

Maria João Correia Soares da Costa

Licenciada em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

MANOBRAS DE CONDUÇÃO ASSISTIDA PARA VEÍCULOS SUBMARINOS SUBACTUADOS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

Candidato: Maria João Correia Soares da Costa, 1070269@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Alfredo Manuel de Oliveira Martins, aom@isep.ipp.pt



Instituto Superior de Engenharia do Porto

Novembro de 2013

Manobras de Condução Assistida para Veículos Submarinos Subactuados

Copyright © Maria João Correia Soares da Costa, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto.

O Instituto Superior de Engenharia do Porto e o Instituto Politécnico do Porto têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Aos meus pais,
à Mariana e ao Carlos*

*“O mundo só vai prestar
Para nele se viver
No dia em que a gente ver
Um gato maltês casar
Com uma alegre andorinha
Saindo os dois a voar
O noivo e sua noivinha
Dom Gato e dona Andorinha.”*

Jorge Amado
(O Gato Malhado e a Andorinha Sinhá)

Agradecimentos

Ao longo do meu percurso académico, muitos foram os que de algum modo contribuíram para a realização desta dissertação. Embora não seja possível mencioná-los a todos, expresso o meu sentimento de gratidão pelo seu envolvimento na minha formação como pessoa e como profissional.

Começo por agradecer ao meu orientador, Eng.º Alfredo Martins, por todo o apoio e disponibilidade demonstrados. Agradeço também ao Professor Doutor Eduardo Silva pelo constante acompanhamento e preocupação, assim como pela disponibilização das instalações do Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) e de todo o material necessário para a realização desta tese/dissertação. Agradeço ainda a todos os elementos que integram o LSA pelo bom ambiente de trabalho e ajuda proporcionados, em particular ao Eng.º André Dias pela partilha de conhecimento e apoio prestado relativamente aos equipamentos presentes no laboratório.

Aos meus colegas de curso Pedro Gonçalves, João Teixeira, Hugo Queirós e Filipe Ferreira um muito obrigada por todos os momentos que partilhamos juntos, pela boa disposição sempre presente e por todo o companheirismo que nunca falhou.

A todos os meus amigos, aos quais agradeço a compreensão pela minha ausência em tantas ocasiões e todas as palavras de apoio e incentivo que existiram sempre que precisei (obrigada por todos os convívios contra-relógio e pelas intermináveis conversas ao telemóvel, Telma e Daniel!).

Agradeço especialmente à Verónica Silva, a qual se revelou neste período uma amiga de todas as horas. Obrigada por todas as aventuras, as conversas, as parvoíces, a sinceridade e a enorme paciência para me aturares ☺.

Não posso deixar de agradecer a toda a minha família por todo o carinho e apoio ao longo da minha vida e todas as palavras de confiança nesta recta final do curso.

Obrigada Mãe, obrigada Pai. Sem vocês nada disto seria possível. Obrigada por me proporcionarem uma educação dentro das melhores condições possíveis e acima de tudo, obrigada por me ensinarem a sonhar e por acreditarem em mim. A minha força parte de vocês.

Obrigada Mariana. Mais do que minha irmã, és a minha melhor amiga. Obrigada por todos os conselhos, pela tua infinita compreensão e por toda a força e bem-estar que sempre me transmitiste. Sem ti, tudo seria mais difícil.

Resumo

A intervenção humana no manuseamento de veículos submarinos operados remotamente (ROVs) é um requisito necessário para garantir o sucesso da missão e a integridade do equipamento. Contudo, a sua teleoperação não é fácil, pelo que a condução assistida destes veículos torna-se relevante. Esta dissertação propõe uma solução para este problema para ROVs de 3DOF (*surge*, *heave* e *yaw*). São propostas duas abordagens distintas – numa primeira propõe-se um sistema de controlo *Image Based Visual Servoing* (IBVS) tendo em vista a utilização exclusiva de uma câmara (sensor existente neste tipo de sistemas) por forma a melhorar significativamente a teleoperação de um pequeno ROV; na segunda, propõe-se um sistema de controlo cinemático para o plano horizontal do veículo e um algoritmo de uma manobra capaz de dotar o ROV de movimento lateral através de uma trajectória dente-de-serra.

Demonstrou-se em cenários de operação real que o sistema proposto na primeira abordagem permite ao operador de um ROV com 3DOF executar tarefas de alguma complexidade (estabilização) apenas através de comandos de alto nível, melhorando assim drasticamente a teleoperação e qualidade de inspecção do veículo em questão. Foi também desenvolvido um simulador do ROV em MATLAB para validação e avaliação das manobras, onde o sistema proposto na segunda abordagem foi validado com sucesso.

Palavras-Chave

Condução assistida, *visual servoing*, ROV, 3DOF, IBVS, inspecção subaquática, tubagem, movimento lateral, simulador.

Abstract

It is well-known that remotely operated underwater vehicles (ROVs) require human intervention to guarantee the success of their assignment, as well as the equipment safety. However, as its teleoperation is quite complex to perform, there is a need for assisted teleoperation. This dissertation proposes a solution for this problem for 3DOF ROVs (surge, heave and yaw). Two different approaches are proposed – in the first one an image based visual servoing (IBVS) control system is proposed to assess the exclusive use of the camera (sensor present in this type of systems) to significantly improve the teleoperation of a small ROV; in the second one, a cinematic control for the horizontal plane of the vehicle was proposed, and also an algorithm of a maneuver capable of making the vehicle move sideways through a saw tooth type of trajectory.

It was demonstrated in real life operation scenarios that the proposed system in the first approach allows a 3DOF ROV operator to execute somewhat complex tasks (stabilization) only by high-order commands, thus improving drastically its teleoperation and the inspection quality of the referred vehicle. It was also developed a ROV simulator in MATLAB for validation and evaluation purposes, where the second approach system was successfully validated.

Keywords

Assisted teleoperation, visual servoing, ROV, 3DOF, IBVS, underwater inspection, pipeline, lateral movement, simulation.

Índice

Início	i
Resumo	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
Acrónimos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	4
1.2 Formulação do Problema	4
1.3 Objectivos e Contribuições.	6
1.4 Estrutura do Documento	6
2 Estado da Arte	9
2.1 Veículos Robóticos Marítimos.	9
2.2 Simuladores de Veículos Subaquáticos.	11
2.3 Manobras para UUVs subactuados	12
3 Simulador VideoRay PRO 3E	15
3.1 Modelização	15
3.1.1 Cinemática	17
3.1.2 Dinâmica	19
3.1.3 Modelo do <i>Thruster</i>	25

3.2	Implementação	26
3.2.1	Modelo do ROV VideoRay PRO 3E.	26
3.2.2	Simulação	31
4	Manobras de Condução Assistida	37
4.1	IBVS.	38
4.1.1	Formulação do Problema	38
4.1.2	Conceitos Teóricos	39
4.1.3	Implementação	40
4.2	Controlo Cinemático.	44
4.2.1	Formulação do Problema	45
4.2.2	Conceitos Teóricos	45
4.2.2.1	Modelo Cinemático	46
4.2.2.2	Lei de Controlo.	48
4.2.3	Implementação	49
4.2.3.1	Manobra de Movimento Lateral – Algoritmo	49
4.2.3.2	Simulação.	51
5	Resultados	55
5.1	Manobra de Condução Assistida – IBVS.	55
5.2	Manobra de Condução Assistida – Controlo Cinemático.	63
6	Conclusões	69
	Referências Bibliográficas	73
	ANEXOS	77
A	Especificações do VideoRay PRO 3E.....	79
B	Módulo INS & Lasers	81

Lista de Figuras

Figura 1.1: ASVs ROAZ (à esquerda) e ROZ II (à direita).	2
Figura 1.2: ROV <i>Seabotix LBV150</i>	3
Figura 1.3: ROV <i>VideoRay PRO 3E</i>	3
Figura 3.1: Referenciais do veículo XO, YO, ZO e do mundo X, Y, Z	17
Figura 3.2: Planos de simetria do ROV <i>VideoRay PRO 3E</i>	28
Figura 3.3: <i>Setup</i> experimental para medição do volume de fluido deslocado pelo ROV <i>VideoRay PRO 3E</i>	30
Figura 3.4: Arquitectura do sistema implementado (simulador ROV).	31
Figura 3.5: Representação gráfica do <i>VideoRay PRO 3E</i> em ambiente de simulação (MATLAB).	32
Figura 3.6: Diagrama de funcionamento do simulador do ROV em modo isolado.	33
Figura 3.7: Diagrama do sistema de operação do <i>VideoRay PRO 3E</i>	33
Figura 3.8: Diagrama de funcionamento do simulador do ROV em modo integrado.	34
Figura 4.1: Efeito <i>sway</i> num ROV de 3DOF (actuadores em <i>surge, heave</i> e <i>yaw</i>).	39
Figura 4.2: Diagrama do sistema de operação do <i>VideoRay PRO 3E</i>	40
Figura 4.3: Arquitectura do <i>software</i>	41
Figura 4.4: Sequência de processos realizados na unidade de Processamento de Imagem.	41
Figura 4.5: Ilustração do centro do alvo no eixo x do plano da imagem (x_{12}) e da largura do alvo $ x_1 - x_2 $	42
Figura 4.6: Diagrama de controlo de <i>surge-yaw</i>	43
Figura 4.7: Diagrama de controlo de <i>heave</i>	43

Figura 4.8: Movimento lateral através de uma trajectória dente-de-serra.. 45

Figura 4.9: Representação do ROV no plano $X_R Y_R$ no referencial inercial (X_I, Y_I) e
ilustração dos erros de distância (ρ) e orientação (α e β) em coordenadas polares. . . . 46

Figura 4.10: Ilustração das distâncias Δx , Δy e Δd na trajectória gerada pelo algoritmo da
Manobra de Movimento Lateral. 50

Figura 4.11: Diagrama da implementação do controlador cinemático de posição.. . . . 51

Figura 5.1: Tanque de testes nas instalações do LSA/ISEP. 56

Figura 5.2: Situação de teste – Manobra *Heading Centering*; Luzes externas desligadas. . 58

Figura 5.3: *Heading* (*Compass* ou bússola) vs Largura do alvo detectado (*DistLines* ou
 $|x_1 - x_2|$).. 59

Figura 5.4: Resultados do Método III dentro e fora do intervalo das distâncias de trabalho. 59

Figura 5.5: Situação de teste – Manobra *Heading Centering*; Luzes externas desligadas;
Existência de correntes. 61

Figura 5.6: Situação de teste – Manobra *Tracking Up/Down*; Luzes externas desligadas;
Existência de correntes. 62

Figura 5.7: Interface dos métodos de visão implementados (Método I – A e D; Método II –
C; Método III - B). 63

Figura 5.8: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,305m$ e $\Delta y = 0,02m$, onde
 $k_\rho = 4$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 90^\circ)$ 64

Figura 5.9: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,305m$ e $\Delta y = 0,05m$, onde
 $k_\rho = 4$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 90^\circ)$ 65

Figura 5.10: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,40m$ e $\Delta y = 0,05m$,
onde $k_\rho = 3$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 90^\circ)$ 65

Figura 5.11: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = -0,5m$, $\Delta x = 0,40m$ e $\Delta y = 0,05m$,
onde $k_\rho = 3$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 45^\circ)$ 66

Figura 5.12: Exemplo de manobra de varrimento de uma parede, cujo um dos elementos é a
manobra de movimento lateral proposta. 67

Figura 5.13: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = -0,21m$, $\Delta x = 0,305m$ e $\Delta y = 0,02m$, onde $k_\rho = 4$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, -90^\circ)$. Erro introduzido no sistema de posição $\pm 0,01m$ e de pose $\pm 0,1^\circ$ 68

Figura 5.14: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,40m$ e $\Delta y = 0,05m$, onde $k_\rho = 3$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 0^\circ)$. Erro introduzido no sistema de posição $\pm 0,01m$ e de pose $\pm 0,1^\circ$ 68

Figura A.1: ROV *VideoRay PRO 3E*. 79

Figura B.1: Módulo INS&Lasers. 81

Figura B.2: Porto de conexão para equipamentos externos selado (à esquerda), ficha *dummy* para selar o porto de conexão externa quando não está a ser utilizado (à direita, em cima) e *pinout* do porto de conexão. 82

Figura B.3: Cabo de conexão entre o ROV *VideoRay PRO 3E* e o módulo INS&Lasers. . . 83

Figura B.4: Conversor USB/CAN utilizado para comunicar com o módulo INS&Lasers (modelo CPC-USB/M16C da EMS Dr. Thomas Wunsche). 84

Figura B.5: Placa de desenvolvimento do ARM M3-Cortex STM32, disponibilizada pelo LSA. 84

Figura B.6: Interior do módulo INS&Lasers. 85

Figura B.7: Exterior e interior do módulo INS&Lasers. 86

Figura B.8: Instalação do Módulo INS&Lasers no ROV *VideoRay PRO 3E*. 87

Figura B.9: Esquema eléctrico da placa de desenvolvimento do STM32 utilizada no módulo INS&Lasers. 88

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Notação SNAME 1950.	16
Tabela 3.2: Propriedades e coeficientes do VideoRay PRO 3E.	29
Tabela 3.3: Valores utilizados no modelo do ROV VideoRay PRO 3E.	31
Tabela 3.4: Organização do simulador do ROV VideoRay PRO 3E.	34
Tabela B.1: <i>Pinout</i> do porto de conexão externa do <i>VideoRay PRO 3E</i>	82

Acrónimos

ASV	Autonomous Surface Vehicle
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CAN	Controller-Area Network (protocolo de comunicação)
DOF	Degree of Freedom
HIL	Hardware-in-the-Loop
IBVS	Image Base Visual Servoing
INS	Inertial Navigation System
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LSA	Laboratório de Sistemas Autónomos
MATLAB	Matrix Laboratory
PAL	Phase Alternating Line (sistema de codificação de cor para transmissões de vídeo analógicas)
PBVS	Position-Based Visual Servoing
PC	Personal Computer
PID	Proporcional-Integral-Derivativo (controlo de malha fechada)
ROV	Remotely Operated underwater Vehicle
RS-232	Recommended Standard 232 (protocolo de comunicação série)
SMC	Sliding Mode Control
SNAME	Society of Naval Architects and Marine Engineers
USB	Universal Serial Bus
USV	Unmanned Surface Vehicle
UUV	Unmanned Underwater Vehicle

1

Introdução

A robótica subaquática tem sofrido um crescimento e uma evolução bastante significativos nas últimas décadas. Embora o ambiente marítimo seja altamente propício à utilização da robótica¹, são vários os factores que de algum modo contribuíram para este acontecimento – os avanços tecnológicos verificados nos últimos anos, sobretudo nas áreas de percepção (sensores e instrumentação) e capacidade de processamento computacional, contribuíram como factores principais impulsionadores deste registo. O interesse pela pesquisa e exploração das profundezas marítimas (i.e., oceanos), contudo, já há muito que existe, uma vez que além de cobrir uma grande parte da superfície terrestre (a qual se sabe que contém muitos recursos naturais valiosos), representa a esmagadora maioria do habitat biológico do mundo [1]. Motivos pelos quais, cada vez mais investigação tem sido realizada por parte de entidades comerciais (indústria de petróleo e gás natural), científicas (oceanografia, biologia e arqueologia marinhas) e também militares (patrulhamento e defesa de fronteiras, operações de busca e salvamento).

¹ A acção do ser humano em ambientes subaquáticos, além de ser algo limitada (quando comparada ao que um robô pode fazer), comporta custos elevados e tem um risco de segurança associado bastante significativos.

Esta dissertação foi desenvolvida num grupo de investigação do ISEP – no Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA). Uma das principais áreas de investigação do LSA/ISEP é precisamente a robótica aplicada à oceanografia e monitorização ambiental, tendo contribuído cientificamente nos últimos anos sobretudo com trabalho desenvolvido em sistemas de percepção, navegação e controlo para veículos de superfície. Exemplos disso são os robôs não tripulados de superfície desenvolvidos e concebidos pelo LSA (os ASVs ROAZ e ROAZ II – ver Figura 1.1), os quais contam já com muitas horas de operação em cenários reais. O laboratório dispõe ainda de outras plataformas robóticas marinhas, neste caso veículos subaquáticos não tripulados operados remotamente² adquiridos comercialmente – um *Seabotix LBVI50* (ver Figura 1.2) e um *VideoRay PRO 3E* (ver Figura 1.3). Os próximos passos na área da robótica marinha que o laboratório pretende dar, são no sentido de expandir a sua área de contribuição de igual modo para a robótica subaquática. O primeiro passo neste ramo da robótica marinha foi dado através do desenvolvimento de um sistema de localização e posicionamento de veículos submarinos, recorrendo a um sistema externo de visão artificial (*Groundtruth*) – o qual foi testado e aplicado num tanque de testes disponível nas instalações do LSA.



Figura 1.1: ASVs ROAZ (à esquerda) e ROAZ II (à direita).

² Este tipo de robôs é denominado genericamente por ROV, cuja principal característica é estarem ligados à superfície por um cabo umbilical (ver subcapítulo Veículos Robóticos Marítimos no Estado da Arte, na pág.9).



Figura 1.2: ROV *Seabotix LBV150*.

O seguinte desafio surge das dificuldades sentidas na utilização do *VideoRay PRO 3E* em missões de campo para conseguir realizar tarefas de inspeção com alguma qualidade. É neste contexto que se insere esta dissertação – na necessidade de acrescentar e otimizar as funcionalidades da teleoperação de um ROV *VideoRay PRO 3E*.

O *VideoRay PRO 3E*³ é um pequeno ROV que se insere na classe *micro* (ver subcapítulo Veículos Robóticos Marítimos no Estado da Arte, na pág.9), com actuação em três graus de liberdade (DOF, *Degree of Freedom*) – no eixo longitudinal (*surge*), no eixo vertical (*heave*) e em torno do eixo vertical (*yaw*).



Figura 1.3: ROV *VideoRay PRO 3E*.

³ As principais especificações do veículo são apresentadas no ANEXO A, na pág.79.

1.1 Motivação

A utilização de pequenos ROVs⁴ em tarefas de inspecção subaquática é uma solução comum em diversas aplicações. Isto deve-se ao facto destes veículos serem dotados de grande manobrabilidade, requererem um espaço de trabalho reduzido e ainda comportarem custos menores quando comparados com outras soluções. Para além disso, a sua fácil portabilidade permite não só uma rápida preparação e subsequente operacionalidade do equipamento em missões de campo, como também a capacidade de operação a partir da costa, de uma embarcação ou de qualquer outra plataforma de superfície. Todas estas características fazem de pequenos ROVs veículos adequados para realizar inspecções de estruturas subaquáticas (levantamento e avaliação de danos materiais) e uma resposta eficaz, segura e económica.

A imprevisibilidade do meio circundante do ROV e a natureza complexa das manobras exigidas por este tipo de tarefas, torna necessária a intervenção humana para garantir o sucesso da missão e a integridade do equipamento. Contudo, a teleoperação de um pequeno ROV é complicada, sobretudo devido às correntes marítimas e às forças de arrasto provocadas pelo cabo umbilical do veículo. Para além disso, grande parte deste tipo de veículos que actualmente se encontram em actividade são subactuados⁵ (factor que condiciona ainda mais a sua teleoperação), pelo que o desenvolvimento de manobras de condução assistida para auxiliar a sua teleoperação adquire ainda maior importância neste contexto.

1.2 Formulação do Problema

A teleoperação de pequenos ROVs consegue ser um enorme desafio, uma vez que geralmente estes são muito vulneráveis a perturbações externas devido às suas dimensões reduzidas e à usual menor potência dos seus actuadores. Além disso, habitualmente são subactuados, o que significa que o operador não pode controlar todos os eixos de movimento do veículo. Os casos mais críticos são os ROVs com 3DOF (tipicamente com actuadores em

⁴ A expressão “pequenos ROVs” refere-se não só aos veículos que se inserem na classe *micro*, mas também da classe *mini* (ver subcapítulo Veículos Robóticos Marítimos no Estado da Arte, na pág.9).

⁵ Um veículo é considerado subactuado quando tem menor número de actuadores do que graus de liberdade (DOF).

surge, *heave* e *yaw*) – a ausência de movimento lateral independente (*sway*) é particularmente necessária para contrariar forças de arrasto. Nestas condições, manter o objecto de inspecção no campo de visão da câmara é um verdadeiro desafio para o piloto do veículo – numa primeira abordagem, este é o objecto de estudo desta dissertação.

Nesta primeira abordagem é estudada a viabilidade do uso exclusivo da câmara para conferir ao robô a capacidade de manter o objecto de interesse no campo da imagem, estável o suficiente para permitir uma adequada inspecção. O objectivo das manobras executadas é manter uma distância constante entre o ROV e o alvo escolhido, mantendo-o sempre visível no campo da imagem, corrigindo suavemente o seu posicionamento relativamente ao alvo de modo a este permanecer no centro da imagem.

Numa segunda abordagem, o objecto de estudo é a ausência de movimento lateral destes veículos, mais concretamente como dotá-los de movimento lateral quando não existem actuadores nesse eixo de movimento. Propõe-se uma manobra no plano horizontal que realiza uma trajectória em dente-de-serra para dotar o veículo de movimento lateral.

A robótica marinha é, com relativa facilidade, sinónimo de custos elevados. Isto porque as tecnologias disponíveis (sensores, actuadores) que existem para ambientes subaquáticos ainda são dispendiosas, quando comparadas com as soluções que existem para meios aéreos ou terrestres. Assim, nos ROVs de pequena dimensão, e particularmente num *micro* ROV (como é o caso do *VideoRay PRO 3E*), coloca-se ainda uma questão relevante sempre que se concebe uma manobra para o veículo – o custo da implementação da dita manobra (ou de eventuais equipamentos/sensores adicionais), por norma, tem que ser adequado ao valor económico do veículo original. Caso contrário, fará mais sentido que se invista antes num ROV da classe acima (no caso um *mini* ROV); isto porque, embora sejam também subactuados (4DOF), usualmente estes veículos já são actuados em *sway* – o que por si só já facilita a sua teleoperação – e possuem melhor equipamento a bordo. Além disso, são também ainda classificados como ROVs pequenos, pelo que partilham muitas características idênticas às dos *micro* ROV.

1.3 Objectivos e Contribuições

Como foi referido anteriormente, esta dissertação propõe-se a otimizar a operação de um ROV subactuado de 3DOF (com actuação em *surge*, *heave* e *yaw* – em particular, um *VideoRay PRO 3E*) através da implementação de manobras de condução assistida, que permitam ao operador do ROV efectuar tarefas de inspecção com menor dificuldade e melhores resultados qualitativos.

Os objectivos que se pretendem atingir com a realização deste trabalho são:

- Desenvolvimento e implementação de um simulador do ROV *VideoRay PRO 3E* que represente o mais fielmente possível o seu comportamento e que permita validar e avaliar estratégias de controlo desenvolvidas para o mesmo;
- Desenvolvimento de novas funcionalidades de teleoperação de um ROV *VideoRay PRO 3E* através de manobras de condução assistida;
- As manobras desenvolvidas têm que ter um custo de implementação adequado ao veículo em questão.

1.4 Estrutura do Documento

Esta dissertação está organizada do seguinte modo:

- Capítulo 1: âmbito e contextualização deste documento, formulação do problema que esta dissertação se propõe a resolver e, por fim apresentação dos objectivos e contribuições que se pretendem atingir com a realização deste trabalho;
- Capítulo 2: estado da arte no contexto dos veículos robóticos marinhos, de simuladores de robótica subaquática e de manobras de controlo para pequenos ROVs subactuados;
- Capítulo 3: descrição do processo de modelização do *VideoRay PRO 3E*, das opções de implementação do seu modelo e do simulador;

- Capítulo 4: descrição completa e detalhada das manobras de condução assistida implementadas;
- Capítulo 5: apresentação de todos os resultados obtidos;
- Capítulo 6: apresentação das conclusões alcançadas após uma análise cuidada do trabalho realizado e dos resultados obtidos; exposição das perspectivas de trabalho futuro.

2

Estado da Arte

2.1 Veículos Robóticos Marítimos

A utilização de veículos robóticos marítimos nas diferentes actividades relacionadas com o mar não só é uma realidade, como é cada vez maior. Isto deve-se sobretudo ao facto de grande parte dessas actividades implicarem um elevado risco humano e da sua execução ser uma tarefa complicada e lenta, o que usualmente significa elevados custos também.

Os veículos robóticos marítimos podem ser divididos nas seguintes categorias:

- **ROV⁶** (*Remotely Operated Underwater Vehicle*): veículo submersível não tripulado operado remotamente, cuja característica principal é um cabo umbilical (cabo revestido que contém os cabos de alimentação, de sinal de vídeo e de comunicação de dados entre o veículo e o operador). Estes podem ser classificados de acordo com as suas características e o tipo de tarefas que são capazes de realizar:
 - *Micro*: tamanho e peso muito reduzidos (cerca de 3Kg). Por norma, são utilizados como alternativa a um mergulhador quando é necessário aceder a locais fisicamente inacessíveis ao ser humano. Realizam apenas tarefas de inspecção.

⁶ Tanto os ROVs como os AUVs poderão ser ambos referidos como *Unmanned Underwater Vehicles* (UUV).

- *Mini*: pesam até 15Kg . Pode também ser usado como substituto de um mergulhador, é facilmente transportado numa pequena embarcação e é normalmente utilizado para tarefas de inspeção, sendo que eventualmente poderá realizar pequenas tarefas de intervenção.
- *General*: potência de propulsão até 5HP . Poderão ser capazes de transportar sensores externos ou um pequeno manipulador para realizar tarefas de pesquisa, mapeamento ou levantamento de dados do meio (*survey*). Tipicamente têm um valor máximo de profundidade menor do que 1000m .
- *Light Workclass*: potência de propulsão até 50HP . Poderá ter instalado um ou mais manipuladores e a capacidade de carga disponível (*payload*) para transportar sensores já é bastante considerável. Tipicamente têm um valor máximo de profundidade menor do que 2000m . São principalmente utilizados na indústria de petróleo e gás natural no mar alto.
- *Heavy Workclass*: potência de propulsão até 220HP . Tipicamente têm um valor máximo de profundidade menor do que 3500m . Comparativamente com a classe anterior, a capacidade de carga disponível para transportar sensores é, por norma, ainda maior e tem pelo menos dois manipuladores instalados. São principalmente utilizados na indústria de petróleo e gás natural no mar alto.
- *Trenching/Burial*: potência de propulsão entre 200HP e 500HP . Capazes de transportar um enrolador de cabo e de trabalhar a profundidades até 6000m .
- **USV** (*Unmanned Surface Vehicle*): veículo de superfície não tripulado operado remotamente ou não (quando este último é o caso, poderão ser também denominados por ASV, isto é, *Autonomous Surface Vehicle*). São tipicamente fiáveis, manobráveis, rápidos e com grande capacidade de carga (*payload*), o que lhes confere utilidade num grande leque de aplicações. Em oceanografia, por exemplo, constituem uma alternativa mais económica e versátil do que as tradicionais embarcações de investigação e bóias meteorológicas, respectivamente. Missões de patrulha, busca e salvamento, monitorização ambiental, batimetria e aquisição de dados científicos são ainda outros exemplos de aplicações em que são utilizados.

- **AUV⁶** (*Autonomous Underwater Vehicle*): veículo submersível não tripulado autónomo – ao contrário dos ROV, não necessitam de um operador. Por norma sensores de localização e navegação fazem parte do seu equipamento, bem como sensores de mapeamento. Estes veículos são utilizados em aplicações com fins comerciais, militares e de investigação científica. Mapeamento do fundo do mar, inspecção e monitorização de locais de interesse, detecção de minas, levantamento de dados do meio, são alguns exemplos.

Entre os diferentes tipos de veículos acima descritos, os mais procurados para tarefas de inspecção subaquática, que constituem uma parte significativa das aplicações para veículos subaquáticos, são os ROVs. Isto deve-se ao facto de, ao contrário dos AUVs, não terem limites de tempo de operação e terem a capacidade de transmitir toda a informação em tempo real, uma vez que estão sempre ligados fisicamente à superfície através do cabo umbilical. É ainda uma solução com maior disponibilidade comercial e economicamente mais em conta. Contudo, têm também as suas limitações e o grande objectivo num futuro próximo será sempre a realização de todas estas tarefas de forma autónoma [2]. Por outro lado, uma vez que ROVs e AUVs partilham muitas características de controlo e deparam-se com alguns problemas semelhantes, os primeiros acabam por funcionar como uma boa plataforma de investigação para realizar trabalho nessa área (automatizar alguns processos nos ROVs – as manobras de condução assistida que se propõe nesta dissertação são um exemplo disso).

2.2 Simuladores de Veículos Subaquáticos

Existem ferramentas de simulação para a robótica em geral, que permitem a simulação das mais variadas combinações de robôs, sensores, actuadores e ambientes 3D. São exemplos disso o simulador MORSE [3] ou o USARSim [4]. Contudo, embora sejam plataformas de simulação muito completas e versáteis, privilegiam a simulação multi-robô e da representação do meio, não tendo como principal objectivo uma representação precisa a nível da física. Existem ainda simuladores dedicados à robótica subaquática, como é o caso do UWSim [5] e soluções desenvolvidas em ambiente MATLAB/Simulink, como por exemplo o MSS (*Marine System Simulator*) [6] ou o RDA (*ROV Design and Analysis Toolbox*) [7].

Estas alternativas de simulação desenvolvidas em particular para robótica subaquática, obviamente são bastante adequadas para o caso desta dissertação (possuem modelos de alguns ROVs, algoritmos de controlo, modelos dos *thrusters*, a dinâmica é simulada com base nas equações de movimento não-lineares de um corpo rígido de 6DOF, entre outras características propícias à sua utilização). Pelo que, para a concretização do primeiro objectivo estabelecido – o desenvolvimento e implementação de um simulador do ROV *VideoRay PRO 3E* – poder-se-ia recorrer a qualquer uma das plataformas mencionadas anteriormente. No entanto, optou-se por desenvolver uma solução à medida das necessidades deste trabalho, isto é, uma aplicação (em MATLAB) que permita a validação e avaliação de manobras de controlo para o veículo em estudo e que seja flexível e adaptada ao sistema real do veículo. Deste modo, consegue-se uma solução personalizada, otimizada à situação e com um custo computacional mínimo.

É ainda importante referir que existem no mercado vários simuladores para veículos subaquáticos, sobretudo para ROVs. No entanto, a grande maioria destes simuladores disponíveis comercialmente destinam-se ao treino de pilotos e teste de diferentes configurações de *hardware* (sensores e ferramentas) – não estão preparados para testar algoritmos de controlo. São exemplos o ROVsim da empresa *Marine Simulation*, o VMAX Simulator da *Forum Energy Technologies* e o *Deepworks* da *Fugro Subsea Services*.

2.3 Manobras para UUVs subactuados

A primeira manobra de condução assistida desenvolvida nesta dissertação propõe um sistema que usa exclusivamente a visão artificial para manter o objecto de inspecção dentro do campo de visão do veículo e para seguir cabos ou *pipelines* com um ROV de 3DOF, para assim demonstrar que até a teleoperação do mais básico dos ROVs poder ser melhorada sem a necessidade de se recorrer a sensores adicionais. Muito trabalho tem sido realizado nesta área, a maioria concentrando-se em problemas tais como a questão de manter o objecto de interesse no campo de visão da câmara [8], manter o veículo numa zona/posição fixa relativamente ao objecto de interesse (*station keeping*) [9][10][11] e seguir *pipelines* e cabos [12][13]. O que todos estes exemplos têm em comum é o uso de informação adquirida por

um sensor de visão a realimentar o sistema de controlo de movimento do robô – este tipo de controlo é também conhecido por *Visual Servoing*. As diferentes técnicas de *visual servoing* existentes podem ser classificadas como *Image Based* (IBVS), *Position Based* (PBVS) ou *Hybrid* (em português, Híbrido). No caso do IBVS (ou *visual servoing 2D*), a pose (posição e orientação) do alvo não é estimada e a lei de controlo baseia-se na diferença da posição actual e a desejada de determinadas características no plano da imagem (*features*) [14]. Por sua vez, o PBVS (ou *visual servoing 3D*) é uma técnica que implica a modelização tanto do alvo, como da própria câmara. São igualmente adquiridas características de interesse (*features*) da imagem, mas neste caso estas são utilizadas posteriormente para estimar a pose do alvo relativamente ao plano da imagem, no espaço cartesiano [14]. Abordagens híbridas, usualmente denominadas *visual servoing 2-1/2-D*, usam uma combinação entre *visual servoing 2D* e *3D* [15]. O sistema proposto pela primeira manobra de condução é, também ele, um sistema de controlo de *visual servoing*.

A principal vantagem em recorrer a uma câmara para desenvolver soluções de teleoperação assistida é a sua presença em todos os ROVs, ao contrário da combinação de sensores presente no veículo. Além disso, os sensores são frequentemente sujeitos a influências magnéticas, erros sistemáticos e/ou incrementais e, no caso de sensores de posicionamento, taxas lentas de actualização. Obviamente que isto não significa que se deveria optar por uma ou outra solução, por exemplo em [9][10][13] foram implementados métodos de fusão sensorial de modo a integrar no sistema toda a informação.

Analisando as várias abordagens desenvolvidas até ao momento, consegue-se perceber que no geral, um sistema com IBVS está associado a um conjunto de controladores com realimentação, como um controlador *Proporcional-Integral-Derivativo* (PID) [11] ou um *Sliding Mode Control* (SMC) [12], ao passo que um sistema com PBVS deverá estar associado a uma técnica de planeamento de trajectória [8][9]. É ainda notório que para um ROV subactuado (geralmente em *sway*), o método de *visual servoing* de selecção é, por norma, o PBVS – o que não se verifica no caso deste trabalho. Uma vez que o sistema proposto nesta primeira abordagem não recorre à modelização, não existe necessidade de trabalhar fora do espaço da imagem, o que significa que IBVS é a técnica de *visual servoing* aplicada.

A segunda manobra de condução assistida desenvolvida nesta dissertação propõe o desenvolvimento de uma manobra de teleoperação assistida, especialmente projectada para ROVs com 3DOF (actuadores em *surge*, *heave* e *yaw*), capaz de conferir ao veículo movimento lateral. A manobra em questão deverá permitir que o operador consiga deslocar o veículo lateralmente mantendo a orientação do veículo estável, executando para isso apenas um comando de alto nível.

No contexto de manobras de teleoperação assistida para ROVs subactuados, existem inúmeros estudos publicados na comunidade científica. Contudo, quase todos eles propõe soluções para ROVs com 4DOF (actuadores em *surge*, *sway*, *heave* e *yaw*) e por isso o controlo e as manobras desenvolvidas não abordam a questão da não-existência de movimento lateral (*sway*), o qual é particularmente necessário para compensar as forças de arrastamento (do próprio cabo do veículo e de correntes marítimas) e condiciona muito significativamente a teleoperação do ROV. Entre as publicações que propõe soluções para ROVs com 3DOF, destacam-se os artigos [8] e [16], onde são propostos sistemas que conferem ao veículo a capacidade de manter o objecto de inspecção dentro do campo de visão do ROV e de manter o veículo numa zona/posição fixa relativamente ao objecto de interesse (*station keeping*), respectivamente. É ainda importante mencionar o trabalho desenvolvido em [19], o qual propõe um sistema de controlo que permite a realização de trajectórias predefinidas de modo autónomo.

3

Simulador VideoRay PRO 3E

Um dos objectivos a que esta dissertação se propõe é o desenvolvimento de uma plataforma de simulação para o ROV VideoRay PRO 3E (ver Figura 1.3) que represente o mais fielmente possível o seu comportamento e que permita validar e avaliar estratégias de controlo desenvolvidas para o mesmo. A possibilidade de testar manobras que se pretendem implementar no veículo real num simulador é importante, na medida em que permite a identificação e correcção de eventuais erros sem comprometer a integridade física dos equipamentos envolvidos.

Neste capítulo são descritos o processo de modelização utilizado para obter um modelo do veículo em estudo (necessário para simular o seu comportamento) e a plataforma de simulação desenvolvida.

3.1 Modelização

A modelização de veículos subaquáticos é um processo complexo, mas importante para a previsão do comportamento do veículo e, conseqüentemente, para a validação de estratégias de controlo. A sua complexidade deve-se à elevada dificuldade de caracterização das forças hidrodinâmicas⁷ que actuam sobre o veículo e às incertezas geralmente associadas a alguns

⁷ Descritas posteriormente na secção Dinâmica, na pág.21.

parâmetros físicos conhecidos do mesmo. Como tal, é usual recorrer-se a aproximações significativas.

As equações de movimento não-lineares de veículos marinhos foram alvo de estudo em [17], onde se concluiu que explorando determinadas propriedades das mesmas é possível simplificar consideravelmente a representação do modelo não-linear. Uma vez que o modelo não-linear constitui uma representação mais fiel do veículo (e, conseqüentemente, do seu comportamento) do que o respectivo modelo linear, optou-se por utilizar um modelo não-linear (com base no estudo desenvolvido em [17]).

A notação para veículos marinhos que será utilizada neste documento foi estabelecida pela convenção SNAME (*Society of Naval Architects and Marine Engineers*) em 1950 [18], a qual é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Notação SNAME 1950.

DOF ⁸	Tipo de Movimento (Translações e Rotações)	Forças e Momentos (τ)	Velocidades Lineares e Angulares (v)	Posições e Ângulos de <i>Euler</i> (η)
1	Movimento no eixo x (<i>Surge</i>)	X	u	x
2	Movimento no eixo y (<i>Sway</i>)	Y	v	y
3	Movimento no eixo z (<i>Heave</i>)	Z	w	z
4	Rotação em torno do eixo x (<i>Roll</i>)	K	p	ϕ
5	Rotação em torno do eixo y (<i>Pitch</i>)	M	q	θ
6	Rotação em torno do eixo z (<i>Yaw</i>)	N	r	ψ

O veículo subaquático é tido como um corpo rígido com seis graus de liberdade (6DOF), uma vez que são necessárias seis coordenadas independentes para determinar a posição e orientação (pose) de um corpo rígido. O estudo da modelização de um veículo pode ser dividido em duas partes: cinemática e dinâmica, sendo que a cinemática estuda o movimento do corpo sem considerar a actuação das forças sobre este (só trata os aspectos geométricos) e a dinâmica analisa as forças responsáveis pelo mesmo. Por outras palavras, através da cinemática é possível passar do sistema de coordenadas do veículo para o referencial do mundo (e vice-versa) e através da dinâmica é possível prever o comportamento do veículo quando determinadas forças actuam sobre ele.

⁸ DOF – Grau de Liberdade (*Degree of Freedom*).

3.1.1 Cinemática

No estudo do movimento de um corpo rígido de 6DOF definem-se, por conveniência, dois sistemas de coordenadas – um móvel fixo no veículo (X_O, Y_O, Z_O) e um inercial⁹, usualmente referente a um ponto fixo no mundo (X, Y, Z). Como se pode observar na Figura 3.1, os eixos do referencial do veículo coincidem com os principais eixos de inércia do mesmo (X_O – eixo longitudinal, Y_O – eixo transversal, Z_O – eixo normal). O movimento do referencial móvel é descrito relativamente ao referencial do mundo.

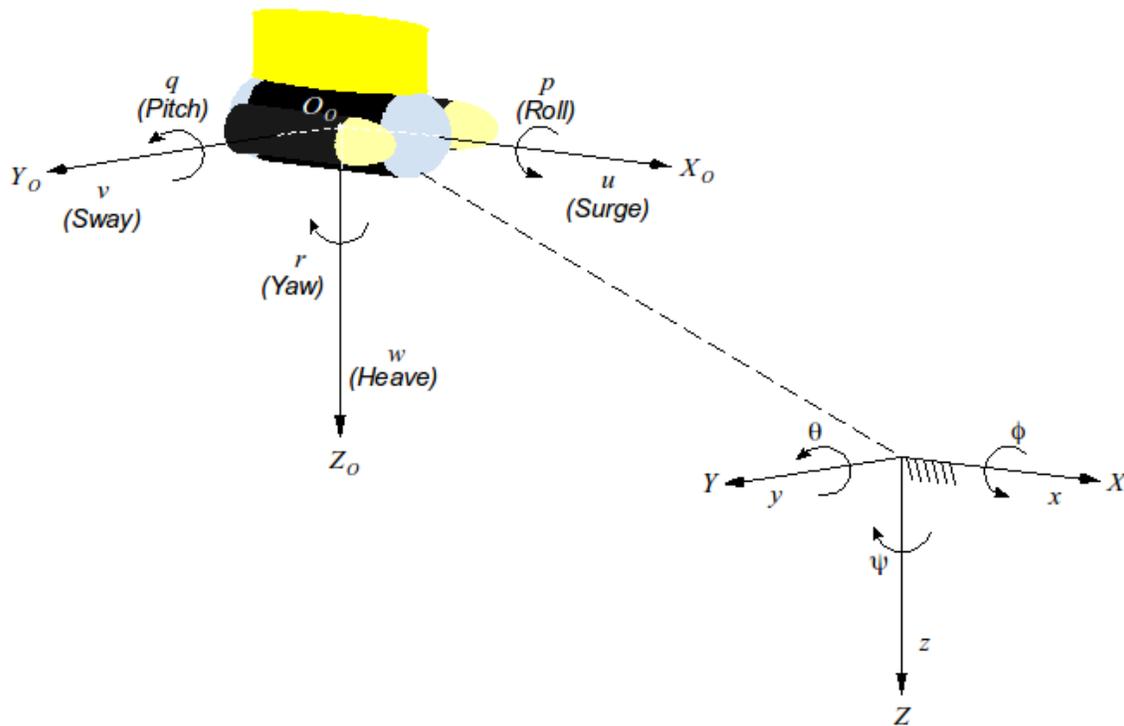


Figura 3.1: Referenciais do veículo (X_O, Y_O, Z_O) e do mundo (X, Y, Z).

O movimento de um corpo rígido de 6DOF pode ser descrito pelos seguintes vectores:

$$\eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad \nu = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix}, \text{ onde}$$

⁹ Em física, um referencial inercial é um referencial que descreve o tempo e o espaço homogeneamente e isotropicamente, de um modo independente do tempo.

η → vector de posição (x, y, z) e orientação (ϕ, θ, ψ) do veículo no referencial do mundo.

v → vector de velocidades lineares (u, v, w) e angulares (p, q, r) no referencial do veículo.

τ → vector das forças (X, Y, Z) e momentos (K, M, N) que actuam no veículo, no referencial do veículo.

A velocidade do veículo no seu referencial é representada no referencial do mundo através da seguinte transformação:

$$\boxed{\dot{\eta} = J(\eta)v} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde

$O_{3 \times 3}$ → matriz nula de ordem 3.

$\eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ → posição do veículo no referencial do mundo.

$\eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$ → orientação do veículo no referencial do mundo (ângulos de *Euler*¹⁰).

$v_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$ → velocidades lineares (de translação) no referencial do veículo.

$v_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$ → velocidades angulares (de rotação) no referencial do veículo.

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

¹⁰ Os ângulos de *Euler* (ϕ, θ, ψ) são três ângulos independentes que descrevem a orientação de um corpo rígido num espaço euclidiano tridimensional (espaço vectorial real de dimensão finita, com um produto interno).

A transformação cinemática $J_1(\eta_2)$ ¹¹ é a transformação através da qual é possível representar a velocidade de translação do veículo (expressa no seu referencial) no mundo ($\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1$). $J_1(\eta_2)$ consiste numa sequência de três rotações, a qual é realizada de acordo com a convenção *xyz* dos ângulos de *Euler* (*Bryant Angles*).

A transformação cinemática $J_2(\eta_2)$ é a transformação através da qual é possível representar a velocidade de rotação do veículo (expressa no seu referencial) no mundo ($\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2$). Note-se que em $J_2(\eta_2)$ existe uma singularidade para $\theta \pm 90^\circ$, uma vez que $\tan(90^\circ) = \infty$ e $\tan(-90^\circ) = -\infty$. Na prática esta questão não se torna um problema, visto que o veículo em estudo muito dificilmente terá valores de *pitch* perto de $\pm 90^\circ$ devido à sua configuração física (ver secção Modelo do ROV VideoRay PRO 3E no próximo subcapítulo).

3.1.2 Dinâmica

As equações de movimento de um corpo rígido¹² de 6DOF podem ser descritas na forma matricial apresentada:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (3.4)$$

sendo que a matriz de inércia do corpo rígido M_{RB} , é dada por:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_O \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

onde

$m \rightarrow$ massa do corpo rígido (*Kg*).

$I_{3 \times 3} \rightarrow$ matriz identidade de ordem 3.

$r_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \rightarrow$ centro de gravidade.

¹¹ Notação alternativa, mais sintética, das funções trigonométricas. Exemplificando, $c\phi = \cos(\phi)$, $s\theta = \sin(\theta)$ e $t\psi = \tan(\psi)$.

¹² A sigla “RB” que aparece associada às matrizes M_{RB} e C_{RB} e ao vector τ_{RB} é referente a *rigid-body*, que em português se traduz como “corpo rígido”.

$$S(r_G) = \begin{bmatrix} 0 & -z_G & y_G \\ z_G & 0 & -x_G \\ -y_G & x_G & 0 \end{bmatrix} \rightarrow S(r_G) \in SS(3), \text{ ou seja, matriz anti-simétrica (skew-symmetric) de ordem 3.}$$

$$I_O = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \rightarrow \text{tensor de inércia definido no referencial do corpo rígido, sendo que } I_x, I_y \text{ e } I_z \text{ são momentos de inércia em torno dos eixos } X_O, Y_O \text{ e } Z_O, \text{ respectivamente, e ainda que } I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx} \text{ e } I_{yz} = I_{zy}.$$

A matriz de *Coriolis* e termos centrípetos do corpo rígido $C_{RB}(\nu)$, é dada por:

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & -mS(\nu_1) - mS(\nu_2)S(r_G) \\ -mS(\nu_1) + mS(r_G)S(\nu_2) & -S(I_O\nu_2) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde

$O_{3 \times 3} \rightarrow$ matriz nula de ordem 3.

$$S(\nu_1) = \begin{bmatrix} 0 & -w & v \\ w & 0 & -u \\ -v & u & 0 \end{bmatrix} \rightarrow S(\nu_1) \in SS(3), \text{ ou seja, matriz anti-simétrica de ordem 3.}$$

$$S(\nu_2) = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \rightarrow S(\nu_2) \in SS(3), \text{ ou seja, matriz anti-simétrica de ordem 3.}$$

$$S(I_O\nu_2) = \begin{bmatrix} 0 & -I_z r + I_{zy} q + I_{zx} p & I_y q - I_{yx} p - I_{yz} r \\ I_z r - I_{zy} q - I_{zx} p & 0 & -I_x p + I_{xy} q + I_{xz} r \\ -I_y q + I_{yx} p + I_{yz} r & I_x p - I_{xy} q - I_{xz} r & 0 \end{bmatrix} \rightarrow S(I_O\nu_2) \in SS(3), \text{ ou seja, matriz anti-simétrica de ordem 3.}$$

É importante referir que a validade das equações de movimento anteriormente apresentadas depende de três condições que foram assumidas como verdadeiras:

A(1): O veículo é um corpo rígido (indeformável e constituído por um número finito de partículas.

A(2): O referencial do mundo é um referencial inercial.

A(3): A massa do veículo é constante no tempo $\dot{m} = 0$.

Na modelização de um veículo subaquático, além das equações de movimento, é necessário também ter em conta as forças e momentos que actuam no veículo – usualmente denominadas por forças e momentos hidrodinâmicos. São elas:

- Forças de propulsão (τ)
- Forças ambientais (τ_E)
 - Correntes marítimas;
 - Ondulação (pode ser desprezada, no caso de veículos subaquáticos);
 - Vento (não se aplica no caso, uma vez que se trata da modelização de um veículo subaquático).
- Forças induzidas por radiação (τ_H)
 - Massa Acrescentada (deve-se à inércia do fluido circundante);
 - Amortecimento Hidrodinâmico (deve-se a factores tais como a energia contida na ondulação criada pelo veículo (*potential damping*), o atrito na superfície do corpo (*skin friction*), o arrasto da ondulação (*wave drift*) e as perdas provocadas pelos vórtices criados pelo movimento relativo do fluido na superfície do corpo (*vortex shedding*));
 - Forças de Restabelecimento (provocadas pelo peso e flutuabilidade do veículo).

$$\tau_H = - \overbrace{M_A \dot{v}}^{\text{Matriz de Inércia da Massa Acrescentada}} - \overbrace{C_A(v)v}^{\text{Matriz de Coriolis e termos centrípetos da Massa Acrescentada}} - \overbrace{D(v)v}^{\text{Matriz de Amortecimento Hidrodinâmico}} - \overbrace{g(\eta)}^{\text{Forças de Restabelecimento}} \quad (3.7)$$

onde

$$D(v) \triangleq \underbrace{D_P(v)}_{\text{Potential Damping}} + \underbrace{D_S(v)}_{\text{Skin Friction Damping}} + \underbrace{D_W(v)}_{\text{Wave Drift Damping}} + \underbrace{D_M(v)}_{\text{Damping due to Vortex Shedding}} \quad (3.8)$$

Sendo que para veículos subaquáticos assume-se que:

A(4): Para veículos completamente submersos assume-se que os coeficientes de massa acrescentada são constantes e, como tal, independentes da frequência circular das ondas.

Além disso, é possível simplificar algumas componentes das forças hidrodinâmicas se, para o veículo em estudo, for possível assumir que:

S(1): O veículo move-se a velocidades baixas.

S(2): O veículo tem três planos de simetria.

Assim, vem:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \xRightarrow[\text{se } \mathbf{S(1) e S(2)}]{} M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a_2 = X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 = X_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 = X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b_2 = X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w + K_{\dot{q}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b_3 = X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w + K_{\dot{r}}p + M_{\dot{r}}q + N_{\dot{r}}r \end{cases} \quad \Downarrow \text{ se } \mathbf{S(1) e S(2)} \quad (3.10)$$

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

As contribuições dos elementos que não pertencem à diagonal da matriz M_A podem ser desprezadas se **S(1)** e **S(2)** forem assumidos, o que simplifica a matriz M_A e, subsequentemente, a matriz $C_A(\nu)$.

Além disso, para veículos subaquáticos, se estes realizarem movimentos desacoplados e tiverem três planos de simetria, é possível também simplificar significativamente a matriz de amortecimento $D(\nu)$, passando esta a ser composta apenas por termos de amortecimento linear e quadrático na diagonal da matriz. Ou seja, a equação (3.8)

$$D(\nu) \triangleq D_p(\nu) + D_s(\nu) + D_w(\nu) + D_M(\nu)$$

$$\Downarrow \text{ se } \mathbf{S(1)} \text{ e } \mathbf{S(2)}, \text{ vem}$$

$$D(\nu) = D_L(\nu) + D_Q(\nu) \quad (3.11)$$

onde a matriz de amortecimento linear $D_L(\nu)$ (predominante a velocidades baixas) é dada por:

$$D_L(\nu) = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

E a matriz de amortecimento quadrático $D_Q(\nu)$ (significativo quando o veículo se movimenta a velocidades superiores) é dada por:

$$D_Q(\nu) = \begin{bmatrix} X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Por fim, o vector de forças de restabelecimento $g(\eta)$ é definido por:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -(W - B)c\theta c\phi \\ -(y_G W - y_B B)c\theta c\phi + (z_G W - z_B B)c\theta s\phi \\ (z_G W - z_B B)s\theta + (x_G W - x_B B)c\theta c\phi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta s\phi - (y_G W - y_B B)s\theta \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

onde

$$r_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \rightarrow \text{centro de gravidade (as forças gravitacionais actuam sobre ele).}$$

$$r_B = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} \rightarrow \text{centro de flutuação (as forças de flutuabilidade actuam sobre ele).}$$

$W = mg$ \rightarrow peso submerso do corpo rígido. Sendo que,

m \rightarrow massa do corpo rígido (Kg).

g \rightarrow aceleração da gravidade (m/s^2).

$B = \rho g \nabla$ \rightarrow força de flutuabilidade. Sendo que,

ρ \rightarrow densidade do fluido (Kg/ m^3).

∇ \rightarrow volume do fluido deslocado pelo veículo (m^3).

As forças ambientais (τ_E), que essencialmente consistem em correntes marítimas no caso de veículos subaquáticos, não serão descritas nesta secção, uma vez que por uma questão de simplificação do modelo estas não foram consideradas¹³:

S(3): As forças ambientais, correntes marítimas no caso, são desprezadas $\rightarrow \tau_E = 0$.

¹³ Note-se que a consideração do efeito das correntes pode sempre ser efectuada, se o movimento do veículo em relação à água for considerado no processo de modelização [20].

Assim, reescrevendo as equações de movimento na forma matricial considerando as forças e momentos hidrodinâmicos, obtém-se as equações dinâmicas não-lineares para um corpo rígido com 6DOF:

$$\boxed{M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau} \quad (3.15)$$

Onde a matriz de inércia M é dada por:

$$M \triangleq M_{RB} + M_A \quad (3.16)$$

A matriz de *Coriolis* e termos centrípetos $C(v)$ é dada por:

$$C(v) \triangleq C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (3.17)$$

A matriz de amortecimento $D(v)$, previamente definida na equação (3.11), é dada por:

$$D(v) = D_L(v) + D_Q(v)$$

E finalmente, onde:

$g(\eta) \rightarrow$ vector de forças de restabelecimento (equação (3.14)).

$\tau \rightarrow$ vector de entrada de controlo (forças de propulsão).

3.1.3 Modelo do *Thruster*¹⁴

O vector τ é constituído pelas forças e momentos gerados pelos *thrusters* do veículo, pelo que resulta não só da força gerada por cada *thruster* como também da sua configuração, ou seja, da disposição dos *thrusters* no veículo (ver secção Simulação, nomeadamente na pág. 32).

A força de propulsão gerada por um *thruster* em geral constitui uma função não-linear, que depende não só da velocidade do veículo (v), como também da variável de controlo relativa à rotação da hélice (n). Além disso, em geral os *thrusters* não são simétricos – possuem

¹⁴ Neste documento utiliza-se, por vezes, a denominação comum de origem anglo-saxónica "*thrusters*" para designar os actuadores de um veículo subaquático.

características diferentes dependendo do sentido de rotação. A força gerada pelo *thruster* pode ser dada por:

$$T = \rho D^4 \left(\alpha_1 + \alpha_2 \frac{V_a}{nD} \right) n |n| \quad (3.18)$$

Onde,

n → Taxa de rotação da hélice.

D → Diâmetro da hélice.

ρ → Densidade do fluido.

V_a → Velocidade da água que está a entrar na hélice.

$\left(\alpha_1 + \alpha_2 \frac{V_a}{nD} \right) = K_T$ → Coeficiente da força do *thruster*. É uma função não-linear de quatro quadrantes, onde α_1 e α_2 são constantes dadas por características da hélice ($\alpha_2 < 0$).

Esta expressão (equação (3.18)) descreve por um lado a forte dependência da força de propulsão do quadrado da velocidade de rotação e, por outro, o efeito de perda de propulsão causado pela velocidade do veículo (uma vez que $\alpha_2 < 0$, à medida que a velocidade do veículo aumenta o *thruster* perde eficiência).

3.2 Implementação

Nesta secção são descritas as principais opções de implementação, quer a nível de simplificação do modelo do ROV em estudo, como a nível de organização e funcionalidades do simulador desenvolvido.

Este projecto foi implementado em MATLAB (*MATrix LABoratory*), uma vez que é uma ferramenta adequada para realizar operações com matrizes e permite o desenvolvimento de aplicações, algoritmos e a visualização de gráficos ilustrativos dos resultados obtidos.

3.2.1 Modelo do ROV VideoRay PRO 3E

O veículo em estudo é um micro ROV de inspecção, o qual tem capacidade para operar até 150m de profundidade. O veículo tem flutuabilidade positiva e é hidrosticamente estável na

água devido à distribuição do seu peso (o centro de gravidade do veículo encontra-se abaixo do centro de flutuabilidade). O equipamento disponível a bordo, a nível de sensores, consiste em duas câmaras (uma colocada na frente do ROV e outra na retaguarda), uma bússola e um sensor de pressão (profundidade). Possui ainda três actuadores (*thrusters*), dois no plano horizontal (paralelos entre si) e um no plano vertical. Ou seja, embora no processo de modelização do veículo este seja considerado como um corpo no espaço com 6DOF (nomeadamente *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* e *yaw*), a sua configuração dos *thrusters* apenas permite actuar em *surge*, *heave* e *yaw*, pelo que o VideoRay PRO 3E é um veículo subactuado¹⁵. Deste modo, uma vez que o veículo é hidrostáticamente estável e não tem actuação em *sway*, *roll* e *pitch*, assume-se que $\phi = \theta = 0$ e $v = p = q = 0$.

Por si só, este facto já simplifica o modelo. Contudo, optou-se também por definir a origem do referencial do veículo O_o no centro de gravidade do veículo, o que simplifica ainda mais o modelo, pois deste modo:

$$r_G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ e } I_{xy} = I_{yx} = I_{xz} = I_{zx} = I_{yz} = I_{zy} = 0 \Rightarrow I_o = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}.$$

Além disto, uma vez que a velocidade máxima do VideoRay PRO 3E é $\approx 1,34m/s^2$, confirma-se a validade de **S(1)** neste veículo (este move-se a velocidades baixas). Relativamente a **S(2)**, que assume que o veículo tem três planos de simetria, também se considera válida, visto que embora o veículo não seja perfeitamente simétrico nos três planos, está relativamente perto disso (Figura 3.2):

- Plano X_oZ_o : simétrico;
- Plano Y_oZ_o : não simétrico, mas perto de o ser;
- Plano X_oY_o : não simétrico. No entanto, uma vez que o veículo se move a baixas velocidades, os efeitos de acoplamento poderão ser desprezados [19].

¹⁵ Um veículo é considerado subactuado quando tem menor número de actuadores do que graus de liberdade (DOF).

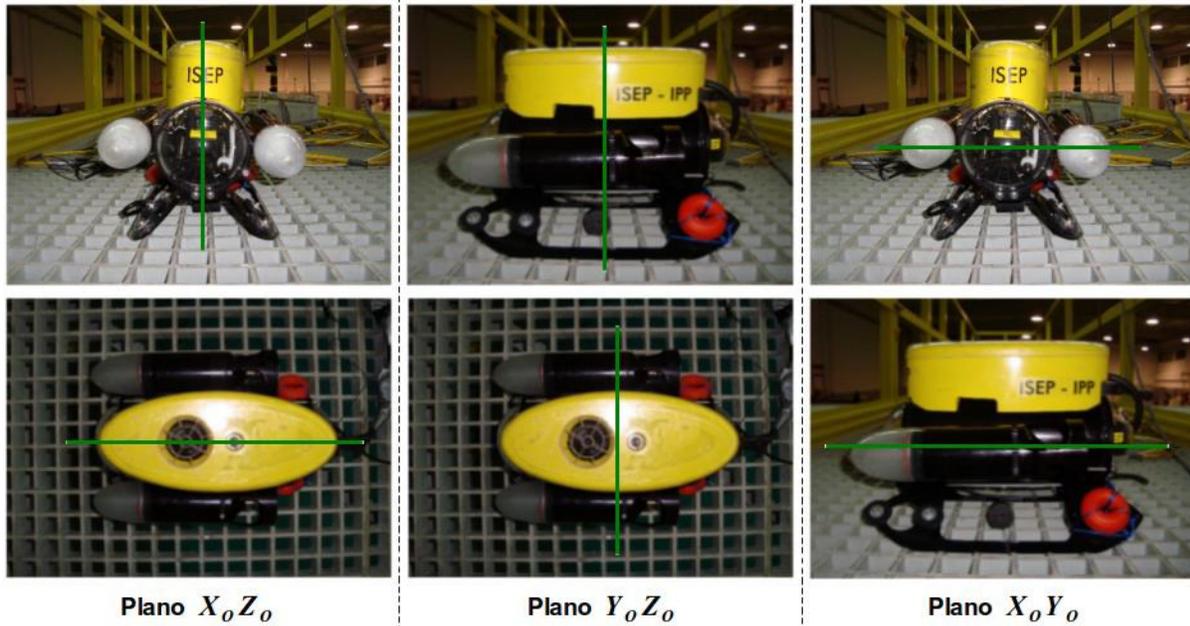


Figura 3.2: Planos de simetria do ROV VideoRay PRO 3E.

A simplificação do modelo a nível de forças e momentos hidrodinâmicos é bastante significativa e a aproximação aqui realizada não tem efeitos negativos drásticos no modelo, já que os elementos que mais contribuem para τ_H (equação (3.7)) mantêm-se após a simplificação (elementos das diagonais das matrizes) [17].

Os parâmetros que descrevem as não-linearidades do modelo do VideoRay PRO 3E foram calculados e medidos experimentalmente (neste último caso, sempre que possível) em [19]. Na implementação do modelo serão utilizados os valores experimentais sempre que estes existam, caso contrário serão utilizados os analíticos. Na Tabela 3.2 apresentam-se esses parâmetros.

Tabela 3.2: Propriedades e coeficientes do VideoRay PRO 3E.

Propriedade		Parâmetro	Valor
Massa e Inércia		m	3,8 Kg
		I_x	0,02275 Kg.m ²
		I_y	0,02391 Kg.m ²
		I_z	0,02532 Kg.m ²
Thrusters horizontais	<i>forward</i>	C_t	$2,5939 \times 10^{-4} N$
	<i>backward</i>	C_t	$1,0086 \times 10^{-4} N$
Thruster vertical	<i>forward</i>	C_t	$1,1901 \times 10^{-4} N$
	<i>backward</i>	C_t	$7,534 \times 10^{-5} N$
Massa Acrescentada		$X_{\ddot{u}}$	1,9404
		$Y_{\ddot{v}}$	6,0572
		$Z_{\ddot{w}}$	3,9482
		$K_{\dot{p}}$	0,0326
		$M_{\dot{q}}$	0,0175
		$N_{\dot{r}}$	0,0118
Amortecimento Linear		X_u	0,946
		Y_v	5,8745
		Z_w	3,702
		K_p	0,0009
		M_q	0,0012
		N_r	0,0048
Amortecimento Quadrático		$X_{ u }$	6,0418
		$Y_{ v }$	30,731
		$Z_{ w }$	26,357
		$K_{ p }$	0,0048
		$M_{ q }$	0,0069
		$N_{ r }$	0,4504

Note-se que os valores apresentados nas propriedades dos *thrusters* do veículo, isto é, os parâmetros C_t , representam o seguinte na força de propulsão gerada por um *thruster* (equação (3.18)):

$$T = \rho D^4 \left(\alpha_1 + \alpha_2 \frac{V_a}{nD} \right) n |n| \Rightarrow T = C_t n |n| \quad (3.19)$$

Relativamente ao cálculo do centro de flutuabilidade r_b , este foi realizado considerando as principais formas geométricas do ROV. Considerando que este é constituído por apenas um material, calculando o centro geométrico resultante (centróide), obtém-se a posição no veículo do centro de flutuabilidade do veículo¹⁶.

O volume do fluido deslocado pelo veículo ∇ foi obtido empiricamente. Colocou-se o ROV numa tina com água e totalmente submerso e mediu-se a altura da água. De seguida, retirou-se o ROV da tina e voltou-se a medir a altura da água na tina. Por fim, utilizando um medidor graduado, acrescentou-se água à tina até atingir a altura da água medida com o ROV dentro da tina, obtendo-se assim o volume pretendido.

Esta operação foi realizada diversas vezes para minimizar eventuais erros de medição e o valor utilizado posteriormente na modelização corresponde à média aritmética dos testes realizados.



Figura 3.3: *Setup* experimental para medição do volume de fluido deslocado pelo ROV VideoRay PRO 3E.

¹⁶ O princípio de Arquimedes enuncia que “Todo o corpo mergulhado num fluido (líquido ou gás) sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo”, pelo que o centro de flutuabilidade de um corpo submerso corresponde ao centro de gravidade do fluido do volume deslocado. Assim, no cálculo do centro de flutuabilidade do veículo em estudo, considera-se que este é um corpo homogéneo (assume-se que o fluido deslocado tem a densidade constante) totalmente submerso (o veículo opera nessa condição).

Na Tabela 3.3 apresentam-se os restantes valores utilizados na obtenção do modelo do ROV.

Tabela 3.3: Valores utilizados no modelo do ROV VideoRay PRO 3E.

Parâmetro	Valor
g	$9,81 \text{ m/s}^2$
$\rho_{\text{água doce}}$	1000 Kg/m^3
$\rho_{\text{água salgada}}$	1025 Kg/m^3
∇	$5,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Note-se que os valores da densidade da água (ρ) apresentados são valores médios, para as temperaturas e profundidades de operação do veículo, e ainda que o valor apresentado para o parâmetro ∇ é o valor obtido empiricamente na experiência anteriormente descrita.

3.2.2 Simulação

Como foi mencionado anteriormente, foi desenvolvido um simulador do VideoRay PRO 3E em MATLAB, capaz de simular o comportamento do ROV (através da implementação do seu modelo) de acordo com os comandos que este receber.

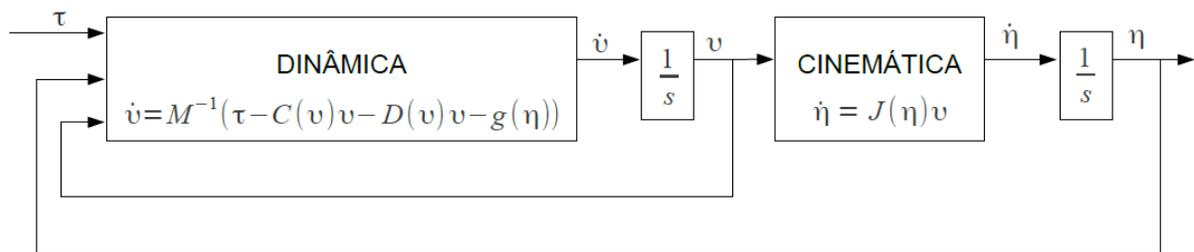


Figura 3.4: Arquitectura do sistema implementado (simulador ROV).

Como se pode constatar na Figura 3.4, o argumento de entrada consiste no vector de forças e momentos gerados pelos *thrusters* (τ) e, o argumento de saída, na pose do veículo no referencial do mundo (η). É importante referir que o vector τ (forças e momentos de propulsão), para a configuração dos *thrusters* do ROV VideoRay PRO 3E, obtém-se do seguinte modo:

$$\tau = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 + T_2 \\ 0 \\ T_3 \\ 0 \\ 0 \\ T_1 - T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_i n_1 |n_1| + C_i n_2 |n_2| \\ 0 \\ C_i n_3 |n_3| \\ 0 \\ 0 \\ C_i n_1 |n_1| - C_i n_2 |n_2| \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Ou seja, o utilizador não define τ directamente, mas sim o valor de n de cada *thruster* (no caso do VideoRay PRO 3E $n \in [0, 220]$). Analisando a equação (3.20) facilmente se constata que o ROV tem actuação em *surge* (X), *heave* (Z) e *yaw* (N), uma vez que possui dois actuadores no plano horizontal (paralelos entre si) e um no plano vertical. Assim, o movimento em *surge* resulta das forças geradas pelos dois actuadores horizontais (sendo que os dois *thrusters* contribuem de igual modo para o movimento resultante), o movimento em *heave* resulta da força gerada pelo actuador vertical e o movimento em *yaw* resulta da força diferencial gerada pelos dois actuadores horizontais.

Note-se que C_i varia dependendo do *thruster* a que corresponde e do seu sentido de rotação (consultar Tabela 3.2).

A representação gráfica do ROV é executada na sequência do argumento de saída, a pose do veículo no referencial do mundo (η).

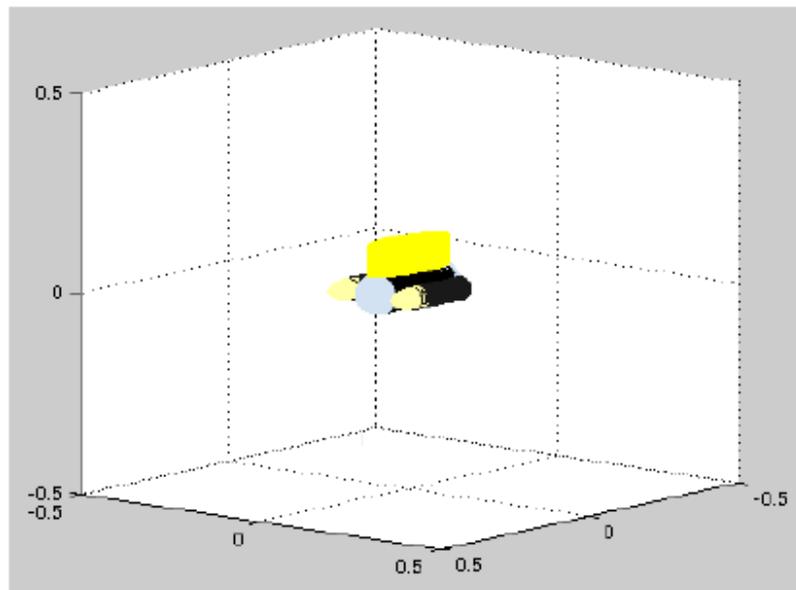


Figura 3.5: Representação gráfica do VideoRay PRO 3E em ambiente de simulação (MATLAB).

A representação da trajectória efectuada, bem como a apresentação de gráficos ilustrativos são opcionais e podem ser facilmente alterados ou adaptados à situação de teste em questão.

No que concerne à utilização do simulador, este pode ser utilizado de dois modos diferentes:

- **Modo isolado:** o simulador funciona como um bloco isolado, isto é, as manobras de controlo que se pretendam testar são implementadas directamente no próprio simulador (ver descrição do ficheiro *main.m* na Tabela 3.4). O simulador está preparado para receber comandos de um *joystick* (por defeito de 12 botões e 4 eixos analógicos), sendo que a manobra implementada por defeito é a condução do veículo através do *joystick* em ambiente de simulação.

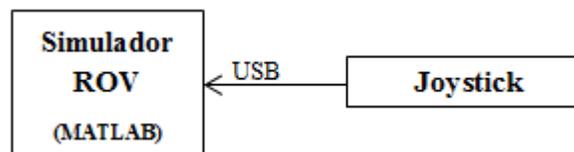


Figura 3.6: Diagrama de funcionamento do simulador do ROV em modo isolado.

- **Modo integrado:** o simulador funciona como substituto do veículo real em termos de implementação.

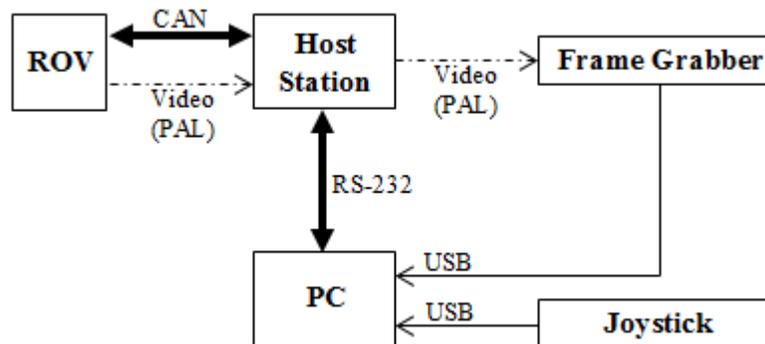


Figura 3.7: Diagrama do sistema de operação do *VideoRay PRO 3E*.

Como se pode ver na Figura 3.7, no sistema real o ROV está ligado a uma estação intermédia (*host station*) localizada à superfície através de um cabo umbilical, o qual conduz a energia de alimentação, o sinal de vídeo (PAL) e os dados entre o veículo e a estação (CAN). A interacção com o ROV é feita por comunicação série (RS-232) por intermédio da *host station*. Ora, no modo integrado pretende-se que a manobra seja testada no mesmo modo de operação – a partir do PC e enviando e recebendo

dados do ROV por comunicação RS-232, pelo que à excepção da transmissão de vídeo da câmara do veículo (que não é simulada), mantém-se o mesmo princípio (ver Figura 3.8).

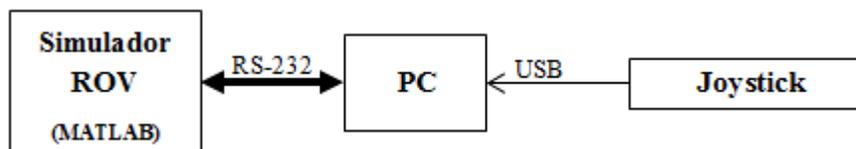


Figura 3.8: Diagrama de funcionamento do simulador do ROV em modo integrado.

Note-se que neste caso, o simulador do ROV pode estar a correr no mesmo computador a que se refere o bloco PC, ou não.

A existência de dois modos de utilização do simulador permite ao utilizador desenvolver o conceito de uma nova manobra apenas em ambiente de simulação (modo isolado) e, se esta se verificar válida, implementar a manobra para o sistema real e, em vez de a testar directamente com o veículo, testá-la primeiro no simulador (modo integrado¹⁷).

Para uma melhor compreensão da utilização do simulador desenvolvido, apresenta-se detalhadamente na Tabela 3.4 a sua organização, através da descrição dos ficheiros constituintes e respectivas funcionalidades.

Tabela 3.4: Organização do simulador do ROV VideoRay PRO 3E.

Ficheiro	Tipo	Funcionalidades
<i>main.m</i>	<i>script</i>	Ficheiro principal a partir do qual deve ser executado o simulador – ver Figura 3.4. No caso de utilização em modo isolado, possui uma secção destinada à implementação da manobra (por defeito, a teleoperação do ROV através do <i>joystick</i> está implementada).
<i>simROV.m</i>	<i>function</i>	Simula o comportamento do ROV VideoRay PRO 3E.
<i>parametros.m</i>	<i>script</i>	Declaração de todas as variáveis relativas às propriedades e coeficientes específicos do VideoRay PRO 3E (ver Tabela 3.2 e Tabela 3.3). Outras variáveis globais podem ser declaradas neste ficheiro.
<i>parametros_init.m</i>	<i>script</i>	Atribuição de todos os valores iniciais das variáveis declaradas no ficheiro <i>parametros.m</i> .
<i>ROVplot.m</i>	<i>function</i>	Representação gráfica do ROV (por defeito a do VideoRay PRO 3E). Recebe como argumento de entrada η (pose actual).

¹⁷ O modo integrado do simulador do ROV consiste numa simulação *Hardware-in-the-Loop* (HIL) [21].

<i>thrusters.m</i>	<i>function</i>	Cálculo das forças e momentos de propulsão (τ). Recebe como argumento de entrada n_1 , n_2 e n_3 . Devolve τ .
<i>joystick.m</i>	<i>function</i>	Leitura (comunicação série) e processamento dos dados recebidos de um <i>joystick</i> (conversão da extensão dos eixos analógicos para a gama de n do veículo simulado). Utilizado no modo isolado.
<i>GainCorrection.m</i>	<i>function</i>	Simula a assimetria dos actuadores que se verifica no veículo real. Necessário utilizar quando o simulador é utilizado no modo integrado.
<i>SerialRead.m</i>	<i>function</i>	Lê os dados recebidos pela porta série e devolve-os como argumento de saída – simula os dados recebidos pelo ROV do PC (comandos do <i>joystick</i> ou comandos gerados pela manobra que está a ser executada (τ)). Necessário no modo integrado.
<i>SerialWrite.m</i>	<i>function</i>	Envia dados (argumentos de entrada) para porta série – simula os dados que o ROV envia para o PC (dados da bússola (ψ) e sensor de pressão (z), por exemplo). Necessário no modo integrado.
<i>graficos.m</i>	<i>function</i>	Representação gráfica dos dados que o utilizador entender importantes.
<i>erros.m</i>	<i>function</i>	Definição e atribuição de erros associados ao modelo ideal implementado (por defeito, a τ e aos dados devolvidos pelo simulador ao bloco PC em modo integrado). Podem ser implementados outros erros.

O ficheiro *GainCorrection.m* é necessário porque os actuadores do plano horizontal do veículo real têm um comportamento diferente para iguais n (taxa de rotação da hélice), ou seja, são assimétricos. Na execução de uma manobra com o simulador em modo integrado, uma vez que esta é implementada no bloco PC preparada para interagir directamente com o veículo real, este factor é sempre considerado – logo a correcção da assimetria¹⁸ dos actuadores está implementada, pelo que o simulador tem que obrigatoriamente simular esta assimetria também (à semelhança do que acontece no veículo real).

A estrutura do simulador foi pensada deste modo para ser o mais adaptável possível a diferentes situações de teste ou até mesmo a outros veículos (UUVs). Note-se que foi implementado um modelo para um veículo subaquático com 6DOF – para alterar o veículo simulado bastariam ser alterados os ficheiros *parametros.m* e *ROVplot.m*. Eventualmente as

¹⁸ A correcção de T_1 e T_2 (forças geradas pelos *thrusters* a bombordo e estibordo, respectivamente) é feita através de uma tabela de consulta (obtida empiricamente), a qual faz a correspondência dos n pretendidos com os valores reais simétricos correspondentes (o *thruster* com propulsão superior é limitado pelo outro).

funções *GainCorrection.m* e *thrusters.m* ficariam inutilizadas ou também teriam que sofrer alterações.

4

Manobras de Condução Assistida

O conceito de manobra de condução assistida, neste contexto, traduz-se na implementação de um sistema de controlo que confira ao veículo a capacidade de executar determinada manobra de inspecção, apenas com comandos de alto nível. Está inerente ainda a este conceito, a característica de que toda a manobra de condução assistida, quando implementada, permita a alternância entre a execução da manobra desenvolvida e a teleoperação do ROV. Esta necessidade advém da própria natureza de uma missão de inspecção, onde muitas vezes é necessária a intervenção do operador quer seja para garantir a integridade dos equipamentos, quer seja para conduzir o veículo até à área de interesse ou realizar a selecção dos locais que se pretendam inspeccionar com cuidado (e, nesse caso, executar uma manobra de condução assistida para realizar uma melhor inspecção do alvo). Assim, o ROV deverá dispor de dois modos de operação – manual (teleoperação através de um *joystick*) e condução assistida (execução de uma das manobras de condução assistida implementadas).

Nesta dissertação foram concebidas e implementadas duas manobras de condução assistida, as quais seguem duas abordagens distintas, como se poderá constatar nas descrições em baixo apresentadas.

4.1 IBVS

Para a primeira manobra de condução assistida desenvolvida, optou-se por uma solução que fosse transversal a todos os pequenos ROVs e que pudesse ser implementada no mais básico dos ROVs sem implicar custos adicionais. A questão que se coloca é a seguinte: como melhorar a teleoperação de um destes veículos recorrendo apenas ao seu equipamento original? A solução passa por explorar o elemento comum a todos eles – a câmara.

O sistema desenvolvido e implementado nesta abordagem foi objecto de publicação na conferência *OCEANS 2012 MTS/IEEE Hampton Roads*, USA [22].

4.1.1 Formulação do Problema

Como já foi mencionado anteriormente, nesta primeira abordagem, é estudada a viabilidade do uso exclusivo da câmara para conferir ao robô a capacidade de manter o objecto de interesse no campo da imagem, estável o suficiente para permitir uma adequada inspecção (mesmo em condições adversas – correntes, má visibilidade). Com este propósito, vários métodos de visão foram implementados para realizar a detecção do alvo. O tipo de alvos usados neste estudo são cabos, tubos ou estruturas similares, uma vez que são objectos comuns na área de inspecção subaquática.

O objectivo das manobras executadas é manter uma distância constante entre o ROV e o alvo escolhido, mantendo-o sempre visível no campo da imagem, corrigindo suavemente o seu posicionamento relativamente ao alvo de modo a este permanecer no centro da imagem. Isto significa que a questão da ausência de *sway* permanece; o que significa que se o veículo for arrastado nesse eixo enquanto executa a manobra, é o operador que o tem que reposicionar se necessário (Figura 4.1). Se o veículo estiver a executar a manobra proposta, este vai manter-se a uma distância x do alvo (*target*) e alinhado de frente para ele (para manter o alvo no centro do plano da imagem); ora, se o veículo sofrer um arrastamento lateral e estiver em modo de condução assistida, este vai corrigir a sua posição em x e a sua orientação (volta a alinhar-se de frente e centrado para o alvo) – a linha azul a tracejado na Figura 4.1 representa isso mesmo. Se o veículo sofrer arrastamentos laterais enquanto executa a manobra de condução assistida proposta, este vai deslocar-se sobre a linha azul de modo a que o alvo permaneça no centro do seu plano de imagem.

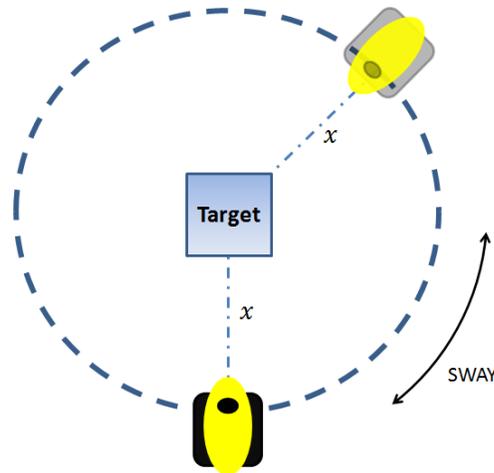


Figura 4.1: Efeito *sway* num ROV de 3DOF (actuadores em *surge*, *heave* e *yaw*).

4.1.2 Conceitos Teóricos

Visual Servoing (também denominado *Vision-Based Robot Control*) é um termo usado para descrever o controlo em malha fechada de um robô, cuja realimentação é feita com informação adquirida por sensores de visão. O controlo *visual servoing* depende de técnicas de processamento de imagem, visão computacional e teoria de controlo.

O principal objectivo de um esquema de controlo baseado em visão é a minimização do erro $e(t)$, o qual é tipicamente definido por [25]:

$$e(t) = s(m(t), a) - s^* \quad (4.1)$$

Onde $m(t)$ é um conjunto de medições da imagem, o qual é usado para calcular um vector de k pontos de interesse da imagem (*features*), $s(m(t), a)$, no qual a é um conjunto de parâmetros que representa potencial conhecimento adicional sobre o sistema. O vector s^* contém os valores desejados das *features*.

Neste caso, a técnica implementada é IBVS (*Image Based Visual Servoing* ou *visual servoing 2D*), o que significa que a *pose* (posição e orientação) do alvo não é estimada e a lei de controlo baseia-se na diferença da posição actual e a desejada de determinadas características no plano da imagem (*features*) [14].

Esquemas de controlo *image-based* tradicionais usam as coordenadas no plano da imagem de um conjunto de pontos para definir o conjunto s . As medições da imagem m são geralmente

coordenadas em pixéis de um conjunto de pontos de imagem e os parâmetros a na definição de $s = s(m, a)$ são os parâmetros intrínsecos da câmara.

No esquema de controlo IBVS implementado, como já foi referido, a minimização do erro é feita sempre no plano da imagem (em pixéis).

4.1.3 Implementação

Na Figura 4.2 é ilustrado o sistema de operação real do ROV *VideoRay PRO 3E*. Como se pode constatar, no sistema real o ROV está ligado a uma estação intermédia (*host station*) localizada na superfície através de um cabo umbilical, o qual conduz a energia de alimentação, o sinal de vídeo (PAL) e os dados entre o veículo e a estação (CAN). A *host station* está ligada a 230V AC e é responsável pela habilitação da interacção com o ROV através de comunicação série (RS-232). Esta interacção é realizada por um PC (Intel Core i5-2410M), o qual também recebe o sinal de vídeo depois deste ser digitalizado por um *frame grabber* (Pinnacle DC100) para uma resolução de 640×480 . Está ainda conectado ao PC um *joystick* (Logitech RumblePad 2) para efeitos de teleoperação.

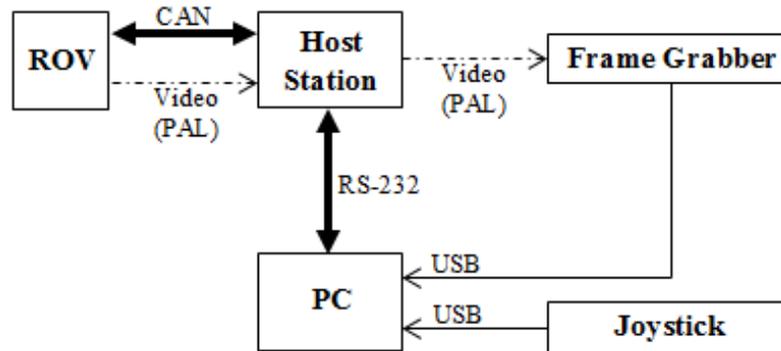


Figura 4.2: Diagrama do sistema de operação do *VideoRay PRO 3E*.

O *software* do sistema, o qual corre no PC, foi implementado em linguagem C/C++ e no sistema operativo Linux. Como se pode ver na Figura 4.3, onde a arquitectura de *software* é apresentada, a unidade de controlo recebe a localização do alvo no plano da imagem (o centro do alvo no eixo x no plano da imagem, x_{12} , e a largura do alvo $|x_1 - x_2|$), dados provenientes dos sensores e comandos do *joystick*. O operador é responsável pela selecção do modo de operação (manual ou condução assistida) e detém a prioridade mais alta no sistema. Por defeito o sistema está em modo manual, o que significa que os comandos enviados pelo

controlador para a *host station* são os comandos enviados pelo *joystick*. Se o operador iniciar uma manobra de condução assistida, a unidade de controlo decide quais os comandos que devem ser enviados para o ROV de acordo com a diferença entre a posição actual e a desejada do alvo relativamente ao veículo, enquanto que o *joystick* só envia comandos de alto nível (manuseamento do movimento em *heave*, alternância entre os diferentes métodos de visão implementados ou ajuste de parâmetros de visão). Note-se que o operador pode alternar para controlo manual sempre que o entender.

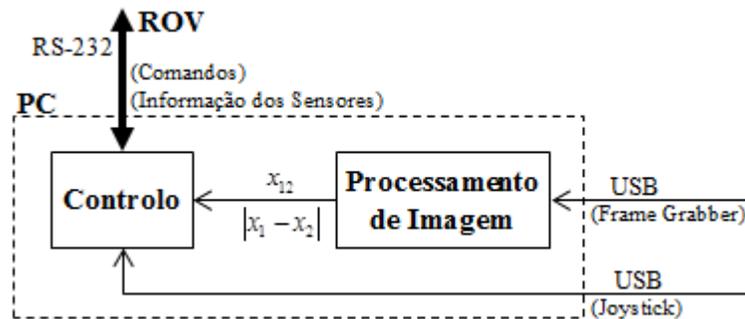


Figura 4.3: Arquitectura do *software*.

Quanto à unidade de processamento de imagem, é perceptível na arquitectura apresentada que cada *frame* do sinal de vídeo é sujeito a esse processo. Na Figura 4.4 é apresentada a sequência de acções que ocorrem dentro desta unidade.

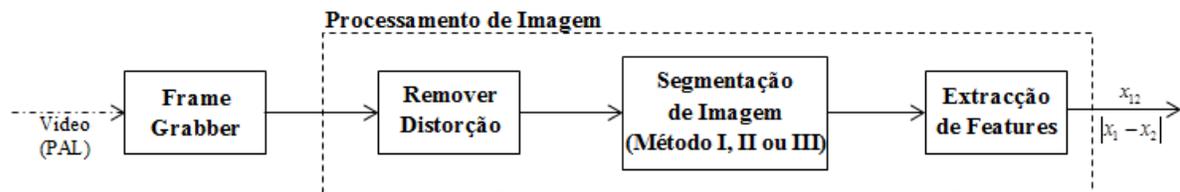


Figura 4.4: Sequência de processos realizados na unidade de Processamento de Imagem.

A detecção do objecto de inspecção, no sistema proposto, pode ser realizada por diferentes técnicas de processamento de imagem. Esta característica permite a comparação e avaliação das várias técnicas implementadas para as mesmas condições do meio. Os métodos de processamento implementados são:

- Método I: Detecção de Linhas Verticais (*Full Frame*);
- Método II: Detecção de Linhas Verticais (*Template*);
- Método III: Segmentação de Cor (*Template*).

A implementação destes métodos foi realizada com recurso a bibliotecas padrão de visão, nomeadamente ao *OpenCV* [26] e à *cvBlob*. Independentemente do método que for seleccionado na etapa de segmentação de imagem, o bloco “Processamento de Imagem” recebe sempre um *frame* da transmissão de vídeo da câmara do ROV e devolve sempre dois valores resultantes do processamento: o centro do alvo no eixo x do plano da imagem (x_{12}) e a largura do alvo ($|x_1 - x_2|$).

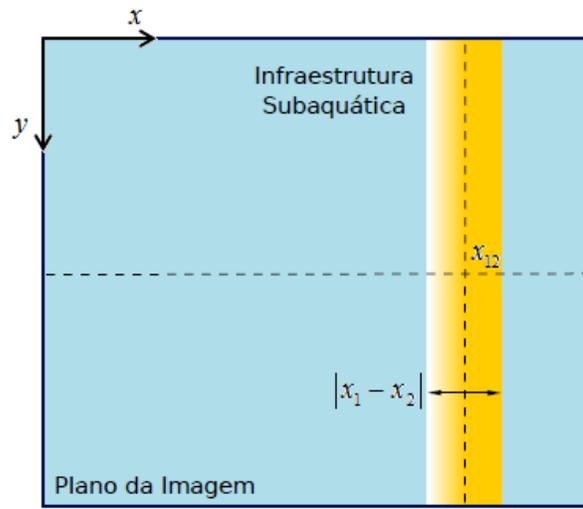


Figura 4.5: Ilustração do centro do alvo no eixo x do plano da imagem (x_{12}) e da largura do alvo $|x_1 - x_2|$.

No que diz respeito ao bloco de controlo, este, tal como já foi mencionado, possui dois modos de operação – manual e condução assistida. No modo manual, o veículo é totalmente teleoperado pelo *joystick*; no modo de condução assistida, os comandos enviados para o veículo são dados pela lei de controlo IBVS e o *joystick* apenas envia comandos de alto nível. A unidade de controlo apresentada na Figura 4.3 é a responsável pela correcta interpretação e execução dos comandos dados pelo operador do ROV. Esta unidade é composta por três controladores – um para cada DOF actuado (*surge*, *heave* e *yaw*). O controlo de movimento no plano horizontal (*surge-yaw*) e no plano vertical (*heave*) foi implementado de modo desacoplado, independentemente do modo de operação seleccionado [23].

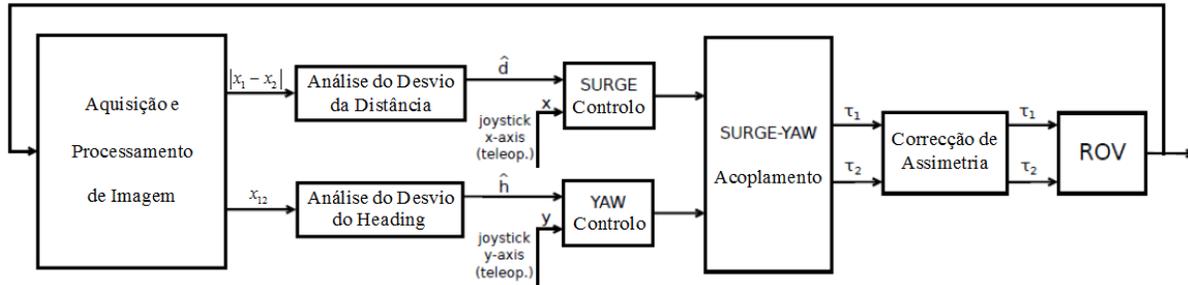


Figura 4.6: Diagrama de controlo de surge-yaw.

Controlo Surge-Yaw: Quando o modo manual é seleccionado, os valores da velocidade e o sentido de rotação dos *thrusters* horizontais (τ_1 e τ_2 para os *thrusters* de bombordo e estibordo, relativamente) são dados pelo eixo-x (movimento em *surge*) e eixo-y (movimento *yaw*) do *joystick*. Quando activado o modo de condução assistida, τ_1 e τ_2 são calculados por uma lei de controlo baseada no desvio entre a posição actual e a desejada do alvo relativamente ao ROV – a entrada dada ao controlador *surge* (\hat{d}) é o desvio da distância que é necessário corrigir, de modo a manter o veículo a uma distância constante do alvo; a entrada dada ao controlador *yaw* (\hat{h}) é o desvio de *heading* (ψ) que é necessário corrigir, de modo a manter o alvo no centro horizontal (eixo x) do plano da imagem.

O bloco de correcção de assimetria é necessário porque os actuadores do plano horizontal do veículo têm um comportamento assimétrico para iguais n (taxa de rotação da hélice). A correcção de T_1 e T_2 (forças geradas pelos *thrusters* a bombordo e estibordo, respectivamente) é feita através de uma tabela de consulta (obtida empiricamente), a qual faz a correspondência dos n pretendidos com os valores reais simétricos correspondentes (o *thruster* com produção superior é limitado pelo outro).

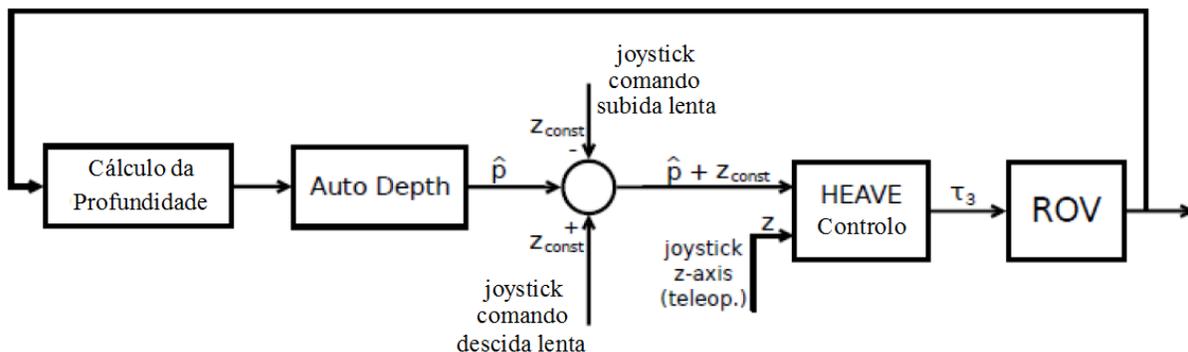


Figura 4.7: Diagrama de controlo de heave.

Controlo Heave: O valor velocidade e o sentido de rotação do *thruster* vertical (τ_3) pode ser dado pelo eixo-z do *joystick* ou pela unidade de *auto depth*, dependendo do estado da opção “auto depth” (habilitado/desabilitado). Os dados do sensor de pressão são realimentados indirectamente na unidade de *auto depth*, a qual os utiliza para calcular o τ_3 necessário para manter o ROV a uma profundidade constante. A este valor é então somada uma constante (z_{const}), no caso de uma das opções “subida lenta” ou “descida lenta” estiverem seleccionadas.

Todas estas opções para manusear o movimento de *heave* (eixo-z do *joystick*, “auto-depth”, “subida lenta” e “descida lenta”) estão disponíveis nos dois modos de operação do robô (manual ou condução assistida).

O sistema de controlo implementado como está, permite, no modo de operação de condução assistida, a execução de manobras tais como o seguimento de tubagem ou cablagem vertical (subsequentemente referida como “*Tracking Up/Down*”) e a centralização de um objecto de interesse no plano da imagem (subsequentemente referida como “*Heading Centering*”), durante as quais o operador apenas necessita de dar comandos de alto nível – manusear o movimento em *heave*, alternar entre os diferentes métodos de visão implementados ou ajustar parâmetros de visão.

4.2 Controlo Cinemático

A principal limitação do sistema proposto na abordagem anterior (ver subcapítulo antecedente, IBVS) é o facto de não lidar com a ausência de actuação em *sway*, particularmente necessário na compensação do efeito de arrastamento lateral. Como tal, nesta segunda abordagem, explora-se este problema através do estudo de um sistema de controlo cinemático de posição para o plano horizontal do ROV (*surge* e *yaw*), em tudo semelhante ao controlo linear tradicionalmente implementado em veículos de tracção diferencial [24].

4.2.1 Formulação do Problema

Como já foi referido anteriormente, o veículo em estudo tem dois actuadores no plano horizontal e um outro no plano vertical (ver Figura 1.3). Aferiu-se ainda que, embora o veículo não seja perfeitamente simétrico nos três planos (plano X_oZ_o simétrico, plano Y_oZ_o quase simétrico e o plano X_oY_o não simétrico – ver Figura 3.2), uma vez que é estável em *roll* e *pitch* (por este motivo assume-se que são sempre nulos) e este se move a velocidades baixas, os efeitos de acoplamento poderiam ser desprezados [17][19]. Considerando esta premissa, poder-se-ia de igual modo desprezar os efeitos de acoplamento entre movimentos do plano horizontal (*surge* e *yaw*) e do plano vertical (*heave*) em termos de controlo [19][23]. Como tal, nesta abordagem propõe-se o estudo de uma manobra no plano horizontal do veículo que realiza uma trajectória em dente-de-serra para dotar o veículo de movimento lateral (ver Figura 4.8).

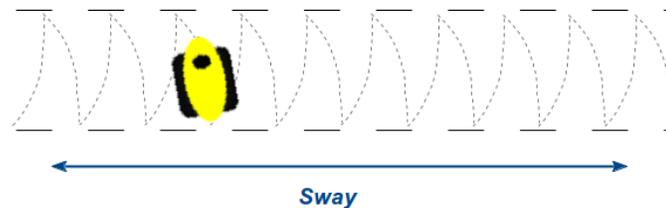


Figura 4.8: Movimento lateral através de uma trajectória dente-de-serra.

No decorrer das experiências realizadas para a abordagem anterior [22], foi identificado que este tipo de movimento quando executado a baixas velocidades e se a oscilação do *heading* do ROV (*yaw*) for pequena, produz um vídeo de inspecção estável onde se denota apenas um movimento lateral do veículo. Deste modo, actuando apenas em *surge* e *yaw*, será possível deslocar o veículo lateralmente do ponto de vista do operador.

O controlo do movimento no plano vertical do veículo (*heave*), embora não seja o foco de estudo nesta abordagem, acaba por ser em tudo semelhante ao apresentado na abordagem anterior (ver Figura 4.7), uma vez que dispõe de um actuador independente e considera-se desacoplado do controlo do plano horizontal do veículo.

4.2.2 Conceitos Teóricos

Como foi referido anteriormente, este estudo propõe uma manobra no plano horizontal do robô, o qual dispõe de dois actuadores que lhe conferem acção em *surge* e *yaw*. Uma vez que

o plano vertical do veículo não é considerado, a sua cinemática torna-se em tudo semelhante à de um robô de tracção diferencial. Como tal, optou-se por implementar um controlo cinemático de posição para o plano horizontal do ROV (controlo linear), tradicionalmente implementados em veículos de tracção diferencial terrestres.

4.2.2.1 Modelo Cinemático

O modelo cinemático no referencial inercial (X_I, Y_I) é dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Onde x e y são as coordenadas actuais do veículo no referencial inercial nos eixos X_I e Y_I respectivamente, ψ corresponde à orientação¹⁹ actual do robô (*yaw*), u representa a velocidade linear do veículo no eixo X_R e r a velocidade angular em torno de Z_R . Na Figura 4.9, pode-se observar o ROV representado no plano horizontal (X_R, Y_R) em relação ao referencial inercial (X_I, Y_I) , sendo os erros de distância (ρ) e orientação (α e β) representados em coordenadas polares com origem na posição de destino (*goal*). O referencial do veículo é denominado por (X_R, Y_R, Z_R) .

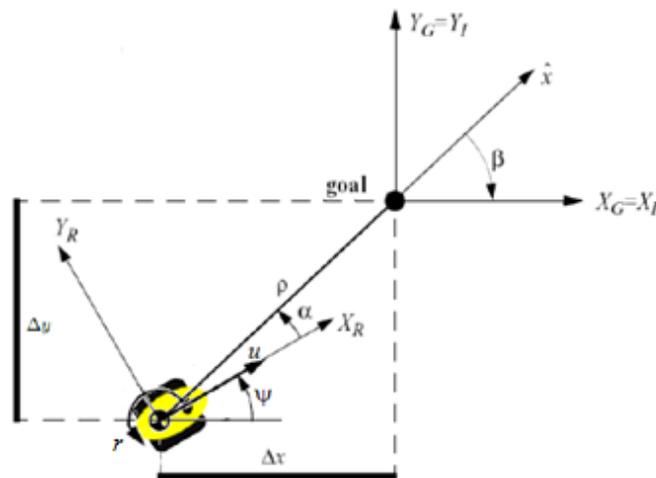


Figura 4.9: Representação do ROV no plano $X_R Y_R$ no referencial inercial (X_I, Y_I) e ilustração dos erros de distância (ρ) e orientação (α e β) em coordenadas polares.

¹⁹ Orientação nesta secção refere-se apenas ao ângulo do robô em torno do eixo vertical (ψ), uma vez que se está a considerar apenas o plano horizontal do veículo.

Os erros de distância (ρ) e orientação (α e β) da posição actual do veículo relativamente à posição que se pretende atingir (*goal*), são dados por [24]:

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (4.3)$$

$$\alpha = -\psi + \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (4.4)$$

$$\beta = -\psi - \alpha \quad (4.5)$$

Como se pode verificar observando a Figura 4.9, ρ representa a distância entre a posição actual do veículo e o destino pretendido (*goal*), α representa o ângulo entre a orientação actual do veículo (ψ) e a orientação necessária para atingir o *goal* e β representa a orientação necessária para atingir o *goal*.

O sistema deste novo referencial em coordenadas polares, pode ser descrito por [24]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha) & 0 \\ -\text{sen}(\alpha)/\rho & -1 \\ \text{sen}(\alpha)/\rho & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix}, \text{ para } \alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \text{ e} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 \\ -\text{sen}(\alpha)/\rho & 1 \\ \text{sen}(\alpha)/\rho & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix}, \text{ para } u = -u \wedge \alpha \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2}\right] \cup \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$$

Definindo-se o destino à frente do robô no momento inicial ($t = 0$), é sempre possível que α pertença aos intervalos apresentados em (4.6); no entanto, não há garantia que α pertença aos intervalos para todo o t . A equação (4.6) apresenta as duas situações possíveis de localização do ponto destino – a primeira situação acontece quando o *goal* se encontra na frente do robô e a segunda quando o *goal* se encontra atrás (por esse motivo $u = -u$, pois o robô move-se na direcção oposta do primeiro caso).

4.2.2.2 Lei de Controlo

Recorrendo à lei de controlo linear:

$$u = k_\rho \rho \quad (4.7)$$

$$r = k_\alpha \alpha + k_\beta \beta \quad (4.8)$$

Obtém-se o sistema realimentado:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha) & 0 \\ -\frac{\sin(\alpha)}{\rho} & -1 \\ \sin(\alpha)/\rho & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_\rho \rho \\ k_\alpha \alpha + k_\beta \beta \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_\rho \rho \cos(\alpha) \\ k_\rho \sin(\alpha) - k_\alpha \alpha - k_\beta \beta \\ -k_\rho \sin(\alpha) \end{bmatrix},$$

para $\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ e

(4.9)

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha)/\rho & 1 \\ \sin(\alpha)/\rho & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_\rho \rho \\ k_\alpha \alpha + k_\beta \beta \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_\rho \rho \cos(\alpha) \\ -k_\rho \sin(\alpha) + k_\alpha \alpha + k_\beta \beta \\ k_\rho \sin(\alpha) \end{bmatrix},$$

para $u = -u \wedge \alpha \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2}\right] \cup \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$

Como se pode constatar nas equações (4.7) e (4.8), a lei de controlo define a velocidade linear (u) proporcional ao erro de distância (ρ) e a velocidade angular (r) proporcional aos erros de orientação (α e β). Como tal, a constante de proporcionalidade k_ρ influencia a velocidade de aproximação ao destino, e k_α e k_β influenciam a correcção da orientação do robô.

Note-se que esta configuração conduz o robô para $(\rho, \alpha, \beta) = (0, 0, 0)$, uma vez que a lei de controlo calcula as velocidades de actuação (u e r) no sentido de diminuir o erro existente entre a posição actual do robô e o destino. Note-se ainda que $(\alpha, \beta) \in [-\pi, \pi]$, o sinal de controlo v tem sempre um sinal constante e que, no referencial cartesiano, a lei de controlo origina equações não definidas para $x = y = 0$ (por este motivo optou-se por implementar o controlo cinemático no sistema de coordenadas polares).

É ainda importante referir as seguintes condições de estabilidade do sistema:

- Condição para o sistema realimentado ser localmente exponencialmente estável:

$$k_\rho > 0 \quad \wedge \quad -k_\beta > 0 \quad \wedge \quad k_\alpha - k_\rho > 0$$

- Condição que garante que o robô não muda de direcção na aproximação:

$$k_\rho > 0 \quad \wedge \quad k_\beta < 0 \quad \wedge \quad k_\alpha + \frac{5}{3}k_\beta - \frac{2}{\pi}k_\rho > 0$$

Um sistema com duas entradas (u e r) e três saídas ($\dot{\rho}$, $\dot{\alpha}$ e $\dot{\beta}$) não é estável no seu estado natural. O estudo das condições de estabilidade necessárias para este sistema foi realizado por Astolfi em [27].

4.2.3 Implementação

A implementação do sistema proposto pode ser descrita em duas etapas – o desenvolvimento do algoritmo que gera os pontos que definem a trajectória dente-de-serra (*waypoints*) que permite a deslocação lateral do veículo e a implementação do algoritmo e do controlador linear cinemático de posição para o plano horizontal do robô no simulador do *VideoRay PRO 3E* desenvolvido.

4.2.3.1 Manobra de Movimento Lateral – Algoritmo

Para o operador do ROV poder realizar a manobra de movimento lateral apenas com um comando de alto nível, foi desenvolvido um algoritmo que gera os *waypoints* da trajectória dente-de-serra de acordo com a distância e o sentido do deslocamento lateral (Δd) que o operador pretende realizar.

Como se pode verificar no Algoritmo 1 (linha 2), o primeiro *waypoint* da trajectória coincide com a posição actual do veículo (x, y) no momento em que o algoritmo é iniciado. Note-se ainda que a trajectória da manobra de movimento lateral é gerada de acordo com a orientação do veículo (ψ) no mesmo instante (linha 16).

Na Figura 4.10 são ilustradas as distâncias Δx , Δy e Δd presentes no algoritmo apresentado, para uma melhor compreensão do que representam.

Algoritmo 1 Manobra de Movimento Lateral

Requisitos: Veículo com actuação em *surge* e *yaw*

Resultados: Lista de *waypoints* que definem uma trajectória em dente-de-serra

1: Calcular o número de *waypoints* necessários para percorrer a distância lateral desejada Δd

2: Declarar $n=0$ e $waypoints(n)=(0,0)$

3: **Repetir**

4: Incrementar n

5: **Se** $\Delta d > 0$

6: **Se** n for ímpar

7: $waypoints(n)=(x-\Delta x, y+n\Delta y)$

8: **Senão**

9: $waypoints(n)=(x, y+n\Delta y)$

10: **Senão**

11: **Se** n for ímpar

12: $waypoints(n)=(x-\Delta x, y-n\Delta y)$

13: **Senão**

14: $waypoints(n)=(x, y-n\Delta y)$

15: **Até** n ser igual ao número de *waypoints* calculados

16: Rotação da orientação actual do veículo ψ e translação para a posição actual (x, y) em todos os *waypoints* gerados ($waypoints = R_{x,y}(\psi) \times waypoints + T_{x,y}$)

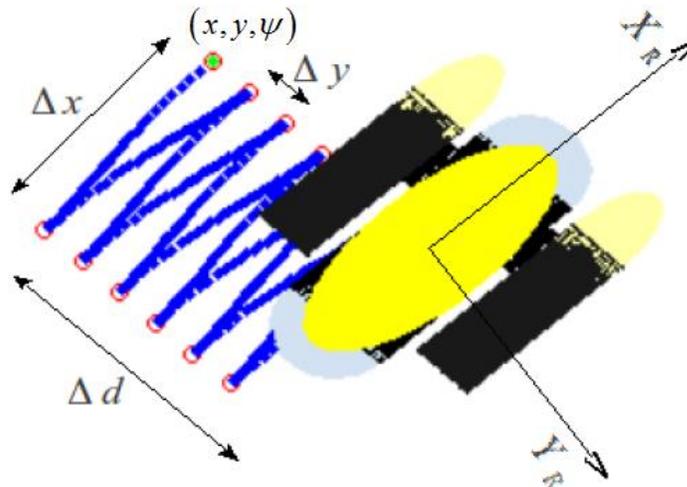


Figura 4.10: Ilustração das distâncias Δx , Δy e Δd na trajectória gerada pelo algoritmo da Manobra de Movimento Lateral. Note-se que os valores de Δx , Δy e Δd são definidos pelo operador.

Observando a Figura 4.10 facilmente se percebe que Δx corresponde à distância no eixo X_R entre dois *waypoints* consecutivos, Δy corresponde à distância no eixo Y_R entre dois *waypoints* consecutivos e Δd corresponde à distância no eixo Y_R entre o primeiro e o último *waypoint* da trajectória gerada, ou seja, o deslocamento lateral que o operador pretende realizar. Todas estas distâncias são expressas em metros (m).

4.2.3.2 Simulação

Para validar e avaliar a estratégia de controlo concebida o sistema desenvolvido foi implementado no simulador, sendo que este consiste no algoritmo da manobra lateral e no controlador cinemático de posição anteriormente referidos. Na Figura 4.11 é apresentado um diagrama de controlo que ilustra a implementação do controlo cinemático de posição, o qual é utilizado após a trajectória ser gerada, através do algoritmo desenvolvido.

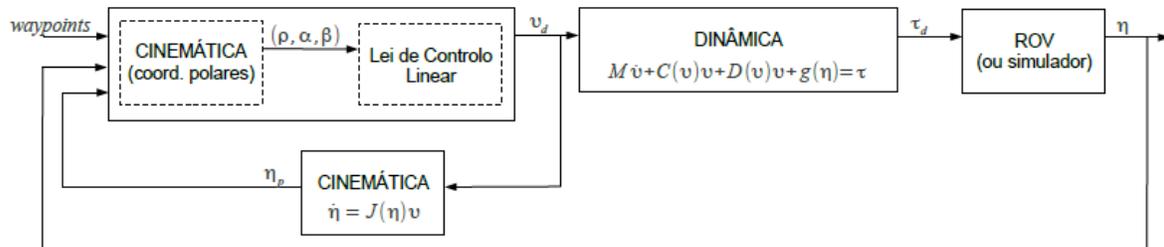


Figura 4.11: Diagrama da implementação do controlador cinemático de posição.

Como se pode constatar na Figura 4.11, um dos argumentos de entrada consiste nos *waypoints* gerados pelo algoritmo da trajectória dente-de-serra. Tendo em conta que o primeiro *waypoint* gerado pelo algoritmo constitui a posição actual do robô no início da manobra (ver Algoritmo 1), o segundo *waypoint* da trajectória gerada é o primeiro ponto destino (*goal*) – uma vez atingido pelo veículo, o destino passa a ser o seguinte *waypoint* da trajectória e assim sucessivamente até se atingir o último *waypoint* gerado pela trajectória, o destino final (ver Figura 4.10).

O controlo cinemático é realizado no primeiro bloco do diagrama, o qual engloba o cálculo dos erros de distância e orientação do robô relativamente ao destino (ρ , α e β) e o cálculo das velocidades linear e angular para correcção do erro ($v_d = [u \quad r]$). Os valores das forças e momentos de propulsão que traduzem em realidade essas velocidades são seguidamente calculadas através do modelo dinâmico do *VideoRay PRO 3E* (bloco “DINÂMICA”) e

posteriormente aplicadas no veículo. Note-se que a nomenclatura $\tau_d = [X \quad N]$ foi utilizada no diagrama para uma melhor compreensão do processo ilustrado; no entanto, como já foi mencionado no capítulo anterior, τ_d não é enviado directamente para o *VideoRay*, mas sim o valor de n de cada *thruster* (ver equação (3.20)).

Por fim, os restantes argumentos de entrada são realimentações do sistema. Uma delas é a previsão da pose que o robô terá após a acção das velocidades calculadas através do modelo cinemático do *VideoRay PRO 3E* (η_p) e a outra é a saída do sistema (a pose do robô, η). A nível da simulação, se não existirem erros introduzidos, naturalmente que η e η_p coincidem. Todavia, o sistema foi projectado a pensar na implementação no veículo real, pelo que erros e incertezas estão inerentes à situação.

A implementação do sistema apresentado na Figura 4.11 no robô real coloca uma outra questão: como é feita a realimentação da pose actual do veículo no sistema real?

Existem várias soluções, uma delas sendo somente a utilização do próprio modelo do *VideoRay PRO RE*. Contudo, embora seja uma solução que não implique gastos, é uma solução com algum custo computacional e as incertezas associadas aos valores calculados são muitas (pois não existe nenhuma outra medição sobre o que o robô na realidade efectuou). As outras possíveis soluções passam pelo recurso aos sensores a bordo do veículo. Porém, o *VideoRay PRO 3E* apenas dispõe de uma bússola (com uma resolução de 2°) e um sensor de pressão (com uma resolução de $0,2m$). Como se poderá constatar posteriormente no subcapítulo 5.2, a bússola a bordo do veículo (a qual poderia realimentar o sistema com o ψ actual), para este tipo de manobra tem uma resolução muito baixa. Além disso, apenas a informação de z e ψ (e com baixas resoluções) não resolve a questão.

Atendendo ao terceiro objectivo a que esta dissertação se propõe a atingir, o qual impõe que o custo de implementação tem que ser adequado ao veículo em questão, optou-se pela combinação dos seguintes sensores externos:

- Um sensor inercial (INS) para medições da orientação do veículo (ϕ, θ, ψ) e eventualmente as velocidades e acelerações angulares; É um dos sensores menos dispendiosos nesta área e além disso, existem vários disponíveis no laboratório;

- Dois *lasers* paralelos entre si e, preferencialmente, ao plano horizontal do ROV; utilizando a câmara do veículo em conjunto com os *lasers* podem-se medir a distância (x) e orientação (ψ) relativamente a uma parede ou obstáculo [8][28]; Solução de muito baixo custo.

Deste modo seria possível realimentar o sistema com quase todos os elementos da pose actual do robô (excepto y) sempre que este se encontrasse em frente a um objecto de inspecção. Embora a inexistência de realimentação em y (que esta possível configuração de sensores não colmata) possa parecer um problema numa manobra lateral, na prática não é muito significativa do ponto de vista da qualidade do vídeo de inspecção – se o veículo executar a manobra com uma orientação e distância ao alvo estáveis do ponto de vista do operador (isto é, que não se denotem variações na imagem), o facto da distância final percorrida em y ser maior ou menor torna-se pouco relevante.

Para este fim, e uma vez que o *VideoRay PRO 3E* não tem espaço no seu habitáculo para mais equipamento, desenvolveu-se uma solução transversal a outros veículos marinhos do laboratório – um módulo externo para o equipamento que se pretenda acrescentar (ver ANEXO B, na pág.81).

5

Resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos (experimentalmente ou em ambiente de simulação) de todos os elementos que foram desenvolvidos nesta dissertação.

5.1 Manobra de Condução Assistida – IBVS

Para determinar se a teleoperação do *VideoRay PRO 3E* melhora ou não com o sistema implementado, foram executadas várias manobras e simultaneamente comparados os diferentes métodos de visão implementados. Uma série de testes foi realizada num tanque de dimensões $10m(c) \times 6m(l) \times 5m(a)$ (ver Figura 5.1). Um conjunto de experiências foi projectado com diferentes condições exteriores – como o nível de iluminação da água, a ausência ou presença de correntes marítimas e ondulação. Este conjunto de experiências foi realizado para cada manobra com cada um dos três métodos de visão implementados. Duas manobras foram executadas no processo de testes – o seguimento de tubagem ou cablagem vertical e a centralização de um objecto de interesse no plano da imagem (*Tracking Up/Down* e *Heading Centering*, respectivamente). Foram ainda utilizados dois alvos distintos – uma escada cinzenta com $50cm(l) \times 5m(a)$ (*gray ladder*) e um tubo magenta de $18,5cm(l) \times 2,2m(a)$ (*magenta pipeline*).



Figura 5.1: Tanque de testes nas instalações do LSA/ISEP.

Embora o segundo alvo (*magenta pipeline*) não constitua um cenário comum em aplicações reais, foi incluído no conjunto de testes para possibilitar a avaliação do potencial do processamento de cor, quando disponível numa situação real. A avaliação dos diferentes métodos foi realizada recorrendo a sensores de navegação a bordo do *VideoRay PRO 3E*: uma bússola (*yaw* ou *heading*), um sensor de pressão para a medição da profundidade (*heave*) e um altímetro²⁰ (*surge*).

Um dos conjuntos de experiências realizadas foi projectado para aferir o desempenho da estabilização do ROV dependendo da distância ao alvo. Mais especificamente, foi pensado para a determinação das distâncias mínimas e máximas de trabalho. Concluiu-se que, para todos os métodos de visão implementados, o sistema funciona correctamente e com fiabilidade quando o alvo no plano da imagem tem uma largura compreendida entre [30, 70] pixéis. Este intervalo de pixéis traduz-se numa distância (em metros) a que o ROV se encontra do alvo – para o primeiro alvo (escada cinzenta) o intervalo das distâncias de trabalho correspondente está compreendido entre [1,5; 4,5]m; para o segundo alvo (tubo magenta) está compreendido entre [0,8; 2,0]m.

Na Figura 5.2 são apresentados os resultados obtidos para cada método de visão, dentro dos intervalos das distâncias de trabalho mencionadas anteriormente. Cada método é representado por uma cor diferente e três gráficos são exibidos para cada alvo/método – dois

²⁰ O altímetro foi adicionado à configuração original do veículo para efeitos de avaliação do sistema implementado, neste caso em particular para medir a distância entre o veículo e o alvo (distância medida no eixo *X*).

relativos ao *heading* (*yaw*) do veículo e um relativo à distância do ROV ao alvo (*surge*), durante a execução da manobra. No primeiro gráfico de *heading*, o centro (no eixo x do plano da imagem) do alvo detectado é apresentado (designado por x_{12} no capítulo anterior); se a variação de x_{12} permanecer dentro do intervalo delimitado pelas linhas pretas, significa que o piloto do ROV não nota movimento no *heading* na transmissão de vídeo e que o alvo está centrado no plano da imagem. O segundo gráfico, também relativo ao *heading*, mostra os valores obtidos pela bússola a bordo do veículo (em graus). Por fim, o gráfico relativo à distância mostra os resultados do altímetro (em metros).

No geral, constatou-se que o método III (ver pág.41) funciona melhor que os outros quando o alvo é o tubo magenta, o método II é o mais fiável independentemente da combinação alvo/distância e que o método I normalmente apresenta piores resultados comparativamente aos outros métodos (isto deve-se ao maior custo computacional que tem associado). Como se pode ver na Figura 5.2, ambos os métodos II e III têm ótimos resultados. Também possível verificar que os resultados do método I do tubo magenta são melhores que os da escada. Contudo, é importante referir que embora no primeiro gráfico do *heading* relativo à escada cinzenta x_{12} não oscile apenas dentro do intervalo demarcado pelas linhas pretas, o que significa que uma variação do *heading* é perceptível na transmissão de vídeo, a referida oscilação não é suficiente para perturbar a tarefa de inspecção. Além disso, o alvo está sempre perto do centro da imagem.

É ainda relevante mencionar que a oscilação presente nos gráficos de *heading* coincide com a variação da largura detectada do alvo $|x_1 - x_2|$. Este acontecimento pode-se observar na Figura 5.3. Mais do que isso, é possível verificar que quando a largura detectada é constante, o *heading* (*yaw*) do ROV é também constante e sem oscilação. Isto verifica-se para todos os métodos.

Os picos presentes nos gráficos de resultados do altímetro, nomeadamente nos correspondentes ao primeiro alvo (escada cinzenta), ocorrem algo aleatoriamente e devem-se a reverberações, visto que a escada encontra-se num canto do tanque e o altímetro usa tecnologia sonar.

5.1 Manobra de Condução Assistida – IBVS

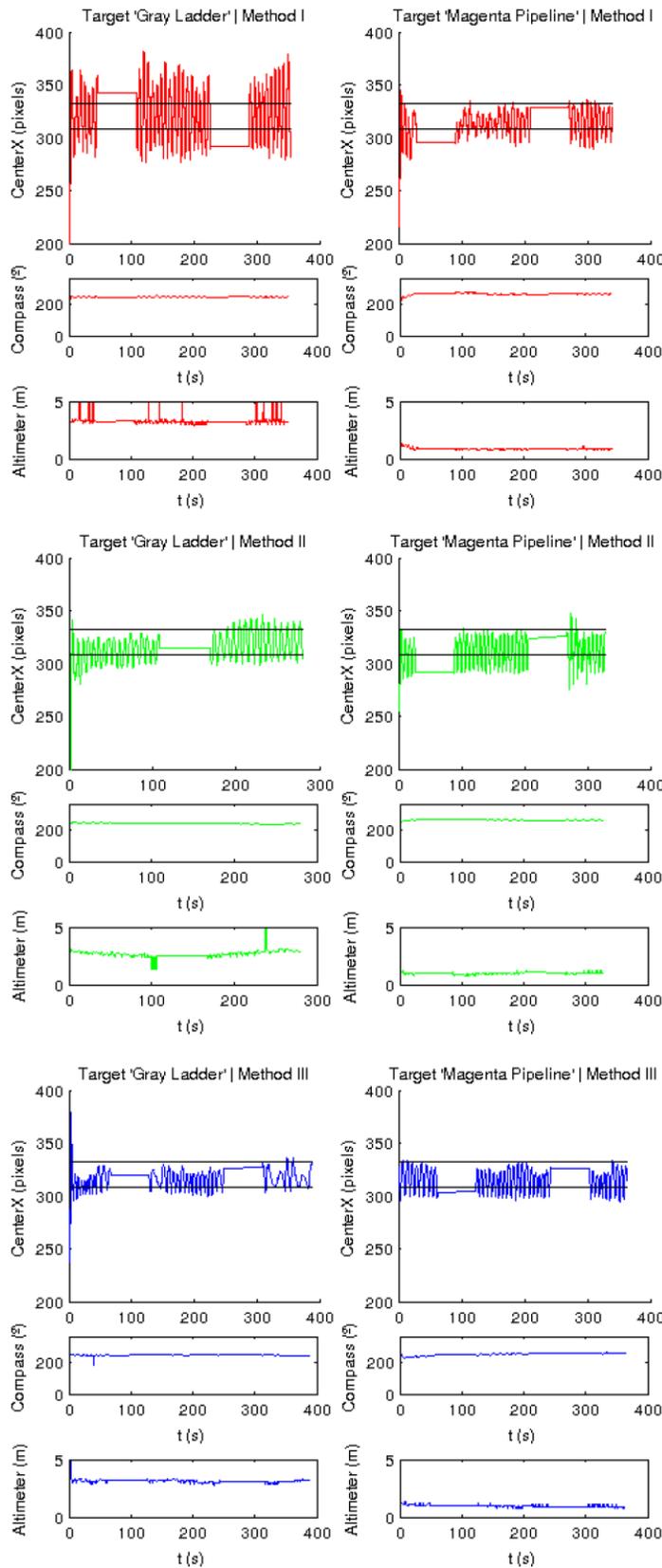


Figura 5.2: Situação de teste – Manobra *Heading Centering*; Luzes externas desligadas.

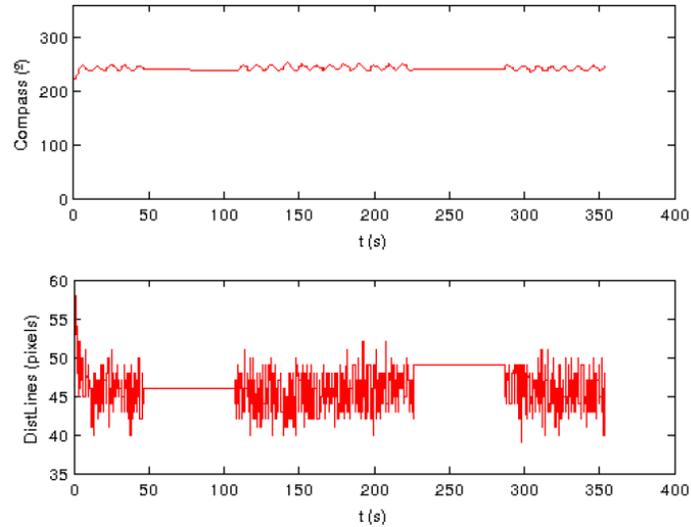


Figura 5.3: Heading (Compass ou bússola) vs Largura do alvo detectado (DistLines ou $|x_1 - x_2|$).

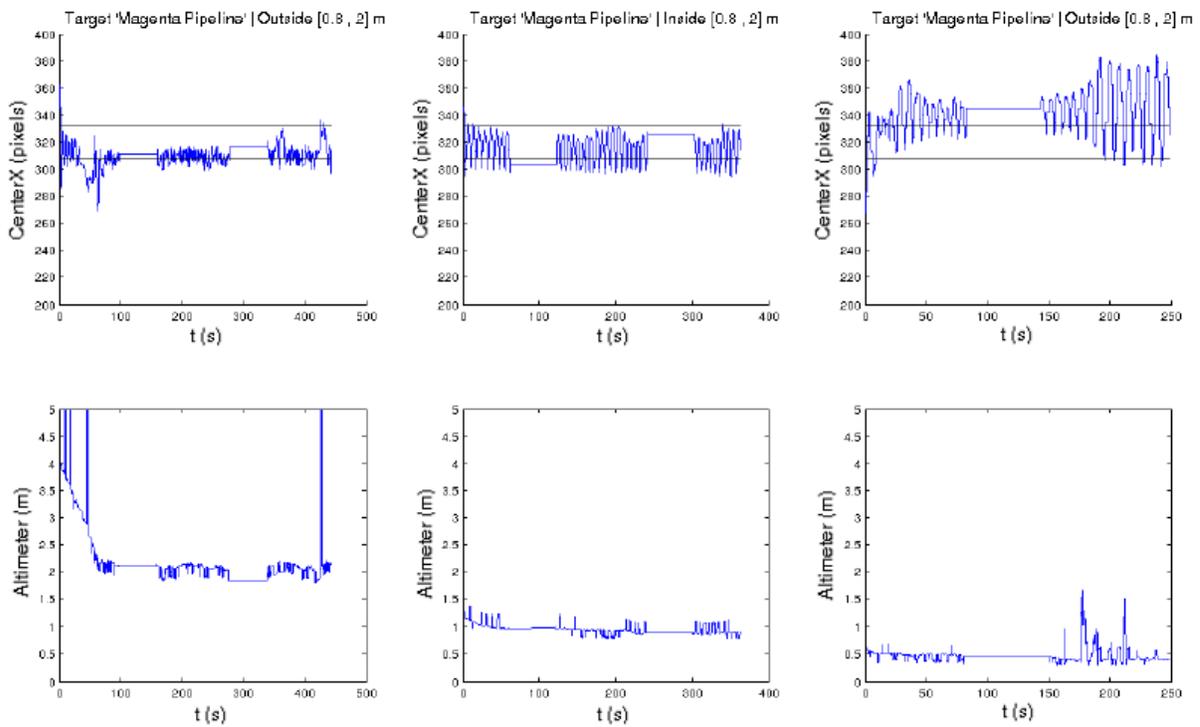


Figura 5.4: Resultados do Método III dentro e fora do intervalo das distâncias de trabalho.

Todas as experiências anteriormente mencionadas foram realizadas com todas as luzes externas desligadas. A única iluminação utilizada pertencia ao ROV. Um conjunto de experiências foi projectado e realizado usando as luzes externas do tanque do laboratório, de modo a avaliar o efeito de luz externa no sistema desenvolvido. Embora os intervalos das

distâncias de trabalho aumentem, a eficiência do sistema desenvolvido permanece essencialmente a mesma. Por este motivo foi decidido realizarem-se os restantes testes sem o uso de luzes externas. Para além disso, esta última situação constitui um cenário mais realístico de inspecção subaquática.

Em missões de campo anteriores (REP12²¹), o sistema proposto foi testado com incidência de luz solar – cenários de rio e mar. Em ambos os casos o efeito causado foi a saturação da imagem em profundidades rasas (de 0 a 3 m, aproximadamente).

A Figura 5.5 apresenta os resultados de um conjunto de experiências idêntico ao apresentado na Figura 5.2, exceptuando a existência de correntes marítimas durante a execução das manobras²².

Os resultados obtidos para esta série de testes são bastantes satisfatórios, tendo em conta que cada um dos métodos de visão reproduziu um comportamento muito próximo ao do conjunto de testes sem as correntes marítimas. O efeito provocado pelas correntes não é perceptível no aumento de oscilação do *heading*, mas no facto de que o alvo não é estabilizado no centro do eixo *x* do plano da imagem mas algures perto do centro (verifica-se um pequeno desvio).

O último conjunto de experiências foi projectado para a manobra *Tracking Up-Down*, o que basicamente é executar a manobra *Heading Centering* enquanto se actua simultaneamente o eixo *z* (*heave*). O conjunto de testes foi realizado com e sem correntes marinhas. Para os testes do alvo “escada cinzenta”, a manobra foi executada subindo e descendo entre a superfície e o fundo do tanque (5 m); para os testes do alvo “tubo magenta”, a manobra foi executada ao longo do comprimento do tubo (de 1,0 a 3,2 m de profundidade). A Figura 5.6 apresenta os resultados do segundo método de visão com correntes marinhas, deste último conjunto de testes. A manobra foi executada para os dois alvos e para diferentes velocidades de movimento no eixo *z* (*heave*) – *slow* corresponde a uma velocidade adequada para inspecção (seguimento de tubagem) e *fast* corresponde à potência máxima do actuador vertical do ROV.

²¹ O REP12 (*Rapid Environmental Picture 2012*) é um exercício anual realizado pela Marinha portuguesa que associa as áreas da Defesa e Segurança, Investigação & Desenvolvimento e Indústria. O LSA (laboratório associado ao INESC-Porto) é uma das entidades que participa neste evento.

²² O tanque de testes do LSA possui bombas de água e de filtragem que, quando em funcionamento, conseguem gerar ondulação e correntes no tanque.

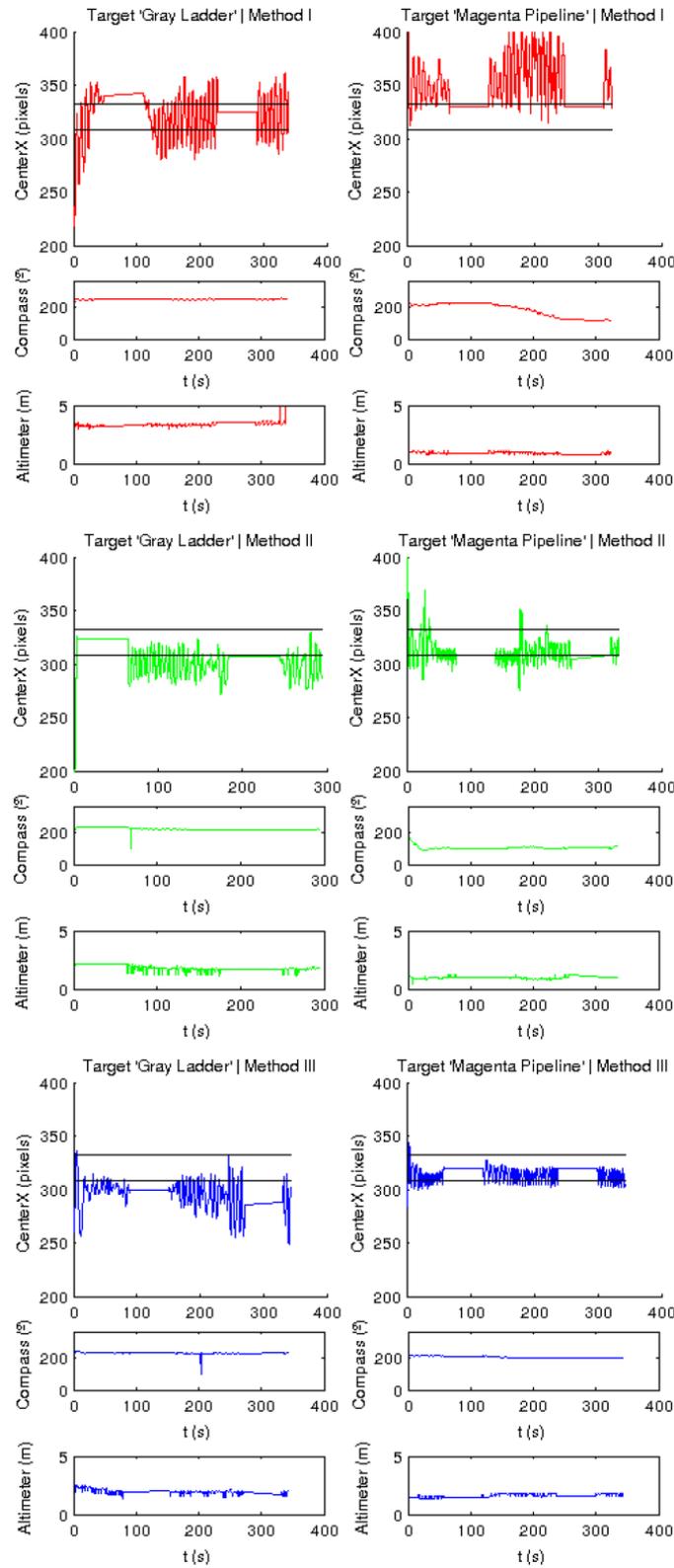


Figura 5.5: Situação de teste – Manobra *Heading Centering*; Luzes externas desligadas; Existência de correntes.

5.1 Manobra de Condução Assistida – IBVS

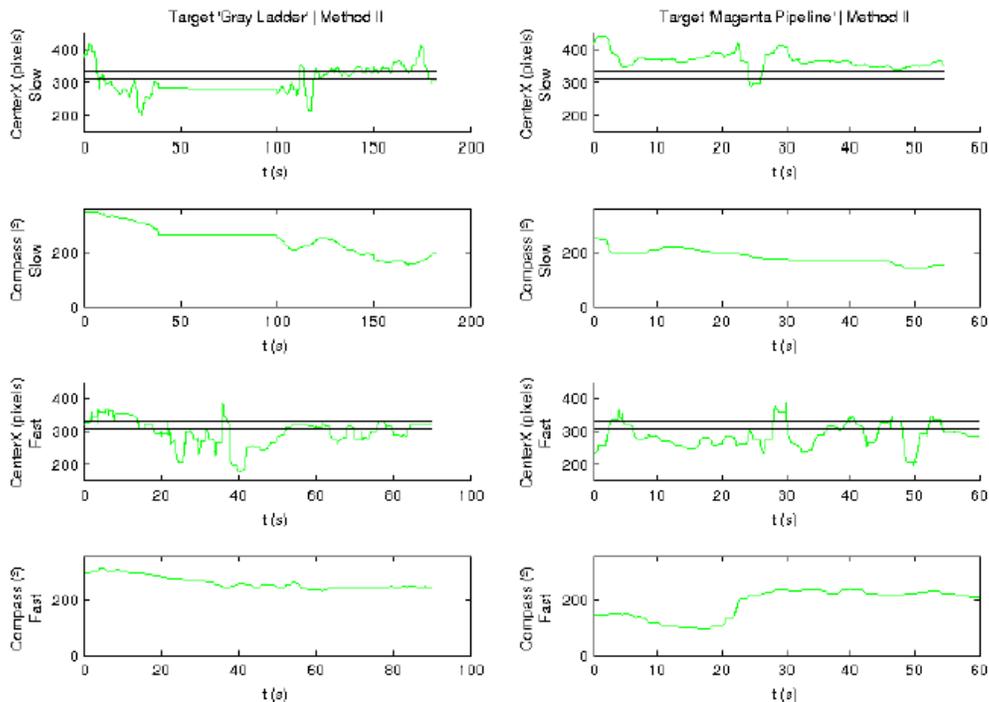


Figura 5.6: Situação de teste – Manobra *Tracking Up/Down*; Luzes externas desligadas; Existência de correntes.

Comparando os resultados obtidos nesta manobra com a anterior, constata-se que a oscilação de *heading* aumenta. Além disso, é ainda notório que quanto maior for a velocidade em *heave*, maior a oscilação de *heading*. Os resultados obtidos são ainda aceitáveis para inspeção, apesar das questões mencionadas. Contudo, estas condições são mais susceptíveis ao efeito *sway* (ver secção *Formulação do Problema*, na pág.38), especialmente a velocidades mais elevadas. Este efeito é possível de observar no gráfico da bússola (*compass*). Nos testes equivalentes mas sem correntes, os resultados de *heading* são melhores mas o efeito *sway* ainda é observável.

Os resultados obtidos para este conjunto de testes relativo à combinação método III/tubo magenta foram semelhantes aos resultados apresentados na Figura 5.6 – no geral, quando existe um contraste de cor significativo entre o alvo e o ambiente circundante, a detecção do alvo melhora (verdade para todos os métodos de visão implementados); para a escada cinzenta, os resultados não foram tão positivos e nem sempre aceitáveis para inspeção, visto que a velocidades elevadas o sistema perdeu o alvo em mais do que um dos testes realizados. Por fim, tal como para a manobra anterior, os resultados do método I foram novamente os

piores; para altas velocidades ambos os alvos foram ocasionalmente perdidos porque existe uma maior oscilação de *heading* adicionada ao efeito *sway*.

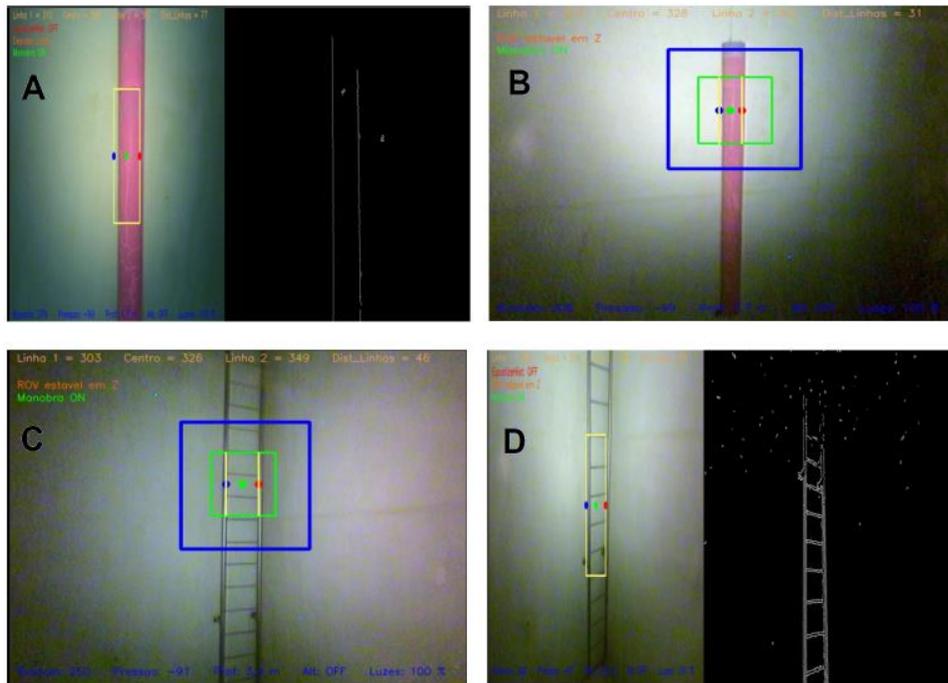


Figura 5.7: Interface dos métodos de visão implementados (Método I – A e D; Método II – C; Método III - B).

5.2 Manobra de Condução Assistida – Controlo Cinemático

Para validar e avaliar a estratégia de controlo concebida, o sistema desenvolvido foi implementado no simulador do *VideoRay PRO 3E* desenvolvido no âmbito desta dissertação.

Na Figura 5.8 são apresentados os resultados obtidos no simulador pelo controlo cinemático de posição, para uma manobra lateral com $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,305m$ e $\Delta y = 0,02m$, onde $k_\rho = 4$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Ou seja, foi simulado uma situação onde o robô se desloca para a sua direita a sua largura e o seu comprimento para trás e para a frente (a largura do *VideoRay* é $21cm$ e o comprimento $30,5cm$ – ver ANEXO A).

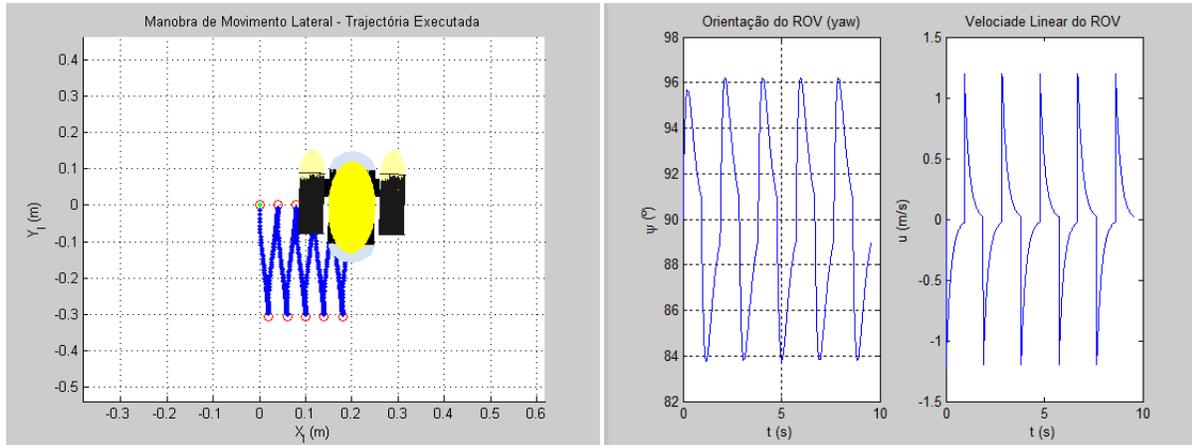


Figura 5.8: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,305m$ e $\Delta y = 0,02m$, onde $k_\rho = 4$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 90^\circ)$.

No gráfico apresentado na janela do lado esquerdo pode-se observar a trajetória efectuada pelo veículo, no primeiro gráfico da janela da direita a variação da orientação do ROV (*yaw*, ψ , ou *heading*) durante a execução da manobra e, no segundo gráfico, a velocidade linear do ROV (u).

Nesta situação de teste, ao longo da execução da manobra o *heading* (*yaw*) do robô sofre uma variação de $\pm 6,22^\circ$, a qual se encontra dentro do intervalo óptimo de variação do *heading* nesta manobra – a experiência adquirida durante os testes experimentais da primeira manobra [22] mostrou que até uma variação de aproximadamente $\pm 8^\circ$ de *heading*, o operador não sente a oscilação na imagem; a partir daí e até sensivelmente os $\pm 12^\circ$ já é perceptível no vídeo transmitido a oscilação, mas a qualidade do vídeo ainda é aceitável para realização de tarefas de inspeção; depois desta marca, a qualidade já não é satisfatória.

O custo que esta qualidade de inspeção neste caso implica, é o tempo necessário para realizar a manobra. Note-se que $9,57s$ para percorrer apenas a largura do próprio veículo é um tempo alto. A solução imediata de se redefinir as constantes de proporcionalidade k_ρ , k_α e k_β não é a melhor neste caso em particular, uma vez que se analisarmos o gráfico da velocidade linear (u), embora a velocidade linear média seja de apenas de $\bar{u} = |0,307| m/s$, esta apresenta picos de $1,2m/s$ (recorde-se que a velocidade máxima do *VideoRay PRO 3E* são $1,34m/s$ – ver ANEXO A).

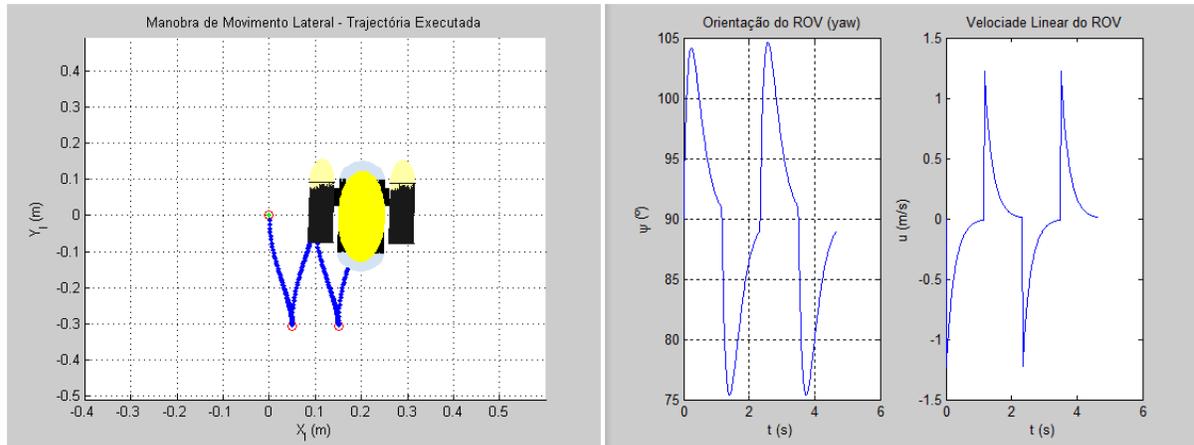


Figura 5.9: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,305m$ e $\Delta y = 0,05m$, onde $k_\rho = 4$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 90^\circ)$.

Na Figura 5.9 apresenta-se um teste com os parâmetros do caso anterior, mas com um Δy superior ($\Delta y = 0,05m$). Como se pode perceber, de facto o tempo de execução da manobra reduziu para $4,67s$, mas à custa da qualidade de inspecção – a variação do *heading* passou agora a ser de $\pm 14,1^\circ$.

Testou-se então o aumento de Δx em simultâneo com a diminuição de k_ρ (Figura 5.10). Note-se que aumentando Δx para tentar obter variações de *heading* menores, a velocidade de correcção linear aumenta também (ver equação (4.7)), pelo que se diminuiu o valor de k_ρ para o pico da velocidade linear não ultrapassar os $1,34m/s$ (velocidade máxima possível).

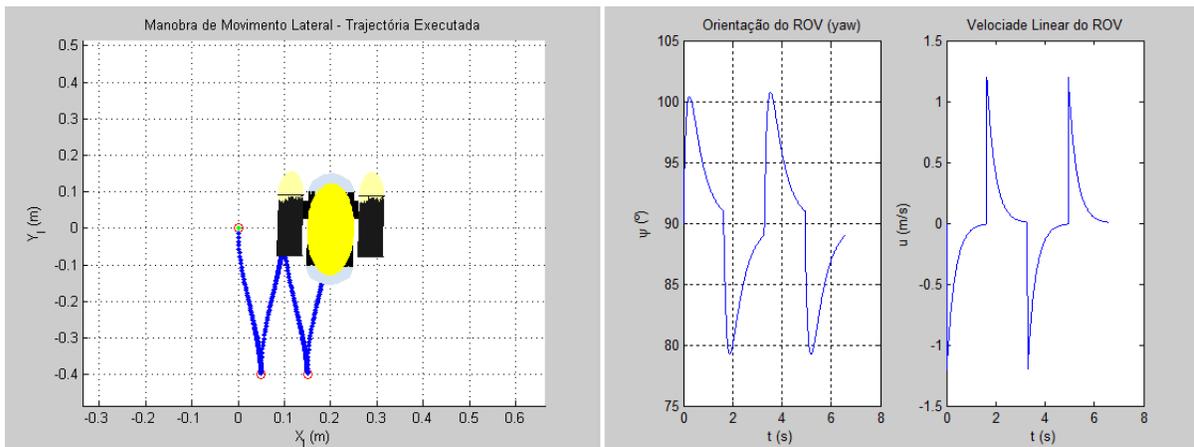


Figura 5.10: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,40m$ e $\Delta y = 0,05m$, onde $k_\rho = 3$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 90^\circ)$.

Observando a Figura 5.10, constata-se que se conseguiu um bom compromisso entre o tempo de execução da manobra ($6,58s$) e a variação do *heading* ($\pm 10,4^\circ$, o que produz uma qualidade aceitável para inspecção). Além disso, a velocidade linear máxima registada é de $1,2m/s$ e o valor médio de $\bar{u} = |0,242| m/s$. Contudo, um $\Delta x = 0,40m$ poderá já constituir uma distância excessiva dependendo da proximidade e tamanho do objecto de inspecção. Note-se ainda que mesmo com este compromisso, os tempos de execução da manobra lateral continua a ser bastante elevado – na Figura 5.11 apresenta-se uma situação de teste idêntica à anterior mas para $\Delta d = -0,5m$.

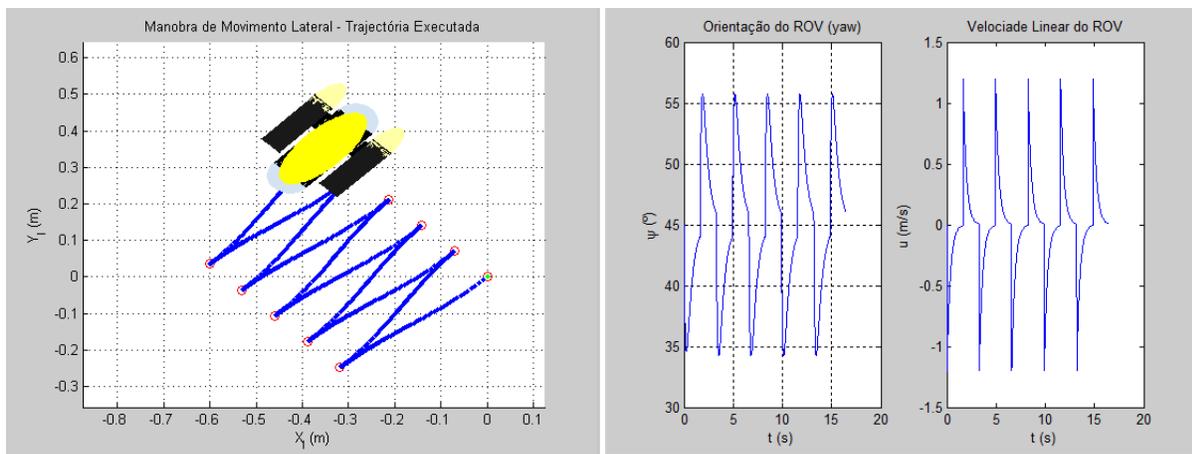


Figura 5.11: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = -0,5m$, $\Delta x = 0,40m$ e $\Delta y = 0,05m$, onde

$$k_p = 3, k_\alpha = 12 \text{ e } k_\beta = -4,5. \text{ Pose inicial } (x, y, \psi) = (0, 0, 45^\circ).$$

Como se pode verificar, o tempo de execução para uma manobra lateral de $\Delta d = -0,5m$ ²³ é bastante elevado ($16,48s$). Ou seja, a velocidade de execução da manobra lateral máxima que se consegue, garantindo qualidade no vídeo para inspecção, é de $0,03m/s$. Sendo uma velocidade muito baixa de deslocação lateral, obviamente permite inspecção durante a execução da manobra; no entanto, a velocidade é excessivamente baixa para uma aplicação prática em que se pretenda executar uma manobra lateral que não tenha uma Δd curto. Assim, a manobra de movimento lateral apresentada adequa-se sobretudo a ser um elemento de transição numa manobra mais complexa que tire proveito da capacidade de movimento lateral que o veículo ganha com este sistema proposto – um algoritmo de varrimento de uma

²³ O sinal negativo apenas significa que o deslocamento lateral é realizado na direcção oposta (neste caso, para a esquerda do veículo).

parede, por exemplo, o qual explore o movimento vertical do robô (*heave*) predominantemente e que recorra à manobra de movimento lateral (padrões *lawn mower*) para realizar a transição para inspeccionar uma nova zona – ver Figura 5.12.

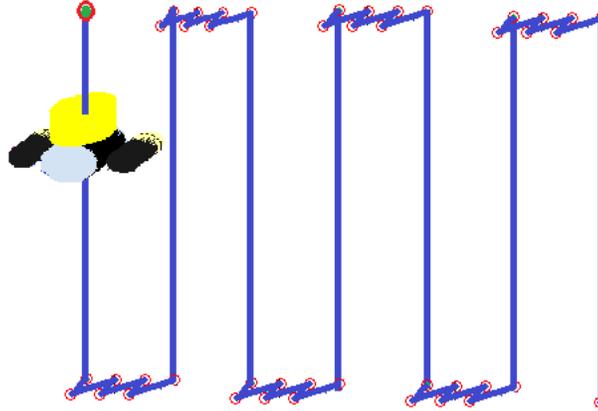


Figura 5.12: Exemplo de manobra de varrimento de uma parede, cujo um dos elementos é a manobra de movimento lateral proposta.

Note-se que em todos os testes realizados, as constantes de proporcionalidade k_p , k_α e k_β cumprem as condições de estabilidade calculadas por Astolfi para este sistema [27] (ver subsecção 4.2.2.2). Do mesmo modo, o círculo de aceitação do *waypoint* é de $\rho \leq 0,01m$ e de $\psi \leq 1^\circ$ (quando ρ e ψ atingem estes valores, considera-se que o veículo chegou ao ponto destino).

Os resultados apresentados foram obtidos na simulação do sistema sem erros introduzidos. Na Figura 5.13 e na Figura 5.14 apresentam-se os resultados obtidos para duas situações de teste apresentadas anteriormente com erros aleatórios introduzidos no sistema na ordem dos $\pm 0,01m$ para a posição do robô (x e y) e $\pm 0,1^\circ$ para a orientação (ψ). Como se pode verificar, o sistema implementado demonstra o comportamento esperado, sendo que a qualidade de inspeção piora. No caso apresentado na Figura 5.13 apesar do aumento da variação de *heading*, a qualidade de inspeção ainda se mantém aceitável (variação menor que $\pm 12^\circ$). No caso apresentado na Figura 5.14 a variação de *heading* chega a passar a barreira dos $\pm 12^\circ$ por vezes e a ter picos até aos $\pm 15^\circ$. Contudo, como isto só acontece num período curto da manobra, considera-se que a qualidade do vídeo de inspeção que estes

resultados traduzem seriam no limiar do aceitável – em todo o vídeo se notaria oscilação de *heading*, mas apenas numa pequena parte atrapalharia a tarefa de inspeção.

Resumindo, os testes realizados com erro introduzido comprovam o que os resultados anteriores (sem erro) sugeriram. A estratégia de controlo desenvolvida para a implementação desta manobra é válida, sendo um tipo de manobra apropriado para distâncias laterais curtas (tempos de execução muito elevados ou então degradação da qualidade de inspeção proporcionada durante a manobra), pelo que se adequam à integração em algoritmos mais complexos onde sejam utilizadas como elementos de transição.

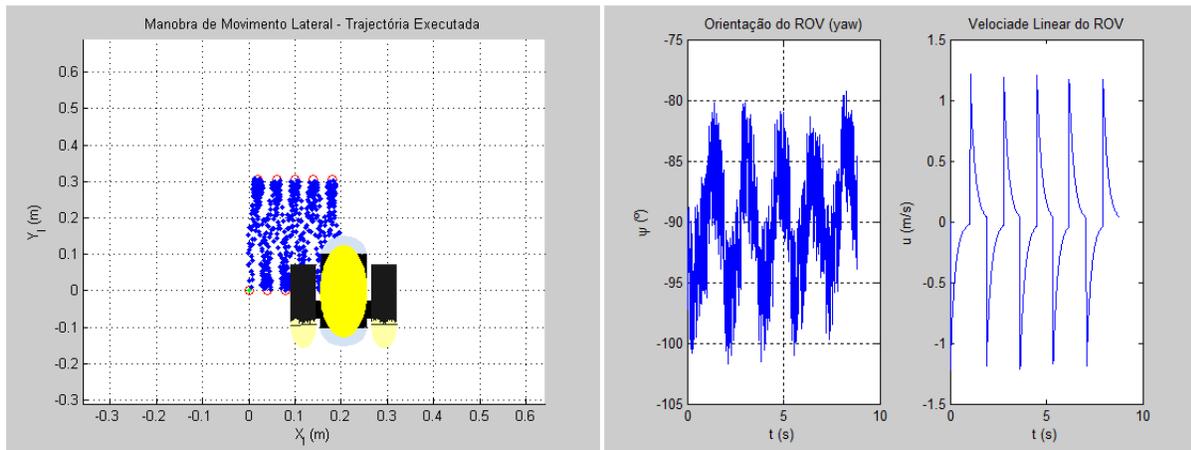


Figura 5.13: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = -0,21m$, $\Delta x = 0,305m$ e $\Delta y = 0,02m$, onde $k_p = 4$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, -90^\circ)$. Erro introduzido no sistema de posição $\pm 0,01m$ e de pose $\pm 0,1^\circ$.

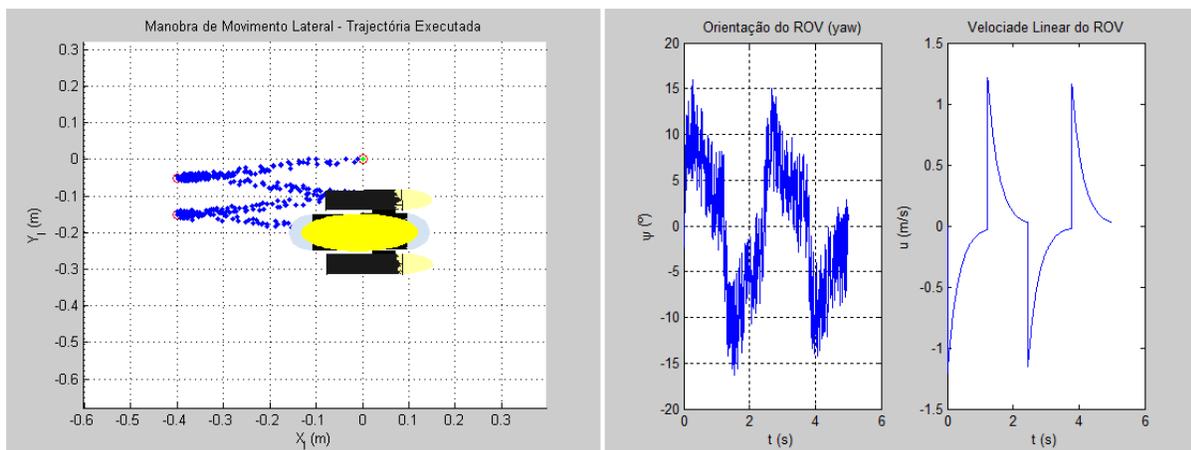


Figura 5.14: Manobra de movimento lateral para $\Delta d = 0,21m$, $\Delta x = 0,40m$ e $\Delta y = 0,05m$, onde $k_p = 3$, $k_\alpha = 12$ e $k_\beta = -4,5$. Pose inicial $(x, y, \psi) = (0, 0, 0^\circ)$. Erro introduzido no sistema de posição $\pm 0,01m$ e de pose $\pm 0,1^\circ$.

6

Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta dissertação propôs a optimização da teleoperação de um ROV com 3DOF (com actuação em *surge*, *heave* e *yaw*) – mais especificamente, um *VideoRay PRO 3E* do LSA/ISEP, de modo a que fosse possível que este realizasse tarefas de inspecção subaquática com qualidade em missões de campo, sem que para isso fosse necessário realizar investimentos financeiros significativos. Propôs-se ainda também a desenvolver e implementar um simulador do veículo em estudo que permitisse validar e avaliar as estratégias de controlo desenvolvidas para o mesmo.

Como tal, num primeiro passo, procedeu-se à modelização do *VideoRay PRO 3E* e implementou-se uma plataforma de simulação em MATLAB. Foram então desenvolvidas duas abordagens distintas para solucionar a questão imposta: numa primeira abordagem, optou-se por implementar um sistema de controlo IBVS para aferir se o uso exclusivo da câmara seria ou não suficiente para melhorar significativamente a teleoperação de um pequeno ROV; na segunda, foi concebido e avaliado no simulador um sistema de controlo cinemático para o plano horizontal do veículo e um algoritmo de uma manobra capaz de dotar o ROV de movimento lateral através de uma trajectória dente-de-serra.

De um modo geral os resultados obtidos comprovaram que todos os objectivos foram cumpridos.

No caso da primeira abordagem, concluiu-se que o uso exclusivo de dados da câmara associado ao facto que o sistema referido foi desenvolvido para um ROV de 3DOF (com actuação em *surge*, *heave* e *yaw*), faz com que este seja fácil de implementar em quase todos os ROVs (senão mesmo todos) e, especialmente, com que seja uma solução atractiva para um pequeno ROV de inspecção de baixo custo e recursos limitados. Além disso, o custo computacional é reduzido quando comparado com outros sistemas de teleoperação semi-autónomos (neste caso existe menos informação para processar) e a facilidade de portabilidade e preparação de equipamentos (*deployment*) permanece a mesma que a do ROV original, visto que nenhum equipamento foi adicionado.

Para adquirir resultados experimentais, duas manobras foram executadas e simultaneamente comparados os diferentes métodos de visão implementados. Foram também testadas alterações nas condições do meio. Os resultados obtidos consideram-se bastante promissores, visto que nos testes realizados, a teleoperação do veículo tornou-se bem mais simples e o vídeo transmitido pela câmara verificou-se estável o suficiente para possibilitar uma inspecção adequada. Considerando ainda que, para cada situação, pelo menos um dos métodos de visão foi capaz de melhorar a teleoperação, os resultados obtidos validam a legitimidade do estudo proposto nesta abordagem.

No caso da segunda abordagem, esta foi validada com sucesso no simulador desenvolvido. A sua implementação foi realizada em duas etapas – uma primeira que consiste num algoritmo que gera pontos que definem uma trajectória dente-de-serra que permite a deslocação lateral do veículo, a partir de um comando de alto-nível do operador; uma segunda que envolve um controlador linear tradicionalmente utilizado em veículos de tracção diferencial, nomeadamente um controlo cinemático de posição para o plano horizontal do ROV.

A partir dos resultados obtidos verifica-se a manobra desenvolvida permite que o veículo se desloque lateralmente do ponto de vista do operador, através de uma trajectória dente-de-serra executada a baixas velocidades, durante a qual é possível que o operador continue a inspecção visto que o *heading* do veículo se mantém estável.

O próximo passo consiste na implementação da manobra de movimento lateral no veículo real, sendo que o primeiro passo nesse sentido já foi dado com a criação do módulo INS&Lasers. Uma vez implementada a manobra no veículo real, pretendem-se desenvolver

outros algoritmos que tirem partido do que foi desenvolvido neste estudo, por exemplo para gerarem trajectórias de varrimento de paredes (padrões *lawn mower*). Desta forma, o veículo será capaz de realizar inspecções de modo semi-autónomo, sendo que as tarefas do operador se limitarão a conduzir o ROV ao local de inspecção e depois executar comandos de alto nível.

Existe também ainda trabalho a ser realizado no simulador – o efeito do cabo umbilical do ROV, correntes marítimas e outras influências externas não são contabilizadas nesta versão ainda. Por fim, pretende-se ainda num futuro próximo implementar no sistema uma interface gráfica para o operador do ROV, na qual este seja capaz de interagir com o robô, alterar manobras de condução assistida ou até gravar e registar dados das missões efectuadas. Um dos principais objectivos futuros passa por tornar o sistema iniciado nesta dissertação num produto final, capaz de ser aplicado ao maior número possível de ROVs e de ser executado em qualquer plataforma.

Referências Bibliográficas

- [1] J. R. McFarlane. *Underwater Technology 2000 ROVs and AUVs: Tools for Exploring, Exploiting and Defending the Ocean Frontier*, Underwater Technology, pp.465-471, 2000.
- [2] Gianluca Antonelli. *Underwater Robots – Motion and Force Control of Vehicle-Manipulators Systems*, 2nd edition, Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [3] G. Echeverria, N. Lassabe, A. Degroote e S. Lemaignan. *Modular Open Robots Simulation Engines: MORSE*, IEEE Robotics and Automation (ICRA), pp.46-51, 2011.
- [4] S. Carpin, M. Lewis, J. Wang, S. Balakirsky e C. Scrapper. *USARSim: A Robot Simulator for Research and Education*, IEEE Robotics and Automation, pp.1400-1405, 2007.
- [5] M. Prats, J. Pérez, J. J. Fernández e P. J. Sanz. *Na Open Source Tool for Simulation and Supervision of Underwater Intervention Missions*, IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems, pp.2577-2582, 2012.
- [6] T. Perez, Ø. N. Smogeli, T. I. Fossen e A. J. Sørensen. *An Overview of the Marine Systems Simulator (MSS): A Simulink Toolbox for Marine Control Systems*, Modeling Identification and Control, Vol.27, No.4, pp.259-275, 2006.
- [7] C. Chin, M. Lau, E. Low e G. Seet. *A Robust Controller Design Method and Stability Analysis of an Underactuated Underwater Vehicle*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol.16, No.3, pp.345-356, 2006.

- [8] G. C. Karras e K. J. Kyriakopoulos. *Visual Servo Control of an Underwater Vehicle using a Laser Vision System*, IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems, pp.4116-4122, 2008.
- [9] G. C. Karras, S. G. Loizou e K. J. Kyriakopoulos. *A Visual-Servoing Scheme for Semi-Autonomous Operation of an Underwater Robotic Vehicle using an IMU and a Laser Vision System*, IEEE Robotics and Automation, pp.5262-5267, 2010.
- [10] A. M. Plotnik e S. M. Rock. *Visual Servoing of an ROV for Servicing of Tethered Ocean Moorings*, IEEE OCEANS, pp.1-6, 2006.
- [11] J. Kerdels, J. Albeiz e F. Kirchner. *A Robust Vision-Based Hover Control for ROV*, MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean OCEANS, pp.1-7, 2008.
- [12] M. Narimani, S. Nazem e M. Loueipour. *Robotics Vision-Based System for an Underwater Pipeline and Cable Tracker*, IEEE OCEANS Europe, pp.1-6, 2009.
- [13] J. O. Hallset. *Simple Visual Tracking of Pipelines for an Autonomous Underwater Vehicle*, IEEE Robotics and Automation, vol.3, pp.2767-2772, 1991.
- [14] F. Chaumette e S. Hutchinson. *Visual Servo Control. i. Basic Approaches*, Robotics & Automation Magazine, IEEE, vol.13, no.4, pp.82-90, Dezembro 2006.
- [15] E. Malis, F. Chaumette e S. Boudet. *2-1/2-D Visual Servoing*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.15, no.2, pp.238-250, Abril 1999.
- [16] G. C. Karras e K. J. Kyriakopoulos. *Semi-Autonomous Teleoperation of a Non-Holonomic Underwater Vehicle using a Laser Vision System: A Visual-Servoing Switching Control Approach*, 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp.797-802, 2009.
- [17] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicle*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [18] SNAME. *Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body through a Fluid*, Technical and Research Bulletin No.1-5, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1950.

- [19] Wei Wang (2006). *Autonomous Control of a Differential Thrust Micro ROV*, Master of Applied Science in Mechanical Engineering Thesis, University of Waterloo.
- [20] A. J. Healey (2001). *Dynamics and Control of Mobile Robot Vehicles*, ME4823 Lecture Notes, Naval Postgraduate School.
- [21] M. Bacic. *On Hardware-in-the-Loop Simulation*, IEEE Decision and Control, pp.3194-3198, 2005.
- [22] M. J. Costa, P. Gonçalves, A. Martins e E. Silva. *Vision-Based Assisted Teleoperation for Inspection Tasks with a Small ROV*. OCEANS 2012 MTS/IEEE Hampton Roads, 2012.
- [23] A. J. Healey e D. Lienard. *Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.18, No.3, pp.327-339, 1993.
- [24] A. Astolfi. *Exponential Stabilization of a Car-like Vehicle*. IEEE Robotics and Automation, Vol.2, pp.1391-196, 1995.
- [25] F. Chaumette e S. Hutchinson. *Visual Servoing and Visual Tracking*, Springer Handbook of Robotics, 2008.
- [26] G. Bradsky e A. Kaehler. *Learning OpenCV – Computer Vision with the OpenCV Library*, M. Loukides, Ed. O’Reilly Media, Inc., 2008.
- [27] A. Astolfi. *Exponential Stabilization of a Mobile Robot*, Proc. 3rd European Control Conference, Roma, 1995.
- [28] T. Wang, M. Lu, W. Wang e C. Tsai. *Distance Measurement using Single Non-metric CCD Camera*, Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal Processing, Computational Geometry and Artificial Vision, pp.1-6, 2007.

ANEXOS



Especificações do VideoRay PRO 3E

As principais especificações do ROV *VideoRay PRO 3E* (Figura 1.3) são:

- Dimensões: $30,5\text{ cm}(c) \times 21\text{ cm}(l) \times 22,5\text{ cm}(a)$;
- Peso: $3,8\text{ Kg}$;
- Velocidade máxima: $2,6\text{ nós}$ ($1,34\text{ m/s}$ ou $4,82\text{ Km/h}$);
- Profundidade máxima: 152 m ;
- Configuração dos actuadores: dois no plano horizontal e um no plano vertical (3DOF – actuação em *surge*, *heave* e *yaw*);
- Câmara: câmara a cores (PAL) com ângulo de visão 90° horizontal/ 140° vertical (otimizado para uso subaquático), com controlo de inclinação vertical (*tilt*);
- Iluminação: duas lâmpadas de halogéneo de 20 W (intensidade regulável);
- Sensores: uma bússola (PNI V2Xe) e um sensor de pressão (MSP300).



Figura A.1: ROV *VideoRay PRO 3E*.

B

Módulo INS & Lasers

Uma vez que o ROV *VideoRay PRO 3E* não tem espaço no seu habitáculo para mais equipamento que se pretenda adicionar à configuração original do veículo, desenvolveu-se um módulo externo para esse fim (designado também por “módulo INS&Lasers”) – ver Figura B.1.

O *VideoRay PRO 3E* disponibiliza um porto de conexão para o exterior para realizar a interacção física com possíveis equipamentos externos. Na Figura B.1 e na Tabela B.1 são ilustrados a sua localização e o seu *pinout* (que dados são disponibilizados e por onde).

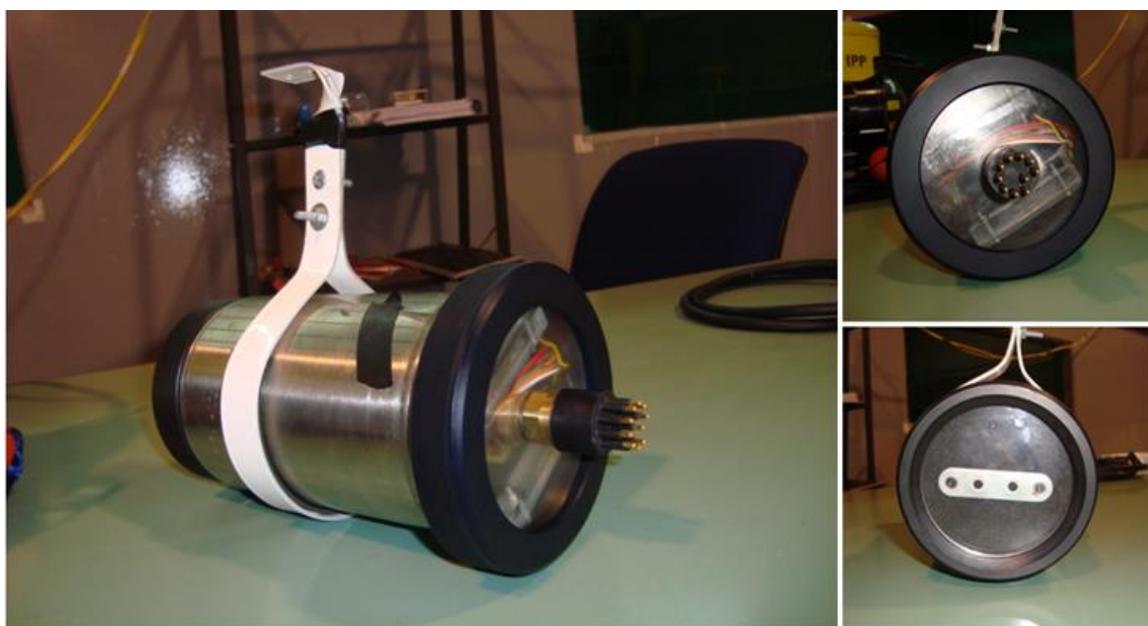


Figura B.1: Módulo INS&Lasers.

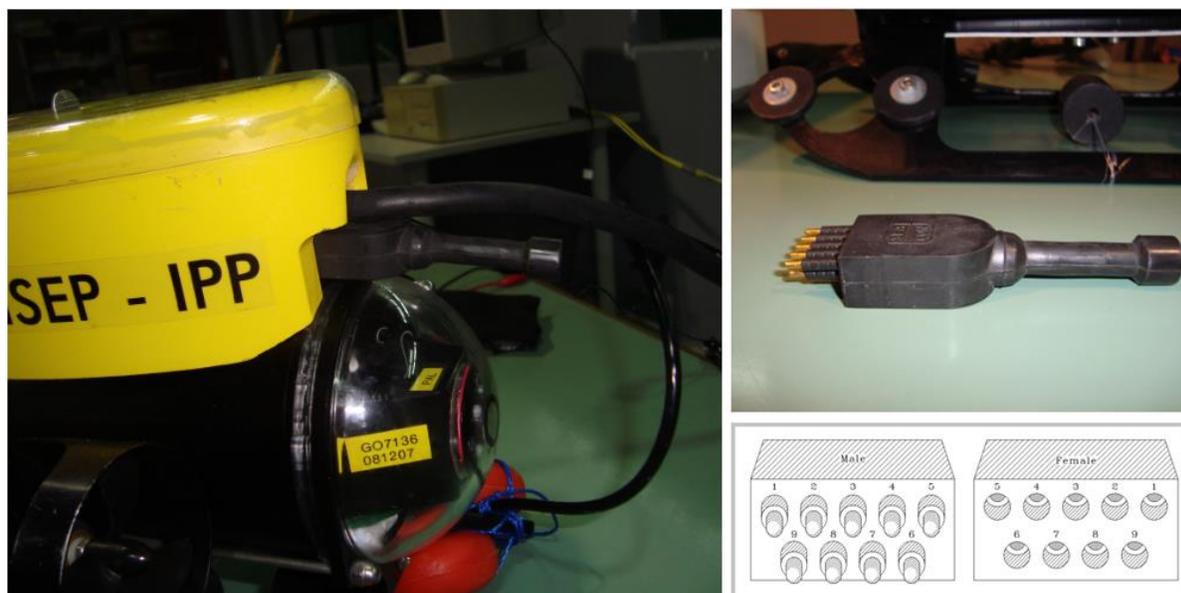


Figura B.2: Porto de conexão para equipamentos externos selado (à esquerda), ficha *dummy* para selar o porto de conexão externa quando não está a ser utilizado (à direita, em cima) e *pinout* do porto de conexão.

Tabela B.1: *Pinout* do porto de conexão externa do *VideoRay PRO 3E*.

Pino	Função
1	Vídeo –
2	Vídeo +
3	48V DC +, 30W
4	Aux +
5	Ground
6	Aux –
7	24V DC –
8	24V DC +
9	12V DC +, 6W

Como não fazia sentido desenvolver uma solução tão específica e apenas para este robô do LSA, optou-se por conceptualizar o módulo de modo a conseguir transportar mais equipamento do que o INS e os *lasers*. Além disso, uma vez que a ficha subaquática presente no ROV (Subconn MCLPIL9M) não é padrão, optou-se por utilizar uma outra que o seja no lado do módulo (Subconn MCIL10F-SU na extremidade do cabo que liga ao módulo INS&Lasers e uma Subconn SCBH10M no módulo). Assim, o cabo apresentado na Figura

B.3 é utilizado apenas para ligar o módulo desenvolvido ao *VideoRay PRO 3E* em particular, sendo que a utilização do módulo com qualquer outro robô do laboratório precisa apenas de uma cabo *standard* com fichas subaquáticas circulares de dez pinos (menos dispendioso que o cabo que o *VideoRay* exige).



Figura B.3: Cabo de conexão entre o ROV *VideoRay PRO 3E* e o módulo INS&Lasers.

Analisando a Tabela B.1 anteriormente apresentada, é possível constatar que apenas são disponibilizados dois pinos que não têm função atribuída (“Aux +” e “Aux –”). Estes dois cabos são também disponibilizados na superfície – em particular na *host station* (ver Figura 4.2), através do cabo umbilical do robô. Esta particularidade implica que a comunicação com o módulo INS&Lasers seja realizado através de uma comunicação que apenas necessite de dois fios para enviar e receber dados – neste caso optou-se pelo protocolo de comunicação CAN, o qual apenas necessita de um par diferencial para envio e recepção de dados.

A comunicação do PC (ver Figura 4.2) com o módulo é realizada por intermédio de um conversor USB/CAN (ver Figura B.4). Do mesmo modo, no módulo INS&Lasers, optou-se por utilizar um microcontrolador ARM M3-Cortex STM32 como intermediário entre o PC e os sensores (ver Figura B.5). Desta forma, uma vez que o STM32 é capaz de comunicar em vários protocolos de comunicação diferentes, o módulo fica preparado para a integração de mais sensores.



Figura B.4: Conversor USB/CAN utilizado para comunicar com o módulo INS&Lasers (modelo CPC-USB/M16C da EMS Dr. Thomas Wünsche).



Figura B.5: Placa de desenvolvimento do ARM M3-Cortex STM32, disponibilizada pelo LSA.

Por fim, apresentam-se algumas imagens do interior e exterior do módulo INS&Lasers e deste instalado no *VideoRay PRO 3E*. Apresenta-se também o esquema eléctrico da placa de desenvolvimento do STM32 utilizada.

Como se pode ver nas Figura B.6 e Figura B.7, estão instalados dois *lasers* paralelos entre si na face frontal do módulo e, no seu interior, o INS (modelo 3DM-GX2 da MicroStrain), a placa de desenvolvimento do STM32 e ainda uma pequena placa de potência (conversão de 12V para 5V DC).

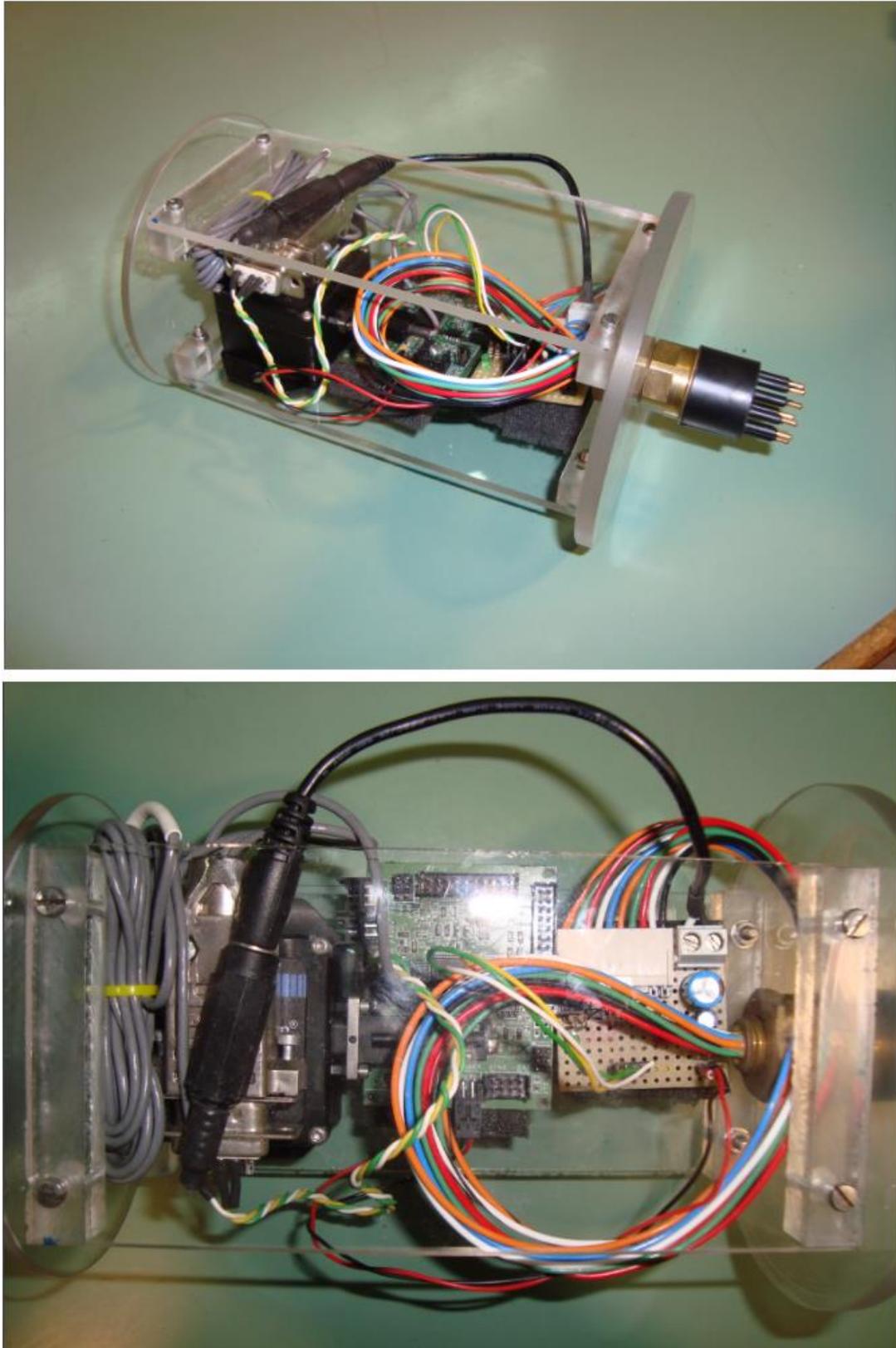


Figura B.6: Interior do módulo INS&Lasers.

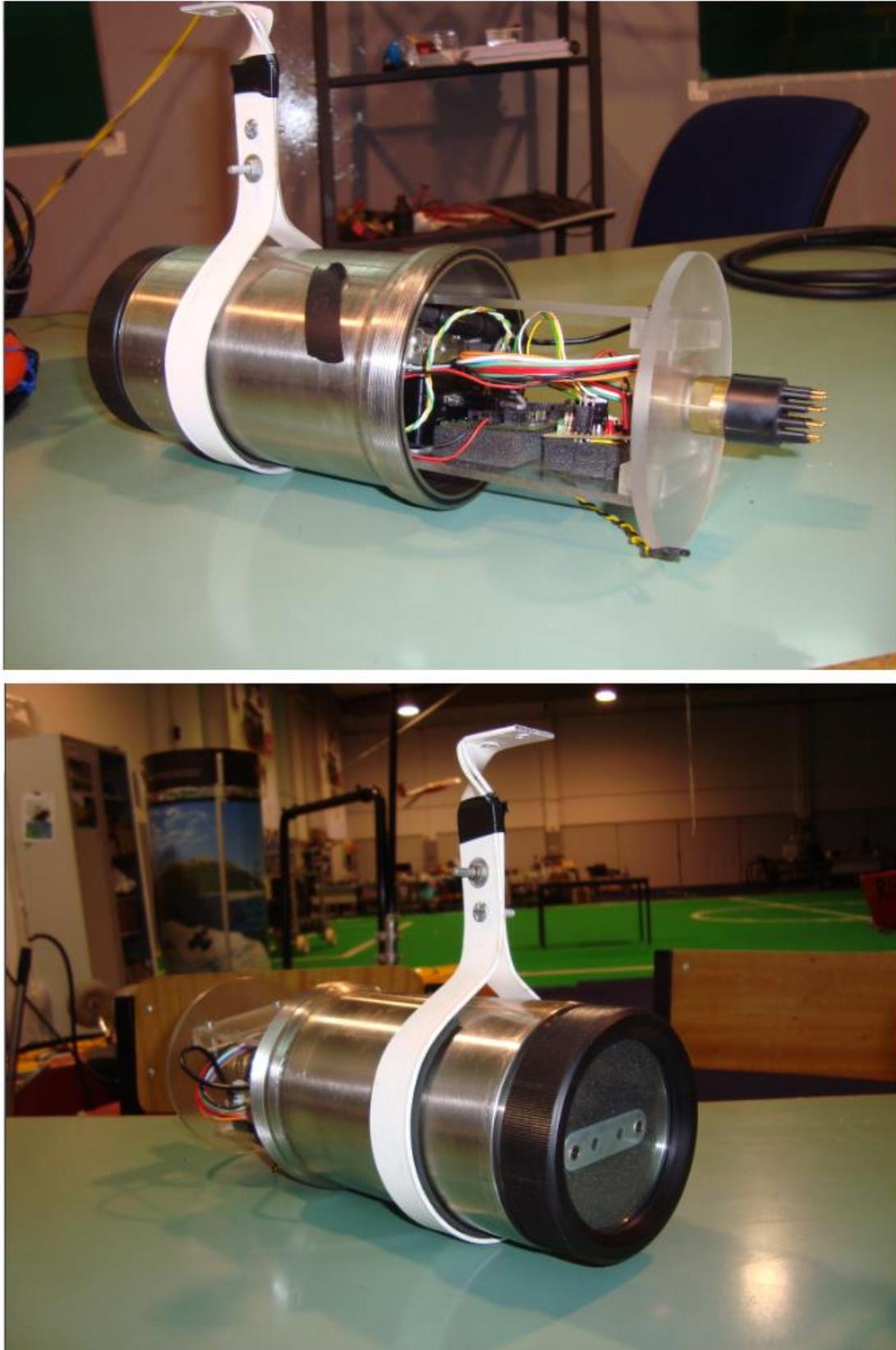


Figura B.7: Exterior e interior do módulo INS&Lasers.

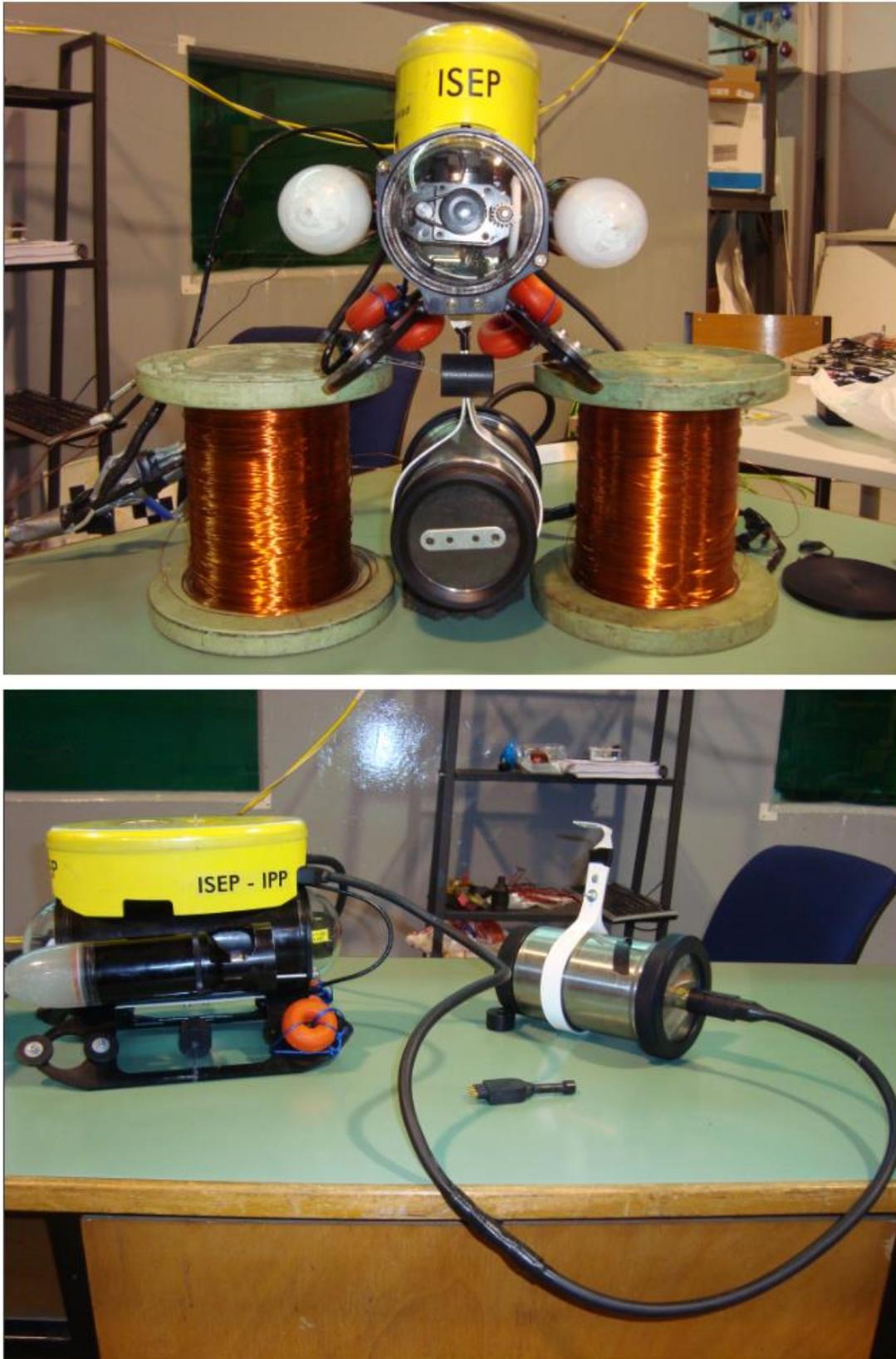


Figura B.8: Instalação do Módulo INS&Lasers no ROV *VideoRay PRO 3E*.

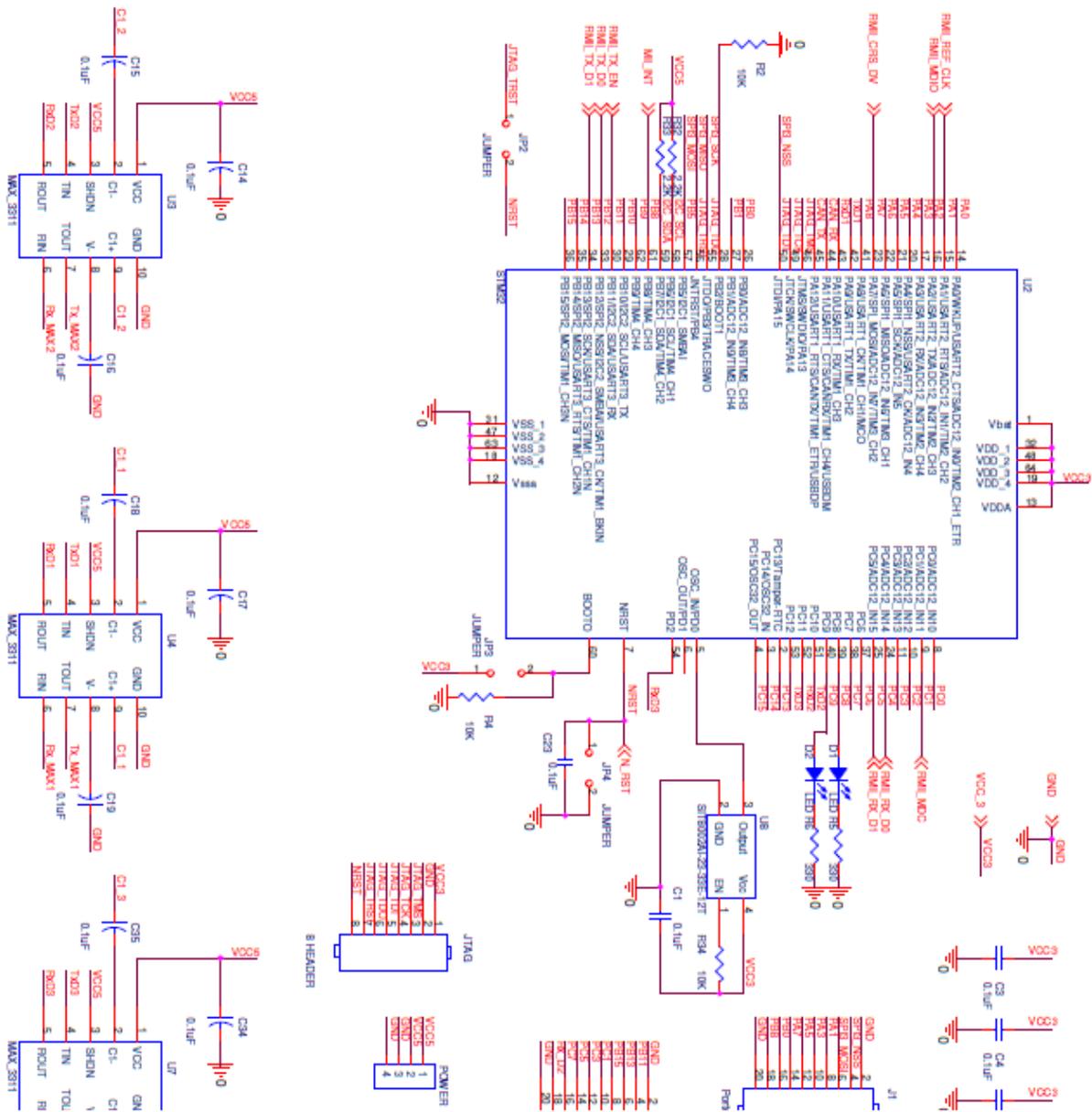


Figura B.9: Esquema eléctrico da placa de desenvolvimento do STM32 utilizada no módulo INS&Lsers.

