dot{J}(\eta)\right]J^{-1}(\eta) \\
D_\eta(v,\eta) &= J^{-T}(\eta)D(v)J^{-1}(\eta) \\
g_\eta(\eta) &= J^{-T}(\eta)g(\eta) \\
\tau_\eta(\eta) &= J^{-T}(\eta)\tau.
\end{aligned}$$

A realimentação deverá ser escolhida de forma que a trajectória do veículo convirja para a referência desejada. Existem várias abordagens para determinar leis de controlo estáveis. Uma delas é a linearização por realimentação de estado. A ideia principal deste método é cancelar todas as não linearidades do sistema e aplicar exactamente as forças necessárias para vencer a inércia do veículo. É ainda necessário complementar a ideia anterior com uma forma de corrigir os erros de trajectória.

Se considerarmos a lei de controlo em malha aberta 5.2 e substituirmos na equação da dinâmica

5.1, verificamos que

$$M\ddot{\eta} = M\ddot{\eta}_d.$$

Se M for uniformemente positiva definida, temos que

$$\ddot{\eta} = \ddot{\eta}_d. \tag{5.3}$$

Mas como já vimos anteriormente esta estratégia não converge em caso de perturbações. A linearidade da equação 5.3 sugere a seguinte estratégia

$$\tau_\eta = M_\eta \left(\ddot{\eta}_d - K_v\dot{e} - K_p e\right) + C_\eta(v,\eta)\dot{\eta} + D(v,\eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) \tag{5.4}$$

onde $\dot{e} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d$, $e = \eta - \eta_d$, e K_v e K_p são matrizes de ganho. Quando substituída na equação 5.1, a dinâmica do erro vem:

$$\ddot{e} - K_v\dot{e} - K_p e = 0 \tag{5.5}$$

supondo novamente que M é positiva definida.

A nova estratégia de controlo pode ser escrita da seguinte forma

$$\tau = M_\eta\ddot{\eta}_d + C_\eta(v,\eta)\dot{\eta} + D(v,\eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) + M_\eta\left(-K_v\dot{e} - K_p e\right) \tag{5.6}$$

ou então

$$\tau = \tau_{ff} + \tau_{fb} \tag{5.7}$$

onde

$$\begin{aligned} \tau_{ff} &= M_\eta\ddot{\eta}_d + C_\eta(v,\eta)\dot{\eta} + D(v,\eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) \\ \tau_{fb} &= M_\eta\left(-K_v\dot{e} - K_p e\right). \end{aligned}$$

O termo τ_{ff} corresponde à componente de "feedforward". Esta componente calcula as forças necessárias para vencer inercias e atritos para mover o veículo segundo a trajectória desejada. O termo τ_{fb} é o termo de realimentação. Esta componente calcula as forças necessárias para corrigir os erros da trajectória.

Uma vez que a equação 5.5 é linear, é fácil calcular as matrizes de ganho K_v e K_p de forma que o sistema seja exponencialmente estável. Pode-se ainda escolher as matrizes de ganho diagonais garantindo estabilidade independente para cada variável. A proposição seguinte mostra as condições em que a lei 5.6 resulta num seguimento da trajectória de forma exponencial.

Proposição 5.1 *Estabilidade da lei 5.6*
Se $K_v, K_p \in \Re^{n\times n}$ forem positivas definidas e simétricas, então a lei de controlo 5.6 aplicada ao sistema 5.2 converge exponencialmente para a trajectória planeada.

A vantagem deste método é converter um sistema não linear noutro linear, permitindo o uso

de um número alargado de técnicas de síntese de controladores. A desvantagem é que pode ser complicado em termos computacionais o uso desta realimentação para converter o sistema não linear num sistema linear.

Antes de implementar a simulação foi necessário resolver alguns problemas. Um deles foi simplificar a equação 5.6. Como as forças a aplicar ao ROV tinham que ser no referencial veículo, multiplicou-se à esquerda desta equação por $J^T(\eta)$, resultando

$$u = B^{-1}\hat{M}J^{-1}(\eta)\left[\ddot{\eta}_d - K_v(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) - K_p(\eta - \eta_d)\right] + \left[\hat{C}(v) - \hat{M}J^{-1}\dot{J}\right]v + \hat{D}(v)v + \hat{g}(\eta).$$

Desta expressão pode-se verificar que $\ddot{\eta}_d, \dot{\eta}_d$ e η_d são as entradas deste controlador, mas se estivermos a pensar em usá-lo para controlo em posição, basta dar uma referência de posição η_d e igualar a 0 a sua velocidade e aceleração. A saída deste controlador é submetida ao modelo do propulsor para calcular a tensão que deverá ser aplicada a todos os motores. As matrizes $\hat{M}$, $\hat{C}$, $\hat{D}$ e $\hat{g}$ representam as estimativas respectivamente de M, C, D e g.

Outro problema a resolver foi a alocação de pólos para o erro do controlador. Partindo da equação 5.5, e convertendo-a para espaço de estados, encontramos:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -k_p & -k_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

com $x_1 = e$ e $x_2 = \dot{e}$. Para que o erro tenda para 0 é necessário impor que os valores próprios da matriz tenham parte real negativa. Pela proposição 5.1 verifica-se que se k_p e k_v forem simétricas positivas definidas então os pólos têm parte real negativa [36]. Isto é um resultado muito importante, mas não chega porque não permite definir a dinâmica do erro. Portanto, consegue-se garantir a estabilidade mas não se consegue alocar os pólos em valores desejados. Este facto pode ser verificado mais à frente nos resultados da simulação deste controlador (ver figura 5.2).

Outro problema importante foi o facto do sistema ser subactuado. Ou seja, só se pode actuar nos graus de liberdade x, y, z e yaw, ficando o $roll$ e o $pitch$ sem actuação. Felizmente pode-se assumir que quando se actua no veículo com forças limitadas, as perturbações em $roll$ e em $pitch$ são de tal modo pequenas que podem ser desprezadas no movimento global do veículo. A razão desta assunção pode ser compreendida observando a matriz de actuação 5.8. Como se pode ver pelas linhas 4 e 5 os valores dos braços das forças para o $roll$ e o $pitch$ são significativamente mais pequenos do que os do yaw. A maior perturbação que se assiste é em $pitch$ (ver valores da linha 5), mas mesmo assim, por experiência prática em piscina pode-se dizer que não é suficientemente forte para levar o sistema à instabilidade.

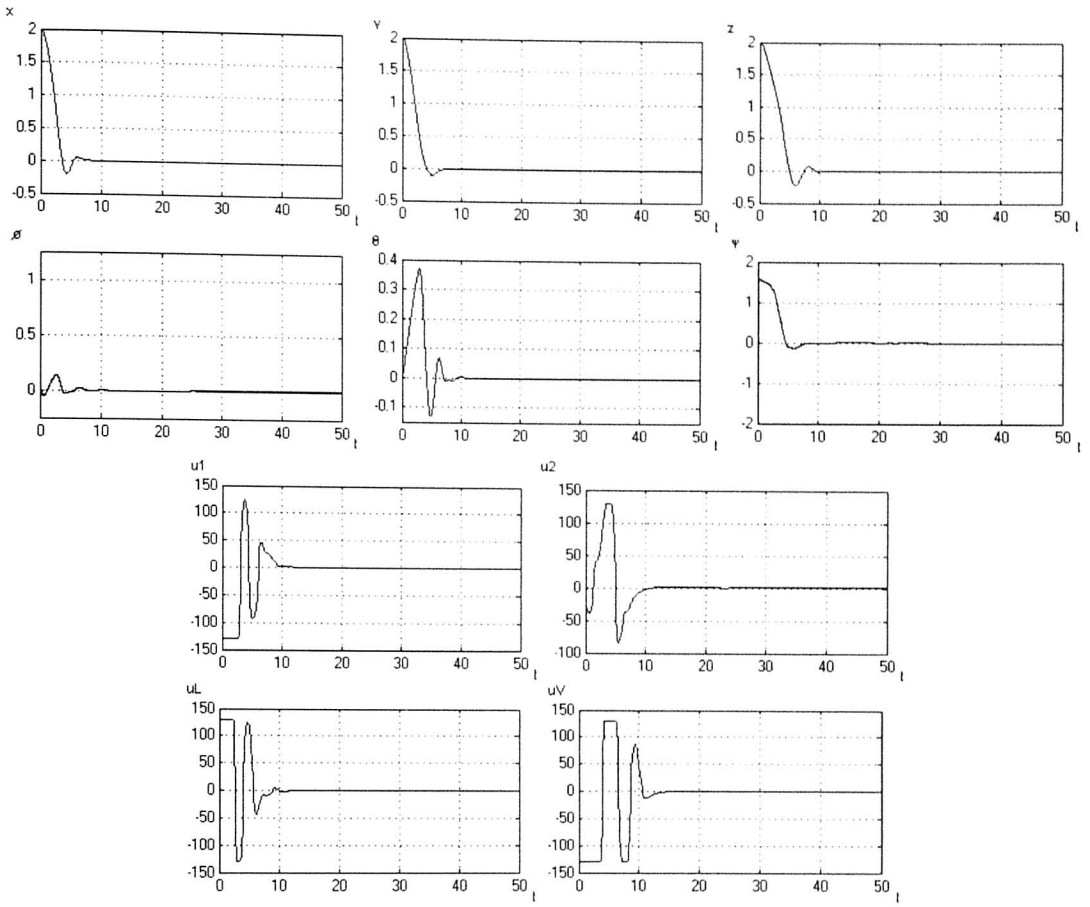


Figura 5.2- Resultados da simulação da estabilização do ROV pelo controlador de realimentação de estado às condições iniciais $(x_i, y_i, z_i, \psi_i) = (2m, 2m, 2m, \pi/2rad)$ (actuação nos motores em $Volt$)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -0.07 & 0.02 \\ -0.1 & -0.1 & 0 & 0.02 \\ 0.175 & -0.215 & 0.135 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \tag{5.8}$$

Portanto construiu-se um sistema reduzido (4×4) que é apresentado no anexo A.2 para efeitos de controlo.

Uma vez resolvidos todos problemas anteriores, foi então implementada a simulação. Os pólos escolhidos para equação de erro foram $[-2, -2, -2, -2, -2, -2, -2, -2, -2, -2, -2, -2,]$ (rad). Os resultados podem ser visualizados na figura 5.2. Pela figura pode-se verificar que a resposta do sistema realimentado é bastante rápida, mas tem um pequeno overshoot. Ao mesmo tempo também se pode observar saturação nas actuações. Para eliminar esse overshoot bem como

as saturações, devería-se reduzir a parte real dos pólos para reduzir o tempo de estabelecimento do sistema. Mas como já foi dito anteriormente, não foi possível reduzir a parte real dos pólos sem aumentar a parte imaginária significativamente. Isto leva a que a resposta do sistema tenha uma componente oscilatória importante que é indesejada.

5.3.2 Sliding Modes

À semelhança da simulação do controlador de realimentação de estado, também nesta simulação foi necessário assentar em alguns pressupostos. O facto de se assumir que o roll e o pitch (que não tem actuação) serem desprezáveis permitiu concluir que se podia usar um modelo simplificado de 4 graus de liberdade.

Para sintetizar uma lei de controlo multivariável [18] definiu-se:

- uma função de Lyapunov da forma

$$V(s,t) = \frac{1}{2} s^T M s \quad , \quad M = M^T > 0,$$

- uma superfície de deslizamento igual à expressão 3.21

$$s = \dot{\tilde{x}} + \lambda \tilde{x}$$

onde $\tilde{x} = x - x_d$ é o erro do sistema.

- um vector de referência virtual x_r que satisfaça

$$s = \dot{x} - \dot{x}_r \quad \text{onde} \quad \dot{x}_r = \dot{x}_d - \lambda \tilde{x} \quad \text{e}$$

- um vector de referência virtual q_r (referencial do veículo) satisfazendo

$$\dot{x}_r = J(x)\dot{q}_r.$$

Assim foi obtida a seguinte lei de controlo:

$$u = B^{-1} \left(\underbrace{\hat{M}\ddot{q}_r + \hat{C}\dot{q}_r + \hat{D}\dot{q}_r + \hat{g}}_{\text{Termo de "feedforward"}} - \underbrace{J^T K_D s}_{\text{PD}} - \underbrace{K \times \text{sgn}(J^{-1}s)}_{\text{Robustecimento}} \right) \tag{5.9}$$

onde

$$\begin{aligned} \dot{q}_r &= J^{-1}\dot{x}_r \\ \ddot{q}_r &= J^{-1}(\ddot{x}_r - \dot{J}J^{-1}\dot{x}_r) \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= \dot{x}_d - \lambda\tilde{x} \\ \ddot{x}_r &= \ddot{x}_d - \lambda\,\dot{\tilde{x}} \end{aligned}$$

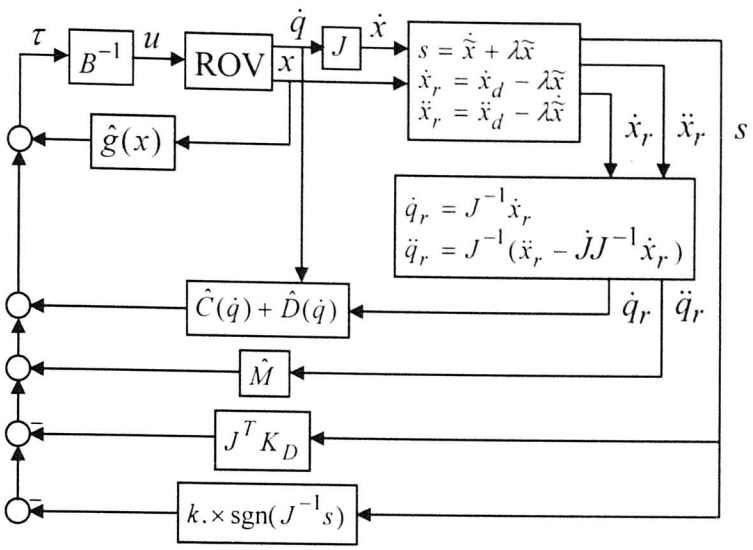


Figura 5.3- Diagrama de blocos da lei de controlo baseada em Sliding Modes

O diagrama de blocos da figura 5.3 resume a estrutura do controlador baseado em sliding modes.

Pela equação 5.9 pode-se verificar que existem três contribuições principais. A primeira corresponde a um termo de "feedforward", o segundo é um controlador PD e o último termo é o que dá robustez ao controlador.

Para que $\dot{V} \leq 0$ é necessário que

$$k_i \geq \left| \hat{M}\ddot{q}_r + \tilde{C}(\dot{q})\dot{q}_r + \tilde{D}(\dot{q})\dot{q}_r + \tilde{g}(x) \right|_i + l_i, \quad l_i > 0$$

onde $\tilde{M} = \hat{M} - M$, $\tilde{C} = \hat{C} - C$, $\tilde{D} = \hat{D} - D$ e $\tilde{g} = \hat{g} - g$. Esta é a chamada condição de deslizamento.

Para testar este controlador foi montada uma simulação que permitiu testar o controlador 5.9. A figura 5.4 mostra os resultados da estabilização da plataforma no ponto $(0m, 0m, 0m, 0rad)$. As condições iniciais foram $(2m, 2m, 2m, \pi/2rad)$. Estas condições iniciais pretendem simular perturbações em todos os graus de liberdade controláveis do sistema. Estas perturbações (lineares de $2m$ e angular de 90^o) dão origem a uma saturação dos actuadores. Embora essa saturação não seja muito prolongada, o que é certo é que ela existe e como se sabe, nessa altura o sistema fica em malha aberta. Mesmo assim, o controlador conseguiu compensar as perturbações simuladas. De qualquer forma este quadro ainda pode ser piorado se pensarmos que existem incertezas nos parâmetros do modelo ou então que é usado um modelo simplificado. Nestas circunstâncias a actuação do controlador pode ser ainda maior que no caso anterior, resultando assim numa saturação do actuador mais acentuada.

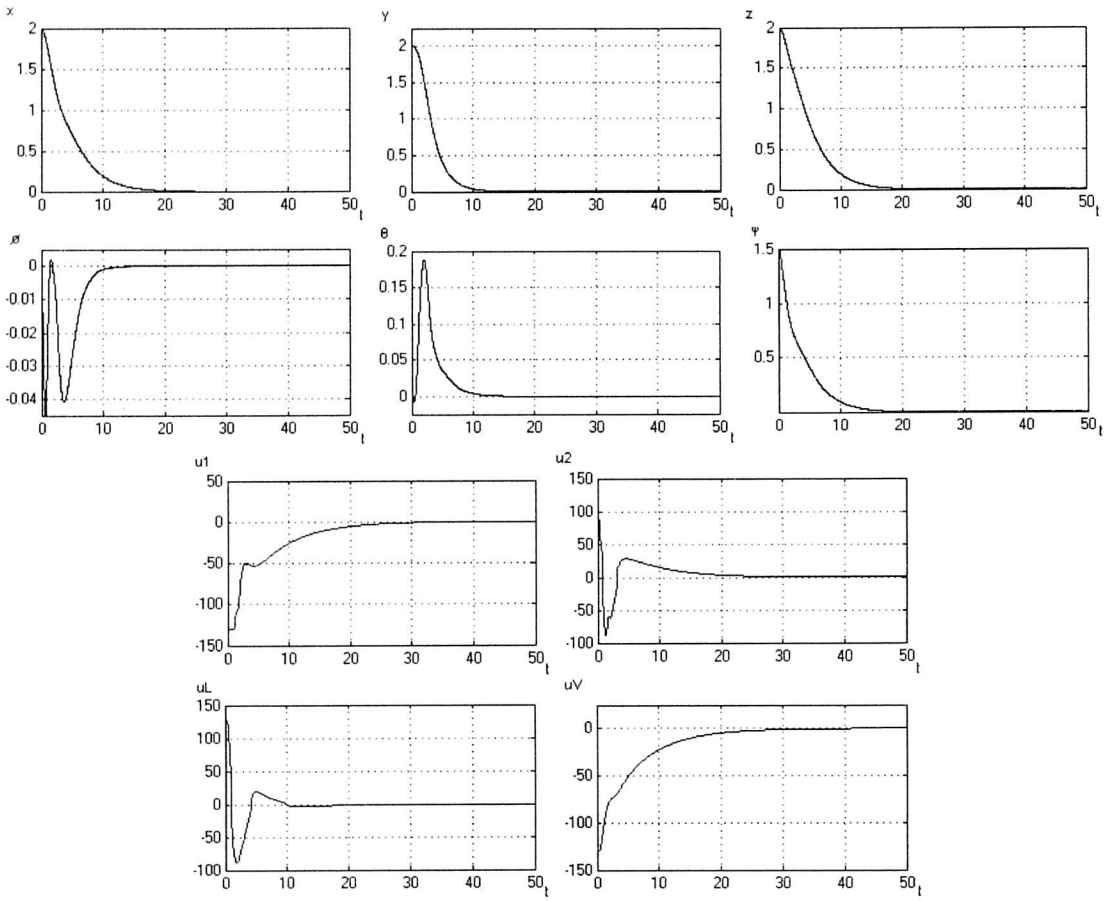


Figura 5.4- Resultados da simulação da estabilização do ROV pelo controlador de sliding modes às condições iniciais $(x_i, y_i, z_i, \psi_i) = (2m, 2m, 2m, \pi/2rad)$ (actuação nos motores em $Volt$)

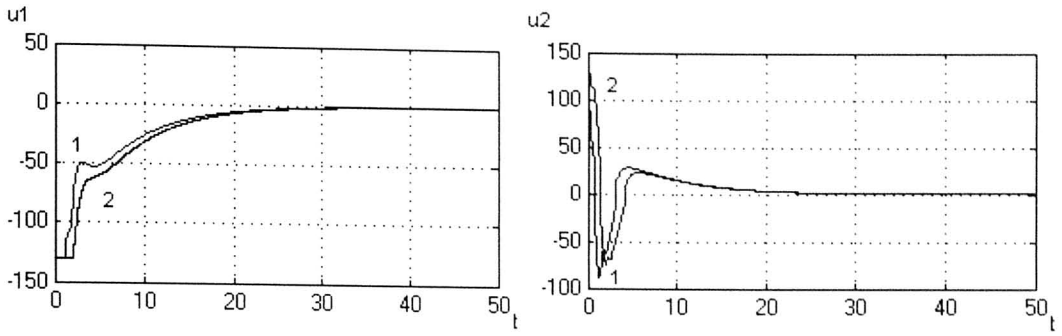


Figura 5.5- Comparação dos dois sinais de controlo u1 e u2 antes de alterar os parâmetros do modelo (1) e depois de aumentar os parâmetros do modelo mais 50% (2) (em $Volt$)

Para verificar o efeito da variação dos parâmetros do modelo no sistema realimentado considerou-se que estes poderiam variar entre -50% a $+50\%$ face aos nominais. Para o movimento apresentado na simulação anterior, os parâmetros que mais o influenciam e ao mesmo tempo os menos conhecidos são: I_{zz}, $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, $Z_{\dot{w}}$, $N_{\dot{r}}$, $X_{u|u|}$, $Y_{v|v|}$, $Z_{w|w|}$, $N_{r|r|}$, X_u, Y_v, Z_w, N_r. Todos estes parâmetros foram aumentados em 50%. Esta medida tem por objectivo tornar a plataforma mais lenta dado que se aumentou os parâmetros de inércia, forças de drag, etc. Os resultados de actuação em x são apresentados na figura 5.5. Nesta figura pode-se verificar que a saturação de $u1$ foi mais prolongada. No caso de $u2$, inicialmente nem sequer estava saturado, mas quando se aumentou os parâmetros do modelo já ocorreu a saturação.

Se os actuadores começam a saturar para um erro de $2m$, então se este fosse muito maior, constituiria uma dificuldade séria porque o sistema de controlo nunca poderia satisfazer os requisitos. Para verificar este ponto, foram definidas novas condições iniciais, desta vez um pouco exageradas $(50, 0, 0, 0)$. O resultado é apresentado na figura 5.6.

Os resultados desta simulação permitem constatar uma saturação exagerada dos actuadores. Embora esta saturação não tenha dado origem a instabilidade, pode-se verificar que a forma como o veículo convergiu para o ponto $(0, 0, 0, 0)$ não foi a melhor. Se observarmos a orientação do veículo, verificamos que a forma como ele se deslocou em x dos $50m$ até à posição $0m$ não foi como era de esperar. O veículo em vez de se deslocar para trás sempre com um ângulo de orientação nulo, no início começou por fazer isso mesmo mas depois começou a rodar porque os dois motores traseiros estavam saturados, e como já se viu antes, a diferença de braços de força dos dois motores é diferente, o que faz com que o veículo rode. Ora quando o veículo roda 180^o o que acontece é que os motores invertem o sentido de rotação para conseguir levar a cabo a sua missão que é, andar para trás. Tudo isto aconteceu porque o erro era muito grande. Os parâmetros do controlador que foram usados nas duas últimas simulações foram $\lambda = 0.3$, $K_D = 100 * I_{4\times4}$

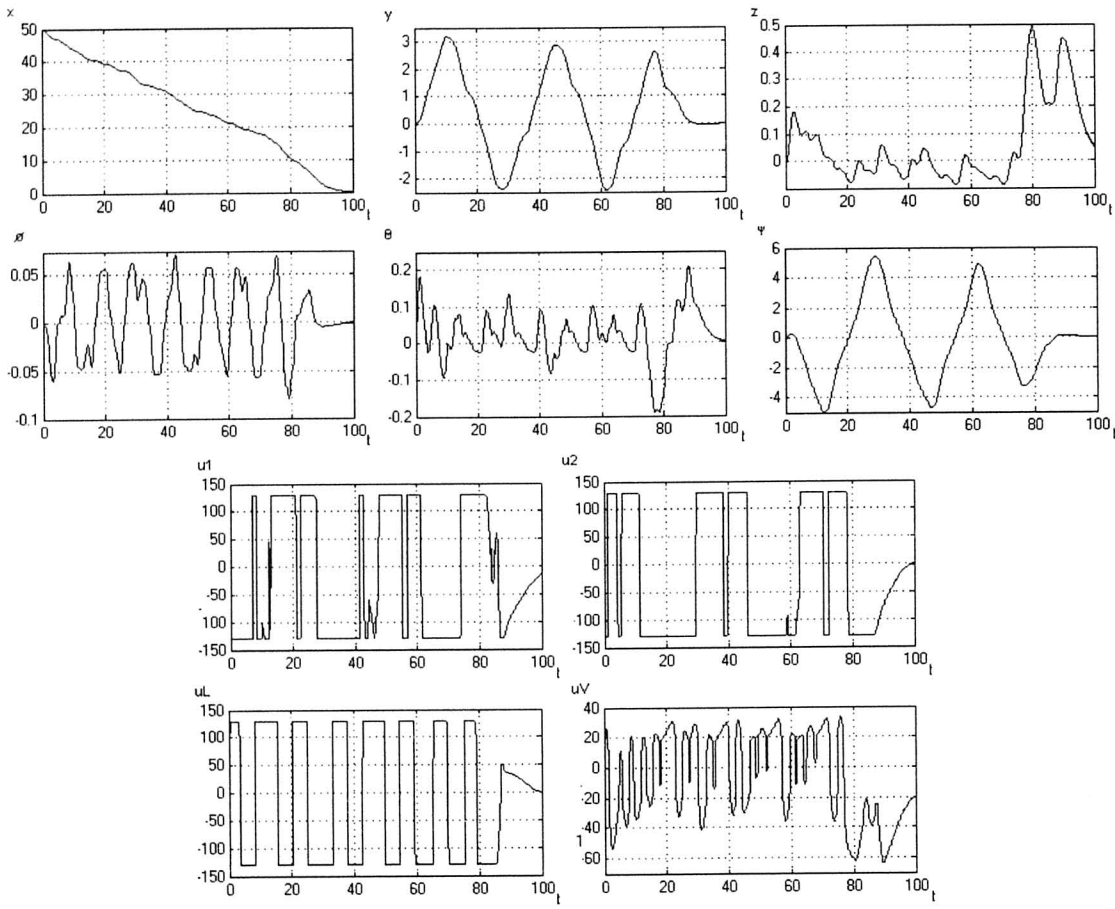


Figura 5.6- Resultados da simulação da estabilização do ROV pelo controlador de sliding modes às condições iniciais $(x_i, y_i, z_i, \psi_i) = (50m, 0m, 0m, 0rad)$ (actuação nos motores em $Volt$)

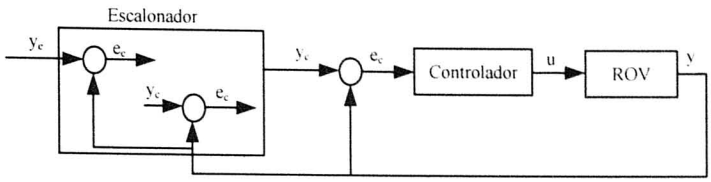


Figura 5.7- Arquitectura de controlo para o controlo em horizonte deslizante

e $K = [1, 1, 1, 1]^T$.

Para ultrapassar esta dificuldade é necessário fazer com que o erro seja pequeno. Vamos pegar no problema de regulação em vez do problema de estabilização anterior. Ou seja, vamos admitir que o objectivo agora era levar o veículo para a posição $x = 50m$ com condições iniciais $(0, 0, 0, 0)$. Uma forma de fazer isto seria por exemplo controlar o erro em horizonte deslizante. A ideia é usar a arquitectura de controlo sugerida na figura 5.7. Para além do sistema realimentado (controlador e ROV), usa-se um sistema escalonador de referências que permite considerar um conjunto de referências sucessivas para as quais o erro é menor. O algoritmo do escalonador de referências está apresentado na figura 5.8. O escalonador verifica se o erro e_e é inferior ao erro máximo $\Delta_{\max}$ a que o controlador pode ser submetido. Se for, então aplica a referência associada a esse erro directamente ao controlador. Se for superior a $\Delta_{\max}$, então calcula uma referência para o controlador y_c com base na posição actual mais um incremento $\Delta_{\max}$. A referência do controlador volta a ser aumentada assim que o erro do controlador desce abaixo do erro mínimo $\Delta_{\min}$. A referência é incrementada sucessivamente até que o erro do escalonador e_e seja inferior a $\Delta_{\max}$. Caso o erro do controlador e_c seja superior a $\Delta_{\max}$, significa que o controlador não está a conseguir controlar como previsto dando origem a um erro de seguimento. O parâmetro $\Delta_{\min}$ representa o erro abaixo do qual o escalonador gera outra referência. O parâmetro $\Delta_{\max}$ representa a amplitude da referência seguinte face à posição actual. Os resultados da simulação são apresentados na figura 5.9. Como se pode verificar, este método permite a eliminação o mais rápida possível do erro, e simultaneamente deixar uma margem para a saturação dos actuadores que permite a regulação necessária. Outro ponto interessante, é o facto do movimento para trás com orientação constante é feito desta vez com velocidade constante. Isto deve-se ao facto da actuação ser aproximadamente constante. Por outro lado a actuação é constante por serem aplicadas sucessivas referências (pequenas) sempre da mesma amplitude em vez de uma única referência enorme. Os parâmetros do controlador para esta simulação foram $\lambda = 1$, $K_D = 100 * I_{4\times4}$ e $K = [1, 1, 1, 1]^T$.

Uma forma de fazer seguimento de trajectórias mais correcta é fazendo recurso à geometria diferencial [38] [39]. A próxima secção mostra alguns resultados do uso desta abordagem.

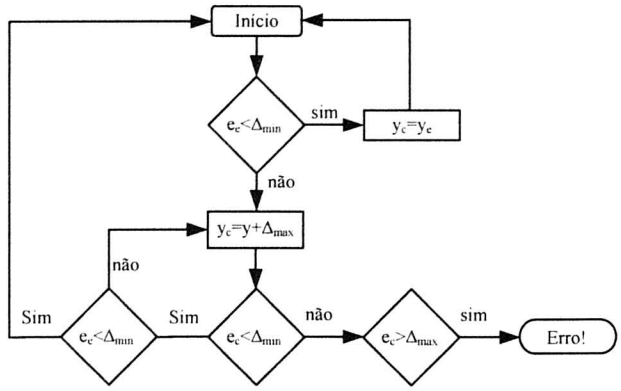


Figura 5.8- Algoritmo para o escalonador de referências

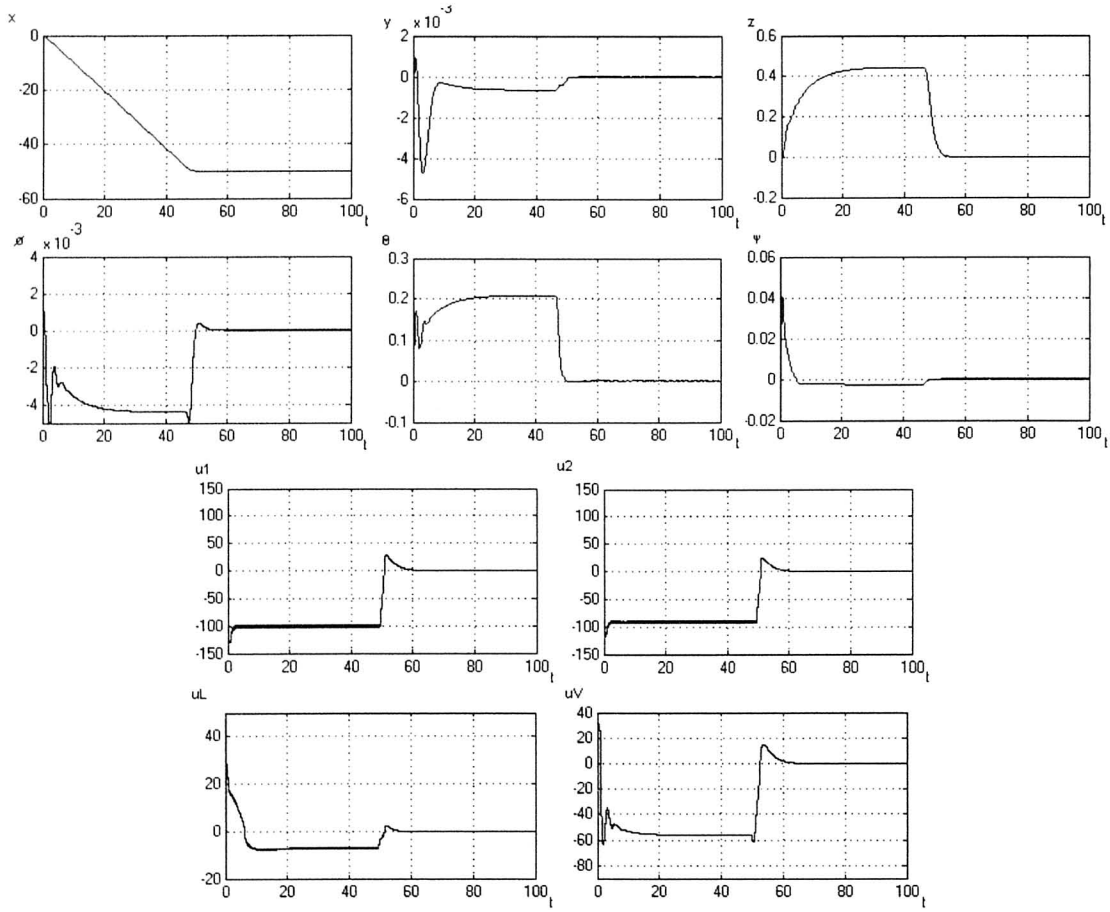


Figura 5.9- Resultados da simulação da regulação do ROV para a posição $x = -50m$ com condições iniciais nulas e sujeito ao controlo deslizante (posições em m, orientações em rad e actuações em $Volt$)

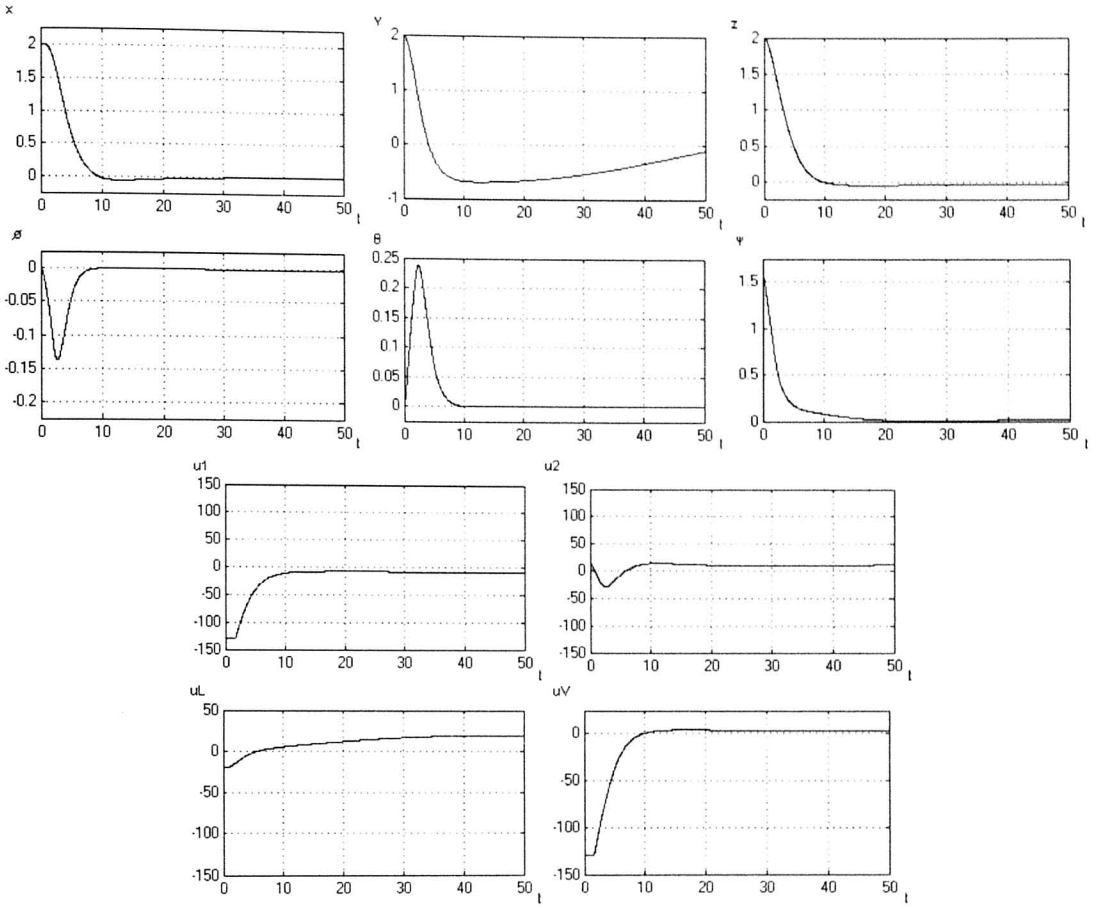


Figura 5.10- Resultados da simulação da estabilização do ROV pelos controladores PID às condições iniciais $(x_i, y_i, z_i, \psi_i) = (2m, 2m, 2m, \pi/2rad)$ (actuação nos motores em V)

5.3.3 PID

Antes de fechar esta secção, convêm fazer uma comparação entre os controladores não lineares com o controlador PID. Para tal implementou-se uma simulação em que cada PID controla cada um dos graus de liberdade desacopladamente. Para fazer uma comparação mais razoável, usou-se o mesmo problema de controlo que tem vindo a ser usado nos controladores anteriores que é estabilizar o sistema no ponto $(0, 0, 0, 0)$ partindo do princípio que o sistema teve uma perturbação que o levou para o estado $(2, 2, 2, \pi/2)$. Os parâmetros dos PIDs foram sintonizados para que o tempo de estabelecimento fosse aproximadamente o dos outros controladores. Os resultados que se obtiveram não foram muito bons em termos de overshoot e erro em regime permanente como mostra a figura 5.10. Mais ainda verificou-se que para outras trajectórias, os parâmeros dos PIDs têm que ser novamente ajustados, caso contrário a resposta do sistema realimentado

vem seriamente degradada. Isto acontece porque os controladores têm que compensar as não linearidades do sistema. Uma forma de minimizar este problema seria entrar no controlador com uma componente de "feedforward", e os PIDs apenas compensariam as incertezas de parâmetros e pequenas perturbações do sistema.

5.4 Seguimento de Trajectórias

À semelhança do controlador de realimentação de estado, também o controlador baseado em sliding modes tem como entradas a posição a velocidade e a aceleração no referencial inercial. Para efeitos de controlo em posição basta colocar a 0 a velocidade e a aceleração que o controlador seguirá as referências de posição. Mas se o objectivo for seguir trajectórias, então é necessário especificar a velocidade e a aceleração do veículo. No Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas existe um sistema de geração de trajectórias [21] que gera todos os dados de entrada para o controlador. Este sistema recebe como entrada uma trajectória como a da figura 5.11 (a tracejado), que é uma trajectória não realizável devido às descontinuidades, e aproxima essa trajectória por polinómios. Esta acção tem duas consequências importantes. Por um lado a trajectória é suavizada o que facilita a sua execução por parte do controlador. Por outro lado facilita a diferenciação de funções para poder calcular as referências de velocidade e de aceleração isto porque é fácil diferenciar polinómios. A figura 5.11 (a tracejado) retrata uma trajectória típica de inspecção subaquática. A trajectória consiste em movimentar-se para o lado direito 10m, depois afunda 1m, volta a movimentar-se 9m para a esquerda, volta a afundar e assim sucessivamente até que quando chega aos 5m de profundidade, volta à posição inicial. A linha contínua da mesma figura é a aproximação por polinómios que o sistema de geração de trajectórias calculou. É certo que a aproximação não foi muito boa, mas pode-se aumentar o grau dos polinómios. As referências a fornecer ao controlador são apresentadas na figura 5.12.

Para verificar a capacidade de seguimento desta trajectória, foi implementada outra simulação com as referências indexadas ao tempo da figura 5.12. Os resultados do seguimento da trajectória desejada é apresentado na figura 5.13. Nessa figura pode-se constatar que a trajectória desejada e a trajectória real são quase coincidentes. Isto é sinal de um seguimento fiel. O controlador teve que tratar de dois problemas. Teve que compensar erros de modelo e o facto de não haver actuação em roll e pitch.

5.5 Controlo do Pan&Tilt

Tal como já foi apresentado anteriormente, o objectivo deste sistema é possibilitar que a câmara permaneça apontada para o alvo. Para tal é necessário considerar o modelo do pan&tilt incluindo

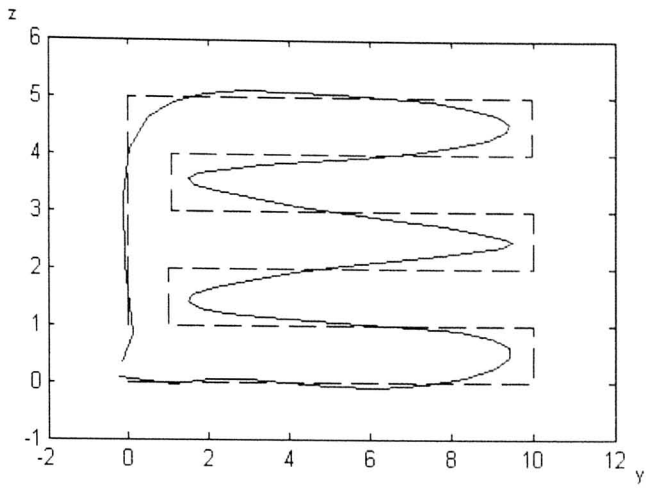


Figura 5.11- Inspecção de uma parede (em m)

a cinemática e a dinâmica.

O controlo do sistema ROV e Pan&Tilt poderia ser endereçado de duas formas. Na primeira, poder-se-ia sintetizar um controlador para a plataforma (ROV) e outro para o Pan&Tilt. Obviamente que a dinâmica do Pan&Tilt teria que ser mais rápida que a da plataforma, caso contrário o nosso fim não seria atingido. No segundo caso, a ideia era integrar no modelo da plataforma a dinâmica do Pan&tilt. Neste caso, teríamos um controlo integrado dos dois sistemas como um sistema global. Pela sua simplicidade a opção escolhida foi a primeira.

O Pan&Tilt é um sistema composto por um motor DC e uma caixa de velocidades. Este sistema foi adquirido comercialmente, e o fabricante não disponibiliza os parâmetros do motor e da caixa. Ao contrário, fornece apenas dois parâmetros do sistema completo. Um deles é o binário máximo produzido pelo Pan&Tilt para fazer rodar a câmara, que neste caso é 6N. Mas o parâmetro mais importante é a velocidade de rotação do Pan&Tilt nos seus dois graus de liberdade que é 28^o/s @ 24V. A partir destes parâmetros, e assumindo uma constante de tempo para a velocidade de rotação do Pan&Tilt de 50ms (ver figura 5.14), podemos obter um modelo de 2^aordem para cada grau de liberdade do mesmo.

A equação que traduz este comportamento é dada por

$$\dot{\theta}(t) = (1 - e^{-\frac{1}{\tau}t})u(t)$$

que em Laplace

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{k/\tau}{s + 1/\tau}$$

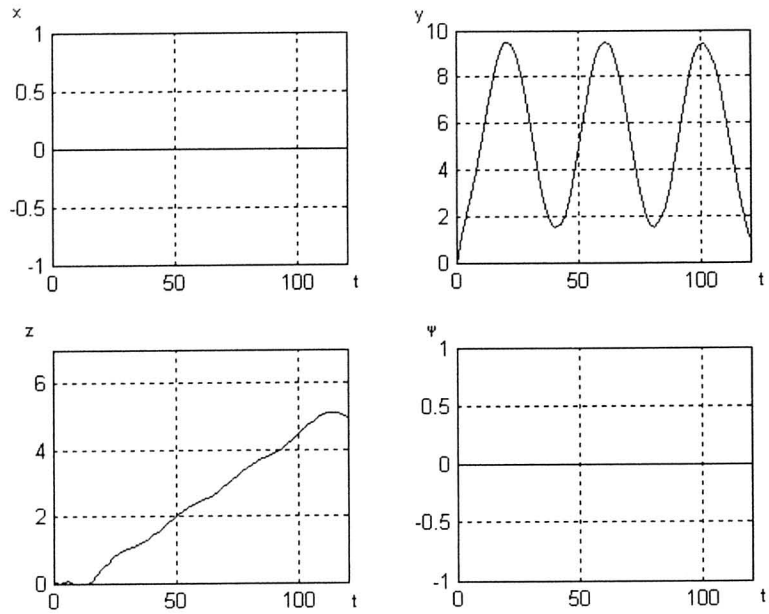


Figura 5.12- Referências de posição a aplicar ao controlador (posições em m e orientação em rad)

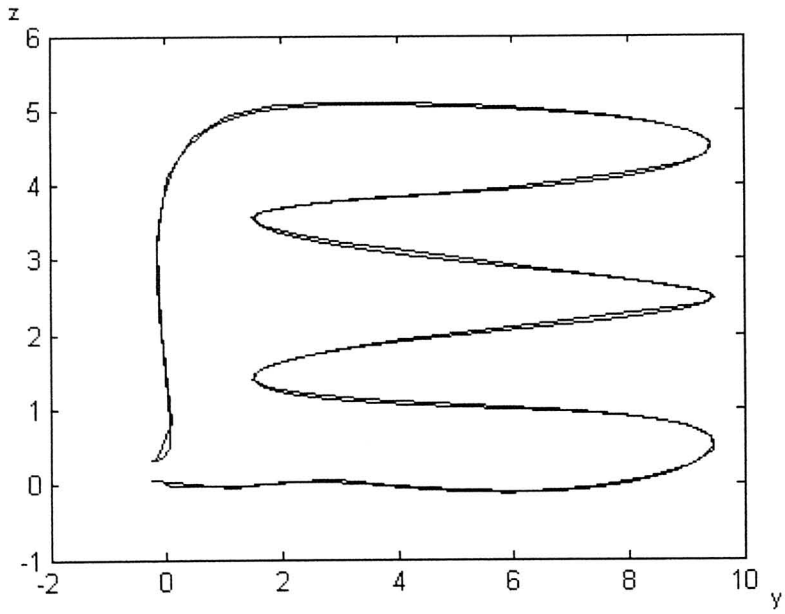


Figura 5.13- Comparação entre a trajectória desejada e a simulada (em m)

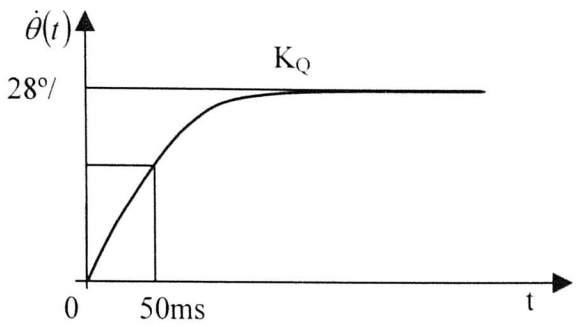


Figura 5.14- Dinâmica do Pan&Tilt

o que faz com que a equação diferencial do sistema venha

$$\ddot{\theta}(s) + \frac{1}{\tau}\dot{\theta}(s) = k\frac{1}{\tau}u(s)$$

passando para o espaço de estados,

$$\begin{aligned} \theta &= x_1 \\ \dot{\theta} &= x_2 = \dot{x}_1 \\ \ddot{\theta} &= \dot{x}_2 = -\frac{1}{\tau}x_2 + k\frac{1}{\tau}u(s) \end{aligned}$$

vem

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{28}{24}\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} u$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

As saídas y_1 e y_2 são respectivamente a orientação e a sua velocidade. Este modelo é obviamente só para um grau de liberdade do Pan&Tilt, portanto é necessário outro modelo igual a este para o outro grau de liberdade.

Para validar este modelo foi feita uma pequena simulação. O resultado pode ser apresentado na figura 5.15, e é absolutamente compatível com o especificado na figura 5.14.

Para concluir, resta ainda descobrir o modelo cinemático deste problema de controlo. Como foi explicado antes, o problema de controlo é o de seguir um ponto alvo independentemente das perturbações que a plataforma possa sofrer. O seguimento desse alvo é accionado por um botão quando o operador da plataforma encontra um pormenor com interesse e pretende inspeccioná-lo com mais detalhe. Nessa altura o ponto alvo tem que ser guardado para depois ser seguido pelo Pan&Tilt quando a plataforma se move devido a perturbações diversas. Vejamos o que se passa em termos vectoriais na figura 5.16. Existem três referenciais na análise deste problema.

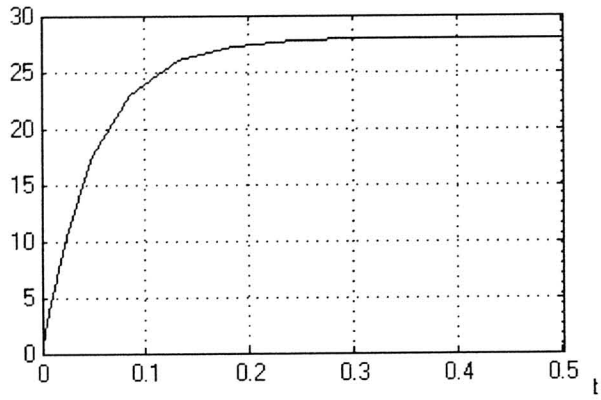


Figura 5.15- Resposta do modelo do Pan&Tilt

O referencial inercial (x, y, z), o referencial veículo com o veículo (x', y', z') e o referencial fixo com o Pan&Tilt (x'', y'', z'').

Os passos que se tem que seguir para controlar a orientação da câmara são os seguintes:

1- Começa-se por guardar as coordenadas do ponto alvo quando o operador carrega num botão do joystick. Pela figura 5.16 pode-se ver que

$$\begin{aligned} X_P &= X_{ROV} + J_1 X'_P + J_1 I_{3\times 3} X''_P \\ X_P &= X_{ROV} + J_1 (X'_P + X''_P). \end{aligned}$$

A matriz J_1 é a matriz de rotação que existe entre o referencial inercial e o referencial do veículo e já foi apresentada na secção 4.2.3. $I_{3\times 3}$ representa uma matriz identidade porque do referencial do veículo para o referencial do Pan&Tilt não há nenhuma rotação, porque neste passo assume-se que quando se carrega no botão, a plataforma está perpendicularmente orientada para a parede a ser inspeccionada.

2- Uma vez guardado o ponto alvo, e assumindo que a plataforma se move em qualquer um dos graus de liberdade, pode-se calcular o novo vector de posição do alvo no referencial do Pan&Tilt e resolver a equação anterior em ordem a X''_P.

$$X''_P = J_1^{-1}(X_P - X_{ROV} - J_1 X'_P)$$

3- Seguidamente, converte-se o vector X'_P para coordenadas esféricas fornecendo assim os dois ângulos de referência que o Pan&Tilt tem que rodar para a câmara se manter orientada para o alvo.

$$\begin{aligned} \theta &= -\sin^{-1}\left(\frac{X''_{P_Z}}{\sqrt{X''^2_{P_X} + X''^2_{P_Y} + X''^2_{P_Z}}}\right) \\ \psi &= \tan^{-1}\left(\frac{X''_{P_Y}}{X''_{P_X}}\right) \end{aligned}$$

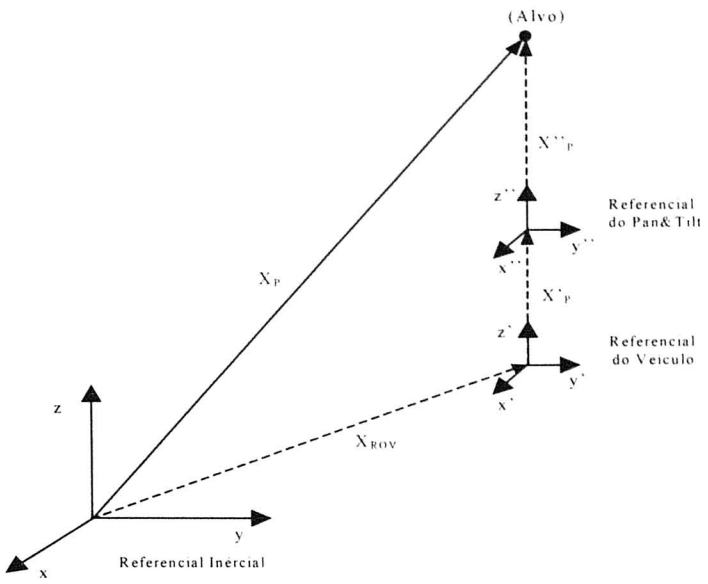


Figura 5.16- Referenciais envolvidos no cálculo dos ângulos de referência do Pan&Tilt

4- Por fim, implementou-se um simples controlador do tipo PID para seguir as referências geradas pelo algoritmo anterior. Os parâmetros do controlador PID foram ajustados experimentalmente de forma a seguir fielmente essas referências.

Em jeito de conclusão apresenta-se ainda uma simulação do sistema global (Plataforma +Pan&Tilt) para validar o controlo do Pan&Tilt. A figura 5.17 mostra os resultados obtidos. O movimento programado para a plataforma foi, deslocar-se para a frente até à posição x=10m (figura 5.17a)). Aos 10 segundos esta tarefa está completamente concluída. Aos 12s o operador da plataforma carrega no botão e o sistema mede a distância à parede que no caso desta simulação foi 1m, e guarda as coordenadas do alvo. Seguidamente, aos 13s a plataforma recebe um comando para se mover para a direita 1m (figura 5.17b)). Ora como se pode verificar pela figura 5.17d) o Pan&Tilt começa a rodar em yaw no sentido contrário. De notar que o P&T rodou no máximo 0.8rad (45º) que é exactamente o ângulo que se estava à espera de encontrar. Para t=22s é dado novo comando à plataforma para se deslocar agora 1m para a esquerda regressando novamente à posição inicial, e mais uma vez pela figura 5.17d) se pode verificar que a câmara seguiu o alvo na perfeição. No final da simulação temos o veículo orientado para a parede e os ângulos do Pan&Tilt são praticamente nulos.

Como não houve alterações significativas na profundidade da plataforma ou no picth, o ângulo θ não foi muito alterado. Contudo se se tivessem alterado, ter-se-ia registado um comportamento parecido com o que foi registado na simulação anterior.

Resta ainda dizer que este problema de controlo só faz sentido se considerarmos o caso do

BIBLIOTECA F.E. PORTO

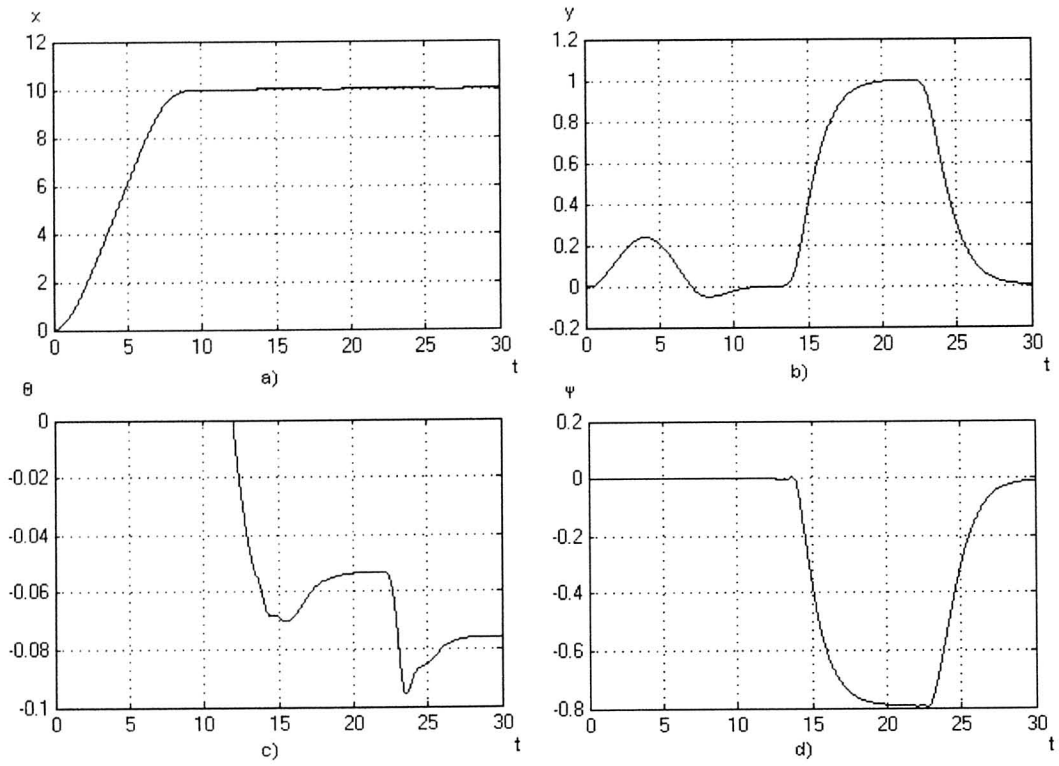


Figura 5.17- Resultados da simulação do sistema Plataforma-Pan&Tilt (posições em m e orientação em rad)

sistema do Pan&Tilt ser mais rápido do que as perturbações que o ROV possa sofrer.

Um exemplo de outro cenário que também poderia ser explorado, seria a inspecção de uma sequência de alvos como sugere a figura 5.18. Vamos admitir que os elementos E são pilares que sustentam uma infra-estrutura subaquática. Como existe todo o interesse em fazer a inspecção em modo automático, é necessário que o Pan&Tilt oriente a câmara à medida que a plataforma de inspecção se desloca. Mais ainda, pode-se gerar uma trajectória para as orientações do Pan&Tilt a partir da trajectória do veículo.

5.6 Conclusões

Neste capítulo começou-se por apresentar a arquitectura de controlo usada no ROV do sistema IES. Seguidamente, foram apresentados dois controladores: o de linearização por realimentação de estado e o de sliding modes. Para cada controlador foi efectuada uma simulação para o testar. Pelos resultados obtidos nas simulações pode-se concluir que os dois controladores conseguem estabilizar a plataforma de inspecção mesmo na presença de incerteza dos parâmetros. Contudo

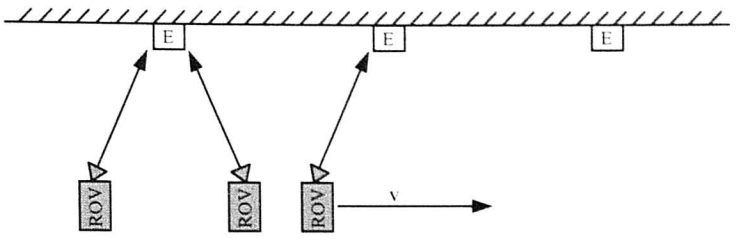


Figura 5.18- Cenário possível de controlo do Pan&Tilt

o controlador de linearização por realimentação de estado apresentou uma desvantagem no que respeita à colocação dos pólos da dinâmica do erro. Por outro lado o controlador de sliding modes foi o controlador que melhores resultados apresentou. Foi feita ainda uma simulação com controladores PID. Os seus resultados não foram tão bons como os do controlador de sliding modes. Verificou-se ainda que os parâmetros dos PIDs tinham que ser ajustados à medida que se mudava de trajectória, o que faz do uso dos controladores PID por si só, não aconselhados para este tipo de aplicações. O controlador de sliding modes foi ainda sujeito a uma trajectória produzida por um sistema de geração de trajectórias baseado em geometria diferencial e mostrou ser quase perfeito no seguimento dessa trajectória.

Depois abordou-se o problema do controlo da orientação da câmara (Pan&Tilt). Neste caso foi apresentado um cenário de operação onde a ideia seria compensar as perturbações que o controlador de posicionamento da plataforma não conseguisse compensar. Os resultados dessa simulação mostraram que no caso da plataforma se desviar da posição desejada, a câmara orientava-se para o alvo a inspeccionar independentemente dessas perturbações.

Os controladores apresentados neste capítulos são controladores multivariáveis. Porém, à luz da secção da arquitectura de controlo, poder-se-ia desenvolver controladores orientados por manobra. Por exemplo, uma manobra pode ter um modelo mais simples que o modelo completo do ROV e consequentemente um controlador. Esse trabalho não é feito nesta dissertação. Será objecto de estudo no futuro.

Capítulo 6
Conclusões e Trabalho Futuro

Num cenário de inspecção de infra-estruturas subaquáticas com um veículo operado remotamente, colocam-se alguns problemas no que diz respeito ao seu controlo e posicionamento. As fontes de perturbações ao movimento da plataforma de inspecção são diversas como as correntes, a ondulação e a tensão do cabo. Todas essas perturbações dificultam o trabalho do operador do sistema. Esse operador deverá possuir alguma experiência na operação deste tipo de sistemas para conseguir movimentar o veículo para levar a cabo a sua tarefa de posicionar a plataforma nos locais onde se pretende inspeccionar.

O principal objectivo desta dissertação é o projecto de um sistema de controlo para o ROV que facilite as tarefas de inspecção. Na realidade, este sistema de controlo é composto por dois controladores: um para o posicionamento da plataforma de inspecção e outro para controlar a orientação do Pan&Tilt. Este último permite compensar as perturbações que o sistema de controlo da plataforma não consiga compensar, orientando a câmara de vídeo de forma a que o operador do sistema não se aperceba que a plataforma se deslocou da posição pretendida.

Sendo necessário o modelo para controlar qualquer sistema, começou-se por modelizar o ROV. O modelo foi decomposto em três blocos principais:

- Modelo do corpo rígido no meio aquático. Este modelo entra em consideração com as inércias e as forças a que o veículo está sujeito, que são a força centripta, de coriólis, de atritos hidrodinâmicos e das forças de restabelecimento como é o caso da força gravítica e de flutuação.
- Modelo do sistema de propulsão. Neste modelo fazem parte dois submodelos: o modelo do motor e o modelo da hélice.
- Modelo das perturbações (correntes, ondulação e cabo).

Para dar um carácter mais prático ao modelo estudado foi implementada uma simulação em MATLAB, e para validar o modelo encontrado foi feita uma missão com o veículo para adquirir dados de navegação para poder comparar com o modelo computacional. Pela comparação desses dados, verificou-se que existem alguns erros mas no geral, nota-se uma tendência de seguimento dos dados simulados face aos reais. Portanto será necessário ajustar os parâmetros do modelo de forma a que o modelo traduza melhor o comportamento real do ROV. Isto será objecto de trabalho futuro.

Do ponto de vista de controlo da plataforma, assumiu-se que o modelo adquirido é real, e foram implementados três controladores: dois multivariáveis e um desacoplado. Os controladores

multivariáveis foram baseados em linearização por realimentação de estado e sliding modes. O terceiro controlador foi baseado em quatro simples PIDs controlando cada um o seu grau de liberdade independentemente.

As principais conclusões a tirar são as seguintes:

- O controlador que deu melhores resultados face à variação dos parâmetros do modelo foi o controlador de sliding modes.
- O controlador de linearização por realimentação de estado não permitiu alocar os pólos da equação diferencial do erro em posições desejadas, sendo esta a principal desvantagem a apresentar.
- Os parâmetros dos controladores PID têm que ser afinados sempre que se altera a trajectória desejada, porque existem acoplamentos entre alguns graus de liberdade e que os controladores não estão à espera, constituindo assim uma fonte de perturbações a que cada PID está sujeito.

Do ponto de vista do controlo do Pan&Tilt, partiu-se do princípio que o controlo da plataforma era um dado adquirido e como tal dimensionou-se um controlador PID para controlar a orientação da câmara. Considerou-se um cenário em que o ROV está parado para inspeccionar um detalhe que pareceu importante ao operador do sistema quando executava a trajectória de inspecção desejada. Assim, se a plataforma se afastasse da sua posição desejada por acção de diversos tipos de perturbações como correntes, ondas e cabo, verificou-se que o controlador do Pan&Tilt conseguiu compensar esses efeitos, proporcionando melhores condições para a prática das inspecções como era o objectivo inicial.

Como trabalho futuro destaca-se:

- a inclusão das perturbações no modelo do ROV como sendo as ondas, as correntes e o cordão umbilical.
- o refinamento dos parâmetros do modelo.
- a fusão da dinâmica do ROV com a do Pan&Tilt para se ter um controlo integrado dos dois.
- a demonstração de que os controladores da plataforma e do Pan&Tilt são os melhores.
- a consideração de modelos mais simples (por manobra) e controladores por manobra.
- a implementação dos controladores estudados nesta dissertação na plataforma de inspecção e o teste subsequente.
- a exploração de outras formas de inspecção. Neste trabalho assumiu-se desde o início que a forma de fazer a inspecção seria com o ROV perpendicularmente ao alvo. Ficou por estudar a possibilidade de fazer inspecções com o veículo paralelamente ao alvo. Esta ideia surgiu quando se verificou que o ROV tem mais facilidade em se movimentar em x do que em y, o que permite que se faça a inspecção muito mais rápida. Este novo modelo de inspecção implica que o sistema de Pan&Tilt tenha a capacidade de rodar em torno de z quase os 360^o. Como isso não é problema, então esse estudo deverá ser feito.

Embora o calendário de actividades do projecto IES não tenha permitido ainda (pela altura da escrita desta dissertação) que se tenha implementado os controladores em causa, isso será feito a curto prazo. De qualquer forma, os controladores de sliding modes mostram (apenas

em simulações) grande potencial na obtenção de resultados pelo que será o controlador que será implementado no ROV.

Bibliografia

[1] *Danish Maritime Institute*. http://www.danmar.dk/.

[2] *DeepOcean Engineering*. http://www.deepocean.com/.

[3] *Ifremer*. http://www.ifremer.fr/fleet/systemes_sm/index.html.

[4] *Petrobras*. http://www2.petrobras.com.br/portal/tecnologia.htm.

[5] *The Control HandBook*. CRC Press in cooperation with IEEE Press, 1996.

[6] R. Bachmayer e L. L. Whitcomb. *A Four Quadrant Finite Dimensional Thruster Model*. ISOPE, 1999.

[7] J. Clynch, K. Schenebele, K. P. Heineman, B. Roditilitis e D. Young. *Monterey Bay Precise Positioning: Comparison of GPS Receiver Solutions Under Dynamic Solutions*. Inst. Navig., páginas 311–321, 1991.

[8] J. Bellingham T. Consi, U. Tedrow e D. Dimassa. *Hyperbolic Acoustic Navigation for Underwater Vehicles: Implementation and Demonstration*. AUV Symp. Tech., 1992.

[9] Alfredo Manuel de Oliveira Martins. *Especificação Do Sistema de Inspecção Submarina: PROJECTO IES*. Relatório técnico, FEUP, Fev2000.

[10] J. Borgues de Sousa, J. Karl Hedrick, Anouck Girard e William Webster. *A General Ship Control Framework*. OMAE, 2001.

[11] J. Borgues de Sousa e F. Lobo Pereira. *A Hybrid System Theory Framework for the Design of a Control Architecture for Multiple Autonomous Underwater Vehicles*. IEEE Simp. Ind. Electron, 1997.

[12] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar e B. A. Francis. *State Space Solutions to Standard H2 and Hoo Control Problems*. IEEE Transactions on Automatic Control, páginas 831–847, 1989.

[13] P. Egeskov, A. Bjerrum, A. Pascoal, Carlos Silvestre, Christian Aage e Leif W. Smitt. *Design, Construction and Hydrodynamic Testing of the Auv Marius*. AUV 94, 1994.

[14] S. Elliot e R. Olson. *Vehicle Tracking Using Advanced Acoustic Technology in an Ultra-Short Baseline System*. Marine Technology Society, ROV 84, páginas 42–44, 1984.

[15] M. J. Every e M. E. Davies. *Prediction on the Drag and Performance of Umbilical Cables*.

[16] Ola-Erik Fjellstad e T. I. Fossen. *Position and Attitude Tracking of AUV's: A Quaternion Feedback Approach*. IEEE J. Oceanic Eng., páginas 512–517, 1994.

[17] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Whiley and Sons, 1995.

[18] Thor Inge Fossen. *Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles (Tese de Mestrado)*. 1991.

[19] Sérgio L. Fraga, João B. Sousa, Anouck Girard e Alfredo Martins. *An Automated Maneuver Control Framework for a Remotely Operated Vehicle*. Oceans, 2001.

[20] Sérgio Loureiro Fraga. *Relatório Da Consola*. Relatório técnico, FEUP, 2001-11-29.

[21] Sérgio Loureiro Fraga. *Geração de Trajectórias - Aplicação a Veículos Subaquáticos (Tese de Mestrado)*. FEUP, 2002.

[22] Daniel Fryxell, Paulo Oliveira, António Pascoal e Carlos Silvestre. *An Integrated Approach to the Design and Analysis of Navigation, Guidance and Control Systems for AUV's*. ROV 95, 1995.

[23] Anouck Girard, João Borges de Sousa e J. Karl Hedrick. *Coordinated Control of Agent Formations in Uncertain Dynamic Environments*. ECC, 2001.

[24] Anouck R. Girard e J. Karl HedricK. *Dynamic Positioning Of Ships Using Nonlinear Dynamic Surface Control*. IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, Saint-Petersburg, Russia, 2001.

[25] Gabriel Grenon, P. Edgar An, Samuel M. Smith e Anthony J. Healey. *Enhancement of the Inertial Navigation System for the Morpheus Autonomous Underwater Vehicles*. IEEE J. Oceanic Eng., Vol 26, 2001.

[26] A. Healey e D. Lienard. *Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles*. IEEE J. Ocean Eng., páginas 327–339, 1993.

[27] A. J. Healey, S. M. Rock, S. Cody, D. Miles e J. P. Brown. *Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles*. IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 20:354–361, 1995.

[28] L. Hsu, R. Costa, F. Lizarralde, J. Cunha, J. Scieszko, D. Junior e A. Anna. *Underwater Vehicle Dynamic Positionning Based on a Passive Arm Measurement System*. Symp AUV Tech., páginas 128–133, 1994.

[29] F. H. Imlay. *The Complete Expressions for Added Mass of a Rigid Body Moving in an Ideal Fluid*. Relatório técnico, 1961.

[30] A. Isidori. *Nonlinear Control Systems. 2 Nd Ed.*. Springer-Verlag, 1989.

[31] R. Johnstone e D. Fries. *Simulation of a Submerged Autonomous Vehicle with Inertial Navigation*. DARPA/CSDL Symp. on Modeling and Simulation, 1988.

[32] H. K. Khalil. *Nonlinear Systems. 2 Nd Ed.* Prentice-Hall, 1996.

[33] S. Kwak, J. McKeon, J. Clynch e R. McGhee. *Incorporation of Global Positionning Into AUV Navigation*. AUV Symp. Tech., páginas 291–297, 1992.

[34] D. J. Lewis, J. M. LipsCombe e P. G. Thompson. *The Simulation of Remotely Operated Underwater Vehicles*. ROV, 1984.

[35] A. Martins, A. Matos, N. Cruz e F.L. Pereira. *IES: An Open System for Underwater Inspection*. Actas MTS/IEEE Oceans'99, Seatle, WA, USA,, 1999.

[36] Richard M. Murray, Zexiang Li e S. Shankar Sastry. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.

[37] J. N. Newman. *Marine Hydrodynamics*. MIT Press, 1977.

[38] Michiel J. Van Nieuwstadt e Richard M. Murray. *Approximate Trajectory Generation for Differentially Flat Systems with Zero Dynamics*. CDC, 1995.

[39] Michiel J. Van Nieuwstadt e Richard M. Murray. *Real Time Trajectory Generation for Differentially Flat Systems*. IFAC, 1996.

[40] F. Lobo Pereira. *Design for Autonomous Vehicles: A Dynamic Optimization Perspective*. European Journal of Control, 7:178-202, 2001.

[41] Svein I. Sagatun e Thor I. Fossen. *The Norwegian Experimental Remotely Operated Vehicle*. ROV 91, 1991.

[42] Shankar Sastry. *Nonlinear Systems: Analysis, Stability and Control*. Springer-Verlag, 1999.

[43] Jorge Manuel Estrela Da Silva. *Software Para Controlo e Gestão de Missões de Veículos Autónomos (Tese de Mestrado)*. FEUP, Dezembro 2001.

[44] J.-J.E. Slotine e W. Li. *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, 1991.

[45] E. D. Sontag. *Mathematical Control Theory. Vol. 6 of TAMS*. pringer-Verlag, 1990.

[46] H. Sorenson. *Kalman Filtering: Theory and Application*. IEEE Press, 1985.

[47] J. Sousa, A. Matos e F. Pereira. *Dynamic Optimization in the Coordination and Control of Autonomous Underwater Vehicles*. CDC, 2002.

[48] J. B. Sousa e F. L. Pereira. *A Generalized Vehicle-Based Control Architecture for Multiple AUVS*. MTS/IEEE Oceans95, páginas 1643–50, 1995.

[49] P. Varaiya. *Towards a Layered View of Control*. CDC, páginas 1187–1190, 1997.

[50] M. Vidyasagar. *Nonlinear Systems Analysis*. Pentice-Hall, 1978.

[51] Dana R. Yoerger, James B. Newman e Jean-Jacques E. Slotine. *Supervisory Control System for the JASON ROV*. IEEE J.Oceanic Eng., páginas 392–399, 1986.

[52] Dana R. Yoerger e J. J. E. Slotine. *Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles*. IEEE

J. Ocean Eng., 1985.

[53] K. David Young, Vadim I. Utkin e Umit Ozguner. *A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control.* IEEE transactions, Vol 7:328–341, 1999.

[54] J. Yuh. *Modeling and Control of Underwater Robotic Vehicles.* IEEE, páginas 1475–1483, 1990.

Anexo A
Modelo Usado para Simulação

Para implementar a simulação em MATLAB foram feitas algumas simplificações ao modelo completo:

- Considerar que a origem do referencial veículo é coincidente com o centro de massa do veículo e que os eixos desse mesmo referencial estão alinhados com as direcções principais do veículo.

$$x_G = y_G = z_G = 0m \tag{A.1}$$

- Considera-se também que o tensor de inércia é diagonal.

Sob estas considerações, as matrizes da dinâmica do veículo vêm:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = B\tau \tag{A.2}$$

$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v \tag{A.3}$$

A.1 Modelo de 6 Graus de Liberdade

As matrizes simplificadas do modelo são resumidas a seguir:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} - K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tag{A.4}$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw - Z_{\dot{w}}w & -mv + Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & -mw + Z_{\dot{w}}w & 0 & mu - X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & mv - Y_{\dot{v}}v & -mu + X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & mw - Z_{\dot{w}}w & -mv + Y_{\dot{v}}v & 0 & -I_{zz}r - N_{\dot{r}}r & -I_{yy}q + M_{\dot{q}}q \\ -mw + Z_{\dot{w}}w & 0 & mu - X_{\dot{u}}u & -I_{zz}r + N_{\dot{r}}r & 0 & -I_{xx}p - K_{\dot{p}}p \\ mv - Y_{\dot{v}}v & -mu + X_{\dot{u}}u & 0 & -I_{yy}q - M_{\dot{q}}q & -I_{xx}p + K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix}. \tag{A.5}$$

$$\begin{aligned} D(v) \;=\; & -diag\left[X_{u|u|}\,|u| + X_u,\; Y_{v|v|}\,|v| + Y_v,\; Z_{w|w|}\,|w| + Z_w,\right. \\ & \left. K_{p|p|}\,|p| + K_p,\; M_{q|q|}\,|q| + M_q,\; N_{r|r|}\,|r| + N_r\right]. \end{aligned} \tag{A.6}$$

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -z_B W c\theta s\phi \\ -z_B W s\theta \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.7}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -D_{3z} & D_{4y} \\ D_{1z} & D_{2z} & 0 & -D_{4x} \\ -D_{1y} & D_{2y} & D_{3x} & 0 \end{bmatrix} \tag{A.8}$$

A.2 Modelo Reduzido Usado para Controlo

$$M_{4\times4} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tag{A.9}$$

$$C_{4\times4}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -mv + Y_{\dot{v}} v \\ 0 & 0 & 0 & mu - X_{\dot{u}} u \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ mv - Y_{\dot{v}} v & -mu + X_{\dot{u}} u & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{A.10}$$

$$D_{4\times4}(v) = -diag\left(X_{u|u|}\,|u| + X_u,\ Y_{v|v|}\,|v| + Y_v,\ Z_{w|w|}\,|w| + Z_w, N_{r|r|}\,|r| + N_r\right) \tag{A.11}$$

$$g_{4\times4}(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.12}$$

$$B_{4\times4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -D_{1y} & D_{2y} & D_{3x} & 0 \end{bmatrix} \tag{A.13}$$

A.3 Parâmetros do Modelo

Os parâmetros usados podem ser observados nas tabelas A.3 a A.4.

Parâmetros Hidrodinâmicos		
$X_u = -72\ Kg\ s^{-1}$	$X_{\dot{u}} = -29\ Kg$	$X_{u\|u\|} = 0\ Kg\ m^{-1}$
$Y_v = -77\ Kg\ s^{-1}$	$Y_{\dot{v}} = -30\ Kg$	$Y_{v\|v\|} = 0\ Kg\ m^{-1}$
$Z_w = -95\ Kg\ s^{-1}$	$Z_{\dot{w}} = -90\ Kg$	$Z_{w\|w\|} = 0\ Kg\ m^{-1}$
$K_p = -40\ Kg\ m\ s^{-1}$	$K_{\dot{p}} = -5.2\ Kg\ m$	$K_{p\|p\|} = 0\ Kg\ m$
$M_q = -30\ Kg\ m\ s^{-1}$	$M_{\dot{q}} = -7.2\ Kg\ m$	$M_{q\|q\|} = 0\ Kg\ m$
$N_r = -30\ Kg\ m\ s^{-1}$	$N_{\dot{r}} = -3.3\ Kg\ m$	$N_{r\|r\|} = 0\ Kg\ m$

Tabela A.1- Coeficientes hidrodinâmicos

Motor	Hélice
$R_a = 13\ \Omega$	$D = 0.155m$
$L_a = 41\ mH$	$\alpha 1 = 0.22/4$
$K_M = 0.4\ Nm\ A^{-1}$	$\alpha 2 = -0.4/4$
$K_e = 0.4\ V\ rad^{-1}\ s$	$w = 0.15$
$J = 0.000254$	

Tabela A.2- Parâmetros dos motores DC e Hélice

Centro de gravidade	Centro de flutuação	Inércia	
$x_G = 0\ m$	$x_B = 0\ m$	$I_x = 1.32\ Kg\ m^2$	$I_{xy} = 0\ Kg\ m^2$
$y_G = 0\ m$	$y_B = 0\ m$	$I_y = 2.08\ Kg\ m^2$	$I_{xz} = 0\ Kg\ m^2$
$z_G = 0\ m$	$z_B = -0.1\ m$	$I_z = 2.32\ Kg\ m^2$	$I_{yz} = 0\ Kg\ m^2$

Tabela A.3- Centro de gravidade, centro de flutuação e inércia

Posição dos propulsores			
Traseiro esquerdo	Traseiro direito	Lateral	Vertical
$x_{F1} = 0\ m$	$x_{F2} = 0\ m$	$x_L = 0.135\ m$	$x_V = -0.022\ m$
$y_{F1} = -0.175\ m$	$y_{F2} = 0.215\ m$	$y_L = 0\ m$	$y_V = 0.02\ m$
$z_{F1} = -0.10\ m$	$z_{F2} = -0.10\ m$	$z_L = 0.07\ m$	$z_V = 0\ m$

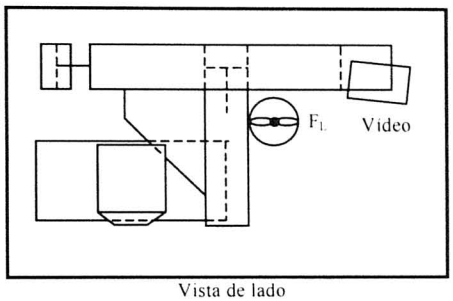
Tabela A.4- Posição dos propulsores em relação ao centro de gravidade

Diversos
$\rho = 1024\ g/m^3$
$m = 102\ Kg$
$g = 9.8\ ms^{-2}$

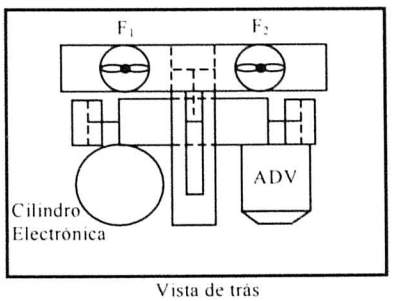
Tabela A.5- Parâmetros dos motores DC e Hélice

Anexo B
O ROV do Projecto IES

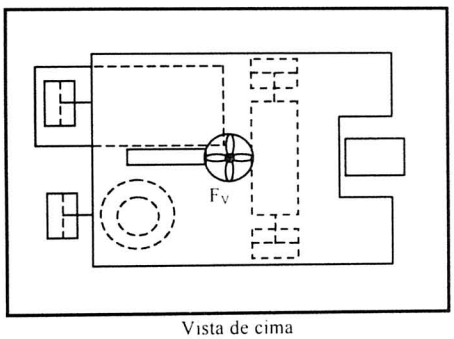
Na figura B.1 estão apresentadas as principais vistas do veículo do projecto IES.



Vista de lado



Vista de trás



Vista de cima

Figura B.1- Projecções do veículo

BIBLIOTECA F.E. PORTO