



Controlo de locomoção do veículo robótico submarino TURTLE com recurso a sistema de variação de flutuabilidade

HELDER JOEL FERNANDES OLIVEIRA

Outubro de 2017



Controlo de locomoção do veículo robótico submarino TURTLE com recurso a sistema de variação de flutuabilidade

Helder Joel Fernandes Oliveira
Nº 1131363

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores -
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

28 de Outubro de 2017



Dissertação para satisfação parcial dos requisitos do Mestrado em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Helder Joel Fernandes Oliveira

Nº 1131363

Orientador: Alfredo Manuel de Oliveira Martins

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores -
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

*"Muitas pessoas devem a grandeza de suas vidas
aos problemas que tiveram de vencer"*

Robert Baden-Powell

Agradecimentos

Se os agradecimentos também fazem parte desta dissertação, é porque ao longo deste trabalho não estive sozinho e obtive grandes apoios e incentivos dos quais estarei eternamente grato.

Gostaria de começar por agradecer ao Professor Eng.^o Alfredo Martins pela excelente orientação, pelo seu apoio e pelas diversas sugestões em prol deste trabalho.

Ao Professor Doutor Eduardo Silva, como responsável do LSA, agradecer todo o seu acompanhamento e disponibilidade em criar condições para o desenvolvimento deste trabalho.

A toda a "família" do LSA, pelo companheirismo, amizade e motivação que todos demonstraram e pelo qual tenho enorme apreço em partilhar com eles o meu trabalho diário.

Agradecer também a toda a minha família e amigos, pela enorme paciência e alento que me foram dando ao longo deste percurso.

Também de uma forma muito especial, gostaria de agradecer à minha namorada, Ariana Gomes, pela sua forma genuína que me acompanhou ao longo desta etapa. A sua capacidade de lidar com os maus momentos e enaltecer os bons contribuiu significativamente para a término deste trabalho.

Por fim, gostaria de prestar um enorme agradecimento aos meus pais e irmãos. Não só por esta etapa académica, que lhes exigiu enormes sacrifícios, mas sim por todos os ensinamentos, exemplos e princípios que me proporcionaram, os quais tenho como referência e estarei infindavelmente agradecido.

Obrigado a todos,

Joel Oliveira

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Resumo

O panorama da robótica marinha ganha cada vez mais ênfase nos dias de hoje, não só pela grande percentagem de água existente no planeta, mas também pela motivação econômica relacionada com exploração dos recursos marinhos. As limitações físicas à presença do homem no meio subaquático, obrigou ao desenvolvimento de veículos autónomos para o mar profundo. O TURTLE, é um desses veículos que foi desenvolvido em Portugal, com a capacidade de operar em profundidades até 1000 metros. Além da sua grande profundidade de operação, o TURTLE possui um sistema de variação de lastro para alteração de flutuabilidade, permitindo grande eficiência energética no seu movimento vertical. Outro ponto relevante deste veículo é o seu sistema de propulsão (*thrusters*) que proporciona o seu reposicionamento, seja no fundo do oceano, na coluna de água ou até mesmo à superfície. Todas estas características culminam numa maior eficácia e eficiência do sistema de controlo de locomoção.

Assim, esta dissertação consiste em desenvolver um sistema de controlo de locomoção para o veículo TURTLE, recorrendo ao sistema de variação de flutuabilidade (VBS) e ao sistema de propulsão (*thrusters*). Para este objetivo proposto, optou-se por analisar as aplicações práticas do veículo e criar uma arquitetura de controlo capaz de satisfazer os seus requisitos definindo assim diversas manobras de controlo que foram posteriormente testadas em simulação. Com a simulação concluiu-se que as manobras que utilizam apenas o sistema de propulsão, são facilmente executadas com recurso ao controlador PID, enquanto que as manobras que recorrem ao VBS, são mais sensíveis ao erro em posição, havendo a necessidade de desenvolver técnicas que atenuam esse mesmo erro. Foi também possível ao longo deste trabalho testar o veículo em ambiente real, no mar, e com isso validar o sistema de locomoção, identificar e caracterizar falhas do mesmo.

Palavras-Chave:

TURTLE, Sistema de Variação de Flutuabilidade(VBS), Sistemas de Propulsão(*thrusters*), Simulação, Controlador PID, Manobras, Modelo Dinâmico, Controlo, Locomoção, Ambiente Subaquático, Mar profundo, Eficiência Energética.

Abstract

The marine robotics field is growing and earning a lot more emphasis nowadays, not just by the fact that a bit part of the planet is covered by water but also by big economic motivations of exploring the marine resources.

The physical limitations to the presence of the human being in an underwater environment has motivated the development of autonomous vehicles to explore the deep sea. Turtle, is one of those vehicles and it has been developed in Portugal with the capacity to operate autonomously in deep sea up to 1000 meters and an autonomy to accomplish missions of some months. To achieve these tasks the vehicle has a variable buoyancy system that makes it capable of change his depth in a power efficient way for vertical motion, and, for the other degrees of freedom it also is capable of faster movements using the available thrusters that can be used at deep sea or at surface. All of those combined features enable a better efficiency of the locomotion system.

This work consists in develop a control and locomotion system for vehicle TURTLE, using the variable buoyancy system (VBS) and propulsion system (thrusters). For this goal proposed, in the begin was analyzed the some application of vehicle TURTLE, for after this to create a control architecture able to satisfy the requirements of vehicle. In this way several maneuvers went developed and tested in simulation. With simulation it was possible conclude that maneuvers that using just the propulsion system are easily to controller by the PID controller. However the maneuvers that using the variable buoyancy system, are more sensitive of error in position, there is a need to implement others techniques that minimize the error. This work also present the some tests performed in the environment real (sea) making it possible the validation of system control.

Keywords:

TURTLE, Variable Buoyancy System(VBS), Propulsion System(*thrusters*), Simulation, PID Controller, Maneuvers, Dynamic Model, Control, Locomotion, Underwater Environment, Depth Sea, Energy Efficiency.

Conteúdo

Resumo	iv
Abstract	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xviii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	2
1.2 Cenários de operação	3
1.3 Objetivos	3
1.4 Estrutura do relatório	4
2 Estado da Arte	7
2.1 Veículos robóticos para o mar profundo <i>deep sea</i>	7
2.1.1 Caracterização de veículos submarinos	7
2.1.2 Veículos para o mar profundo	9
2.2 Sistemas de variação de lastro	11
2.2.1 Tipos de sistemas de variação de lastro	12
2.2.2 Mecanismos de variação de lastro	13
3 Modelização de veículos submarinos	19
3.1 Referenciais	19
3.1.1 Sistemas de coordenadas	21

3.1.2	Ângulos <i>Euler</i>	23
3.2	Dinâmica de um corpo rígido	26
3.2.1	Movimento de translação	28
3.2.2	Movimento de rotação	28
3.2.3	Representação matricial das equações do movimento	30
3.3	Forças e momentos hidrostáticos e hidrodinâmicos	31
3.3.1	Modelos dinâmicos estudados	32
3.3.2	Massa e inércia adicionada	33
3.3.3	Amortecimento hidrodinâmico	34
3.3.4	Forças e momentos de restabelecimento	36
3.3.5	Equação do movimento	37
3.3.6	Modelo do <i>Thruster</i>	38
3.3.7	Flutuabilidade	38
4	Robô submarino TURTLE	41
4.1	Arquitetura	43
4.2	Estrutura	44
4.3	Armazenamento de energia	46
4.4	Sistema de variação de lastro	47
4.5	Sistema de Propulsão - <i>Thrusters</i>	51
4.6	Comunicações	53
4.7	Controlo e Navegação	54
4.8	Operação	59
5	Modelização TURTLE	61
5.1	Veículo subaquático autónomo TURTLE	61
5.1.1	Geometria do veículo	63
5.1.2	Peso e flutuação	68
5.1.3	Centro de gravidade e de flutuabilidade	69
5.1.4	Momentos de Inércia	69
5.1.5	Sistema de Propulsão	70
5.1.6	Simulação CFD - <i>Drag</i>	73

6	Controlo do TURTLE	77
6.1	Arquitetura de controlo	77
6.2	Implementação software	78
6.3	Manobras	84
6.4	Controlador PID	87
6.4.1	Ação Proporcional	89
6.4.2	Ação integral	89
6.4.3	Ação derivativa	90
6.4.4	Resumo das características do PID	91
7	Simulação	93
7.1	Modelação do movimento vertical do TURTLE	94
7.2	<i>Tuning</i> do controlador PID	98
7.3	Controlo <i>thrusters</i>	99
7.4	Controlo VBS	100
7.5	Manobras Compostas	102
7.5.1	Manobra DIVE	104
7.5.2	Manobra DIVE para 1000 metros	107
7.5.3	Manobra DIVE e GOTO	109
7.5.4	Manobra SUBMERGE	111
7.5.5	Missão	111
8	Resultados	115
8.1	Sistema de variação de lastro - VBS	116
8.1.1	Mergulhos com VBS	116
8.1.2	<i>Log</i> com duração de 12 horas	128
8.2	<i>Thrusters</i>	131
8.3	Trajectoria	135
9	Conclusão e Trabalho Futuro	137
	Bibliografia	141

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Figuras

1.1	Alguns robôs aquáticos do Laboratório de Sistemas Autónomos.	3
2.1	Classificação de veículos submarinos.	8
2.2	Alguns exemplos de ROVs e MUVs	11
2.3	Modos de flutuabilidade.	12
2.4	Sistema de membrana extensível usando óleo	15
2.5	Sistema usando ar comprimido	16
2.6	Exemplos de sistemas com pistão. [32]	16
2.7	Sistema de variação usando água do mar	17
2.8	Sistema termal	18
3.1	Referencial Inercial.	20
3.2	Referencial NED em relação ao referencial ECEF.	21
3.3	Referencial inercial <i>earth frame</i> e do corpo <i>body frame</i>	23
3.4	Representação do sistema de coordenadas inercial e móvel de um corpo rígido [43].	27
3.5	Demonstração do princípio de Arquimedes	39
3.6	Efeitos da densidade de um corpo em contacto com a água.	40
3.7	Estabilidade de um corpo em contacto com a água.	40
4.1	Desmonstrador do TURTLE.	42
4.2	Componentes do TURTLE.	43
4.3	Diagrama com os vários sistemas do TURTLE.	44
4.4	Conjunto da espuma e <i>OpenCell</i> ™.	45
4.5	Exemplo de algumas estruturas sujeitas à pressão.	45
4.6	Estrutura do TURTLE.	46

4.7	<i>Housing</i> das baterias.	47
4.8	VBS - Sistema de variação de lastro.	47
4.9	Principais componentes do VBS.	48
4.10	Circuito VBS.	49
4.11	Esquema para entrada de água.	50
4.12	Esquema para saída de água.	50
4.13	Configuração dos <i>thrusters</i>	52
4.14	Potência vs <i>thrust</i>	53
4.15	Arquitetura de comunicações do TURTLE.	54
4.16	Arquitetura geral da navegação	55
4.17	Spatial Fog Advanced Navigation.	56
4.18	DVL <i>Teledyne Explorer Phased Array Self-Contained</i>	57
4.19	Sistema <i>USBL/Modem</i> e sensor de pressão	58
4.20	Operação TURTLE	59
5.1	Referenciais do veículo TURTLE.	62
5.2	Projeção superior do TURTLE.	64
5.3	Projeção frontal do TURTLE.	64
5.4	Projeção lateral do TURTLE.	65
5.5	Principais componentes do TURTLE.	66
5.6	Disposição dos <i>thrusters</i>	71
5.7	Pressão superficial em <i>surge</i>	74
5.8	Velocidade e vorticidade do fluido em <i>surge</i>	74
5.9	Velocidade e vorticidade do fluido em <i>sway</i>	75
5.10	Pressão superficial em <i>heave</i>	75
5.11	Velocidade e vorticidade do fluido em <i>heave</i>	76
6.1	Arquitetura geral do software de controlo vers ão 2	78
6.2	Arquitetura geral do software de controlo vers ão 1 (testes básicos de funcionalidade)	79
6.3	Arquitetura do gestor de missão.	80
6.4	Exemplo de uma máquina de estados.	81
6.5	Arquitetura do gestor de manobras.	81
6.6	Arquitetura do gestor de controlo do <i>thrusters</i>	82

6.7	Arquitetura do gestor de controlo do VBS.	83
6.8	Arquitetura <i>driver thrusters</i>	83
6.9	Arquitetura <i>driver VBS</i>	84
6.10	Exemplo de um ficheiro tipo <i>yaml</i> de uma missão.	87
6.11	Diagrama de blocos de um controlador PID.	88
6.12	Ação proporcional com variação do Kp	89
6.13	Ação integral com variação do Ki	90
6.14	Ação derivativa com variação do Kd	91
7.1	Blocos <i>Simulink</i> do simulador do sistema.	94
7.2	Diagrama da simulação do VBS.	95
7.3	Diagrama da simulação dos <i>thrusters</i>	96
7.4	Diagrama da simulação do movimento vertical do TURTLE.	98
7.5	Método ZieglerNichols.	98
7.6	Diferentes ganhos para a mesma posição (<i>thrusters</i>).	99
7.7	Afinação do controlador para o VBS.	101
7.8	Saída do controlador para o VBS.	102
7.9	Exemplo de um diagrama de estados usando <i>Stateflow</i>	103
7.10	Arquitetura do sistema de simulação.	104
7.11	Diagrama <i>Stateflow</i> da manobra "DIVE".	105
7.12	Manobra "DIVE".	106
7.13	Velocidade vs volume de água.	106
7.14	Posição do veículo para 1000 metros usando apenas o VBS.	107
7.15	Saída do controlador PID.	108
7.16	Velocidade e volume de água.	108
7.17	Diagrama <i>StateFlow</i> da manobra "GOTO".	109
7.18	Posição do veículo usando VBS e <i>Thrusters</i>	110
7.19	Saída do controlador PID do VBS vs <i>thrusters</i>	110
7.20	Diagrama <i>Stateflow</i> da manobra "SUBMERGE".	111
7.21	Arquitetura do sistema de simulação.	113
7.22	Missão executada.	113
7.23	Saída do controlador para cada manobra.	114
8.1	TURTLE na baía de Sesimbra.	115

8.2	Posição em <i>heave</i> do TURTLE ao longo do tempo.	116
8.3	Estados do VBS, válvulas e rotação da bomba do <i>log 7</i>	117
8.4	Velocidade e vorticidade do fluido em <i>heave</i>	118
8.5	Relação dos rpms com a corrente consumida e pressão interna do reser- vatório do VBS do <i>log 1</i>	119
8.6	Relação entre pressão interna e volume de água <i>log 3</i>	120
8.7	Variação de quantidade de água longo da posição vertical relativo ao <i>log 3</i>	121
8.8	Relação entre a velocidade e a posição vertical	122
8.9	Velocidade terminal vs Volume de água	123
8.10	Velocidade de descida versus subida	124
8.11	Análise da manobra executada através dos dados obtidos pelo IMU (<i>log 3</i>)	125
8.12	Impacto na aterragem	126
8.13	Posição do TURTLE ao longo do <i>log 4</i>	127
8.14	Atitude do TURTLE durante o <i>log 4</i>	127
8.15	Profundidade do TURTLE	129
8.16	Temperatura externa vs pressão vs litros perdidos	130
8.17	Atitude do veículo	131
8.18	Relação entre PWM, corrente consumida e rotação do motor	132
8.19	Verificação da matriz de alocação de <i>thrust</i>	132
8.20	Velocidade máxima em <i>surge</i> e <i>heave</i>	133
8.21	Resultado em posição da atuação dos <i>thrusters</i> verticais e do VBS.	134
8.22	Exemplo de uma trajetória na realocação do TURTLE na coluna de água.	135
8.23	Atitude do veículo ao longo da realocação.	136
8.24	Trajetória do TURTLE no largo de Sesimbra	136

Lista de Tabelas

3.1	Notação dos seis graus de liberdade	22
4.1	Principais características físicas do TURTLE.	43
4.2	Especificações técnicas dos <i>thrusters</i>	52
4.3	Especificações técnicas dos <i>Spatial Fog</i>	56
4.4	Especificações técnicas do DVL 600kHz <i>Phased Array Explored</i>	57
4.5	Especificações técnicas do USBL S2CR 7/17.	58
4.6	Especificações técnicas do sensor de pressão <i>Keller PA35X</i>	59
5.1	Principais dimensões do TURTLE.	63
5.2	Volume dos diversos componentes do TURTLE.	67
5.3	Massa dos diversos componentes do TURTLE.	67
5.4	Coordenadas dos principais componentes do TURTLE.	68
5.5	Peso e força de impulsão total do TURTLE.	68
5.6	Posição do centro de gravidade.	69
5.7	Posição do centro de flutuação.	69
5.8	Momentos de inércia.	69
5.9	Coefficientes da matriz de alocação.	72
5.10	Força de propulsão.	73
5.11	Coefficientes de <i>Drag</i>	76
6.1	Comportamento do controlador PID face ao aumento do K_p , K_i , K_d	92
7.1	Cálculos dos ganhos PID propostos por Ziegler-Nicholes.	99
7.2	Ganhos usados para o resultado da Figura 7.6.	100
7.3	Ganhos usados para o resultado da Figura 7.7.	100

8.1	Descrição geral dos <i>logs</i>	117
8.2	Descrição dos estados do VBS e válvulas.	118
8.3	Volume de água durante os vários processos de mergulho.	121
8.4	Tempos de encher/esvaziar tanque VBS	121
8.5	Tempo de descida e subida do TURTLE	123
8.6	Velocidade vertical máxima	124
8.7	<i>Drift</i> da posição	128

Lista de Siglas e Acrónimos

AUV Autonomous Underwater Vehicles

LSA Laboratório de Sistemas Autónomos

SVL Sistema de Variação de Lastro

CPU Central Processing Unit

DVL Doppler Velocity Log

IMU Inertial Measerument Unit

USBL Ultra-Short BaseLine

ROV Remotely Operated Vehicles

ROS Robot Operating System

UV Underwater Vehicle

MUV Manned Underwater Vehicle

URV Underwater Robotic Vehicle

HURV Hybrid Underwater Robotic Vehicle

WHOI Woods Hole Oceanographic Institution

IFREMER Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

MBARI Monterey Bay Aquarium Research Institute

PCM Phase Change Material

ECEF Earth-Centered Earth-Fixed

LPT Local Plan Tangent

LTP Local Tangent Plan

NED North East Down

ENU East North Up

JB Junction Box

GNSS Global Navigation Sattelite System

EKF Extended Kalman Filter

AHRS Attitude and heading reference system

CFD Computer Fluid Dynamics

PID Proporcional Integrated Derivative

VBS Variable Buoyancy System

FOG Fiber Optic Gyros

Capítulo 1

Introdução

O paradigma de Portugal em relação ao mar, não é apenas recordar uma nação de marinheiros, mas sim uma perspectiva de futuro sustentável como fator determinante nos recursos que o mar tem para oferecer. Os 70% do planeta Terra que está coberto de água, por si só representam um evidente manifesto de que tem que existir uma visão global na exploração do mar, nomeadamente do mar profundo [1]. Esta visão não pode estar apenas focada na exploração pontual de energia (*oil & gas*), mas estender-se a todas as restantes áreas socio-econômicas.

A imensidão, adversidade e complexidade da natureza oceânica mudaram o padrão na investigação oceanográfica. Esta necessidade resultou num avanço de tecnologias robóticas (AUV - *Autonomous Underwater Vehicle* e ROV - *Remotely Operated underwater Vehicle*) permitindo metodologias mais seguras, mais rápidas e mais adequadas para o estudo e exploração dos oceanos. Contudo, para isto, os veículos necessitam de estar dotados de capacidades de locomoção que permitem torna-los totalmente autónomos ou remotamente controláveis. È neste ponto, do controlo da locomoção que incide esta dissertação, tendo por base um veículo submarino robótico para o mar profundo, o lander robótico TURTLE.

O TURTLE [2] é um veículo de operação autónoma com capacidade de mergulho até 1000 metros de profundidade de uma forma energeticamente eficiente devido ao seu sistema de variação de lastro. Pode permanecer no fundo oceânico por longos períodos de tempo (meses) e realocar a sua posição autonomamente servindo assim como observatório móvel ou como meio de transporte de equipamento para o mar profundo. Este conceito requer menores requisitos logísticos e operacionais face aos meios convencionais (e.g ROVs com grandes navios de apoio, ou soluções pouco flexíveis como *landers* clássicos).

Abordando mais especificamente o mar português, tendo em conta a proposta da

extensão da plataforma continental [3] e analisando as características da mesma, verifica-se efetivamente a necessidade de apostar no desenvolvimento em sistemas móveis como o TURTLE. Este veículo poderá incidir em diversas áreas de aplicação desde: investigação oceanográfica, monitorização ambiental, vigilância marítima, transporte de cargas para grandes profundidades, aplicações no âmbito da defesa nacional e apoio a outros sistemas sub/aquáticos móveis. Em todas as aplicações mencionadas anteriormente, o veículo TURTLE necessita de um controlo robusto que lhe permite a execução de manobras de uma forma eficaz. O ambiente aquático é adverso, bastante dinâmico e não linear pelo que se torna importante o desenvolvimento métodos de simulação deste tipo de veículos, antes de realização de missões no mundo real. É neste conjunto alargado de necessidades que se insere esta dissertação de forma a que o TURTLE não passe apenas por uma fase de projeto mas sim progrida para a procura de aplicações práticas e que contribua para o desenvolvimento científico e económico do país.

1.1 Enquadramento e motivação

O forte crescimento do Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) (Laboratório de Sistemas Autónomos)¹ nos últimos anos, tem levado à participação em diversos projetos relevantes na investigação de robótica autónoma, nomeadamente na área marítima que possibilitou o desenvolvimento de veículos de superfície e subaquáticos. O ROAZ [4] é um dos veículos de superfície usados no LSA que tem como principal finalidade a realização de tarefas como busca e salvamento e batimetria do fundo oceânico. O EVA, também desenvolvido integralmente no LSA no contexto do projeto VAMOS [5], [6], trata-se de um veículo subaquático direcionado para o mapeamento e auxílio na exploração de minas inundadas. Estes dois veículos pode ser visualizados na Figura 2.2.

Na sequência do projeto *Autonomous Support System for Subsea Operations* surgiu o veículo TURTLE, que tem como principal objetivo atuar a grandes profundidades, com capacidade de realizar movimento de ascensão e imersão de forma energeticamente eficiente devido ao seu sistema de variação de lastro. Possui também quatro *thrusters* para auxílio ao movimento vertical e quatro para o movimento horizontal. Para o seu movimento é necessário um sistema de controlo que permite integrar o conjunto dos meios de locomoção (*thrusters*² verticais, horizontais e VBS³). Desta forma surgiu o

¹www.lsa.isep.ipp.pt

²*Thrusters* de denominação anglo-saxónica, é muitas vezes usado neste documento para designar o sistema de propulsão do TURTLE.

³Neste documento é mencionado diversas vezes VBS ou sistema de variação de fluabilidade, mas todos estes termos se referem ao sistema de variação de lastro usado no veículo TURTLE.



(a) HROV EVA - VAMOS.



(b) ASV ROAZ.

Figura 1.1: Alguns robôs aquáticos do Laboratório de Sistemas Autônomos.

trabalho desta dissertação com o objetivo de desenvolver e validar o sistema de controle e locomoção do TURTLE em ambiente real.

1.2 Cenários de operação

O veículo TURTLE devido às suas potencialidades pode ser aplicado em diversos cenários, tais como:

- Em aplicações civis o TURTLE pode ser usado como um equipamento para transporte de cargas para o fundo oceânico. Outra utilidade em que pode ser usado é no apoio a outros sistemas móveis, operando como satélite de posicionamento.
- Relativamente a aplicações militares pode ser usado como meio de defesa, sendo capaz de efetuar a monitorização do tráfego marítimo.
- Para aplicações científicas, este veículo é capaz de efetuar as mais diversas missões de monitorização, desde temperatura, salinidade, registo de atividade sísmicas, etc. Pode também suportar diversos sensores de monitorização ambiental (e.g. MarinEye) [7] entre outros. Poderá também, realizar mapeamento e batimetria de forma localizada quando necessário.

1.3 Objetivos

Os objetivos que se pretendem alcançar com o desenvolvimento desta dissertação podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- Desenvolver modelo dinâmico do veículo robótico TURTLE tendo em vista o seu controlo de profundidade;
- Desenvolver o sistema de controlo para o sistema de variação de flutuabilidade;
- Desenvolver arquitectura de controlo para a locomoção do robô TURTLE;
- Controlo de movimento do robô TURTLE no plano vertical usando o VBS;
- Implementação do modelo de simulação do veículo;
- Validar sistema de locomoção em ambientes reais;
- Caracterizar desempenho do sistema de locomoção em ambiente real.

1.4 Estrutura do relatório

Este documento está organizado em nove capítulos. No primeiro capítulo aborda-se de uma forma introdutória a contextualização do assunto desta dissertação assim como a sua motivação. É apresentado também um leque de cenários de aplicação para o veículo TURTLE e também são estabelecidos os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo diz respeito ao estudo preliminar de sistemas de variação de flutuabilidade abordados na literatura atual, assim como alguns sistemas robóticos relacionados importantes na investigação submarina.

No terceiro capítulo expõe-se alguns conhecimentos fundamentais na modelização de veículos submarinos.

Relativamente ao quarto capítulo este descreve em detalhe o robô submarino TURTLE implementado.

A modelização do veículo TURTLE é abordada no quinto capítulo. Numa primeira fase determina-se o modelo geométrico do veículo e posteriormente alguns coeficientes de forças hidrodinâmicas.

No capítulo seis, é apresentada a arquitetura de controlo do veículo, assim como detalha várias manobras de controlo propostas para o mesmo. São também estudados fundamentos teóricos do controlador PID.

A simulação do veículo está exposta no capítulo sete. Neste capítulo é apresentado o simulador desenvolvido, bem como os resultados obtidos após implementação de controladores.

No capítulo oito mostram-se os resultados adquiridos em ambiente real (mar), bem como é efetuado a análise comparativa dos testes realizados.

Por fim, no capítulo 9 são apresentadas as conclusões realizadas após uma análise cuidada e são expostas perspectivas de trabalho futuro.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 2

Estado da Arte

O presente capítulo contém uma análise crítica do estado da arte tendo em vista o desenvolvimento de novas soluções para o controlo de profundidade para veículos robóticos para o mar profundo com particular atenção a sistemas de variação de lastro. Perante isso, este capítulo será dividido em duas partes. Numa primeira fase serão abordados diversos veículos para o mar profundo e que tiveram grande ênfase na história da robótica submarina. Numa segunda fase será especificado alguns dos sistemas de variação de lastro mais comuns, assim como algumas das suas particularidades.

2.1 Veículos robóticos para o mar profundo *deep sea*

Com o interesse global na exploração das profundezas do oceano, por parte das mais diversas instituições (universidades, centros investigação, entidades governamentais), surgiu uma considerável evolução no desenvolvimento de sistemas subaquáticos [8]. Nos dias de hoje podemos encontrar sistemas sofisticados para lidar com as mais diversas operações desde, monitorização e recolha de dados das profundezas do oceano até a extração de recursos naturais. Nesta secção serão abordados alguns desses sistemas que possuem sistemas de variação de lastro como principal fonte de propulsão para movimento vertical na coluna de água.

2.1.1 Caracterização de veículos submarinos

Antes de abordar os veículos subaquáticos mais influentes da história é importante perceber que estes são caracterizados mediante algumas particularidades tais como: os

modos de operação e os tipos de missões que podem executar. De uma forma generalizada pode-se utilizar a sigla Underwater Vehicle (UV) (Laboratório de Sistemas Autónomos)(*Underwater Vehicle*⁴) para descrever todo tipo de veículos submergíveis. No entanto, podemos especificar estes veículos em subcategorias como mostra a Figura 2.1.

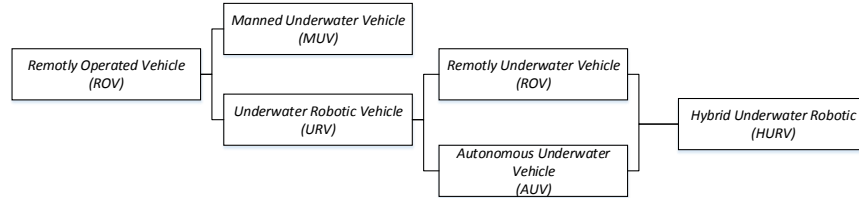


Figura 2.1: Classificação de veículos submarinos.

- MUV - *Manned Underwater Vehicle*

Foram os primeiros veículos submarinos que surgiram para colmatar a curiosidade do ser humano em conhecer presencialmente as profundezas do oceano. O interesse foi aumentando e estes veículos começaram cada vez mais a ser usados para investigação e exploração de águas profundas. Permitiram além do piloto, transportar também biólogos marinhos com o intuito de observarem o fundo do oceano, recolherem amostras através de manipuladores robóticos para posterior análise. Estima-se que atualmente existam cerca de uma centena de MUVs em operação [9]. Com a evolução da tecnologia e com a preocupação de retirar o ser-humano dos perigos inerentes à profundidade elevada, começaram a surgir os URVs *Underwater Robotic Vehicle*, ou seja veículos não tripulados capazes de ser controlados à distância.

Estes veículos podem estar divididos em três categorias:

- URV - *Underwater Robotic Vehicle*

- ROV - *Remotely Operated Vehicle*

Estes veículos podem ser operados por um piloto que permanece numa estação de controlo e que tem uma ligação física (normalmente fibra ótica) com o ROV. Dependendo do seu equipamento, este tipo de veículos pode realizar

⁴*Underwater Vehicle* de denominação anglo-saxónica, é muitas vezes usado neste documento para designar veículos submarinos.

um vasto número de tarefas, desde inspeção visual, proteção ambiental e perfuração para offshores. É de momento o veículo mais utilizado para o trabalho marítimo, em particular para operações de intervenções a grande profundidade. Segundo a *Douglas-Westwood*, empresa líder no ramo da energia, estima-se que mais de 1100 ROVs estejam vinculados à indústria submarina, sendo que 50% destes veículos estejam ligados à atividade de petróleo e gás.

– AUV - *Autonomous Underwater Vehicle*

São veículos em que a sua principal vantagem consiste em realizar tarefas autonomamente sem necessidade de intervenção humana. O próprio veículo tem a capacidade de realizar missões, tomar decisões e mudar os seus comportamentos de missão com base nos dados ambientais. Além disso, uma outra vantagem refere-se ao facto de não possuir qualquer cabo que possa interferir nas manobras executadas [10].

– HURV - *Hybrid Underwater Robotic Vehicle*

Ao combinar as vantagens dos ROVs e dos AUVs, surgem então os HURVs. Estes são veículos que tanto podem ser operados como AUVs, para uma exploração de uma área mais alargada e posteriormente ser convertido em ROV para intervenções mais precisas [11]. A grande vantagem dos HURVs e consequentemente dos ROVs, prende-se essencialmente na comunicação, uma vez que utiliza um cabo de fibra óptica para comunicação com a estação de controlo. Caso contrário, para comunicação no mar a longas distâncias apenas é possível através de modems acústicos estando limitado à sua pequena largura de banda (na ordem dos Kbps) [12].

2.1.2 Veículos para o mar profundo

O forte interesse nos recursos oceânicos fez disparar meios capazes de monitorizar, inspecionar e explorar as profundezas do oceano. Este fascínio reforçou a necessidade de investir em tecnologia marinha, tendo esta um papel económico e científico fundamental da exploração do oceano. O resultado deste investimento surgiu na concepção de veículos subaquáticos e na conquista de novos horizontes e novos desafios devido aos recursos expressivos existentes no meio subaquático. Foram sem dúvida muitos veículos que fizeram e fazem parte deste crescimento, contudo o objetivo deste subcapítulo é abordar os principais veículos/sistemas que têm por base no seu movimento na coluna de água, sistemas de variação de flutuabilidade e mencionar as suas principais características. Um dos veículos mais notáveis da investigação submarina é o submersível *ALVIN* (MUV). Foi

desenvolvido em 1964 pela *Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)*, nos Estados Unidos da América. Já efetuou mais de 4600 mergulhos, levando mais de 13000 cientistas a profundidades do oceano [13]. Trata-se de um veículo que pesa cerca de 13.5 toneladas, permite ir a profundidades máximas de 6000 metros e com autonomia de 10 horas de operação. O sistema de variação de flutuabilidade deste submersível é feito através da variação de volume. Existem 6 esferas resistentes à pressão que possuem óleo no interior das mesmas, e para realizar a variação a flutuabilidade do veículo, esse mesmo óleo é transferido para 2 tanques flexíveis através de uma bomba de alta pressão. A capacidade de variação de flutuabilidade deste veículo é de 272 kg. Incorpora também um outro sistema de variação de flutuabilidade, para efetuar o *trim* do veículo até no máximo 25° [14].

Outros veículos tripulados com referência na investigação submarina, é o caso do *NAUTILE (MUV)*, desenvolvido pelo *IFREMER - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer* em 1984. Este submersível é capaz de alcançar profundezas de 6000 metros, pesa 19,5 toneladas e com autonomia de 5 horas para missões de 6000 metros [15].

JIAOLONG(MUV) foi o primeiro submersível desenvolvido na China, iniciando os seus primeiros testes em 2009. Tem capacidade de atingir 7000 metros de profundidade, pesa 22 toneladas e tem 12 horas de autonomia. A alteração de flutuabilidade deste veículo faz-se através da variação de peso [16]. Todos estes veículos têm capacidade para transportar 3 elementos, sendo um o piloto e mais duas pessoas ligadas à investigação marinha.

O *VICTOR - IFREMER*, é um ROV dedicado à investigação do fundo do oceano. Pode ser instrumentado com diversos sensores para executar as mais diversas tarefas até 6000 metros de profundidade. A variação de flutuabilidade é feita através da variação de peso. A capacidade do sistema de variação de lastro é de 70 litros com um fluxo de 2 lpm a 600 bar. O peso total deste veículo é de 6 toneladas. [17].

Outro ROV relevante é o *TIBURON*, desenvolvido pelo *Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI)*. Este veículo também usa um sistema de variação de lastro recorrendo à água ambiente para fazer o seu movimento vertical na coluna de água. A capacidade de variação é de 68 kg com um fluxo de 9.6 lpm. Este veículo tem um peso total de 3.4 toneladas. [18].



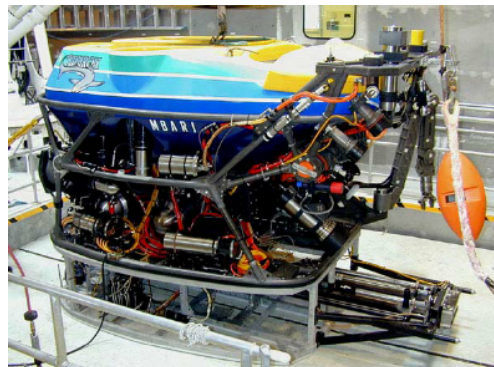
(a) MUV ALVIN.



(b) ROV NAUTILE.



(c) ROV VICTOR.



(d) ROV TIBURON.

Figura 2.2: Alguns exemplos de ROVs e MUVs [19].

2.2 Sistemas de variação de lastro

“Um corpo mergulhado, total ou parcial num fluido, sofre por parte deste, uma força ascendente, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo” (*Arquimedes (287 a.c.- 212 a.c.)*) [20].

A alteração da flutuabilidade possibilita movimentar o veículo na coluna de água, sem recorrer a dispositivos de propulsão elétrica nomeadamente *thrusters*. Estes dispositivos de propulsão requerem um custo energético considerável e a quantidade de energia disponível no veículo, tem um efeito direto sobre as suas capacidades (principalmente em missões *deep sea*). Outro aspeto importante, prende-se com o facto de a temperatura e a salinidade da água alterar a sua densidade. Estas variações interferem diretamente na flutuabilidade do veículo [21]. Através destas afirmações, reforça-se pois a ideia de que os *thrusters* terão que compensar este excesso ou diminuição de flutuabilidade e isto leva a custos energéticos consideráveis. A solução para este tipo de problemas passam por

sistemas de variação de lastro VBS (*Variable Buoyancy System*)⁵. Com estes sistemas é possível variar a flutuabilidade do veículo (positiva, negativa e neutra), de uma forma energeticamente eficiente (Figura 2.3).

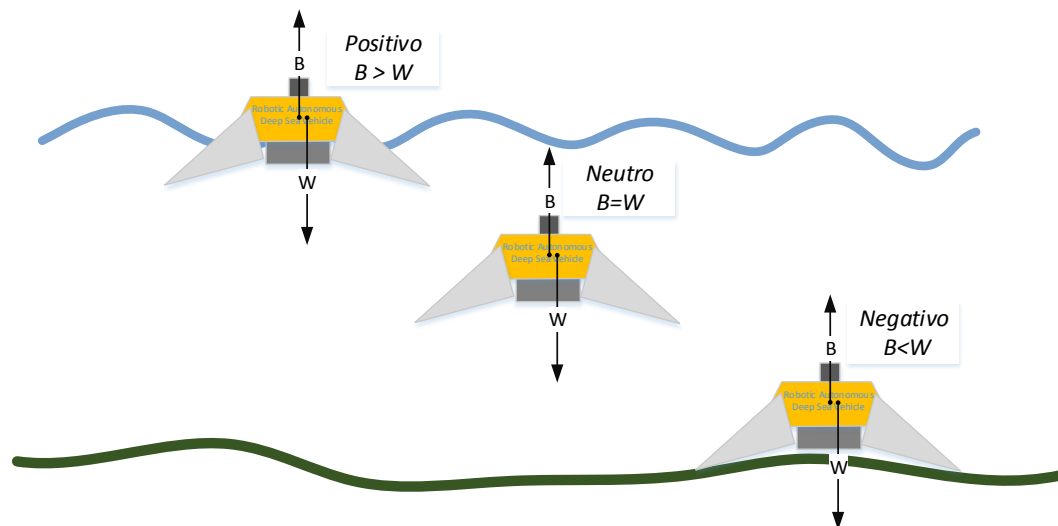


Figura 2.3: Modos de flutuabilidade.

Os VBS têm nos veículos submarinos duas funções principais: permitir o *"trim"* do veículo de forma a colocá-lo neutro na profundidade de operação e com equilíbrio vertical do centro de impulsão e massa; e alterar significativamente a relação impulsão/peso de forma a mergulhar ou emergir.

2.2.1 Tipos de sistemas de variação de lastro

Segundo o autor do livro *"Buoyancy, Stability, and Ballast"* [22], o processo de ajuste de lastro consiste na mudança da flutuabilidade de um veículo subaquático. Pela literatura analisada, verifica-se que grande parte dos investigadores, dividem os sistemas de variação de lastro em dois tipos: passivos e ativos.

- Sistemas passivos

Sistemas passivos envolvem ajustes na flutuabilidade do veículo antes de este executar a missão. Este ajuste é efetuado através da colocação ou retirada de pesos

⁵VBS é referido muitas vezes neste documento para designar o sistema de variação de lastro do veículo.

do veículo de forma a obter a flutuabilidade desejada. Como este método é feito manualmente, não é possível o veículo mudar a sua flutuabilidade durante a sua missão.

- **Sistemas ativos**

Os sistemas ativos, ao contrário dos anteriormente referidos, podem alterar a flutuabilidade do veículo durante a sua missão. Com estes sistemas é possível, em qualquer momento, mudar o centro de gravidade do veículo e o seu centro de flutuabilidade. Este ajuste da flutuabilidade pode ser possível através de três formas:

- Descarga de massa - Esta é a forma mais simples e rudimentar de alterar a flutuabilidade do veículo. Trata-se de um sistema que para variar a flutuabilidade de um veículo liberta uma massa presa ao mesmo.
- Variação de massa - Nestes sistemas a variação de flutuabilidade recorre ao armazenamento de água ambiente no interior de um depósito. É possível em qualquer altura da missão variar a flutuabilidade do veículo alterando a quantidade de água existente no depósito [23].
- Variação de volume - Relativamente à variação do volume, este tipicamente é feito recorrendo a um fluído (normalmente óleo), que se desloca de um tanque rígido pressurizado para uma membrana flexível que se encontra no exterior do veículo. O óleo ao ocupar a membrana aumenta o volume total do veículo alterando a flutuabilidade do veículo [24]. Desta forma o peso total do veículo permanece inalterado e apenas é ajustado o seu volume.

2.2.2 Mecanismos de variação de lastro

Na secção 2.2.1, foram abordados os tipos de sistema de variação de flutuabilidade. Contudo para obter estas variações existem diversos mecanismos que poderão ser utilizados mediante os requisitos a que estes estão sujeitos. Face ao estado da arte estudado, nesta secção serão abordados esses mecanismos de variação de lastro, as suas principais características e o desempenho dos mesmos. Simultaneamente será feita uma crítica sobre os mesmos de forma a diferencia-los entre si, e com isso, adquirir conhecimento para projetar um sistema de variação de lastro mais completo, mediante os requisitos propostos.

- **Sistema descarga de massa**

Uma das formas mais simples de ajustar a flutuabilidade de um veículo é através da libertação de uma massa presa ao mesmo. Estes sistemas são acionados quando o veículo atinge a profundidade desejada. Trata-se de um sistema bastante rudimentar, uma vez que depois ser acionado, a sua reutilização não é possível. Sendo estes sistemas de elevada simplicidade e fiabilidade podem ser utilizados em situações de emergência ou onde é necessário uma maior velocidade de deslocação na coluna de água. Em termos de missão apenas podem ser utilizados para iniciar a ascensão na coluna de água possuindo fortes limitações já referidas.

- **Sistema de membrana expansível**

Tipicamente estes mecanismos utilizam a movimentação do óleo num circuito fechado para fazer a alteração do volume (Figura 2.4). Para aumentar a flutuabilidade do veículo o óleo é movimentado do interior do veículo para uma membrana flexível instalada no exterior do mesmo. À medida que a membrana se expande, aumenta o volume total do veículo provocando uma flutuabilidade positiva. Para diminuir a flutuabilidade, o óleo é transferido novamente para o tanque rígido, diminuindo o volume da membrana. Em todo este processo, a massa total do veículo permanece inalterada, apenas existe variação de volume. Vários são os autores [25], [26] que utilizam este tipo de sistemas nos seus projetos de veículos submersíveis. Repetibilidade e fiabilidade são os principais benefícios deste sistema, porém destacam-se também pela eliminação do risco de entupimento ou outro tipo de contaminações provocados pela água ou sedimentos. Este sistemas são frequentemente utilizados para veículos que não exigem grandes variações de flutuabilidade (<20 litros), uma vez que o sistema cresce à medida que aumenta a variação de flutuabilidade. As dimensões do sistema são proporcionais face ao volume variado. Este tipo de sistemas são frequentemente utilizados em veículos *glider* para pequeno volume de variação [27].

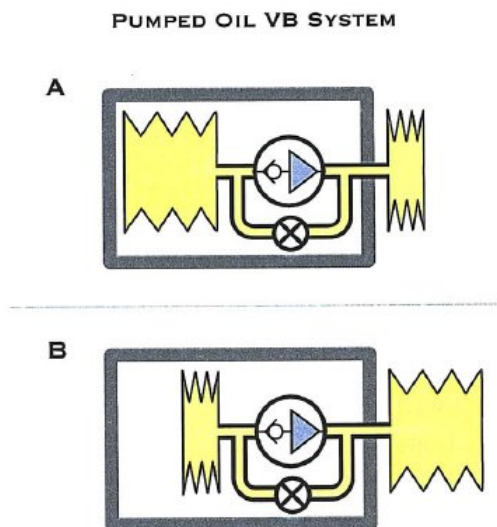


Figura 2.4: Sistema de membrana extensível usando óleo [28].

- **Sistema variação de lastro pneumático**

Os autores em [29], [30], [31] abordam um sistema de variação de lastro, que recorre a um mecanismo de ar comprimido (Figura 2.5). Neste caso o sistema recorre à injeção de ar comprimido para o tanque de lastro para aumentar a flutuabilidade do sistema. No caso em que seja requerido diminuir a flutuabilidade é libertado o ar armazenado dentro do tanque de lastro. Tipicamente estes sistemas recorrem a ar comprimido que é previamente armazenado no sistema.

A operação dos mesmos é restringida quer pela quantidade de ar comprimido armazenada, sendo que o controlo deverá ser primoroso, de forma a não desperdiçar o ar armazenado; quer pela pressão de ar comprimido disponível no sistema de armazenamento, visto que este deve de ser superior à pressão exterior, de forma a ser possível a evacuação de ar dos reservatórios de lastro. Estas desvantagens tornam estes sistemas limitados em termos de transições de flutuabilidade e inviáveis para missões de longo prazo. Porém o recurso a estes sistemas permite rápidas variações de flutuabilidade e também ser utilizado em complementariedade noutros mecanismos de variação de flutuabilidade com o objetivo de aumentar a eficiência energética e mecânica [32], [28]. Estes mecanismo tem como base sistemas similares utilizados em submarinos tripulados.

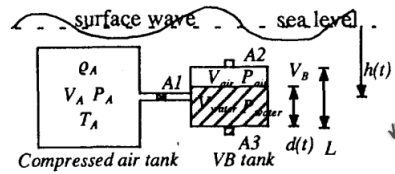
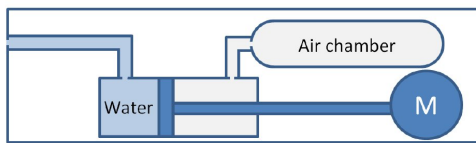


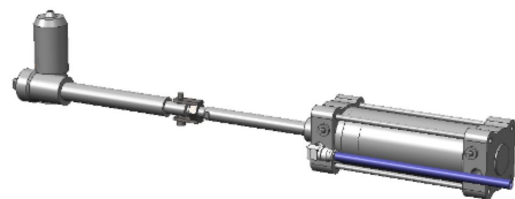
Figura 2.5: Sistema usando ar comprimido [29].

• Sistema de variação de flutuabilidade mecânico/pistão

Um outro mecanismo usado para fazer a variação de flutuabilidade, recorre à atuação de um veio que por sua vez desloca um êmbolo de forma a introduzir e retirar água para uma câmara, fazendo com que altere o volume global do veículo e consequentemente a sua flutuabilidade [32] (Figura 2.6). A vantagem deste tipo de mecanismo consiste na redução do risco de formações de bolhas de ar que é propício nas bombas hidráulicas. Uma característica deste mecanismos é que é frequentemente utilizado para pequenas variações (entre um e três litros) pois, o tamanho do sistema cresce proporcionalmente com a variação de flutuabilidade o que poderá ser eventualmente uma limitação. Este mecanismo tanto pode ser usado para variações de flutuabilidade através do volume ou de peso. O autor [33], utiliza este princípio de funcionamento, mas aplicado a uma esfera, em que altera a flutuabilidade através do peso. No caso do autor [34], utiliza este mecanismo mas com recurso a um fole metálico flexível, realizando assim a alteração de flutuabilidade através do volume. Para aumentar a eficiência deste mecanismo o autor [32] usa ar comprimido de forma a auxiliar o movimento do pistão na ejeção da água. Esta implementação pode reduzir assim o custo energético em 45%.



(a) Sistema ar comprimido e pistão.



(b) Sistema de pistão.

Figura 2.6: Exemplos de sistemas com pistão. [32]

- Sistema de variação de lastro hidráulico

Estes sistemas de variação de lastro são dos mecanismos mais comuns na literatura atual devido à flexibilidade de controlo e também pelo facto de conceder uma ampla gama de parâmetros relevantes para uma série de veículos [35]. Frequentemente estes sistemas operam com recurso à variação da quantidade de água armazenada no tanque de lastro através de um sistema de bombeamento hidráulico. A alteração de flutuabilidade é obtida através da variação da quantidade de água armazenada dentro do tanque. O volume total do veículo permanece inalterado, alterando apenas a massa do mesmo.

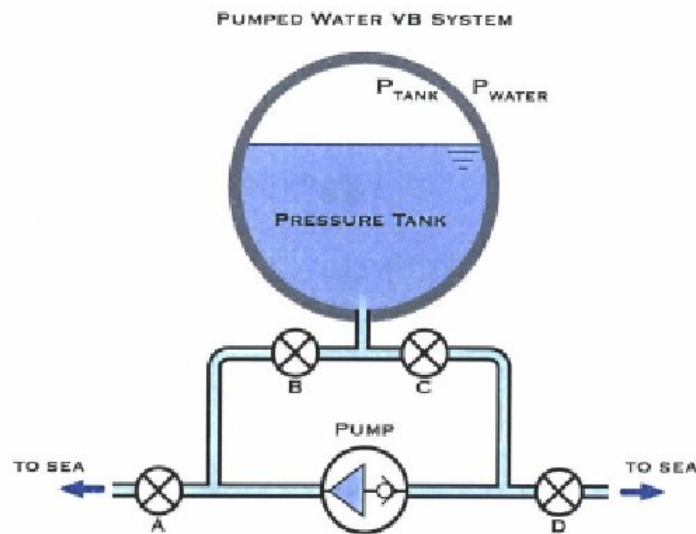


Figura 2.7: Sistemas de variação usando água do mar [28].

Comparando este sistema, ao sistema tradicional de movimentação de óleo as seguintes vantagens são consideradas [36]:

- Inexistência de contaminação por fuga uma vez que, o fluído é a própria água do mar;
- Menor peso, porque não existe necessidade de manter sempre o líquido dentro do reservatório;
- Maior capacidade de flutuabilidade;

- Escabilidade dado que a mesma bomba pode ser utilizada com diferentes reservatórios de diferentes dimensões.

Devido a estes sistemas proporcionarem grande variação de flutuabilidade (>50 litros), são frequentemente utilizados em veículos de grandes dimensões, sejam eles tripulados ou não, [21], [37]. Tal como se pode verificar em [38], observa-se que existe uma constante investigação neste tipo de mecanismos, de forma a encontrar novas soluções, para permitir levar veículos subaquáticos a elevadas profundidades.

- **Phase Change Material**

Estes sistemas diferenciam-se dos demais mencionados, devido à intenção de aproveitar a energia da diferença térmica entre a profundidade do oceano e a sua superfície. A forma de captar essa energia é na utilização de materiais mudança de fase (*PCM - Phase Change Materials*). Estes materiais têm como principal característica o armazenamento e libertação de energia térmica durante o processo de fusão e solidificação. Ao descer na coluna de água, a temperatura da água envolvente diminui e com isso o PCM liberta calor e transita da sua fase líquida para a sólida. No sentido inverso, a temperatura da água aumenta, o que faz com que o PCM absorva calor, regresse à fase líquida e na mudança de fase dilate a mesma proporção em que havia encolhido. É a partir desta variação volumétrica do PCM que se produz a energia necessária à mudança de flutuabilidade do veículo [39]. Um dos protótipos desenvolvidos que usam este sistema de variação de flutuabilidade é o SLOCUM THERMAL [40]. Contudo os autores deste protótipo evidenciam ainda algumas dificuldades tanto na eficiência do processo como também no controlo de estabilidade do veículo. A principal limitação deste tipo de sistemas incide no volume de variação que é relativamente pequeno.

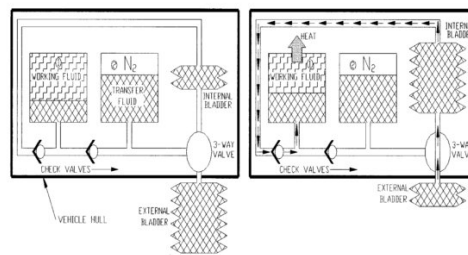


Figura 2.8: Sistema térmico [40].

Capítulo 3

Modelização de veículos submarinos

Pretende-se neste capítulo abordar os conceitos de modelação de veículos subaquáticos com seis graus de liberdade.

3.1 Referenciais

A caracterização de referencial refere-se a um sistema de coordenadas, em que é possível representar grandezas físicas, como posições, velocidades, acelerações entre outras. Estas grandezas físicas são provenientes de diversos sensores que fornecem dados em diferentes referenciais e que posteriormente são sujeitos a transformações de coordenadas para um único referencial. Entre os vários sistemas referenciais usados na robótica marinha destacam-se os seguintes:

- Referencial Inercial

Um referencial inercial pode ser definido como sendo uma referência para o qual se cumpre o movimento linear. A origem do sistema de coordenadas inercial (x^i, y^i, z^i) , é arbitrária e os eixos de coordenadas podem apontar em qualquer das três direções perpendiculares. O centro de gravidade da Terra é a origem deste referencial, o eixo x^i aponta na direção do ponto vernal (determinado pela posição do sol), o eixo z^i paralelo ao eixo de rotação da Terra, quanto ao eixo y^i este está definido pela regra da mão-direita (ver Figura 3.1).

- Referencial ECEF

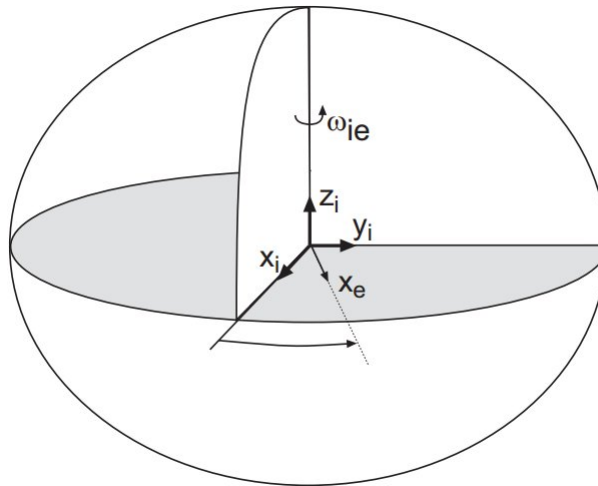


Figura 3.1: Referencial Inercial [41].

O referencial terrestre convencional é um sistema de coordenadas cartesianas (x^e, y^e, z^e) do tipo ECEF, acrônimo de *earth-centered earth-fixed*. A sua origem é no centro de massa da Terra, o eixo x^e passa pelo cruzamento entre a linha do equador e o meridiano de *Greenwich*, o eixo z^e paralelo ao eixo de rotação da Terra e por fim o eixo y^e definido assim como o anterior (inercial) pela regra da mão-direita do sistema de coordenadas ortogonais.

- Referencial Local

Um referencial local (x^l, y^l, z^l) , também designado por LTP (*Local Tangent Plan*), consiste numa superfície plana tangencial num ponto na Terra onde decorre a navegação. Os referenciais locais mais utilizados são NED (*North-East-Down*) e ENU (*East-North-Up*). O referencial NED é mais utilizado para veículos aéreos e subaquáticos e ENU para veículos terrestres. No caso do NED, o eixo x^l aponta para Norte, o eixo y^l para Este e z^l para o centro da Terra. No caso do ENU, x^l aponta para Este, y^l para Norte e z^l para cima. A origem destes dois referenciais (NED e ENU) pode ser estabelecida em qualquer ponto do globo. Na Figura 3.2 pode-se visualizar o referencial NED em relação ao ECEF.

- Referencial do Corpo

O referencial do corpo, contém normalmente os seus eixos (x^b, y^b, z^b) coincidentes com o do veículo, sendo este o referencial base para todos os sensores inerciais. Geralmente x^b aponta para a frente do veículo, y^b para a direita e z^b para baixo.

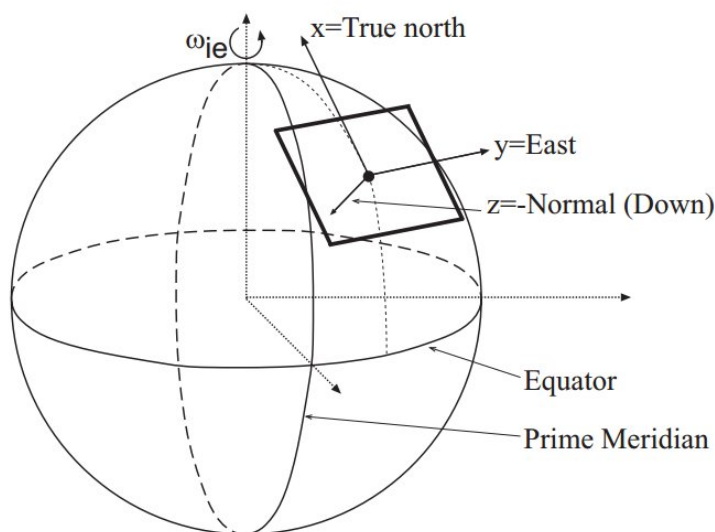


Figura 3.2: Referencial NED em relação ao referencial ECEF [41].

A orientação pode ser expressa em ângulos de *Euler* em que a rotação em torno de x^l é designado por *roll*, em torno de y^b , *pitch* em torno de z^b , *yaw*. Relativamente ao movimento, nos veículos aquáticos, *surge* representa o movimento longitudinal, *sway* o transversal e *heave* o movimento vertical.

3.1.1 Sistemas de coordenadas

Na representação da dinâmica de veículos submarinos é comum usar dois sistemas de referenciais distintos: um referencial inercial e o referencial do corpo. O sistema de coordenadas do corpo, também chamado sistema de coordenadas móvel é constituído por $\{X_o, Y_o, Z_o\}$. A origem deste sistema de coordenadas, usualmente é escolhida mediante o centro de gravidade do veículo. Poderá ser escolhido qualquer outro ponto, contudo é aconselhado que seja no seu plano de simetria. Para veículos aquáticos as suas acelerações num ponto da Terra podem ser desprezados, uma vez que o movimento da Terra não afeta veículos com baixa velocidade. Desta forma o referencial $\{X, Y, Z\}$, é assumido como referencial inercial, uma vez que se trata de um ponto fixo na Terra. Na Figura 3.3, pode ser visualizado o sistema de coordenadas usados em veículos subaquáticos. A posição e orientação de veículos submarinos é expressa relativamente ao referencial inercial, enquanto que as velocidades lineares e angulares são relativas ao referencial do corpo.

- Sistema inercial (fixo à Terra):
 - O: Origem do sistema de coordenadas inercial;
 - X: Eixo longitudinal absoluto;
 - Y: Eixo transversal absoluto;
 - Z: Eixo vertical absoluto.

- Sistema do corpo, móvel (fixo ao corpo)
 - Oo: Origem do sistema de coordenadas móvel;
 - X: Eixo longitudinal, positivo à frente do veículo;
 - Y: Eixo transversal, positivo à direita do veículo;
 - Z: Eixo vertical, positivo para baixo do veículo.

Como mencionado anteriormente dois sistemas de referenciais (corpo e inercial) são usados para relacionar as grandezas físicas associadas ao veículo, e com isso caracterizar o seu movimento. Estas grandezas correspondem aos seis graus de liberdade do veículo e que estão descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Notação dos seis graus de liberdade

DOF		Forças e Momentos	Velocidades linear e angular	Posição e ângulos Euler
1	trans. na direção x (<i>surge</i>)	X	u	x
2	trans. na direção y (<i>sway</i>)	Y	v	y
3	trans. na direção z (<i>heave</i>)	Z	w	z
4	rot. em torno de x (<i>roll</i>)	K	p	ϕ
5	rot. em torno de y (<i>pitch</i>)	M	q	θ
6	rot. em torno de z (<i>yaw</i>)	N	r	ψ

Baseado na nomenclatura *SNAME(1950)*, o movimento de um veículo subaquático é descrito pelos seguintes vetores:

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T; \eta_1 = [x, y, z]^T; \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \quad (3.1)$$

$$\nu = [\nu_1^T, \nu_2^T]^T; \nu_1 = [u, v, w]^T; \nu_2 = [p, q, r]^T \quad (3.2)$$

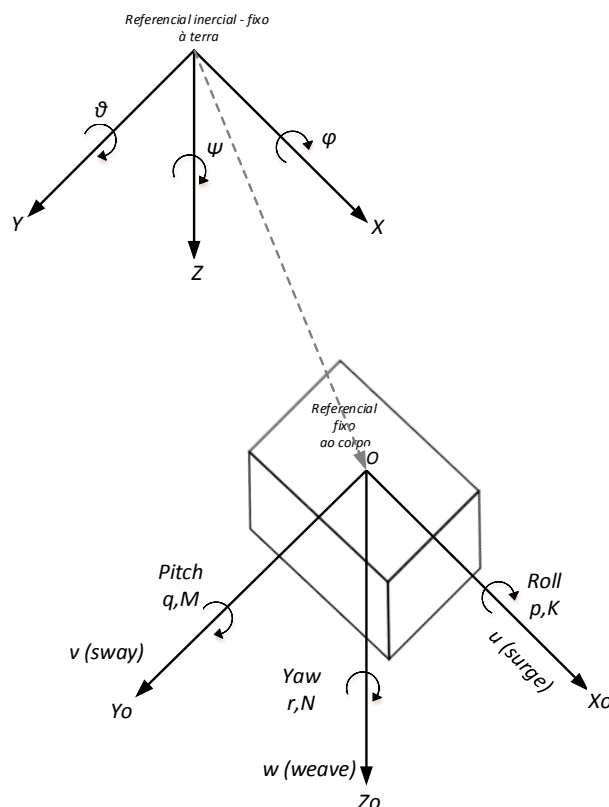


Figura 3.3: Referencial inercial *earth frame* e do corpo *body frame*.

$$\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T]^T; \tau_1 = [X, Y, Z]^T; \tau_2 = [K, M, N]^T \quad (3.3)$$

Sendo que η_1 representa a posição e η_2 a orientação do veículo relativamente ao referencial inercial. ν_1 e ν_2 , são velocidades lineares e angular, respetivamente, no referencial do corpo. τ_1 representa o vetor de forças assim como τ_2 representa os vetor de momentos exercidos sobre o corpo.

3.1.2 Ângulos *Euler*

Existe várias formas de representar a orientação (η_2) do veículo, seja através do ângulos Euler ou de quaterniões. Nesta dissertação são utilizados os ângulos de Euler uma vez que o problema da singularidade para valores de *pitch* e *roll* não se levanta para o

veículo TURTLE, sendo esta representação mais intuitiva de que alternativas como os quaterniões. Como visto anteriormente a orientação é descrita em três ângulos, um por cada eixo de um plano cartesiano (x,y,z) , sendo denominado por *roll* (ϕ), *pitch* (θ), *yaw* (ψ), respetivamente. Embora a interpretação física dos ângulos de Euler seja direta, esta representação apresenta singularidades para $\theta = \pm 90^\circ$, sendo passível das seguintes restrições:

$$-90^\circ < \theta < +90^\circ \quad (3.4)$$

e

$$-180^\circ < \psi, \phi < +180^\circ \quad (3.5)$$

No entanto, na maioria dos casos práticos de operações com veículos submarinos, a região próxima dos valores que apresentam singularidades é improvável de ser atingida. Uma das formas de ultrapassar esta restrição é recorrer ao método de quaterniões ou parâmetros de Rodriguez cujo custo computacional é mais reduzido mas torna a percepção da orientação do veículo menos intuitiva [42].

A trajetória do veículo em relação ao sistema de coordenadas inercial é obtida pela transformação da velocidade, juntamente com os ângulos de Euler (η_2) do veículo.

Esta transformação é expressa por:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (3.6)$$

Inversamente a velocidade é obtida por:

$$v_1 = J_1^{-1}(\eta_2)\dot{\eta}_1 \quad (3.7)$$

As matrizes que correspondem aos respetivos ângulos de Euler são definidas por:

A rotação em torno do eixo X (ϕ) é expressa matematicamente através da seguinte matriz:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Em torno do eixo Y (θ):

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Em torno do eixo Z (ψ):

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Transformação da velocidade linear

Dado que as velocidades de translação ($\nu_1 = [u, v, w]^T$) são dados no referencial móvel (fixo ao veículo), estas devem de ser referenciadas em relação ao sistema de coordenadas global (sistema fixo). Na expressão 3.6, $J_1(\eta_2)$ representa a matriz de transformação obtida pela sequencia da rotação dos ângulos de Euler.

$$J_1(\eta_2) = J_1(\phi, \theta, \psi) = R_z^T, \psi R_y^T, \theta R_x^T, \phi \quad (3.11)$$

Substituindo as matrizes 3.10, 3.9, 3.8, em 3.11, obtém-se a matriz de transformação entre referenciais (móvel e fixo):

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dado que as matrizes de transformação são obtidas por operações que envolvem produto das matrizes de rotação, sendo esta uma operação não comutativa, a sequência escolhida para as rotações influenciam o resultado final.

Uma das propriedades da matriz de transformação $J_1(\eta_2)$, é o facto de ser ortogonal, logo:

$$J_1^{-1}(\eta_2) = J_1^T(\eta_2) = R_x, \phi R_y, \theta R_z, \psi \quad (3.13)$$

Transformação da velocidade angular

Assim como as velocidades de translação, as velocidades angulares ($\nu_2 = [p, q, r]^T$) também são referidas ao sistema móvel.

A transformação da velocidade angular ($\dot{\eta}_2$) e (ν_2), entre os dois sistemas de coordenadas é obtida de acordo com:

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)\nu_2 \quad (3.14)$$

A orientação do sistema referencial do corpo com respeito ao sistema inercial é dado por:

$$\nu_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rx, \phi \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + Rx, \phi Ry, \theta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Reescrevendo a expressão anterior (3.15) sob a forma $\nu_2 = J_2^{-1} \dot{\eta}_2$, obtêm-se:

$$J_2^{-1}(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Note-se $J_2^{-1} \neq J_2^T$. A matriz de transformação dos vetores angulares é dada por:

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)/\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

De uma forma generalizada, para veículos com seis graus de liberdade pode-se escrever a transformações abordadas anteriormente da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_3 \\ 0_3 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\eta} = J(\eta_2)\nu \quad (3.18)$$

3.2 Dinâmica de um corpo rígido

A caracterização da dinâmica consiste em obter um modelo de movimento atendendo a forças e momentos a que um corpo rígido está sujeito. É admitido um corpo rígido como constituído por um número finito de partículas. A dinâmica de um corpo rígido pode ser obtida aplicando a segunda lei de Newton, que relaciona a aceleração de um corpo rígido com as forças que nele atuam. Isto é, um corpo em repouso tende a movimentar-se apenas se uma força lhe for aplicada. No caso contrário, um corpo em movimento atingirá o estado de repouso apenas se uma força no sentido contrário ao seu movimento lhe for aplicada. A segunda lei de Newton é descrita da seguinte forma:

$$m\ddot{\eta}_1 = \tau \quad (3.19)$$

Na equação 3.19, m representa a massa total do corpo, $\ddot{\eta}_1$ a aceleração resultante

da atuação de todos os esforços externos τ . A Figura 3.4 representa o movimento geral de um corpo rígido (translação e rotação) relativo ao sistema de coordenadas inercial (X, Y, Z) , apresentando-se também o sistema de coordenadas móvel (X_o, Y_o, Z_o) , associado ao corpo.

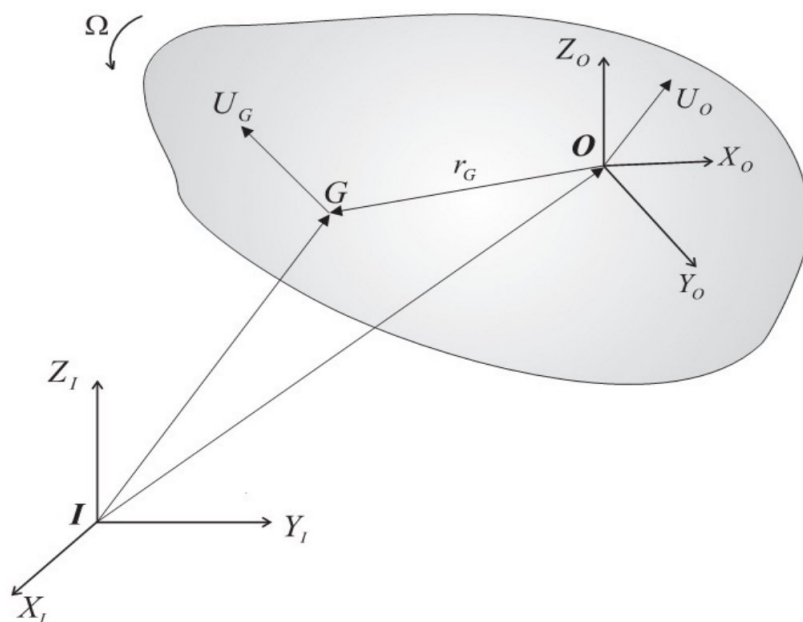


Figura 3.4: Representação do sistema de coordenadas inercial e móvel de um corpo rígido [43].

Pelo facto do veículo submarino possuir dimensões não negligenciáveis, a sua massa não está concentrada em um único ponto mas sim distribuída pela sua estrutura, desta forma deve ser considerado um corpo rígido. A representação da dinâmica para um corpo rígido possui termos adicionais em relação à dinâmica do ponto material que estão relacionados com o movimento de rotação do corpo em torno dos seus eixos. Estes termos adicionais correspondem à força centrípeta e à força de Coriolis. Para fins de controlo é conveniente escrever as equações da dinâmica do movimento do corpo rígido segundo uma parametrização no sistema de coordenadas móvel, visto a ação dos agentes externos e a inércia do veículo serem constantes em relação a este referencial.

3.2.1 Movimento de translação

Baseado na literatura [43], a equação do movimento de translação é dada da seguinte expressão:

$$m(\dot{v}_B + \omega_B * v_B + \dot{\omega}_B * r_{CM} + \omega_B * (\omega * r_{CC})) = \sum f_{ext} \quad (3.20)$$

em que:

- $v_B \equiv \dot{\eta}_1$ é a velocidade da origem do referencial fixo ao corpo em relação ao referencial inercial;
- $\dot{v}_B \equiv \dot{v}_1$ é a derivada em ordem ao tempo da velocidade no referencial fixo ao corpo;
- $\omega_B \equiv v_2$ é a velocidade angular segundo cada eixo do referencial fixo ao corpo;
- $r_{CG} \equiv (X_{CG}, Y_{CG}, Z_{CG})^T$ é a posição do centro de gravidade do corpo;
- $\sum f_{ext} \equiv (\sum X_{ext}, \sum Y_{ext}, \sum Z_{ext})^T$ é a soma das forças externas que atuam no corpo.

3.2.2 Movimento de rotação

Relativamente ao momento angular este é dado pela seguinte expressão:

$$m_r G * v_o + m_{rG} * (\omega_B * v_B) + I_B \dot{\omega}_B + \omega_B * (I_B \omega_B) = \sum m_{ext} \quad (3.21)$$

em que: $\sum m_{ext} = (\sum K_{ext}, \sum M_{ext}, \sum N_{ext})^T$ é a soma dos momentos exercidos no corpo e $I_B \in \mathbb{R}^{3*3}$ o tensor de inércia dado por:

$$I_B = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

I_x, I_y, I_z são momentos de inércia em torno de X_o, Y_o, Z_o e $I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx}, I_{yz} =$

I_{zy} são produtos de inercia definidos como:

$$\begin{aligned}
 I_{xx} &= \int_v (y^2 + z^2) \rho_B dV; \\
 I_{yy} &= \int_v (x^2 + z^2) \rho_B dV; \\
 I_{zz} &= \int_v (x^2 + y^2) \rho_B dV; \\
 I_{xy} &= \int_v xy \rho_B dV; \\
 I_{xz} &= \int_v xz \rho_B dV; \\
 I_{yz} &= \int_v yz \rho_B dV;
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

com ρ_B densidade da massa do corpo e V o seu volume.

As equações 3.20 e 3.21 relativas a um corpo rígido de seis graus de liberdade podem ser reescritas de acordo com a notação de (SNAME 1950):

- $\sum f_{ext} = \tau_1 = [X, Y, Z]^T$ forças externas;
- $\sum m_{ext} = \tau_2 = [K, M, N]^T$ momentos externos;
- $v_0 = \nu_1 = [u, v, w]^T$ velocidade linear;
- $\omega = \nu_2 = [p, q, r]^T$ velocidade angular;
- $r_G = [X_G, Y_G, Z_G]^T$ centro de gravidade;

Decompondo as forças segundo os eixos cartesianos do referencial do corpo, obtém-se as seguintes equações relativamente ao movimento de translação :

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - X_{CG}(q^2 + r^2) + Y_{CG}(pq - \dot{r}) + Z_{CG}(pr + \dot{q})] &= X; \\
 m[\dot{v} - wp + ur - Y_{CG}(r^2 + p^2) + Z_{CG}(qr - \dot{p}) + X_{CG}(qp + \dot{r})] &= Y; \\
 m[\dot{w} - uq + vp - Z_{CG}(p^2 + q^2) + X_{CG}(rp - \dot{q}) + Y_{CG}(rq + \dot{p})] &= Z;
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Relativamente aos momentos sobre o corpo em cada eixo de rotação no seu referencial, o movimento de rotação é dado pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}
& I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
& \quad + m[Y_G(\dot{w} - uq + vp) - Z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K; \\
& I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
& \quad + m[Z_G(\dot{u} - vr + wq) - X_G(\dot{w} - uq + vp)] = M; \\
& I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\
& \quad + m[X_G(\dot{v} - wp + ur) - Y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N;
\end{aligned} \tag{3.25}$$

3.2.3 Representação matricial das equações do movimento

O conjunto das equações 3.25 e 3.26 são parametrizadas e expostas matricialmente de forma a facilitar a modelação de veículos com vários graus de liberdade. Desta forma as equações referidas anteriormente podem-se escrever na seguinte forma matricial:

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = \tau_{RB} \tag{3.26}$$

Onde:

- M_{RB} : representa a matriz de inércia do corpo rígido;
- $C_{RB}(\nu)$: representa a matriz que agrupa os termos de força de Coriolis e centrípeta do corpo rígido;
- $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$: representa o vetor de velocidades lineares e angulares do veículo no sistema de coordenadas móvel;
- $\tau_{RB} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$: corresponde ao vetor de forças e momentos resultantes no veículo;

A matriz M_{RB} é definida como:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{21} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m_{ZG} & -m_{YG} \\ 0 & m & 0 & -m_{ZG} & 0 & m_{XG} \\ 0 & 0 & m & m_{YG} & -m_{XG} & 0 \\ 0 & -m_{ZG} & m_{YG} & I_x & -I_{xy} & -I_{zx} \\ m_{ZG} & 0 & -m_{XG} & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -m_{YG} & m_{XG} & 0 & -I_{zx} & -I_{xy} & I_z \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

A matriz $C_{RB}(v)$ é definida por:

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p + v) \\ 0 & 0 & 0 & m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ 0 & 0 & 0 & m(x_G r - v) & m(y_G r - u) & -m(x_G q + y_G q) \\ m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) & -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) & 0 & -I_{yzq} - I_{xzp} + I_{zr} & I_{yzr} + I_{xyp} - I_{yq} \\ I_{yzq} + I_{xzp} - I_{zr} & 0 & -I_{x zr} - I_{xyq} + I_{xp} & -I_{yzr} - I_{xyp} + I_{yq} & I_{x zr} + I_{xyq} - I_{xp} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

A matriz M_{RB} (3.27) corresponde à matriz de inércia, contendo a massa m , momentos e produtos de inércia. A matriz C_{RB} (3.28) é denominada matriz centrípeta e de Coriolis, contendo os termos das forças centrípeta e de Coriolis. A matriz (C_{RB}) , ao contrário da matriz de inércia, pode ser parametrizada de várias formas (Fossen, 1994):

$$M_{RB} = M_{RB}^T > 0_{6 \times 6}, \quad (3.29)$$

$$\dot{M}_{RB} = 0 \quad (3.30)$$

e

$$C_{RB}(v) = -C_{RB}^T(v), \forall v \in \mathbb{R}^6 \quad (3.31)$$

È importante salientar que em veículos que possuem partes internas móveis a condição \dot{M}_{RB} não é verdadeira. Veículo constituído por braços robóticos, movimentando peças são exemplos típicos. Nestes casos, podem ocorrer variações dos parâmetros das matrizes do modelo do corpo rígido M_{RB} e C_{RB} .

3.3 Forças e momentos hidrostáticos e hidrodinâmicos

As forças e momentos de origem hidrostática e hidrodinâmica [44] podem ser divididas em:

- Forças geradas pela massa adicional, associadas à inercia do fluido;
- Forças geradas pelo amortecimento hidrodinâmico, devidas à viscosidade do fluido;
- Forças de restabelecimento (peso e impulsão).

Somando estes três efeitos, obtém-se a expressão que representa a força hidrodinâmica resultante que atua no veículo:

$$\tau_H = M_{A\dot{\nu}} - C_{A(\nu)\nu} - D_{(\nu)\nu} - g(\eta) \quad (3.32)$$

- M_A : representa a matriz de massas e inércias adicionais;
- $C_A(\nu)$: representa a matriz de Coriolis e centrípeta adicional;
- $D_{(\nu)}$: representa a matriz de amortecimento;
- g_η : representa a matriz das forças de restabelecimento;

A equação das forças e momentos do corpo rígido (3.26), é igual à soma da força hidrodinâmica total τ_H (3.32) juntamente com as forças e momentos provenientes do controlo/propulsão (τ), ou seja:

$$\tau_{RB} = \tau_H + \tau = M_{A\dot{\nu}} - C_{A(v)v} - D_{(v)v} - g(\eta) + \tau \quad (3.33)$$

3.3.1 Modelos dinâmicos estudados

Na literatura tal como abordado nas secções anteriores, pode-se encontrar uma abordagem matricial para o modelo dinâmico de AUVs, baseando-se na parametrização das variáveis associadas com os coeficientes hidrodinâmicos de amortecimento, coeficientes de massa adicional e coeficientes de Coriolis e produto de massas adicionais. Nos modelos dinâmicos estudados mostra-se as forças externas associadas à dinâmica de um veículo submarino. Estas podem ser divididos em força associada à variação da pressão no casco do veículo (relacionado com os coeficientes de massa adicional), forças de arrasto, forças de peso e flutuação e forças externas relacionadas com sistema de propulsão ou forças ambientais. Este tipo de forças serão abordados posteriormente.

Seguidamente será apresentado um dos modelos amplamente utilizados na modelação de veículos submarinos apresentado por [43].

Nesta modelação, a dinâmica do veículo subaquático é dada por:

$$M_{RB\dot{\nu}} + C_{RB(\nu)\nu} = -M_{A\dot{\nu}} - C_{A(\nu)\nu} - D_{(\nu)\nu} - g(\eta) + \tau_{Prop} \quad (3.34)$$

Na equação 3.34, são apresentadas cada uma das forças mencionadas anteriormente, além disso deve-se clarificar que o vetor velocidade do veículo (ν) deve de ser medido em relação à velocidade do fluido a que esse está inserido. Quando um corpo se encontra em estado de submersão, este está sujeito a forças de pressão induzidas devido ao deslocamento do corpo no fluido. Estas forças são proporcionais à aceleração e podem

ser interpretados como massa adicional. A massa adicional, afeta a dinâmica do corpo rígido, logo é possível definir as matrizes M como a soma da matriz de inércia M_{RB} e a matriz de massa adicionada M_A da seguinte forma:

$$M = M_{RB} + M_A \quad (3.35)$$

Da mesma forma acontece com a matriz que contém os termos associados às forças de Coriolis e centrífuga:

$$C_{(\nu)} = C_{RB(\nu)} + C_{A(\nu)} \quad (3.36)$$

Com esta nova definição é possível estabelecer a seguinte expressão:

$$M\dot{\nu} + C_{(\nu)\nu} + D_{(\nu)\nu} + g(\eta) = \tau_{Prop} \quad (3.37)$$

Observa-se que na equação 3.37, os termos $C_{(\nu)\nu}$ associados às forças de Coriolis e centrífugas, e as forças de arrasto $D_{(\nu)\nu}$, são funções da velocidade relativa ao veículo, isto estabelece o comportamento destes termos como não linear.

3.3.2 Massa e inércia adicionada

Quando um corpo permanece mergulhado num fluido, este leva em consideração o efeito que o fluido exerce sobre o corpo quando este se encontra em movimento. Assim quando o veículo se movimenta está sujeito a pressões que são proporcionais à aceleração. Estas forças são consideradas como inerciais e são denominadas forças de massa adicional/acrescentada e atuam na superfície do corpo em contacto com o fluido.

A matriz de massa acrescentada é dada por:

$$M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Na equação 3.38, os elementos da primeira coluna representam as massas e inércias adicionais que atuam no veículo quando este acelera com magnitude $|\dot{u}|$ na direção do eixo X_0 . Especificamente, $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{u}}, Z_{\dot{u}}$ são respetivamente as massas adicionadas nos eixos X_0, Y_0, Z_0 do veículo e $K_{\dot{u}}, M_{\dot{u}}, N_{\dot{u}}$, são respetivamente as inércias adicionadas ao redor

dos eixos X, Y, Z do veículo [45].

Por outro lado, com a adição das forças associadas à massa acrescentada, deve-se incluir o efeito que a variação da massa gera nas forças de Coriolis e centrífugas. Na representação da modelação dinâmica apresentada por [43], a matriz de coriolis e centrípeta é representada da seguinte forma:

$$C_{A(\nu)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a3 & a2 \\ 0 & 0 & 0 & a3 & 0 & -a1 \\ 0 & 0 & 0 & -a2 & a1 & 0 \\ 0 & -a3 & a2 & 0 & -b3 & b2 \\ a3 & 0 & -a1 & b3 & 0 & -b1 \\ -a2 & a1 & 0 & -b2 & b1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

onde,

$$\begin{aligned} a1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a2 &= Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a3 &= Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b1 &= K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b2 &= M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b3 &= N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \end{aligned} \quad (3.40)$$

O cálculo teórico dos coeficientes de massa adicionada é uma tarefa complicada, uma vez que estes valores são calculados a partir do formato do veículo para cada um dos planos de movimento. Logo, para cálculos destes coeficientes, na maioria dos casos recorre-se a vários testes elaborados em tanques próprios para o efeito.

3.3.3 Amortecimento hidrodinâmico

O amortecimento hidrodinâmico pode ser originado devido a factores tais como a energia contida na ondulação criada pelo veículo (D_P), à fricção das moléculas de água com o corpo, chamado amortecimento linear (D_S), ao arrasto da ondulação (D_W) e por fim ao amortecimento quadrático (D_M) que se refere aos vórtices criados pelo movimento relativo do fluído na superfície do corpo. O amortecimento hidrodinâmico total que atua sobre um veículo subaquático pode ser expresso como a soma destes componentes: $D(\nu) = D_P + D_S + D_W + D_M$, sendo: D_P - energia contida na ondulação criada pelo veículo; D_S - atrito na superfície do corpo; D_W - arrasto da ondulação e D_M as perdas

provocadas pelos vórtices.

Contudo o amortecimento hidrodinâmico pode ser simplificado nos seguintes modos:

- Quando o veículo encontra-se deslocando com baixa velocidade;
- O veículo possui três planos de simetria;
- Os termos que relacionam os efeitos hidrodinâmicos acima da segunda ordem são desprezáveis, ou seja, o amortecimento hidrodinâmico é devido ao atrito viscoso superficial (D_S) e aos efeitos dos vórtices (D_M).

$$D_S = \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

e,

$$D_M = \begin{bmatrix} X_{u|u} & X_{v|v} & X_{w|w} & X_{p|p} & X_{q|q} & X_{r|r} \\ Y_{u|u} & Y_{v|v} & Y_{w|w} & Y_{p|p} & Y_{q|q} & Y_{r|r} \\ Z_{u|u} & Z_{v|v} & Z_{w|w} & Z_{p|p} & Z_{q|q} & Z_{r|r} \\ K_{u|u} & K_{v|v} & K_{w|w} & K_{p|p} & K_{q|q} & K_{r|r} \\ M_{u|u} & M_{v|v} & M_{w|w} & M_{p|p} & M_{q|q} & M_{r|r} \\ N_{u|u} & N_{v|v} & N_{w|w} & N_{p|p} & N_{q|q} & N_{r|r} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Cada elemento que compõe as matrizes de amortecimento linear e quadrático pode ser interpretado de maneira análoga às massas acrescentadas. Ou seja, cada elemento na matriz representa uma força que atua em num determinado eixo para deslocamentos no mesmo ou em outro eixo. Exemplificando, $Y_u u$ representa a força de amortecimento no eixo Y_0 , devido a uma velocidade u no eixo X_0 .

Em virtude da simplificação do amortecimento hidrodinâmico mencionado anteriormente, a matriz de amortecimento hidrodinâmico só possui componentes da diagonal principal, dessa forma as matrizes 3.41 e 3.42, podem ser reescritas da seguinte forma:

$$D(\nu) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

3.3.4 Forças e momentos de restabelecimento

Em hidrodinâmica as força da gravidade assim como de flutuação são denominadas forças de restabelecimento. A força causada pela gravidade F_G e a força de flutuação F_B , são produzidas pelo $W = mg$ e $B = \rho gV$, respetivamente. A densidade da água é representada por ρ , V o volume deslocado pelo corpo e g é a aceleração da gravidade. A força F_G é descrita por um vetor paralelo ao eixo vertical do sistema (z), que atua no centro de gravidade $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ e a força de flutuação é um vetor paralelo ao mesmo eixo que atua no centro de flutuação do corpo $r_B = [x_B, y_B, z_B]^T$.

Devido às forças F_G e F_B , estarem referenciadas com respeito ao sistema de coordenadas inercial (fixo), estas devem de ser transformadas relativamente ao sistema de referência do veículo (móvel) para ser adicionadas ao modelo dinâmico.

Para realizar o processo de transformação entre os sistemas de referência, é preciso multiplicar a resultante das forças F_G e F_B em formato vetorial, pela inversa da matriz de transformação de coordenadas $J_1(\eta_2)$, ou seja:

$$F_G(\eta_2) = J_1^{-1}(\eta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$F_B(\eta_2) = -J_1^{-1}(\eta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Devido a centro de gravidade r_G e o centro de flutuação r_B , não coincidirem, o efeito da força de restabelecimento resultante, introduz forças e momentos, ao longo e em torno dos eixos referenciados do veículo no sentido de alinhar tais centros ao eixo z [46].

Baseado nas equações 3.44 e 3.45 a matriz das forças de restabelecimento é dada da seguinte forma:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin(\theta) \\ -(B - W) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -(B - W) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(y_G W - y_B B) \cos(\theta) \cos(\phi) + (z_G W - z_B B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ (z_G W - z_B B) \sin(\theta) + (x_G W - x_B B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(x_G W - x_B B) \cos(\theta) \sin(\psi) - (y_G W - y_B B) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

3.3.5 Equação do movimento

Como verificado nos sub-capítulos anteriores a equação geral para a dinâmica de um veículo subaquático é dada pela seguinte expressão:

$$M\dot{\nu} + C_{(\nu)\nu} + D_{(\nu)\nu} + g(\eta) = \tau_{Prop} \quad (3.47)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad (3.48)$$

onde a matrizes de massa do corpo rígido M_{RB} e de massa acrescentada M_A são somadas em uma única matriz de inércia:

$$M = M_{RB} + M_A \quad (3.49)$$

O mesmo acontece com as matrizes de Coriolis e centrípeta:

$$C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu) \quad (3.50)$$

Relativamente à matriz de amortecimento hidrodinâmico $D_{(\nu)\nu}$ esta também é somada através da matriz D_S e D_M :

$$D(\nu) = D_S + D_M \quad (3.51)$$

A matriz g_η , corresponde às forças de restabelecimento mostrada anteriormente na equação 3.46.

Como se pode verificar a representação da equação 3.47, está expressada com relação ao sistema referencial do veículo. A representação correspondente no sistema inercial (fixo), é dada por:

$$M_{(\eta)}(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(\nu, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(\nu, \eta)\dot{\eta} + g_{(\eta)}(\eta) = \tau_\eta \quad (3.52)$$

onde,

$$M_{(\eta)}(\eta) = J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta) \quad (3.53)$$

$$C_{\eta}(\nu, \eta) = J^{-T}(\eta)[C(\nu) - MJ^{-1}(\eta)\dot{J}(\eta)]J^{-1}(\eta) \quad (3.54)$$

$$D_{\eta}(\nu, \eta) = J^{-T}(\eta)D(\nu)J^{-1}(\eta) \quad (3.55)$$

$$g_{(\eta)}(\eta) = J^{-T}(\eta)g(\eta) \quad (3.56)$$

$$\tau_{\eta}(\eta) = J^{-T}(\eta)\tau \quad (3.57)$$

$$(3.58)$$

O vetor τ incorpora as diversas forças externas que atuam no veículo:

$$\tau = \tau_{prop} + \tau_c \quad (3.59)$$

onde τ_{prop} e τ_c representam forças relativas aos sistemas de propulsão e correntes marítimas, respetivamente, assim como podem existir outras tais como força gerada pela caba umbilical.

3.3.6 Modelo do *Thruster*

O vetor τ_{prop} é constituído pelas forças e momentos gerados pelos *thrusters* do veículo, pelo que resulta não só da força gerada mas também da configuração dos mesmos. A força de propulsão gerada por um *thruster* é dada pela seguinte equação:

$$T = \rho D^4 (\alpha_1 + \alpha_2 \frac{V_d}{nD}) n |n| \quad (3.60)$$

em que ρ é a densidade do fluido, D diâmetro da hélice, n taxa de rotação da hélice e V_a representa a velocidade da água que entra na hélice. $(\alpha_1 + \alpha_2 \frac{V_d}{nD})$, representa o 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 ($\alpha_2 < 0$) [47].

3.3.7 Flutuabilidade

Como mencionado no capítulo 2, o físico Arquimedes estabeleceu o princípio da flutuabilidade, afirmando que: "Um corpo mergulhado, total ou parcial num fluido, sofre por parte deste, uma força ascendente, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo" [20]. Todos os objetos submersos estão sujeitos a uma força ascendente, daí qualquer objeto pesar menos na água do que no ar (Figura 3.5).

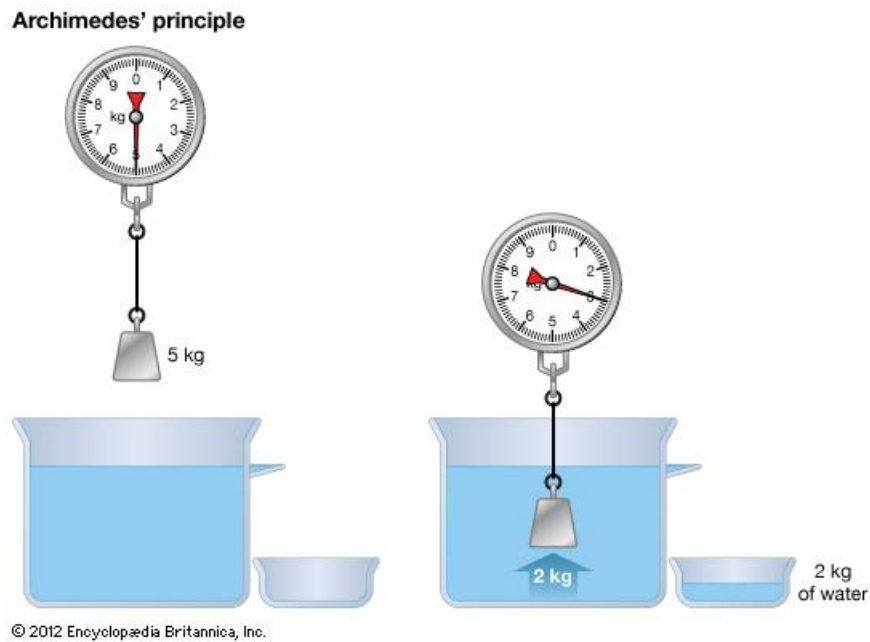


Figura 3.5: Demonstração do princípio de Arquimedes [48].

$$W = m * g \quad (3.61)$$

$$B = V * \rho * g \quad (3.62)$$

A capacidade de um determinado objeto flutuar ou afundar depende da magnitude do seu peso em relação à sua força de flutuabilidade. Se a força de flutuação (B) for maior que o peso (W) o corpo irá flutuar, se a força de flutuação for menor que o peso, o corpo irá afundar, caso estas duas forças sejam iguais o corpo permanecerá neutro. Este efeito está ilustrado na Figura 3.6.

Estabilidade

A estabilidade de um corpo é afetada essencialmente pela posição do centro de massa, mas também pelo centro de flutuabilidade. Caso estes dois pontos não estejam alinhados verticalmente, existirá instabilidade devido à criação de um momento não nulo (Figura 3.7).

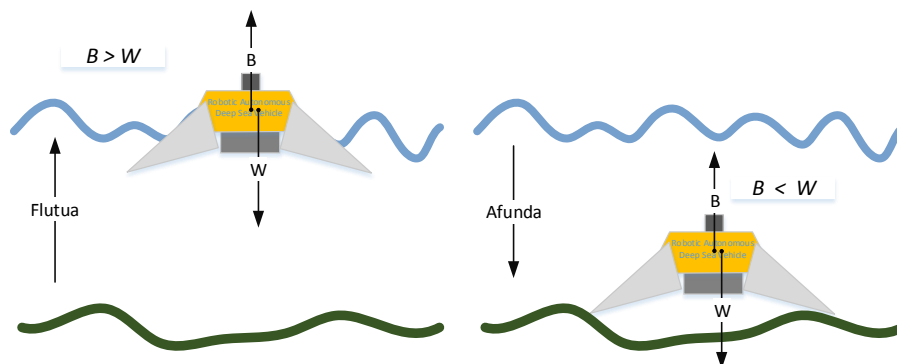


Figura 3.6: Efeitos da densidade de um corpo em contacto com a água.

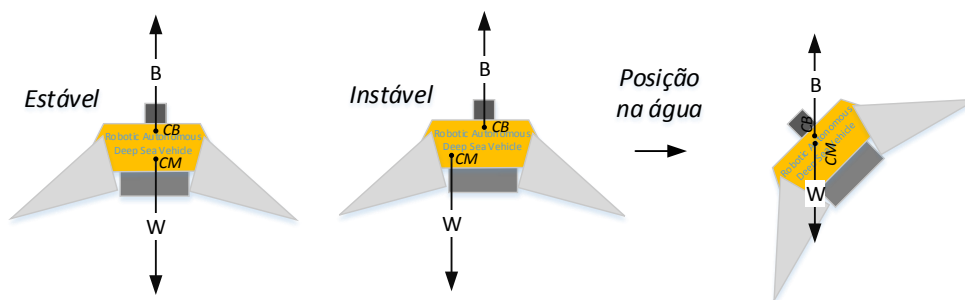


Figura 3.7: Estabilidade de um corpo em contacto com a água.

Se o centro de massa coincidir com o centro de flutuabilidade o veículo irá ser suscetível a perturbações. Idealmente, os dois centroides deverão ser alinhados verticalmente entre si, com o centro de massa abaixo do centro de flutuabilidade, resultando numa configuração básica de estabilidade. A instabilidade do veículo em *roll* e *pitch* é diretamente proporcional à distancia perpendicular entre o centro de massa e flutuabilidade do veículo.

Capítulo 4

Robô submarino TURTLE

O TURTLE é um veículo submarino autónomo para operação no mar profundo. Este resulta de um consórcio entre a empresa metalúrgica A. Silva Matos ⁶ juntamente com a instituição de investigação INESCTEC ⁷ e a Marinha Portuguesa ⁸. As condições extremas da pressão hidrostática, de temperatura e dos ambientes naturais não controláveis são adversidades impostas pelas grandes profundidades. Estes foram os principais motivos que levaram ao desenvolvimento deste projeto inovador, sem precedentes em território português, realizado apenas com mão de obra nacional e resultando num veículo dotado para operar em águas profundas até 1000 metros.

No âmbito deste projeto foram previstos dois objetivos fundamentais [2]:

- Desenvolver tecnologias e estruturas capazes de suportar altas pressões hidrostáticas (> 100 *bar*), para aplicação em águas profundas.
- Desenvolver um veículo autónomo multi-funcional com elevada eficiência do seu movimento aquando da deslocação na coluna de água.

A combinação dos dois pontos anteriores permitiram desenvolver um veículo com inúmeras capacidades e que abrange diversos cenários, tais como:

- O robô TURTLE tem a capacidade de atuar como uma estação de observação (sismografia, temperatura, salinidade, estudos de poluição/biológicos) e instrumentação no fundo do oceano por longos períodos de tempo (meses).
- Tem a possibilidade de se reposicionar autonomamente, seja no fundo do oceano na coluna de água ou até mesmo na superfície.

⁶<http://www.asilvamatos.pt/?lang=en>

⁷<https://www.inesctec.pt/>

⁸<http://www.marinha.pt/pt-pt/Paginas/default.aspx>

- Movimentação na coluna de água de uma forma energeticamente eficiente recorrendo ao sistema de variação de lastro (bombeamento da água através de uma bomba hidráulica) como principal meio de movimentação vertical.
- Movimentação nos quatro graus de liberdade (*surge*, *sawy*, *heave* e *yaw*) com o auxílio de propulsores.⁹
- Poderá, igualmente, ser uma mais valia na vertente militar / segurança, através de monitorização do tráfego marítimo para controlo de tráfico de bens materiais ou humanos.
- Tem também como objetivo permitir atuar como meio de transporte eficiente de cargas até 200Kg para o fundo do oceano (e.g prospecção de petróleo/ minério).
- Versátil na integração de outros sensores ou unidade sensorial para estudos científicos sem necessidade de grande intervenção.
- Por fim tem como característica relevante a possibilidade da avaliação do fundo oceânico reconhecendo o melhor local para aterrar com segurança.

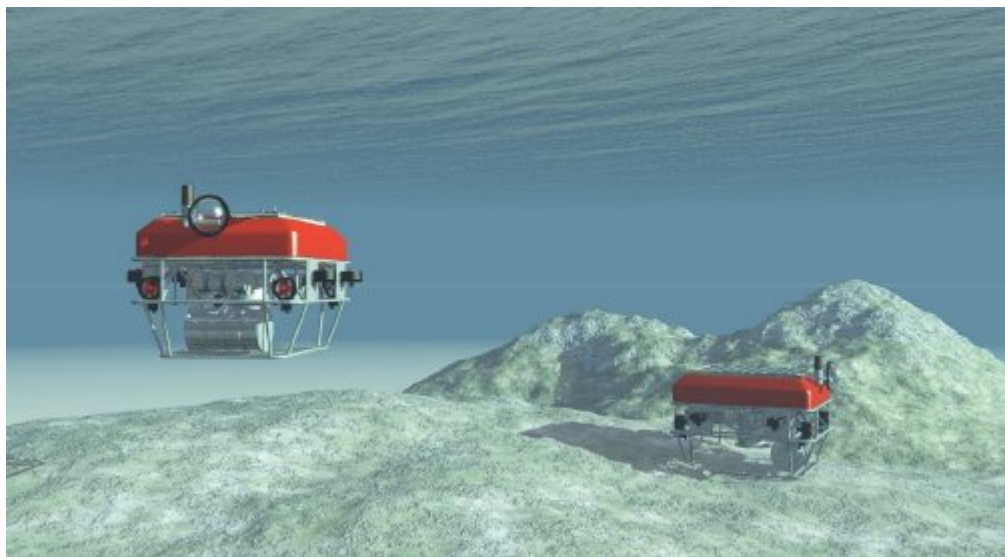


Figura 4.1: Desmonstrador do TURTLE.

⁹Neste documento é mencionado diversas vezes propulsores que se refere aos *thrusters*.

4.1 Arquitetura

De forma a criar um veículo robusto e eficaz, optou-se por desenvolver sistemas que fossem independentes da principal unidade de processamento. Isto permite uma arquitetura descentralizada, reduz o processamento de informação da unidade principal (CPU) e acima de tudo possibilita alguns sistemas manterem-se ativos caso haja alguma anomalia noutros. Na Figura 4.2, estão descritos os componentes básicos para manter o TURTLE em funcionamento.

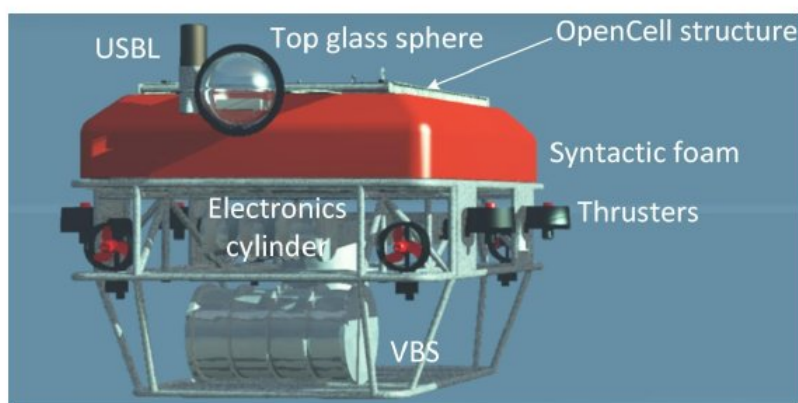


Figura 4.2: Componentes do TURTLE.

A Tabela seguinte (4.1) menciona as principais características deste veículo.

Tabela 4.1: Principais características físicas do TURTLE.

Parâmetros	Valor	Unidades
Peso	1400	<i>kg</i>
Carga	200	<i>kg</i>
Profundidade máx	1000	<i>m</i>
Tipo de células	LifePo4	-
Potência Máxima	8	KW
Tipo de VBS	Var. de lastro	-
Fluxo VBS	6.5	<i>lpm</i>
Velocidade Nominal	(0.5 - 1)	<i>m/s</i>
Capacidade Depósito VBS	45	<i>l</i>

Na Figura 4.3, é possível visualizar o diagrama com os vários sistemas do TURTLE.

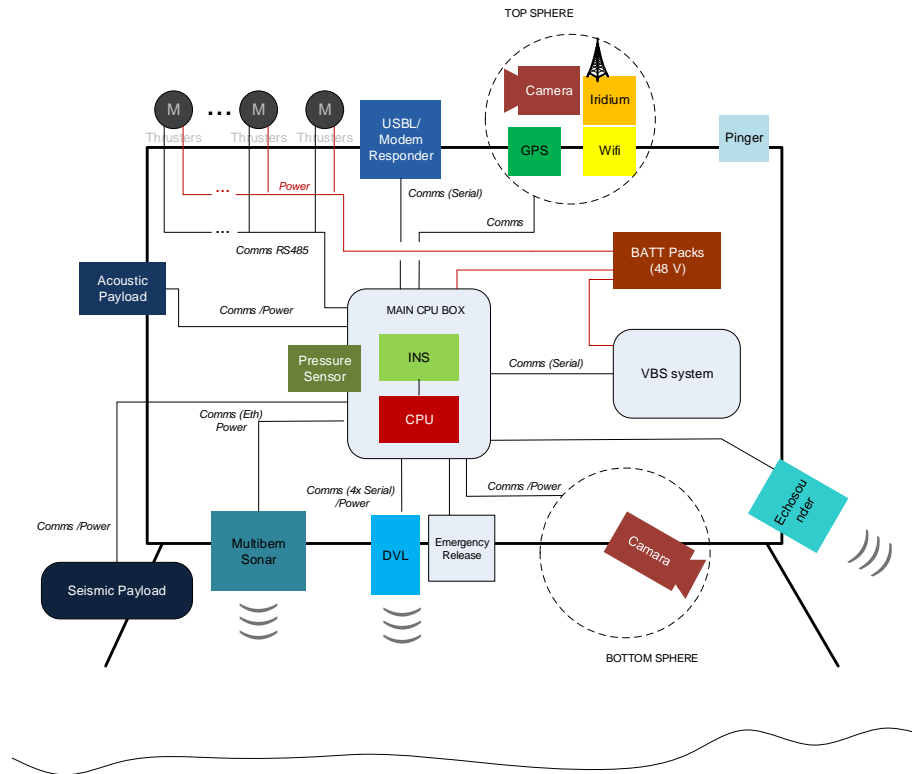


Figura 4.3: Diagrama com os vários sistemas do TURTLE.

4.2 Estrutura

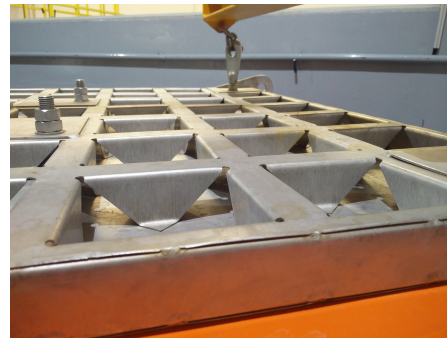
Uma característica fundamental da estrutura deste veículo, é o material maioritariamente responsável pela flutuabilidade do veículo (Figura 4.4a). Optou-se por utilizar uma espuma que suporta profundidades de até 2000 metros e com densidade de 445 kg/m^3 .

O estudo e a exploração de materiais usados em aplicações aeronáuticas, permitiu desenvolver novas estruturas metálicas mais leves e resistentes, sendo uma grande vantagem para veículos autónomos de grandes profundidades. Este estudo resultou no desenvolvimento de estruturas baseadas na tecnologia *OpenCell*¹⁰™ [49], a qual faz parte da estrutura do TURTLE (Figura 4.4b).

¹⁰A tecnologia *OpenCell* consiste na formação de estruturas do tipo *sandwich* por forma a melhorar as propriedades de compressão, tração, torção ou flexão do material.



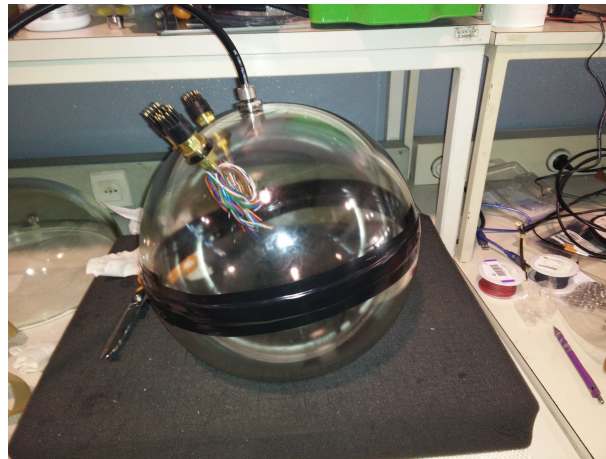
(a) Espuma.

(b) Estrutura *OpenCell*™.Figura 4.4: Conjunto da espuma e *OpenCell*™.

A integração deste bloco de flutuabilidade com a estrutura *OpenCell*™ em forma de *sandwich*, possibilitou um aumento da rigidez estrutural. Foram desenvolvidas outras estruturas em aço inoxidável (cilindro VBS, CPU, JB) para armazenar e proteger os vários sistemas eletrônicos da água e da pressão (ver Figura 4.4 e 4.5). A esfera foi posteriormente adquirida, tendo capacidade de suportar profundidades de 11000 metros (Figura 4.6).



(a) Cilindro CPU.



(b) Esfera.

Figura 4.5: Exemplo de algumas estruturas sujeitas à pressão.



(a) Estrutura de proteção dos *thrusters*.

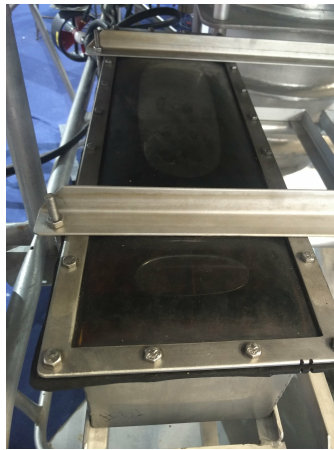


(b) Estrutura geral.

Figura 4.6: Estrutura do TURTLE.

4.3 Armazenamento de energia

O sistema de potência do veículo contém até 4 módulos de baterias com 2Kw cada, permitindo otimizar a quantidade de energia entre missões efetuadas. Cada módulo é composto por 64 células $LiFePO_4$ de 10 Ah, 16 conjuntos de serie, compostos por 4 células em paralelo, resultando numa tensão nominal de 48 V e 40 Ah. Ao contrário de algumas estruturas explicadas anteriormente, o compartimento das baterias utiliza óleo sintético como forma de efetuar compensação de pressão entre o interior e o exterior do compartimento através de uma membrana flexível capaz de contrair e expandir para fazer diferença a alterações volumétricas do interior do compartimento, causadas maioritariamente pela temperatura e pressão. Assim evita-se o desenvolvimento de compartimentos com grandes capacidades de suportar pressões elevadas e assim reduzir o seu peso e tamanho. Cada bateria é conectada ao cilindro JB (*Junction Box*), onde contém dispositivos de proteção e conversores de tensão para que, posteriormente, seja realizada a sua distribuição pelos diversos sistemas (sensores, *thrusters*, VBS, etc).

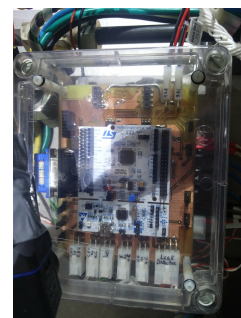
Figura 4.7: *Housing* das baterias.

4.4 Sistema de variação de lastro

A grande eficiência do TURTLE no seu movimento vertical, deve-se essencialmente ao sistema de variação de lastro. Como explicado no capítulo 2, este sistema tem como principal objetivo a variação de flutuabilidade do veículo para o movimento vertical, permanecer neutro, ou mesmo servir de auxílio na ancoragem quando permanecido no fundo do oceano. O sistema de variação de lastro, apesar do seu princípio de funcionamento simples, pode complicar-se mediante a exigência de alguns requisitos de operação (*e.g.* pressão, taxa de variação de flutuabilidade, autonomia, entre outros). Na Figura 4.8b, podem ser visualizados algumas fotos que ilustram o VBS do TURTLE.



(a) Circuito do VBS.



(b) Placa de controle do VBS.

Figura 4.8: VBS - Sistema de variação de lastro.

O VBS do TURTLE é composto essencialmente por três componentes principais:

- Bomba

A exigência de uma bomba sujeita a pressões superiores a 100 *bar*, de pequenas dimensões e cujo o fluido é água do mar, limita a janela de procura, uma vez que estes requisitos não se encontram nos mais variados sistemas de bombeamento. Após um grande estudo do mercado optou-se por adquirir a bomba *Hydra-Cell*, modelo *D/G-04-X* (Figura 4.9a). Esta trata-se de uma bomba adequada para a água salgada, movimenta o fluido apenas num sentido, permite uma taxa de fluxo máximo até 11.0 litros e uma pressão máxima à saída de 170 *bar*.

- Motor

Para acionamento da bomba foi usado um motor *brushless* - *HPM3000B* (ver Figura 4.9b), 3Kw, 48V, sendo este bastante compacto e com eficiência a rondar os 90%. O controlador *Roboteq 1660*, foi utilizado para controlo do motor, atuação nas válvulas e monitorização de outros dados (tensão, corrente, temperatura, etc) que sejam relevantes para o funcionamento do sistema.

- Esquema reversão de fluxo

Como mencionado anteriormente, a bomba utilizada é de sentido único, ou seja movimenta o liquido apenas numa direção. Uma vez que é necessário introduzir e retirar água do depósito, houve a necessidade de criar uma solução (gênero de uma ponte H) recorrendo a eletroválvulas, para assim inverter o sentido do fluxo da água. Foram usadas eletroválvulas da marca *parker* (Figura 4.9c), do tipo duas vias (ou seja duas conexões) sentidos e duas posições e alimentadas a 24V-24W.

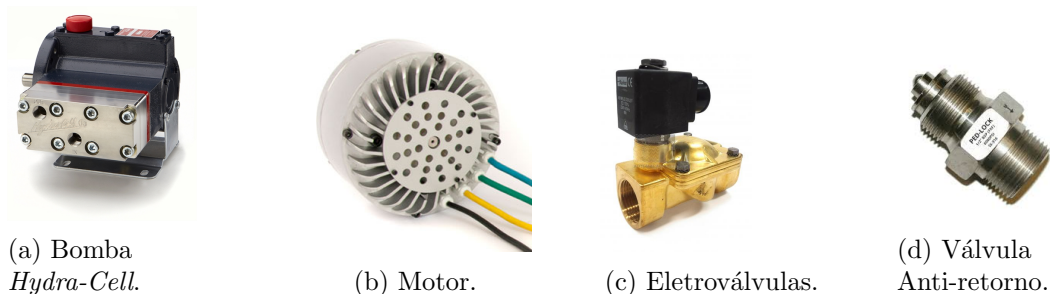


Figura 4.9: Principais componentes do VBS.

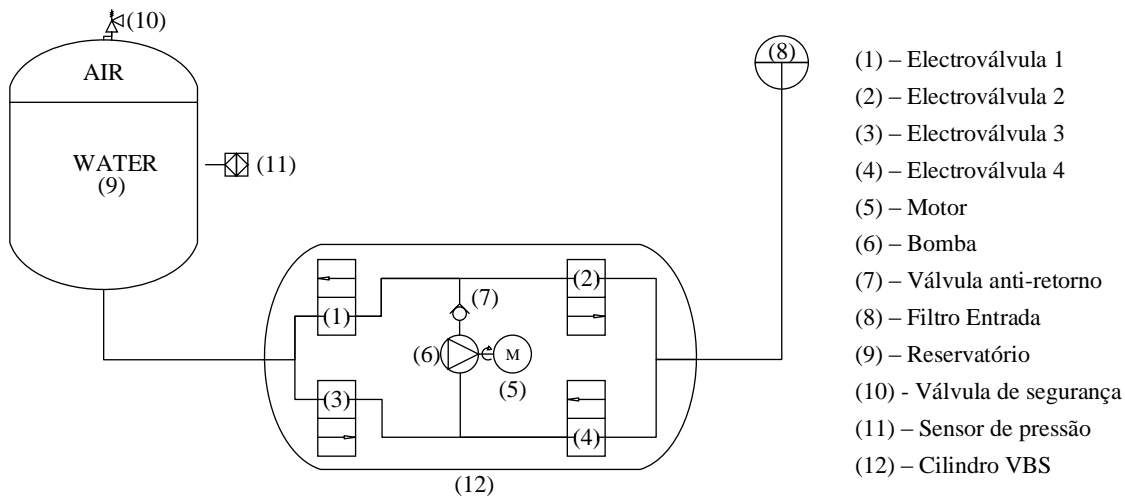


Figura 4.10: Circuito VBS.

Na Figura 4.10, está representado um esquema do circuito do VBS.

O processo de variação de lastro resume-se essencialmente a introduzir e retirar água do reservatório e com isso variar a fluatuabilidade do veículo através da variação do peso global do veículo. Como mencionado anteriormente, como a bomba funciona apenas num sentido é necessário a combinação de um conjunto de eletroválvulas que consoante o seu estado (abertas ou fechadas) permite conduzir o fluxo da água pelo caminho desejado. Apesar deste VBS possuir 4 eletroválvulas, não é possível um controlo independente de cada uma. Ou seja, existe dois conjuntos de eletroválvulas que são atuados em simultâneo. O conjunto composto pela eletroválvula 4 e 1, controla a entrada de água. O conjunto que controla a saída de água é feito pela eletroválvula 3 e 2.

Posto isto será explicado o processo de entrada e saída de água:

- Introduzir água

Para introduzir água no reservatório as eletroválvulas 4 e 1 são abertas e a 3 e 2 fechadas, posteriormente a bomba inicia o seu movimento e a água após entrar no filtro (8), realiza o fluxo mostrado na Figura 4.11. Como as eletroválvulas apenas bloqueiam o fluxo num sentido, a água também acaba por passar através da eletroválvula 2.

- Retirar água

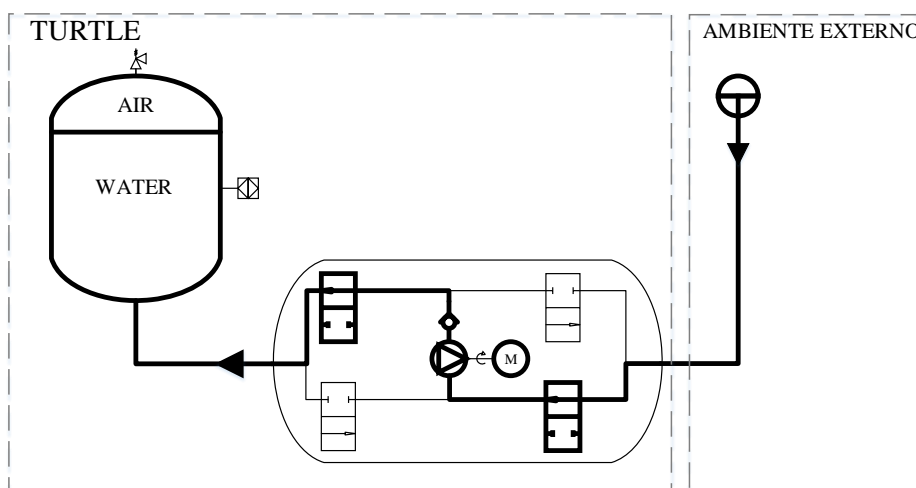


Figura 4.11: Esquema para entrada de água.

Para retirar a água, o processo inverte-se, ou seja, as eletroválvulas 3 e 2 são abertas e a 4 e 1 fechadas, a bomba inicia o seu movimento e expulsa a água como se pode verificar na Figura 4.12. Se a pressão do interior do reservatório for maior que a pressão exterior, parte da água também irá sair pela eletroválvula 1, devido ao bloqueio do fluxo apenas num sentido.

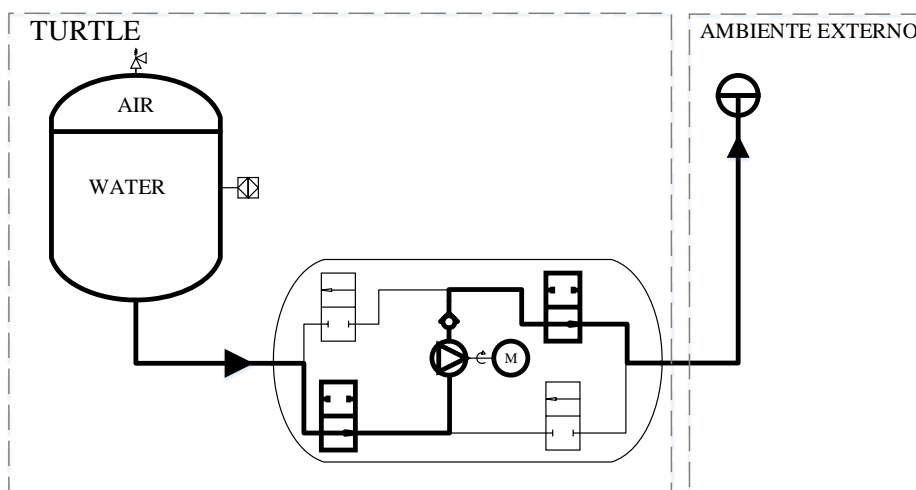


Figura 4.12: Esquema para saída de água.

Para obter um melhor controle, mas também por limitações físicas dos equipamentos, é importante conhecer a pressão e a quantidade de água existente no reservatório. Deste modo o reservatório contém o sensor de pressão no seu interior. Relativamente à quantidade de água existente dentro no reservatório, a medida é obtida através do sensor de pressão baseado na lei de *Boyle*. Esta lei mencionada na equação 4.1, enuncia que a pressão absoluta e o volume de uma certa quantidade de gás no interior de um reservatório fechado são inversamente proporcionais se a temperatura permanecer constante. Por uma questão também de segurança, foi instalado uma válvula de segurança no topo do reservatório que abrirá, quando a pressão no interior do reservatório exceder os 14 *bar*.

$$p1 * v1 = p2 * v2 \Leftrightarrow v2 = (p1 * v1)/p2 \quad (4.1)$$

4.5 Sistema de Propulsão - Thrusters

O veículo TURTLE possui um total de 8 *thrusters*, *SI-MCT01*, dos quais 4 são usados para movimento horizontal, e 4 para o movimento vertical. A escolha destes *thrusters*, deveu-se essencialmente à sua razão potência/*thrust* (Figura 4.14), a sua alimentação estar dentro das características pretendidas ($< 48V$) e possuir comunicação diferencial RS-485, imune a ambientes sujeitos ao ruído. O movimento vertical do TURTLE é maioritariamente efetuado pelo sistema de variação de lastro, contudo os *thrusters* verticais são usados de forma a auxiliar em manobras que requerem um movimento mais preciso. No capítulo 5, será descrito toda a justificação da importância que tem em consideração o posicionamento e orientação dos *thrusters*, para suportar todos os graus de liberdade necessários (*surge*, *sway*, *heave* e *yaw*) de uma forma eficiente. Uma vez que os *thrusters* verticais apenas têm a função de criar propulsão em *heave*, foram todos colocados paralelamente ao eixo *z*, de forma a criar apenas um vetor de força nessa direção (ver Figura 4.13b). Relativamente ao sistema de propulsão horizontal, o objetivo é permitir o movimento em três graus de liberdade (*surge*, *sway* e *yaw*). Para isso os *thrusters* foram colocados com uma orientação de 45° relativamente ao eixo *x*. Perante [50], esta configuração torna-se a mais eficiente para abranger os três graus de liberdade mencionados anteriormente, sendo desta forma possível criar *thrust* com a mesma intensidade em *surge* e *sway*, permitindo movimento omnidirecional no plano *xy*. Contudo o TURTLE, possibilita um ajuste manual na configuração dos *thrusters* horizontais, de forma a conseguir melhor eficiência em diferentes tipos de missões.



(a) *Thruster* em configuração horizontal.

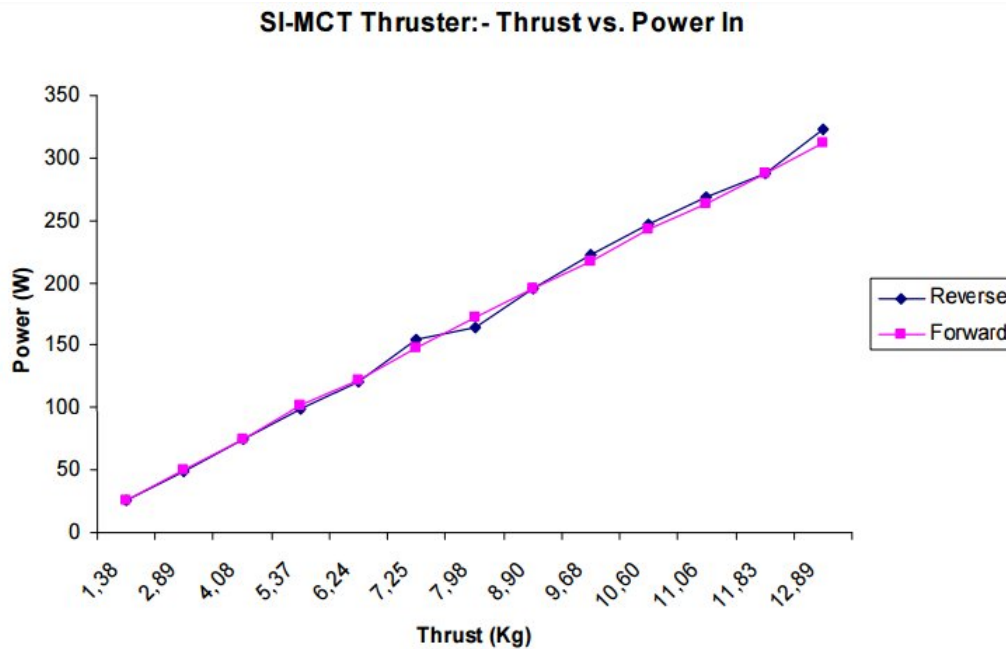


(b) *Thruster* em configuração vertical.

Figura 4.13: Configuração dos *thrusters*.

Tabela 4.2: Especificações técnicas dos *thrusters* [51].

Parâmetros	Valor	Unidades
Tensão Nominal	48	V
Potência	300	W
Força positiva	13	kgf
Força negativa	12.8	kgf
Máx. rotação	980	RPM
Máx. profundidade	1000	m
Interface com.	RS-485	—
Diâmetro Hélice	180	mm

Figura 4.14: Potência vs *thrust* [51]

4.6 Comunicações

Uma vez que o TURTLE possibilita comunicação sem fios quando está submerso, e quando está à superfície, dividiu-se este sistema de comunicação em duas partes:

- Superfície

A principal comunicação efetuada à superfície é através do *WI-FI (802.11)* (4), uma vez que permite elevada largura de banda para comunicações que exijam grande transferência de dados. Outro modo de comunicação é via frequência rádio (5), que tem como principal vantagem comunicação a longas distâncias, mas é restrito a uma largura de banda bastante reduzida. Por esta razão este sistema apenas é usado para envio e receção de pequenos dados de informação, tais como dados de telemetria. O sistema *Iridium* (2), comunicação via satélite, também está incorporado no TURTLE, contudo o objetivo deste sistema é um pouco diferente. A utilização deste sistema maioritariamente é feita em situações de emergência, onde o principal propósito é o envio das coordenadas GNSS (3) da localização do veículo, caso este volte à superfície e nenhum dos sistemas anteriores esteja no raio de alcance.

- Subaquática

Devido à impossibilidade das ondas eletromagnéticas se propagarem na água (<10 metros), a comunicação subaquática é realizada através de *modems* acústicos. Esta comunicação é bastante limitada na sua largura de banda uma vez que apenas permite taxas de transferências de 11Kbps. O conjunto do sistema de comunicação (*transceiver* / *transponder*) usados no TURTLE serão abordados na subsecção seguinte. Para auxílio desta comunicação recorreu-se ao uso de uma boia que faz interface entre comunicação na superfície e subaquática.

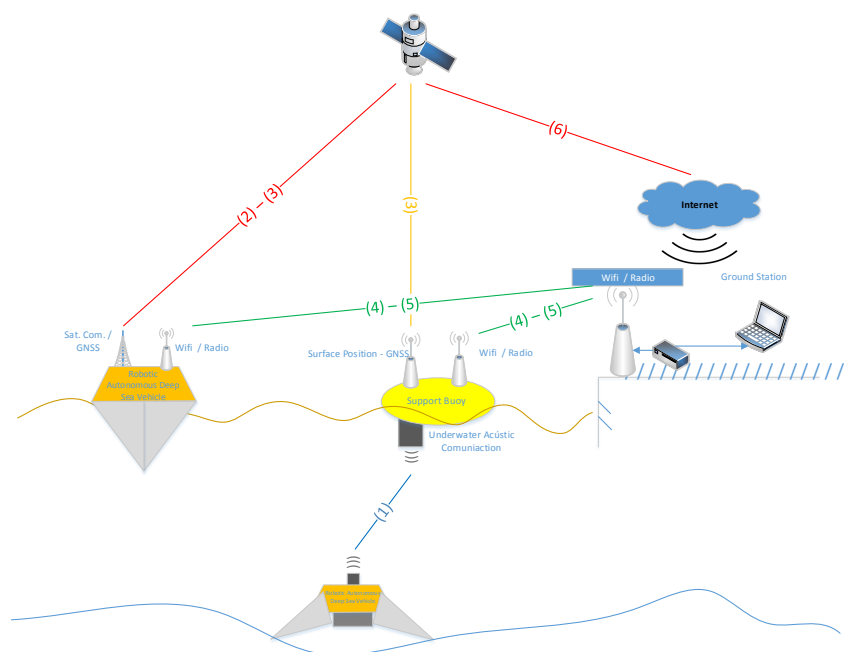


Figura 4.15: Arquitetura de comunicações do TURTLE.

4.7 Controlo e Navegação

Qualquer veículo autónomo para executar determinada missão com sucesso, é inevitável o uso de um sistema de localização e navegação capaz de obter a sua posição com precisão e exatidão e um sistema de controlo para realizar diversas manobras. Uma abordagem simples de obter a posição do veículo seria recorrer ao uso de sensores GNSS, contudo esta técnica apenas é usada à superfície. No que respeita aos veículos subaquáticos,

este sistema é um problema devido à impossibilidade de propagação de ondas eletromagnéticas que compromete a comunicação do sinal GNSS. Por esse motivo o veículo TURTLE está equipado com diversos sensores subaquáticos para navegação. Contudo a incerteza associada às medidas destes mesmos sensores, induzem em erro a localização do veículo. Para colmatar esses erros de localização recorreu-se à implementação de um filtro EKF (*Extended Kalman Filter*) que tem como objetivo estimar os estados de localização do veículo (posição, velocidade e atitude) [52]. O sistema de controlo será explicado com mais detalhe no capítulo 6. Na Figura 4.16 está descrita a arquitetura geral de navegação do TURTLE.

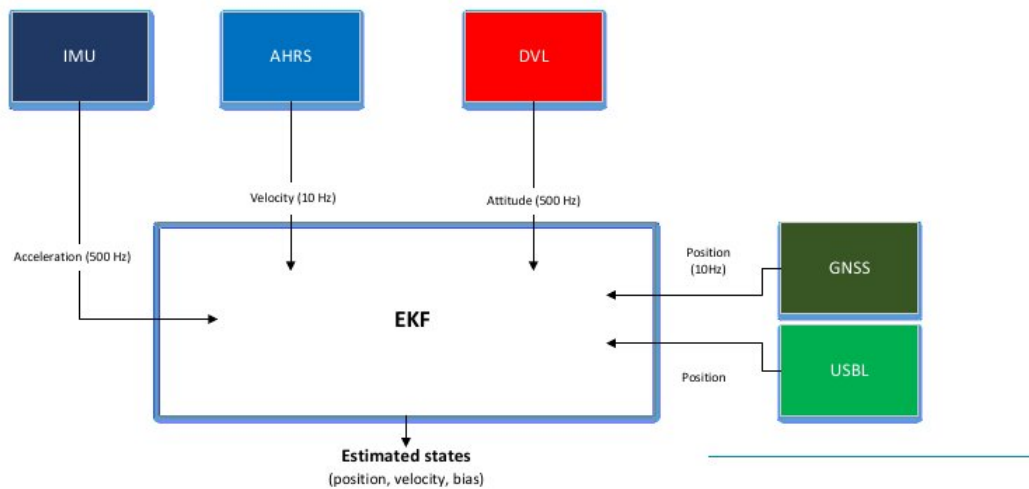


Figura 4.16: Arquitetura geral da navegação [52].

Seguidamente serão mencionados todos os sensores do TURTLE que fazem parte do sistema de localização.

- *Global Navigation Sattelite System* - GNSS

Como o TURTLE, se trata de um veículo subaquático para profundidades a rondar os 1000 metros, o GNSS poderia não ter muita influência na posição de veículo. Contudo para questões de inicialização da localização do veículo, é recorrente o uso do GNSS. Também existem soluções onde os veículos subaquáticos recorrem ao uso de GNSS, se estes operarem em águas pouco profundas e possam voltar à superfície regularmente [53]. No caso do TURTLE, esta situação não acontece com regularidade, contudo é indispensável obter a posição do TURTLE quando este

permanece à superfície. O GNSS usado é o *Trimble BD930* que está incorporado no sensor inercial, o qual será abordado seguidamente.

- *Inertial Measerument Unit - IMU*

O sistema de navegação inercial é normalmente constituído por três acelerómetros, giroscópios e, por vezes, magnetómetros ortogonais. Através da integração deste tipo de sensores é possível obter a posição e a atitude do veículo. O sensor inercial usado no veículo TURTLE é o *Spatial FOG* da empresa *Advanced Navigation*



Figura 4.17: *Spatial Fog Advanced Navigation*

Tabela 4.3: Especificações técnicas do *Spatial Fog*

Performance	Giroscópio	Acelerómetro
<i>Máx. Input Rate</i>	$490 \pm /sec$	10g
ARW	$0.8/h/\sqrt{Hz}$	$120ug/\sqrt{Hz}$
Instabilidade do Bias	0.05/h	50ug
<i>Data Rate</i>	1000Hz	1000Hz

- *Doppler Velocity Log - DVL*

O DVL é um sensor subaquático usado em muitos veículos marinhos que fornece velocidades com grande precisão. Utiliza o efeito de *doppler* para obter as medidas de velocidade, ou seja, através da distorção de frequência entre o sinal emitido e o recebido, obtém-se a velocidade relativo ao objeto referido. Normalmente este sensor utiliza o fundo do oceano para obter a velocidade, porém quando o fundo está fora do local de operação pode utilizar a coluna de água. Na Figura 4.18 está presente o DVL instalado no TURTLE.



Figura 4.18: DVL *Teledyne Explored Phased Array SelfContained*.

Tabela 4.4: Especificações técnicas do DVL 600kHz *Phased Array Explored*¹.

Parâmetros	Valor
<i>Long-term Accuracy</i>	$\pm 0.3\% \pm 0.2\text{cm/s}$
Precisão @ 3m/s^2	$\pm 1.8\text{cm/s}$
Precisão @ 5m/s^2	$\pm 2.6\text{cm/s}$
Frequência	614.4kHz

- *Ultra-Short BaseLine* - USBL

O sistema de posicionamento acústico mais utilizado em veículos autônomos é o USBL, pois é de simples instalação, tamanho reduzido e baixo custo de implementação. O sistema USBL é composto por um *transceiver* e *transponder*, sendo o *transceiver* que calcula a posição relativa do veículo. Este sistema pode ser configurado de diversas formas, contudo a configuração habitual do Turtle é colocar *transponder* no veículo e o *transceiver* à superfície. Apesar da localização ser calculada no *transceiver*, é enviada para o veículo por *modem* acústico (1), que neste conjunto de sensores já está integrado para a comunicação. O Turtle possui um sistema USBL (*transceiver* e *transponder*) da empresa *Evologics*, modelo S2CR 7/17, presente na Figura 4.19.

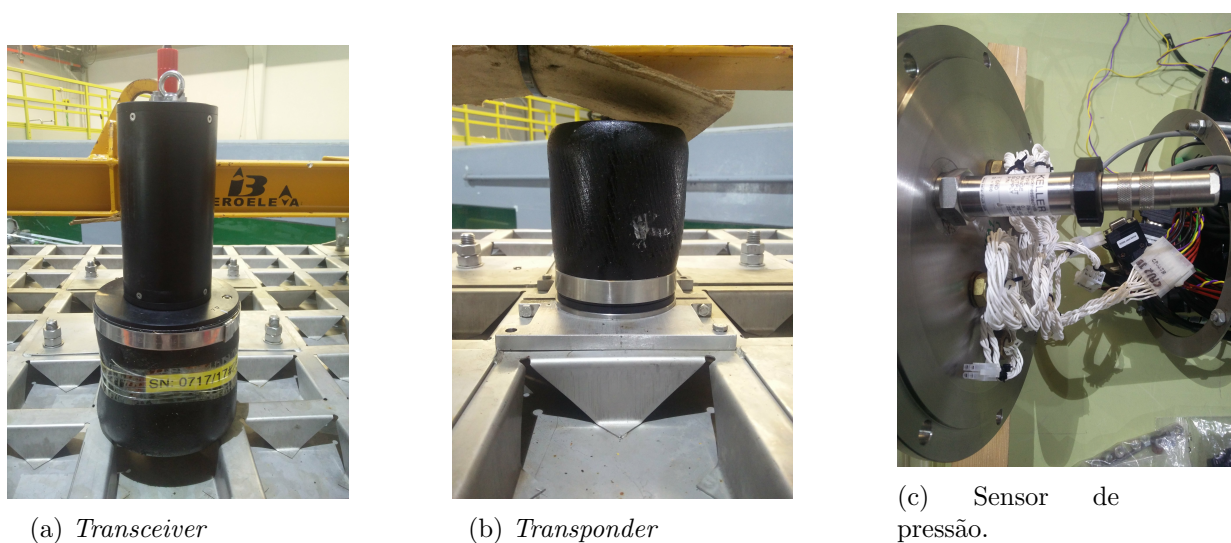


Figura 4.19: Sistema *USBL/Modem* e sensor de pressão

Segue na Tabela 4.5 as especificações técnicas do sistema USBL.

Tabela 4.5: Especificações técnicas do USBL S2CR 7/17

Parâmetros	Valor
Máx Alcance	8000m (10000m - boas condições)
Frequência	7 – 17kHz
<i>Slant Range Accuracy</i>	0.01m
<i>Bearing Resolution</i>	0.1

- Sensor de Pressão

Ao contrário do que acontece noutros veículos (terrestres e aéreos), a localização subaquática permite obter melhor posição no plano vertical z , devido ao uso do sensor de pressão. Isto porque, a profundidade de um determinado objeto subaquático é diretamente proporcional à pressão. As medidas do sensor de pressão são absolutas, obtendo facilmente precisão abaixo dos centímetros. O sensor de pressão incorporado no TURTLE é o *Keller PA35X*.

Tabela 4.6: Especificações técnicas do sensor de pressão *Keller PA35X*

Parâmetros	Valor
Exatidão	0.05%FS
<i>Long Term Stability</i>	0.5mbar
Resolução	0.002%
<i>Data Rate</i>	400Hz

4.8 Operação

Por fim e baseado nos requisitos iniciais do veículo TURTLE, este pode ter três modos de operação:

- Múltiplos movimentos ascendentes e descendentes através da variação de flutuabilidade;
- Transporte de cargas/equipamento de e para o fundo do oceano, autonomamente com posicionamento preciso.
- Reposicionamento no fundo do oceano sem a necessidade de voltar á superfície, usando os *thrusters* para movimento na horizontal.

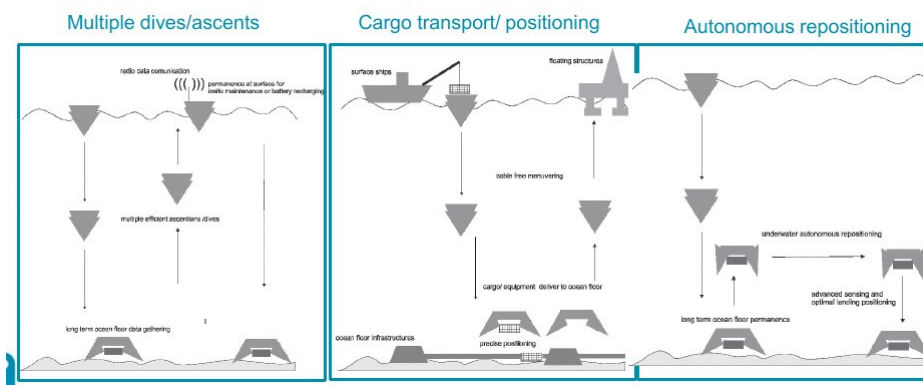


Figura 4.20: Operação Turtle [54].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 5

Modelização TURTLE

O capítulo anterior apresentou uma introdução à modelização de veículos subaquáticos. O objetivo deste capítulo é aplicar alguns desses conceitos e obter um modelo do TURTLE, bem como os seus parâmetros de forma a caracterizar com mais detalhe o comportamento do TURTLE.

5.1 Veículo subaquático autónomo TURTLE

Obter um modelo do sistema TURTLE, é representar através de relações matemáticas ou lógicas o funcionamento do mesmo no mundo real. Isto permite analisar e avaliar o seu comportamento mediante parâmetros de entrada e verificar o sequente resultado. Para simular o comportamento de um sistema com razoável precisão deve-se identificar os seus parâmetros mais relevantes. Informação como peso, força de flutuação, volume e as dimensões do veículo são calculadas com procedimentos simples, a obtenção de um modelo dos efeitos hidrodinâmicos como o arrasto e massa acrescentada é mais difícil. Estes podem ser aproximados por um conjunto de coeficientes que embora simplifiquem o modelo apresentam também problemas no seu cálculo.

Alguns destes dados foram obtidos recorrendo a ferramentas computacionais. Na Figura 5.1, pode-se observar o referencial do veículo e o inercial, que têm por base os referencias propostos por [43].

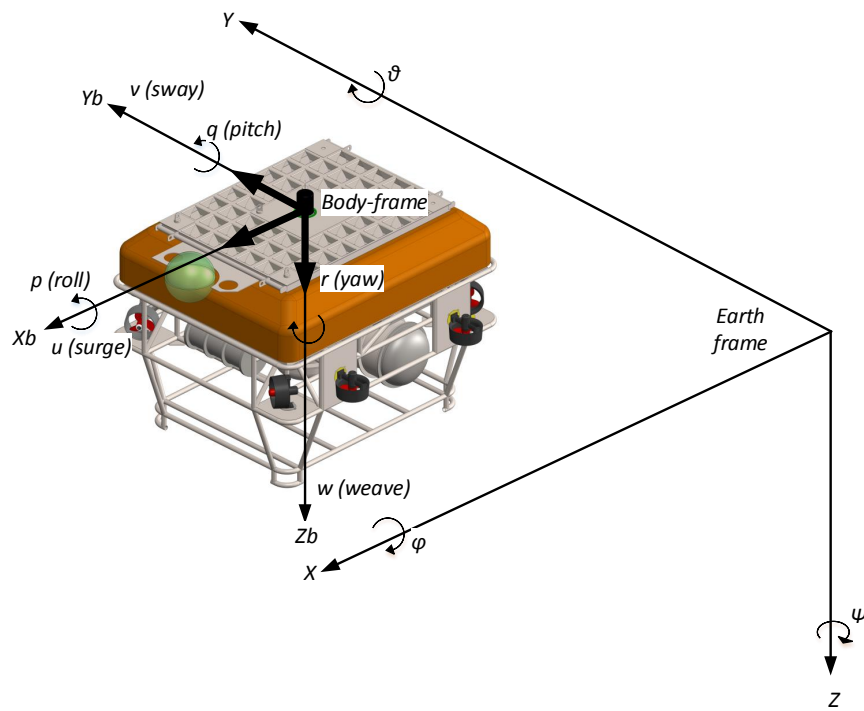


Figura 5.1: Referenciais do veículo TURTLE.

5.1.1 Geometria do veículo

Na tabela 5.1, são apresentadas as principais dimensões do TURTLE, indicadas nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1: Principais dimensões do TURTLE.

Parâmetros	Valor [m]	Descrição
$x_{TURTLE_{max}}$	2.20	Comprimento do TURTLE ao longo do eixo x
x_{Frame}	1.97	Comprimento máximo da estrutura ao longo do eixo x
x_{Foam}	1.90	Comprimento máximo da espuma ao longo do eixo x
$x_{OpenCell}$	1.57	Comprimento do <i>OpenCell</i> ao longo do eixo x
$x_{ThrustersVertical}$	1.03	Distância entre os propulsores verticais ao longo do eixo x
$x_{ThrustersHorizontalis}$	1.72	Distância entre os propulsores horizontais ao longo do eixo x
$y_{TURTLE_{max}}$	2.11	Comprimento do TURTLE ao longo do eixo y
$y_{Structure}$	1.67	Comprimento máximo da estrutura ao longo do eixo y
$y_{FoamMax}$	1.60	Comprimento máximo da espuma ao longo do eixo y
$y_{FoamSuperior}$	1.30	Comprimento mínimo da espuma ao longo do eixo y
$y_{OpenCell}$	1.14	Comprimento do <i>OpenCell</i> ao longo do eixo y
$y_{ThrusterHorizontalis}$	1.24	Distância entre os propulsores horizontais ao longo do eixo y
$y_{ThrustersVerticais}$	1.95	Distância entre os propulsores verticais ao longo do eixo y
$y_{StructureMin}$	1.27	Comprimento mínimo da estrutura ao longo do eixo y
$z_{TURTLE_{max}}$	1.85	Altura do TURTLE
$z_{ThrustersHorizontalis}$	1.02	Altura dos <i>thrusters</i> horizontais em relação à base do veículo
$z_{ThrustersVerticais}$	1.07	Altura dos <i>thrusters</i> verticais em relação à base do veículo
$z_{Structure}$	1.33	Altura da estrutura
z_{Foam}	$37 \cdot 10^{-2}$	Altura da espuma
$z_{OpenCell}$	$5 \cdot 10^{-2}$	Altura do <i>OpenCell</i>
$d_{maxThruster}$	$22 \cdot 10^{-2}$	Diâmetro da hélice do propulsor
d_{sphere}	$33 \cdot 10^{-2}$	Diâmetro da esfera

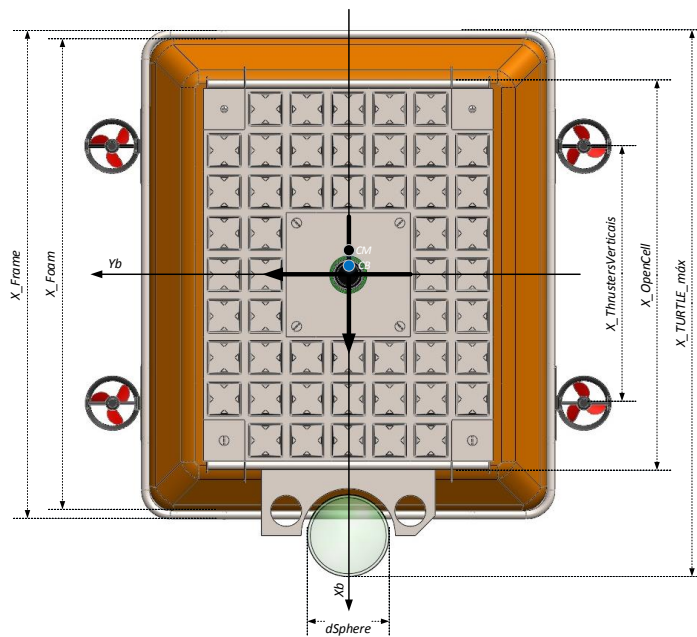


Figura 5.2: Projeção superior do TURTLE.

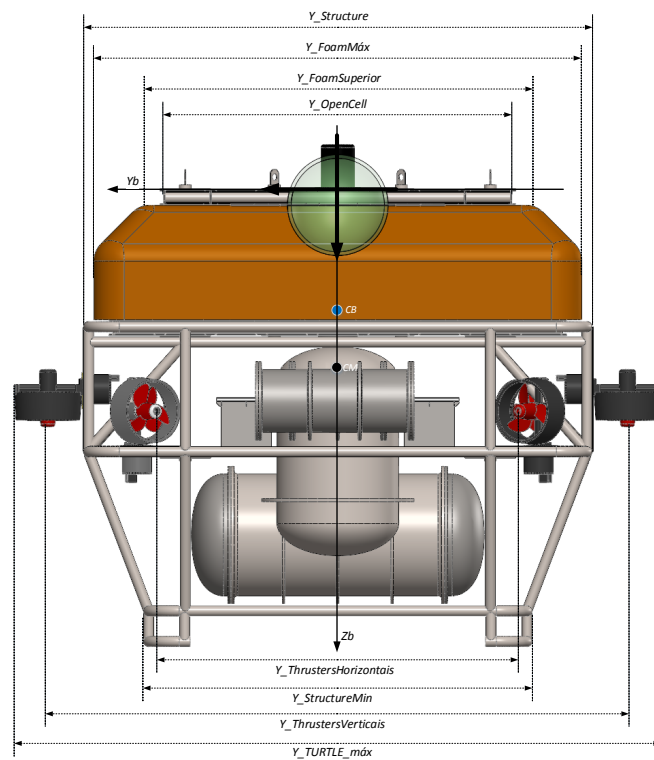


Figura 5.3: Projeção frontal do TURTLE.

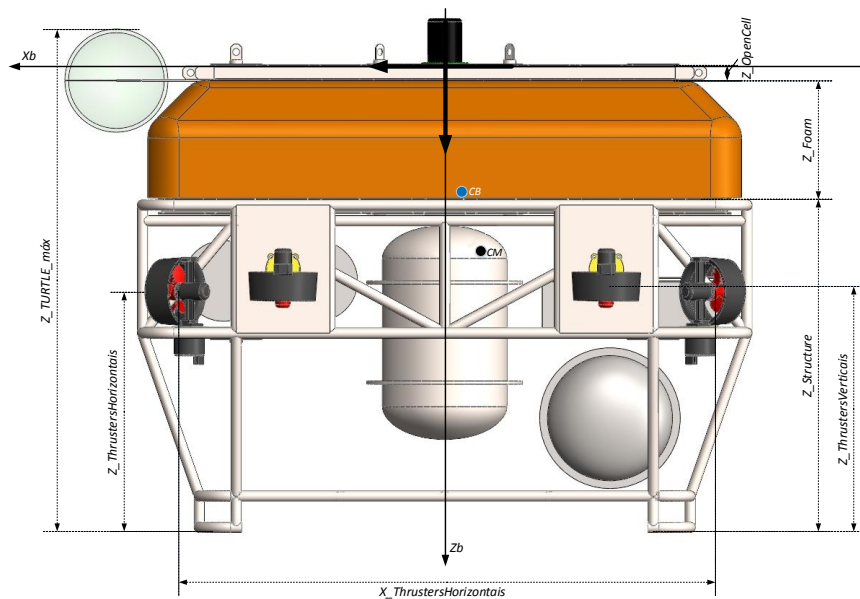


Figura 5.4: Projeção lateral do TURTLE.

Apesar do TURTLE ser constituído por múltiplas estruturas e componentes, apenas serão mencionados os principais componentes que têm grande influência na modelização do mesmo.

- Estrutura: Estrutura mecânica de suporte.
- Espuma: Este é o bloco principal responsável pela flutuação do veículo.
- Baterias: *Housing* onde contém a associação das células.
- *Thrusters*: Sistema de propulsão (8 motores de propulsão).
- CPU: É o cilindro onde está a unidade de processamento responsável pelo controlo e navegação do veículo.
- JB: Neste cilindro está toda a distribuição de energia para os vários sensores, motores e demais componentes do veículo.
- Esfera: Esta é a única compartição transparente do veículo. É aqui que estão todos os sistemas de comunicação à superfície do veículo, assim como uma câmara de espectro visível.

- Tanque Lastro (depósito): Este neste cilindro onde é a armazenada a água injetada pela bomba.
- VBS: Este é o cilindro onde está todo o circuito composto pelo motor, bomba e eletroválvulas, e que é responsável por fazer variar o peso do veículo e assim realizar movimento no plano z .
- *OpenCell*: Estrutura que suporta a espuma.

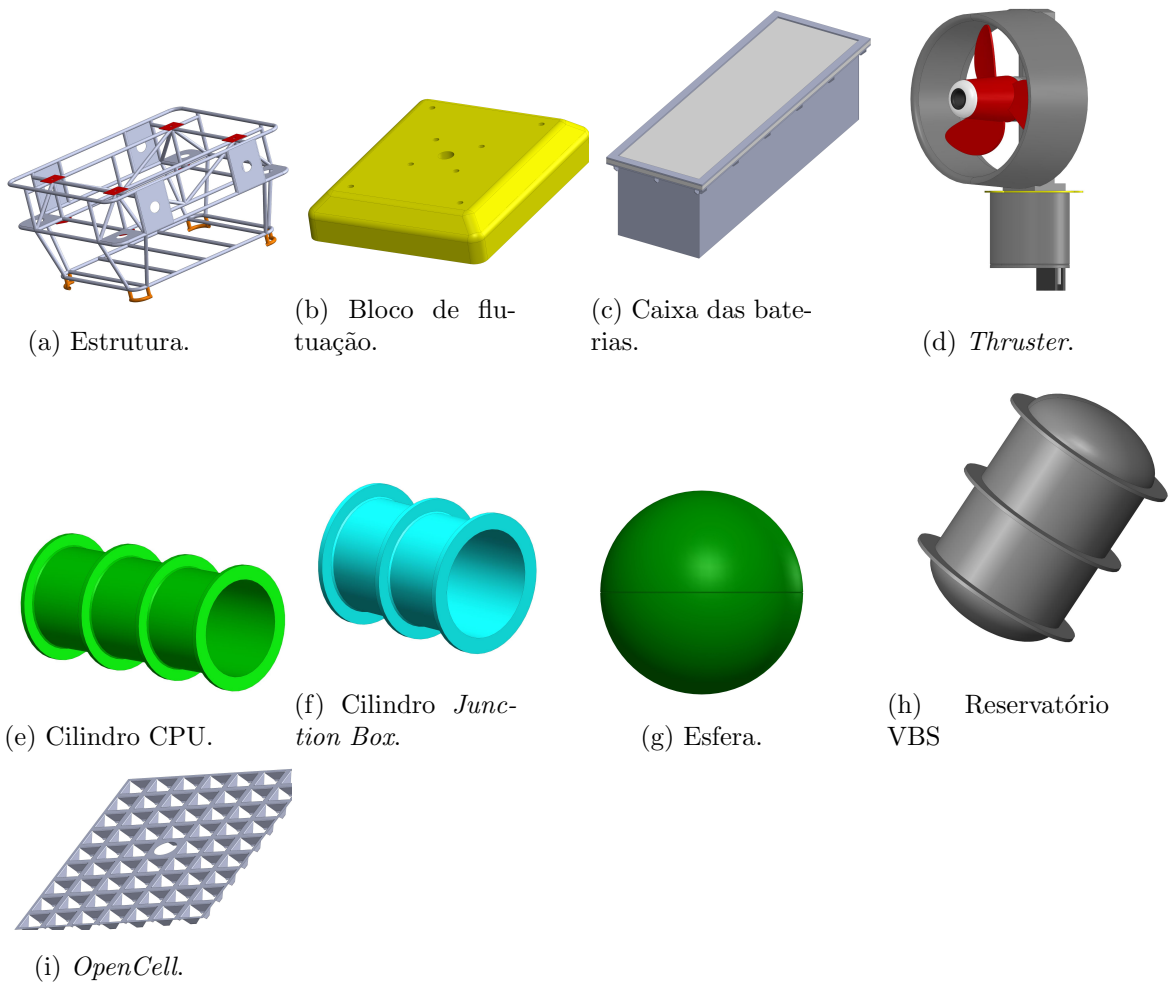


Figura 5.5: Principais componentes do *TURTLE*.

Na seguinte tabela é apresentado o volume correspondente a cada componente do *TURTLE*.

Tabela 5.2: Volume dos diversos componentes do *TURTLE*.

Parâmetros	Valor[m ³]	Descrição
V_{VBS}	$145.5 \cdot 10^{-3}$	Volume do Cilindro de VBS
V_{CPU}	$20.94 \cdot 10^{-3}$	Volume do Cilindro do CPU
V_{JB}	$11.40 \cdot 10^{-3}$	Volume do Cilindro de <i>Junction Box</i>
V_{SPHE}	$5.98 \cdot 10^{-3}$	Volume da esfera
V_{FOAM}	$1027.75 \cdot 10^{-3}$	Volume de espuma
V_{FRAME}	$5.11 \cdot 10^{-3}$	Volume da estrutura
V_{BATT}	$29.70 \cdot 10^{-3}$	Volume das baterias
$V_{OPENCELL}$	$7.45 \cdot 10^{-3}$	Volume do <i>Open Cell</i>
$V_{BALLAST}$	$65.0 \cdot 10^{-3}$	Volume do cilindro de balastro
$V_{THRUSTER}$	$0.001 \cdot 10^{-3}$	Volume de um propulsor
$V_{diverso}$	$0.013 \cdot 10^{-3}$	Volume diverso
V_{Total}	$1.42 \cdot 10^{-3}$	Volume total do <i>TURTLE</i>

Na seguinte tabela pode-se observar a massa correspondente a cada componente do *TURTLE*.

Tabela 5.3: Massa dos diversos componentes do *TURTLE*.

Parâmetros	Valor[kg]	Descrição
m_{VBS}	152	Massa do Cilindro de VBS
m_{CPU}	39.6	Massa do Cilindro do CPU
m_{JB}	29.6	Massa do Cilindro de <i>Junction Box</i>
m_{SPHE}	19.2	Massa da esfera
m_{FOAM}	500	Massa de espuma
$m_{FRAME+OPENCELL}$	300	Massa da estrutura
m_{BATT}	(33.9) * 2	Massa das baterias
$m_{BALLAST}$	80	Massa do cilindro de balastro
$m_{THRUSTER}$	(4.4) * 4	Massa de um propulsor
$m_{diversa}$	(50)	Massa diversa
m_{Total}	(1400)	Massa total do <i>TURTLE</i>

Tanto os valores totais de volume como de massa podem apresentar alguma incerteza ($\approx 1\%$).

Na tabela 5.4, apresentam-se os valores das coordenadas dos principais componentes que constituem o *TURTLE*.

Tabela 5.4: Coordenadas dos principais componentes do *TURTLE*.

Parâmetros	Valor(x, y, z) [m]	Descrição
VBS	$(-5.93 \cdot 10^{-1}, 0, 11.32 \cdot 10^{-1})$	Cilindro VBS
CPU	$(7.07 \cdot 10^{-1}, 0, 6.92 \cdot 10^{-1})$	Cilindro CPU
JB	$(4.07 \cdot 10^{-1}, 0, 6.92 \cdot 10^{-1})$	Cilindro JB
BALLAST	$(0, 0, 8.58 \cdot 10^{-1})$	Tanque de Balastro
SPHERE	$(10.50 \cdot 10^{-1}, 0, 5.25 \cdot 10^{-1})$	Esfera
FOAM	$(0, 0, 2.50 \cdot 10^{-1})$	Espuma
BATTERIES	$(5.93 \cdot 10^{-1}, 0, 7.54 \cdot 10^{-1})$	Baterias
THRUSTER1	$(86 \cdot 10^{-2}, -62 \cdot 10^{-2}, 73 \cdot 10^{-2})$	Propulsor 1
THRUSTER2	$(-86 \cdot 10^{-2}, -62 \cdot 10^{-2}, 73 \cdot 10^{-2})$	Propulsor 2
THRUSTER3	$(-86 \cdot 10^{-2}, 62 \cdot 10^{-2}, 73 \cdot 10^{-2})$	Propulsor 3
THRUSTER4	$(86 \cdot 10^{-2}, 62 \cdot 10^{-2}, 73 \cdot 10^{-2})$	Propulsor 4
THRUSTER5	$(51 \cdot 10^{-2}, -97 \cdot 10^{-2}, 68 \cdot 10^{-2})$	Propulsor 5
THRUSTER6	$(-51 \cdot 10^{-2}, -97 \cdot 10^{-2}, 68 \cdot 10^{-2})$	Propulsor 6
THRUSTER7	$(-51 \cdot 10^{-2}, 97 \cdot 10^{-2}, 68 \cdot 10^{-2})$	Propulsor 7
THRUSTER8	$(51 \cdot 10^{-2}, 97 \cdot 10^{-2}, 68 \cdot 10^{-2})$	Propulsor 8

5.1.2 Peso e flutuação

O peso e a força de impulsão do veículo *TURTLE*, podem sofrer pequenas alterações consoante as missões a executar. Essas alterações devem-se essencialmente à mudança de sensores que comparadamente ao peso e à força de impulsão total do *TURTLE* são desprezáveis. Neste sentido ao longo desta dissertação o peso e a força de impulsão será considerado o que está mencionado na tabela 5.5, assumindo também que o sistema de variação de lastro permanece vazio. Estes cálculos tiverem como base a densidade de 1000 Kg/m^3 .

Tabela 5.5: Peso e força de impulsão total do *TURTLE*.

Parâmetros	Valor (N)	Descrição
W	13734	Peso
B	13930	Força de impulsão

5.1.3 Centro de gravidade e de flutuabilidade

Na Tabela 5.6, apresentam-se as posições do centro de gravidade (CG) e do centro de flutuação (CB). A inserção ou remoção de dispositivos no interior ou exterior do veículo pode alterar estes valores. Ou seja, na verdade com o sistema de variação de lastro, estes valores são alterados, contudo a variação dos mesmos é desprezável, daí assume-se que estes valores permanecem inalterados.

Tabela 5.6: Posição do centro de gravidade.

Parâmetros	Valor (m)
x_{cg}	$-10.45 \cdot 10^{-2}$
y_{cg}	0
z_{cg}	$58.23 \cdot 10^{-2}$

Tabela 5.7: Posição do centro de flutuação.

Parâmetros	Valor (m)
x_{cb}	0
y_{cb}	$3.6 \cdot 10^{-2}$
z_{cb}	$39.2 \cdot 10^{-2}$

5.1.4 Momentos de Inércia

Tabela 5.8: Momentos de inércia.

Parâmetros	Valor (kg/m^2)	Descrição
I_{xx}	536.087	Momento de inércia segundo o eixo x
I_{yy}	429.55	Momento de inércia segundo o eixo y
I_{zz}	573.25	Momento de inércia segundo o eixo z

Pela análise dos valores presentes nas tabelas anteriores já é possível concluir determinadas características do veículo TURTLE. Este veículo tem flutuabilidade positiva devido à sua força de impulsão ser maior que o seu peso. É hidrostáticamente estável na água devido à distribuição do seu peso, ou seja, o seu centro de gravidade encontra-se abaixo

do centro de flutuabilidade. Também se pode verificar que embora o veículo não seja perfeitamente simétrico nos três planos de simetria, está perto disso (ver figuras 5.2, 5.3 e 5.4). Esta propriedade permite simplificar algumas expressões da hidrodinâmica como visto no capítulo 3.

5.1.5 Sistema de Propulsão

O veículo TURTLE possui um total de oito *thrusters*, em que quatro ($T1, T2, T3$ e $T4$) são responsáveis pelo movimento horizontal, ou seja movimento em *surge*, *sway*, *yaw* e os restantes quatro ($T5, T6, T7$ e $T8$) pelo movimento vertical (*heave*), como mostra a figura 5.6. Para o movimento em *heave*, a força gerada pelos *thrusters* é a soma de da força de cada um, isto porque a configuração dos *thrusters* está paralela ao eixo Z . O mesmo não acontece na força gerada para o movimento em *surge*, *sway* e *yaw*. Desta forma e baseado na configuração dos *thrusters* é necessário calcular a força no eixo longitudinal (X), transversal (Y) e no momento (N), ou seja, movimento em torno do eixo Z . Embora o processo de modelização do veículo tenha por base um corpo com 6DOF (capítulo 3), devido à sua utilização prática, apenas são considerados 4 graus de liberdade (*surge*, *heave*, *sway* e *yaw*). Considera-se também o TURTLE um veículo completamente atuado devido a este possuir atuadores nos seus graus de liberdade.

O processo de alocação de *thrusters* abordado seguidamente tem como base métodos propostos em [50].

Sistema de Propulsão Horizontal

As forças e os momentos de atuação no veículo são descritas pela seguinte expressão:

$$\tau = T(\alpha)Pf \quad (5.1)$$

onde, $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$,
 τ_1 → Força no movimento *surge*,
 τ_2 → Força no movimento *sway*,
 τ_3 → Momento em torno do eixo Z *yaw*,
 T → Matriz de alocação.

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \cos(\alpha_2) & \cos(\alpha_3) & \cos(\alpha_4) \\ \sin(\alpha_1) & \sin(\alpha_2) & \sin(\alpha_3) & \sin(\alpha_4) \\ d_1 \sin(\gamma_1) & d_2 \sin(\gamma_2) & d_3 \sin(\gamma_3) & d_4 \sin(\gamma_4) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

onde $\gamma_1 = \alpha_1 - \varphi_1$; $\gamma_2 = \alpha_2 - \varphi_2$; $\gamma_3 = \alpha_3 - \varphi_3$; e $\gamma_4 = \alpha_4 - \varphi_4$;

α = ângulo entre o eixo longitudinal e a direção de *thrust*.

d = distância de cada *thruster* com o centro de gravidade.

φ = ângulo entre o eixo longitudinal e a linha que liga ao centro de gravidade de cada *thruster*.

$f = [f_1, f_2, f_3, f_4]$ - *Thrust* necessário para gerar as forças pretendidas em cada eixo.

P - Matriz diagonal que representa a atividade dos *thrusters*. Se o *thruster* estiver ativo é representado pelo "1", caso esteja inativo pelo "0". Neste caso assumiu-se que todos os *thrusters* estariam ativos.

Na figura 5.6 está representada a configuração dos *thrusters* e na tabela 5.9 os coeficientes representados na matriz 5.2.

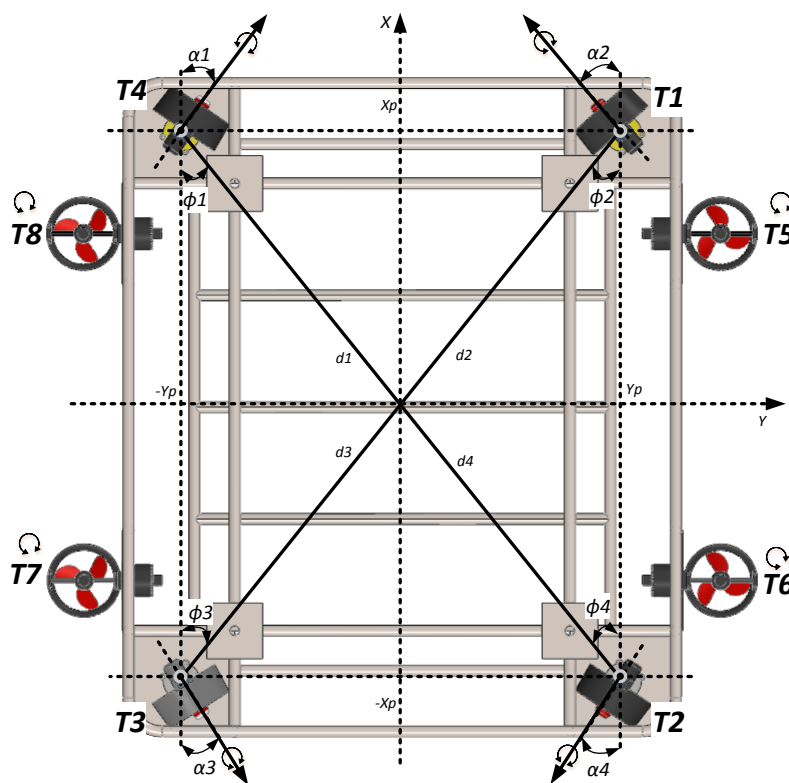


Figura 5.6: Disposição dos *thrusters*.

Tabela 5.9: Coeficientes da matriz de alocação.

Parâmetros	Valor
$d1$	$1.06m$
$d2$	$1.06m$
$d3$	$1.06m$
$d4$	$1.06m$
$\alpha1$	35°
$\alpha2$	35°
$\alpha3$	35°
$\alpha4$	35°
$\varphi1$	35.7748°
$\varphi2$	35.7748°
$\varphi3$	35.7748°
$\varphi4$	35.7748°

Independentemente de o TURTLE estar a ser controlado manualmente, semi-autônomo ou mesmo autônomo, o sistema de propulsão do TURTLE está preparado para receber três parâmetros (valores) que representam o movimento em: *surge*, *sway* e *yaw*. Esses parâmetros podem representar referências de um determinado *joystick*, assim como forças ou velocidades. Posteriormente estes valores são traduzidos para referências de cada *thruster* pela seguinte equação:

$$f = T' * \tau = \begin{bmatrix} 0.9037 & 0.4282 & -0.7415 \\ -0.9037 & 0.4282 & 0.7415 \\ -0.9037 & -0.4282 & -0.7415 \\ 0.9037 & -0.4282 & 0.7415 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Os sinais provenientes dos coeficientes da matriz T , representam o movimento do *thruster*, ou seja se for positivo, sentido horário, negativo anti-horário.

Sistema de Propulsão Vertical

No movimento vertical (*heave*) a configuração é bastante mais simples, dessa forma a força aplicada a cada *thruster* é a mesma força que atua no veículo paralela ao eixo Z , que resulta num somatório da força debitada de cada *thruster*.

$$f = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \times [\tau_4] \quad (5.4)$$

Na Tabela 5.10, estão mencionadas as forças totais de eixo do movimento, tendo por base as características fornecidas pelo fabricante dos *thrusters* - *Seaeye* e a configuração dos mesmos no veículo (Figura 5.6).

Tabela 5.10: Força de propulsão.

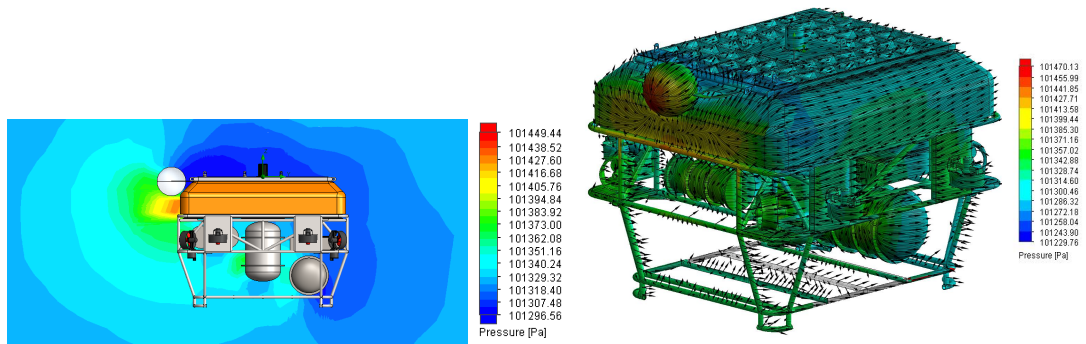
Parâmetros	Valor	Descrição
Fp_{surge}	124.16(N)	Força no movimento em <i>surge</i>
Fp_{sway}	86.94(N)	Força no movimento em <i>sway</i>
Fp_{yaw}	251.63(N/m)	Força no movimento em <i>yaw</i>
$Fp_{heavepos}$	510.1(N)	Força no movimento vertical positivo
$Fp_{heaveneg}$	502.3(N)	Força no movimento vertical negativo

5.1.6 Simulação CFD - *Drag*

A força de arrasto resulta da interação entre o corpo do veículo (TURTLE) e o fluido que o rodeia, que se modifica com base na dinâmica do veículo bem como nas condições ambientais [55]. Recorrendo ao *software* CFD - (*Computer Fluid Dynamics*) do *SolidWorks*, foi possível analisar o fluxo e a pressão exercida pelo fluido ao longo da superfície do TURTLE, assim como as zonas mais propícias à formação de vórtices [56]. As condições iniciais de simulação foram a densidade da água de 1000 kg/m^3 , a temperatura de $293,2K$ e a velocidade do fluido de $0,5 \text{ m/s}$, cuja direção foi simulada em três graus de liberdade do TURTLE (i.e *surge*, *sway* e *heave*). Os resultados destas simulações são úteis para retirar conclusões acerca do comportamento hidrodinâmico do TURTLE.

Surge

Na Figura 5.7a pode observar-se a pressão exercida no TURTLE quando este se movimenta em *surge*. Como esperado, a zona de maior pressão é na face frontal do TURTLE, junto à espuma. Embora se trate de uma zona pouca hidrodinâmica, o diferencial dos pontos de maior e menor pressão são apenas $< 160P_a$. Como tal considera-se a pressão uniformemente distribuída pela superfície do TURTLE.



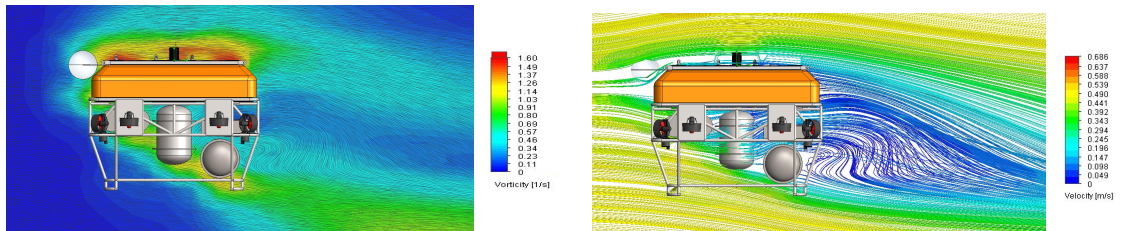
(a) Contorno da pressão no movimento *surge* positivo.

(b) Vetor da pressão no movimento *surge* positivo.

Figura 5.7: Pressão superficial em *surge*.

Na Figura 5.7b, é também possível verificar a distribuição da pressão sobre o *TURTLE*, apoiada de vetores do fluxo da água.

É também possível observar na Figura 5.8a a zona crítica de formação de vórtices aquando da navegação do *TURTLE*. Como esperado é no topo do veículo que se formam os vórtices mais fortes, chegando a atingir valores triplos da velocidade de navegação, assim como na face contrária à navegação, deixando um rasto de passagem.



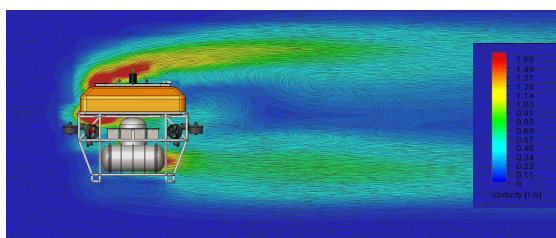
(a) Velocidade dos vórtices no movimento *surge* positivo.

(b) Velocidade do fluido no movimento lateral - *surge* positivo.

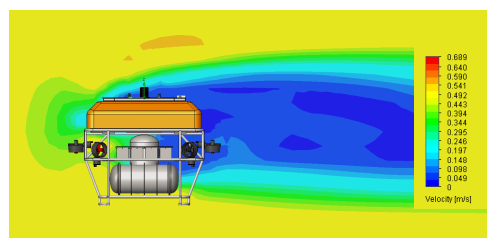
Figura 5.8: Velocidade e vorticidade do fluido em *surge*.

Sway Negative

Relativamente ao movimento em *sway* (Figura 5.9), verifica-se que na ausência da esfera para quebrar a água tem-se uma formação mais agressiva de vórtices no topo do veículo. Contudo, os vórtices na face contrária à de navegação são atenuados devido à quebra da água pelo cilindro do VBS.



(a) Velocidade dos vórtices no movimento lateral - *sway* negativo.

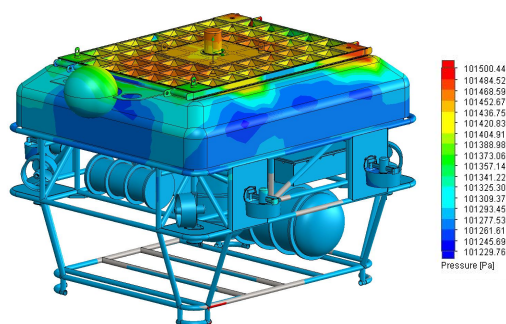


(b) Velocidade do fluido no movimento lateral - *sway* negativo.

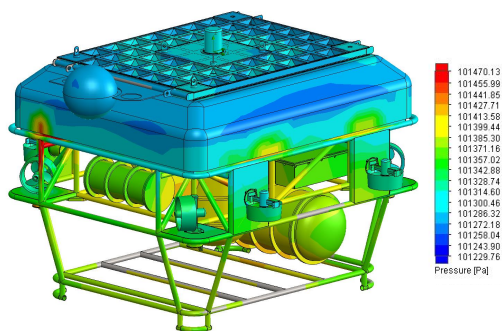
Figura 5.9: Velocidade e vorticidade do fluido em *sway*.

Heave

Observando a Figura 5.10, facilmente se percebe a direção do fluido em cada simulação. Como é possível verificar a Figura 5.10a, tem uma maior pressão na parte superior, o que corresponde ao TURTLE no seu movimento ascendente. Enquanto que na Figura 5.10b o TURTLE realizou o movimento descendente. Ou seja, pela observação das figuras pode-se concluir que no movimento descendente existe uma maior área de contacto onde a pressão é maior, enquanto no movimento ascendente grande parte da pressão está concentrada na parte superior do TURTLE. Assim pode afirmar-se que o TURTLE tem um melhor comportamento hidrodinâmico no movimento ascendente do que descendente.



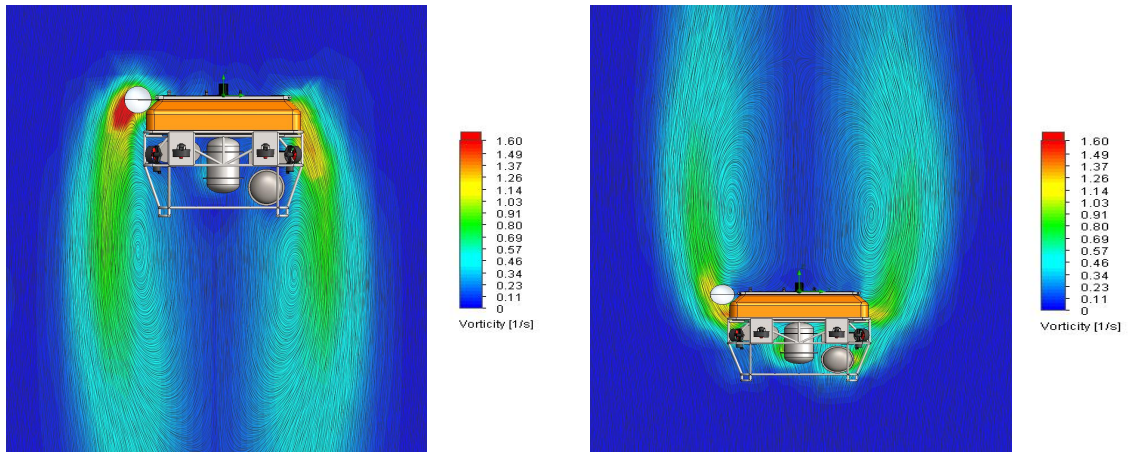
(a) Contorno da pressão no movimento *heave* negativo.



(b) Contorno da pressão no movimento *heave* positivo.

Figura 5.10: Pressão superficial em *heave*.

Relativamente ao comportamento dos vórtices estes são mais notáveis no movimento ascendente.



(a) Velocidade dos vórtices no movimento *heave* negativo.

(b) Velocidade dos vórtices no movimento *heave* positivo.

Figura 5.11: Velocidade e vorticidade do fluido em *heave*.

Após a simulação obtiveram-se os coeficientes de *drag* representados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Coeficientes de *Drag*

Parâmetros	Valor	Unidades
$X_{u u }$	10.83	Kg/m
$Y_{v v }$	-17.80	Kg/m
$Z_{w w }$	40.71	Kg/m
$K_{p p }$	0.19	Kg
$M_{q q }$	0.232	Kg
$N_{r r }$	-0.19	Kg

Capítulo 6

Controlo do TURTLE

Neste capítulo será abordado a arquitetura do controlo, a implementação do *software* e algumas manobras propostas. Será ainda aprofundado alguns fundamentos teóricos relativos ao controlador PID.

6.1 Arquitetura de controlo

Na Figura 6.1, apresenta-se a arquitetura geral dos principais blocos de *software* do TURTLE. A camada de comunicação responsável pela gestão da comunicação do robô com o exterior recorre a sistemas apropriados consoante as condições de operação (superfície, submerso). Este baseia-se tanto na posição do TURTLE (superfície ou subaquática), mas também na melhor forma de comunicação (WI-FI, RF, Iridium, Acústica) consoante as condições atuais. O bloco de localização, este lê dados de diversos sensores, que após a utilização de um filtro *EKF* - *Extended Kalman Filter*, fornece medidas previstas de posição, velocidades e atitude nos três eixos de navegação. O bloco "outros periféricos" representa todos os outros módulos de software que existem no TURTLE mas que não interferem diretamente no controlo do robô, como por exemplo sistemas de gestão de energia, sistemas de monitorização de outras variáveis como temperatura interna, fugas de água, corrente, tensão, etc. Por fim o bloco que será abordado com mais detalhe, "Guidance Control", é responsável por todo o movimento do TURTLE, nos seus três eixos de navegação.

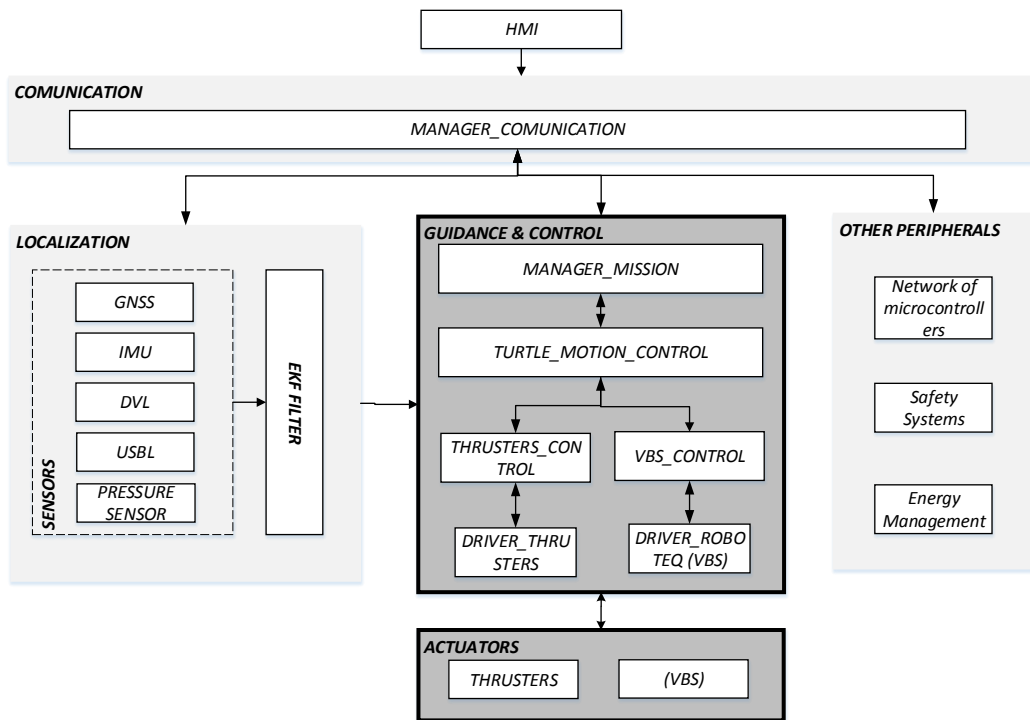


Figura 6.1: Arquitetura geral do software de controlo versão 2.

6.2 Implementação software

Grande parte do *software* de controlo tem por base o *middleware* ROS. ROS (*Robotic Operation System*), é uma plataforma *open source* que possui uma serie de serviços e bibliotecas que simplificam a criação e partilha de aplicações através do sistema de subscrição e publicação de *nodes* [57]. Uma outra vantagem deste *middleware*, refere-se ao facto de permitir a programação em diferentes linguagens de como: *Python*, *C++*, *etc.*

A seguinte 6.2 mostra a arquitetura geral do *software* de controlo elaborado numa fase inicial. Esta fase corresponde a testes de operacionalidade básica de forma a validar os diferentes subsistemas do veículo.

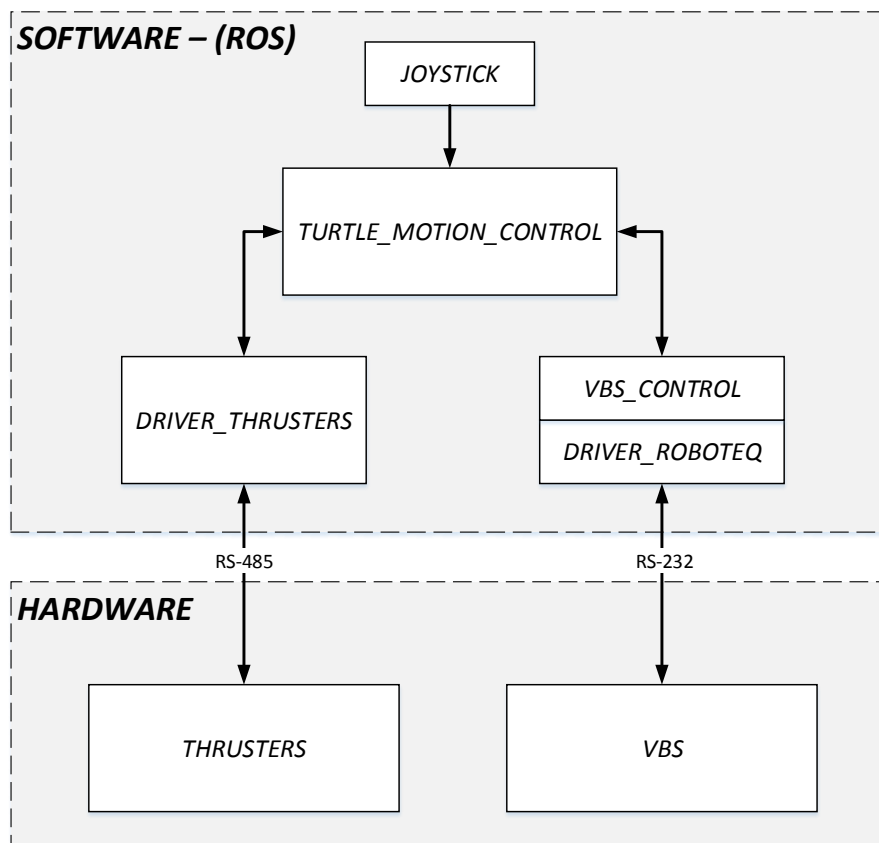


Figura 6.2: Arquitetura geral do software de controlo versão 1 (testes básicos de funcionalidade).

Numa fase posterior foram desenvolvidos os diferentes módulos de *software* correspondentes à arquitetura de controlo definida.

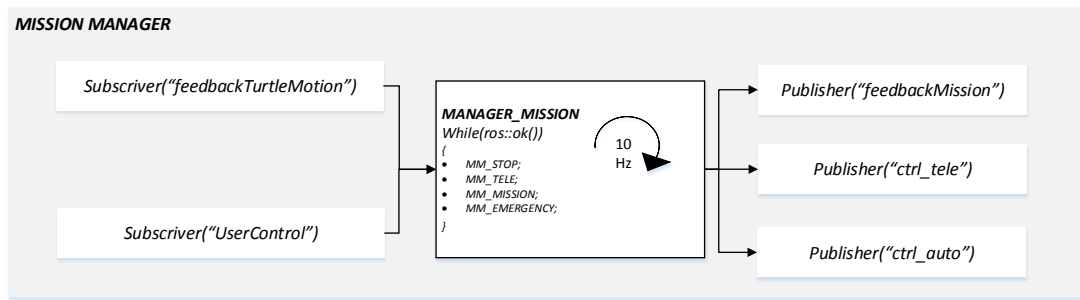


Figura 6.3: Arquitetura do gestor de missões.

Este módulo (Figura 6.3) corresponde ao gestor de missão do TURTLE. Como mencionado anteriormente todas as missões a executar, serão um conjunto de manobras que interligadas entre si, realizam determinadas tarefas pré-programadas. Este bloco gere o tipo de missão a executar. Como se pode observar na Figura 6.3, existem cinco modos em que o gestor de missão pode estar:

- *MM_STOP*

Comuta para este modo, sempre que se pretenda cancelar uma determinada missão, ou outra manobra que este esteja a realizar.

- *MM_IDLE*

Após o TURTLE passar pelo modo MM STOP, e verificar que realmente cancelou aquilo que estava a realizar, comuta para o modo "*MM_IDLE*" e mantém-se até à espera de uma nova ordem.

- *MM_TELE*

Neste modo, o TURTLE pode ser controlado pelo *Joystick* de uma forma manual. Contudo mesmo sendo controlado pelo *Joystick*, pode ter modos de controlo autónomo como por exemplo: manter a mesma direção, velocidade e profundidade.

- *MM_MISSION*

È possível ler um ficheiro de configuração, onde estão descritas todas as manobras que o TURTLE irá realizar para completar uma determinada missão. O próprio gestor de missão é que verifica quanto comuta para uma nova manobra, verificando determinadas condições que o validam de comutar.

- *MM_EMERGENCY*

São vários os sistemas que alertam para uma possível anomalia existente. Essa anomalia posteriormente é analisada para determinar qual o modo de emergência a ativar.

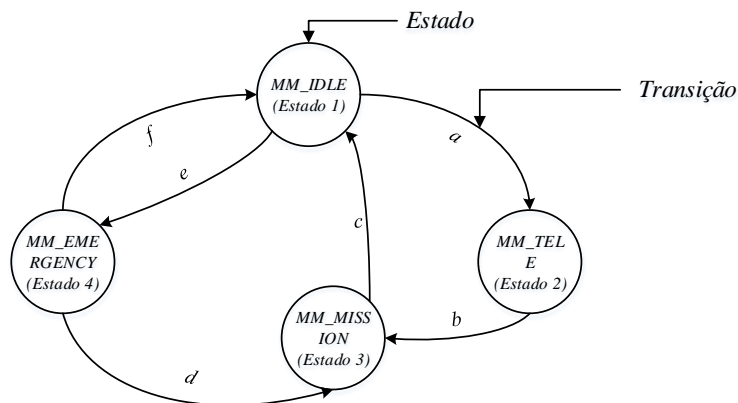


Figura 6.4: Exemplo de uma máquina de estados.

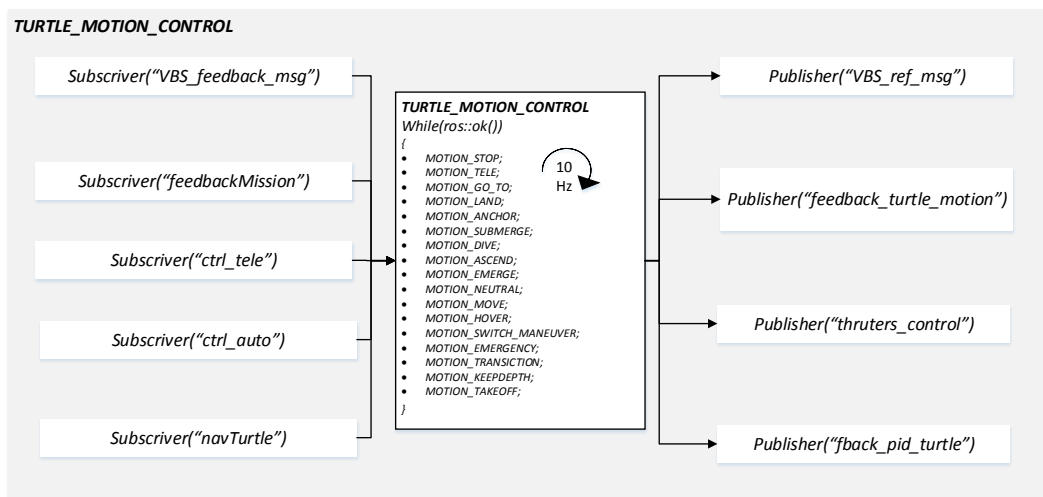


Figura 6.5: Arquitetura do gestor de manobras.

A descrição de todas as manobras estão descritas no bloco " *Turtle Motion Control*". Este bloco tem a principal função de executar as funções de PID (controlo proporcional, integral e derivativo), baseadas no dados de navegação e posteriormente publicar o resultado dessas mesmas funções (PID) para o bloco *thrusters control* e *VBS control*. Este é o bloco que valida se uma determinada manobra foi ou não concluída com sucesso, dando permissão ao gestor de missões para iniciar uma nova manobra. Este bloco também pode a pedido do gestor de missões abortar a manobra atual.

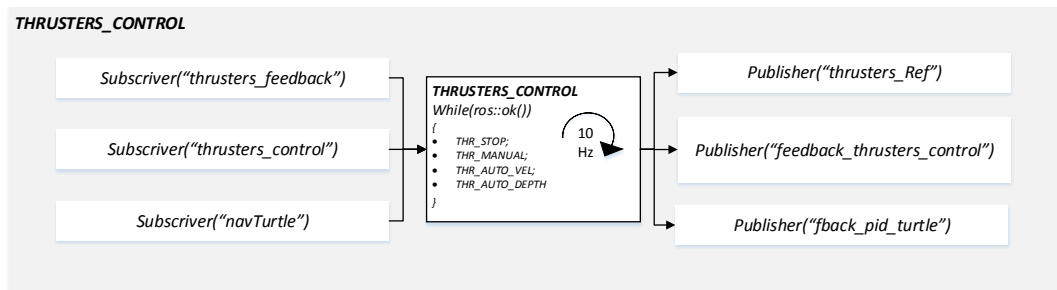


Figura 6.6: Arquitetura do gestor de controlo do *thrusters*.

O bloco " *Thrusters Control*", trata informação de controlo enviada para os *thrusters*. Ou seja, recebe informação proveniente do bloco " *Turtle Motion Control*" aplica a matriz de alocação e publica as referências de cada *thruster* para o " *driver thrusters*". Este bloco também contém funções PID, usadas quando o TURTLE está no modo de teleoperação e o utilizador pretende manobrar mas mantendo uma determinada orientação, velocidade, profundidade, etc. O objetivo deste bloco é também tratar erros provenientes dos *thrusters* e se necessário ajustar a matriz de alocação, caso algum *thruster* esteja inativo.

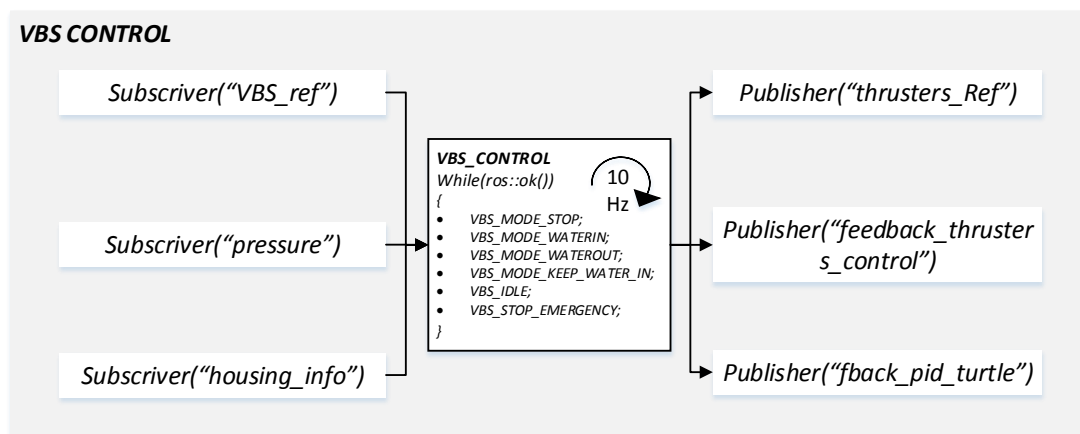


Figura 6.7: Arquitetura do gestor de controlo do VBS.

Este bloco equipara-se ao anterior (*Thrusters Control*), mas direcionado para o VBS. Apenas recebe instruções do "Turtle Motion Control" e comuta para o estado desejado. Este bloco contém todo o código necessário para executar essencialmente duas tarefas: introduzir água e retirar a água. Obviamente que estes dois processos serão precedidos de outras variáveis como por exemplo, quantidade de água a movimentar e o fluxo da mesma.

As figuras 6.8 e 6.9, representam os blocos de baixo nível que são os *drivers*, tanto dos *thrusters* como do VBS. A principal função destes blocos é fazer a comunicação direta com o *hardware*, ler dados de monitorização dos mesmos e disponibiliza-los para melhor execução das manobras implementadas.

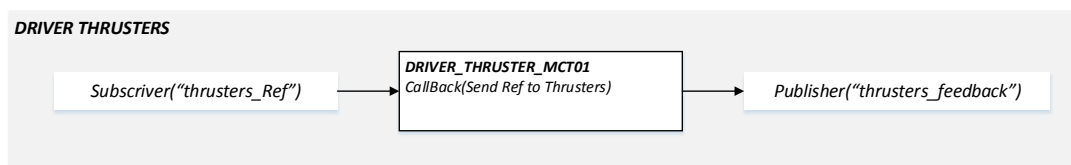
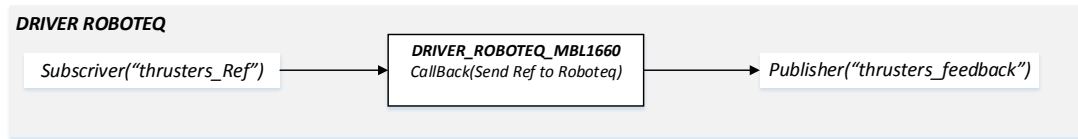


Figura 6.8: Arquitetura *driver thrusters*.

Figura 6.9: Arquitetura *driver VBS*.

6.3 Manobras

Executar determinadas missões sem intervenção de um operador, contribui para um acréscimo das capacidades inerentes às necessidades de carácter militar, civil ou científicas. Abrangendo estes três grupos mencionados anteriormente o TURTLE pode desenvolver missões tais como:

- Permanecer no fundo do oceâneo por um determinado período e realocar a sua posição para outra zona do oceano;
- Além da sua realocação no fundo do oceânico pode também executar missões para a permanência na coluna de água;
- Durante o período que esta no fundo oceânico poderá recolher dados de monitorização ambientais, biológicos, sísmicos, etc;
- Poderá incorporar um novo módulo de sensores (e.x *MarinEye*) e tomar decisões baseadas no módulo incorporado;
- Transporte de cargas para o fundo oceânico, é também uma possível missão, devido ao seu *payload* de 200kg;
- Outra missão em que o TURTLE poderá estar inserido é no apoio à navegação subaquática juntamente com outros veículos.

Para todas estas e muitas outras missões que o TURTLE poderá estar abrangido é necessário dividir determinados comportamentos do TURTLE em pequenas manobras em que a sequência das mesmas, resultam em missões como as mencionadas anteriormente.

- **LAND**

Esta manobra é responsável por aterrar o TURTLE. Dependendo do seu nível de exigência, pode através de sensores batimétricos analisar o fundo do oceano e

perceber se o local é propício a uma aterragem suave e segura tanto para o veículo como para o meio envolvente.

- ***ANCHOR***

Permanecer no fundo do oceano por longos períodos de tempo é um dos principais objetivos do TURTLE. Para isso e em muitos casos é importante que este fique fixo ao chão, evitando que seja movido pela corrente. Para esses casos existe esta manobra que além de encher o tanque de lastro do VBS, pode também ativar outros tipos de mecanismos (futuramente implementados) que o permitem estar fixo ao solo.

- ***UNDOCK***

Manobra inversa da anterior. Sempre que é feito um ***ANCHOR***, posteriormente para mover o TURTLE de posição, é necessário ter um certo cuidado para que este não fique enterrado no solo. Desta forma esta manobra faz uso do VBS e dos *thrusters* até que esteja numa posição segura de realizar outro tipo de manobra.

- ***SUBMERGE***

Esta manobra é usada para submergir o TURTLE, quando este está à superfície. Dependendo da missão, poderá executar esta manobra de uma forma mais rápida usando os *thrusters* verticais para submergir até ficar completamente coberto de água, ou de uma forma mais lenta usando o VBS. Corresponde à transição entre o estado à superfície e completamente submerso.

- ***EMERGE***

É a manobra equivalente à *SUBMERGE*, mas neste caso para a transição entre o estado submersível e a superfície. Esta manobra limita a velocidade de subida do TURTLE usando os *thrusters* verticais para uma ascensão em segurança.

- ***DIVE***

Manobra usada para o TURTLE executar descidas na coluna de água para grandes profundidades. Numa primeira fase faz uso do VBS para encher o reservatório e assim atingir mais velocidade vertical, e numa segunda fase usa os *thrusters* verticais para uma aproximação mais suave à profundidade desejada.

- ***ASCEND***

Manobra inversa da anterior, mas neste caso usada para a subida vertical do TURTLE na coluna de água.

- **NEUTRAL**

Esta manobra é usada para colocar o TURTLE neutro, podendo ser grande parte das vezes usada para colocar o TURTLE com flutuabilidade neutra na coluna de água. Para realização desta manobra o TURTLE usa os *thrusters* verticais de forma a permanecer numa determinada profundidade e consoante a flutuabilidade do TURTLE, este retira ou introduz água no tanque VBS, até obter a posição correta e não ser necessário a atuação nos *thrusters*, para que o TURTLE se mantenha na mesma posição.

- **HOVER**

Mesmo com o TURTLE neutro, as correntes existentes na coluna de água provocam um movimento involuntário no mesmo. Desta forma a manobra *HOVER*, usa os *thrusters* verticais como horizontais para manter uma determinada posição pré-determinada evitando o movimento do TURTLE na coluna de água.

- **GOTO**

Esta manobra recorre apenas ao sistema de propulsão (*thrusters*), para movimentar o veículo para a posição desejada. Tanto pode ser usada no movimento vertical como horizontal. Para grandes exatidões na posição em Z , é usual recorrer a esta manobra.

Outro aspeto a ter em conta no desenvolvimento do *software* para o veículo TURTLE é a sua interface com o utilizador. Esta ainda se encontra em fase de desenvolvimento, contudo é possível de uma forma rápida e simples o carregamento de uma determinada missão, preenchendo apenas o ficheiro (*yaml* - linguagem de marcação estruturada) que se encontra mostrado na Figura 6.10.

1: nManeuvers: 3	▷ Qtd. de manobras
2: typeManeuver: [6, 13, 7]	▷ ID de cada manobra
3: wayPoint_x: [0, 0, 0]	▷ WayPoint em X
4: wayPoint_y: [0, 0, 0]	▷ WayPoint em Y
5: wayPoint_z: [0, 0, 5]	▷ WayPoint em Z
6: vel_x: [0, 0, 0]	▷ Vel em X
7: vel_y: [0, 0, 0]	▷ Vel em Y
8: vel_z: [0, 0, 0]	▷ Vel em Z
9: heading: [0, 0, 0]	▷ Heading
10: timeOut: [15, 15, 15]	▷ Tempo máximo de execução
11: velMax: [20, 0, 20]	▷ Velocidade máxima
12: threshold: [1, 0, 1]	▷ Erro máximo
13: heightFloor: [5, 0, 0]	▷ Altura do fundo
14: liters: [1, 0, 1]	▷ Qtd. litros do reservatório

Figura 6.10: Exemplo de um ficheiro tipo *yaml* de uma missão.

Fazendo uso de todas estas manobras, é possível criar missões ou até mesmo outro tipo de manobras compostas que permitem usar o TURTLE para realização de determinadas tarefas, como por exemplo: *REPOSITION*, *BOTTOM FOLLOW*, *SURVEY* (mapeamento, batimetria, detecção de determinados componentes no solo oceânico, etc).

Todas estas manobras poderão ter níveis de robustez diferentes, possibilitando criar um TURTLE mais autónomo e mais capaz de lidar com dificuldades não previstas. Podendo até o próprio TURTLE possuir uma camada de avaliação se determinada manobra pode ou não ser executada, mediante variáveis que possam por em causa o sucesso da manobra, como por exemplo, energia disponível, entre muitas outras. Contudo este processo não será abordado nesta dissertação.

6.4 Controlador PID

Um sistema de controlo tem como principal objetivo, manter um determinado processo dentro dos parâmetros desejados. Para este fim, existem várias técnicas de controlo como: *Linear Quadratic Regulator*, *Backstepping*, *Sliding Mode*, *Fuzzy* e PID, sendo esta última usada nas execuções das manobras desta dissertação. O Controlador PID, é bastante usado em inúmeras aplicações que requerem um controlo linear eficaz e robusto numa ampla gama de condições de funcionamento e que tem como grande vantagem o facto de não ser necessário o conhecimento do modelo do sistema. A técnica do contro-

lador PID consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir do valor desejado e do valor atual da variável do processo. Este valor de atuação sobre o processo é transformado num sinal adequado ao atuador em questão (PWM, tensão, etc). A afinação dos parâmetros do PID, (K_p, K_i, K_d) , é feita através sobretudo empiricamente, contudo existem alguns processos que facilitam a obtenção dos parâmetros [58].

O sinal de controlo gerado pelo controlador PID é dado pela seguinte equação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.1)$$

onde:

- u - sinal a controlar;
- e - erro de controlo (diferença entre variável do processo e valor desejável);
- K_p - Ganho proporcional;
- K_i - Ganho integral;
- K_d - Ganho derivativo;

Como é perceptível pela equação anterior este controlador é composto por três ações de controlo: proporcional, integrativa e derivativa. Com este tipo de controlador pode-se obter quatro tipo de configurações possíveis:

- P - Proporcional;
- PI - Proporcional e integral;
- PD - Proporcional e derivativo;
- PID - Proporcional, integral e derivativo;

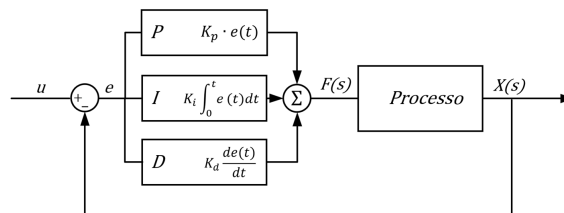


Figura 6.11: Diagrama de blocos de um controlador PID.

6.4.1 Ação Proporcional

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (6.2)$$

Esta ação do PID, produz um valor na saída proporcional ao erro obtido na realimentação. A resposta proporcional pode ser ajustada a partir da constante de ganho K_p . Quanto maior a constante K_p , maior será o ganho do erro e mais instável será o sistema. Contudo se o valor da constante for muito pequeno, maior será o tempo de resposta.

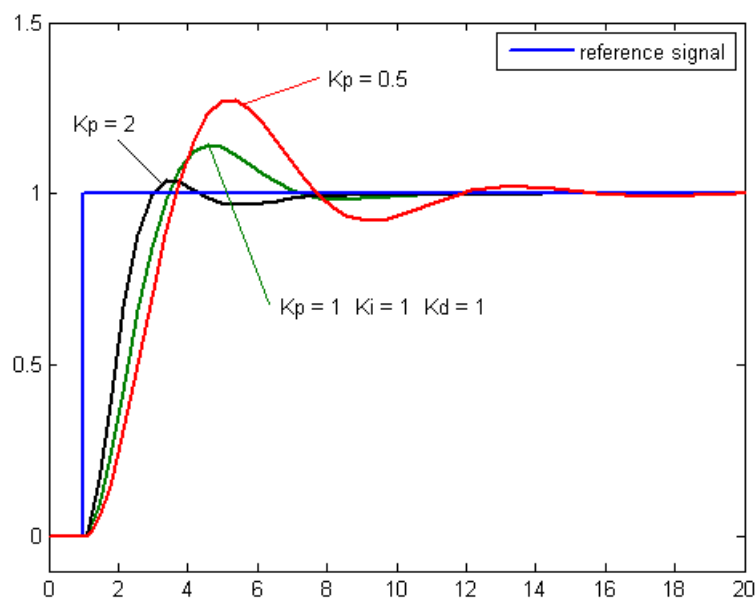


Figura 6.12: Ação proporcional com variação do K_p [59].

6.4.2 Ação integral

$$I_{out} = K_i \int e(t) dt \quad (6.3)$$

A função integral soma todos os erros instantâneos sendo esse somatório multiplicado pela constante K_i . A função integral do controlador PID acelera o movimento do processo até o ponto desejado e elimina o erro que ocorre na função anterior. Como a função soma dados instantâneos, o resultado do processo pode ultrapassar o ponto desejado. Essa consequência se chama *overshoot*. A Figura 6.13 mostra um gráfico com uma entrada (linha azul) e as saídas com K_i de vários valores.

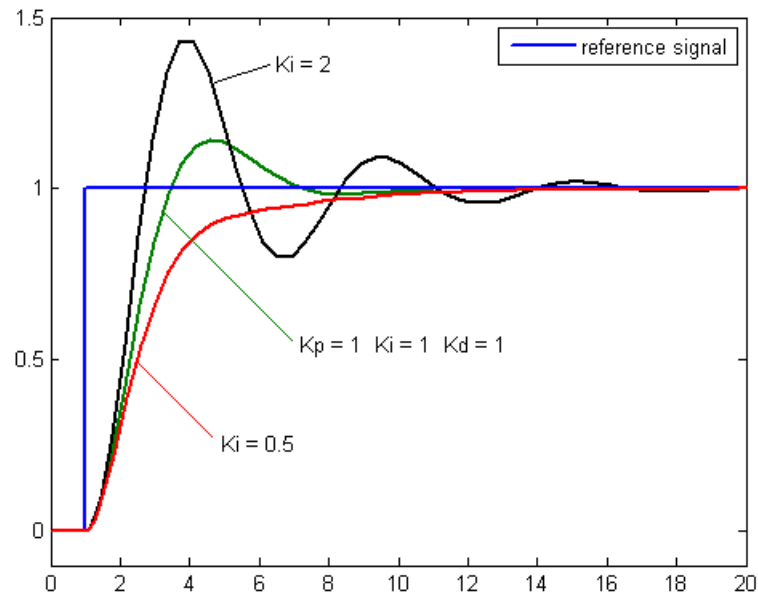


Figura 6.13: Ação integral com variação do K_i [59].

6.4.3 Ação derivativa

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.4)$$

A função derivativa retarda a taxa de variação de saída do controlador. Essa função diminui o *overshoot* da função anterior e melhora a estabilidade do controlador. Por outro lado, a função derivativa causa um retardo na resposta e é muito suscetível à ruídos. Isto acontece porque essa função amplifica o ruído e caso o ruído e o ganho K_d forem muito grandes, podem causar instabilidade no controlador. A Figura 6.14 mostra um gráfico com uma entrada (linha azul) e as saídas geradas pela função.

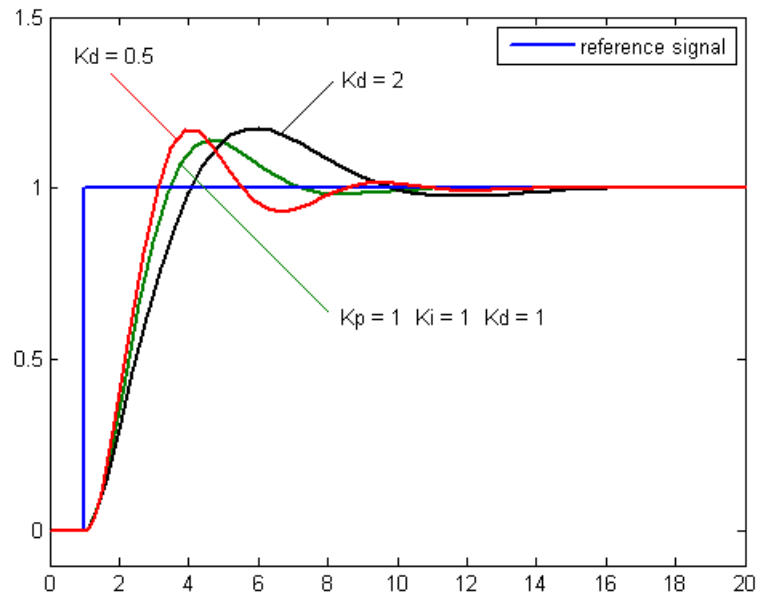


Figura 6.14: Ação derivativa com variação do Kd [59].

6.4.4 Resumo das características do PID

As ações do PID podem ser vistas como sendo realizadas por controladores independentes:

- 1. Um controlador proporcional Kp irá reduzir o tempo de subida, mas não elimina o erro em regime permanente;
- 2. Um controlador integral Ki , irá eliminar o erro em regime permanente, mas irá piorar a resposta transitória;
- 3. Um controlador derivativo Kd terá o efeito de aumentar a estabilidade do sistema, reduzindo o *overshoot* e melhorando a resposta transitória;

As quatro características mais importantes que definem a resposta de um controlador PID são [60]:

- Tempo de Subida - o intervalo de tempo para que a saída do sistema suba além dos 90% do nível desejado;
- *Overshoot* - quanto o nível de pico é superior ao estado estacionário face ao estado estacionário;

- Tempo de estabelecimento - tempo necessário para que o sistema converja para o estado estacionário;
- Erro do estado estacionário - diferença entre a saída do estado estacionário e a saída desejada;

Tabela 6.1: Comportamento do controlador PID face à variação (aumento) dos parâmetros K_p , K_i , K_d .

Parâmetro	Tempo de subida	<i>Overshoot</i>	Tempo de estabelecimento	Erro do estado estacionário
K_p	diminui	aumenta	pequena variação	diminui
K_i	diminui	aumenta	pequena variação	diminui
K_d	pequena variação	diminui	diminui	pequena variação

Contudo é importante realçar que nem sempre o aumento dos parâmetros mencionados na tabela anterior (6.1) correspondem ao comportamento desejado, isto porque todos os sistemas são diferentes gerando assim comportamentos diferentes.

Capítulo 7

Simulação

O modelo de simulação desenvolvido teve por base a arquitetura do *software* implementado no TURTLE (capítulo 6). Este modelo tem como objetivo testar múltiplas manobras de locomoção com diversos métodos de controlo sem a necessidade de recorrer ao veículo real.

Foi desenvolvido um modelo de simulação do TURTLE, tendo em vista estudar o comportamento do veículo e validar o controlo. Desta forma recorreu-se ao *software Matlab/Simulink*, que permite a simulação de sistemas não lineares complexos, possuindo uma interface simples e poderosa.

A organização da simulação pode ser visualizada na Figura 7.1. O bloco "*Interface Manual*" contém a interface com o *joystick* de forma a possibilitar o controlo manual realizado pelo utilizador. O bloco "*Manager Mission*" gere as várias missões a serem executadas pelo veículo, que por sua vez cada missão tem um conjunto de manobras que estão detalhadas no bloco "*Description Maneuvers*". O bloco "*Turtle Vehicle*" representa o modelização do veículo TURTLE com os seus principais componentes. O bloco "*Plots Visualization*" é responsável pela apresentação gráfica dos resultados. A simulação foi abordada tendo em conta um ambiente ideal, sem perturbações de forças externas, exceto do VBS e *thrusters* assim como alguma incerteza no modelo dinâmico do VBS (bomba + reservatório) e do sistema de propulsão (*thrusters*).

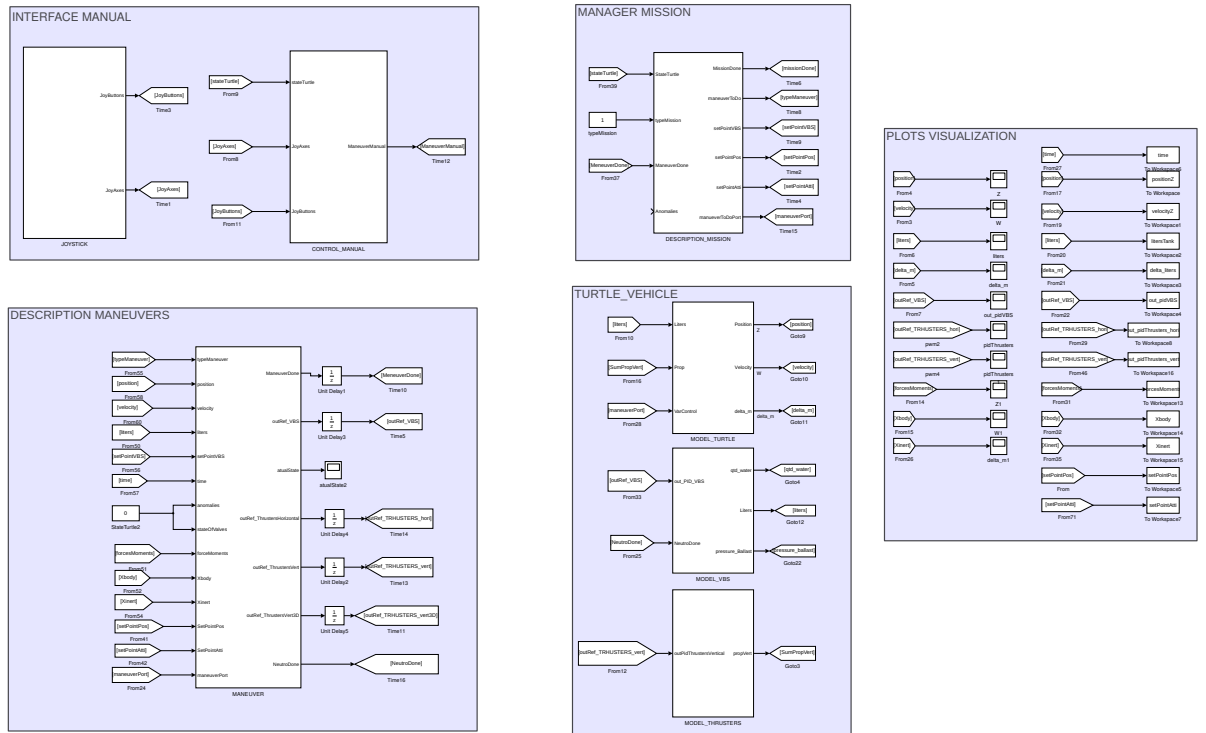


Figura 7.1: Blocos *Simulink* do simulador do sistema.

7.1 Modelação do movimento vertical do TURTLE

No que respeita ao veículo TURTLE, para simulação teve-se em conta a modelização do VBS (bomba + reservatório), *thrusters* e uma aproximação da geometria do veículo.

Na Figura 7.2 encontra-se o diagrama da simulação em *simulink*, relativamente ao VBS.

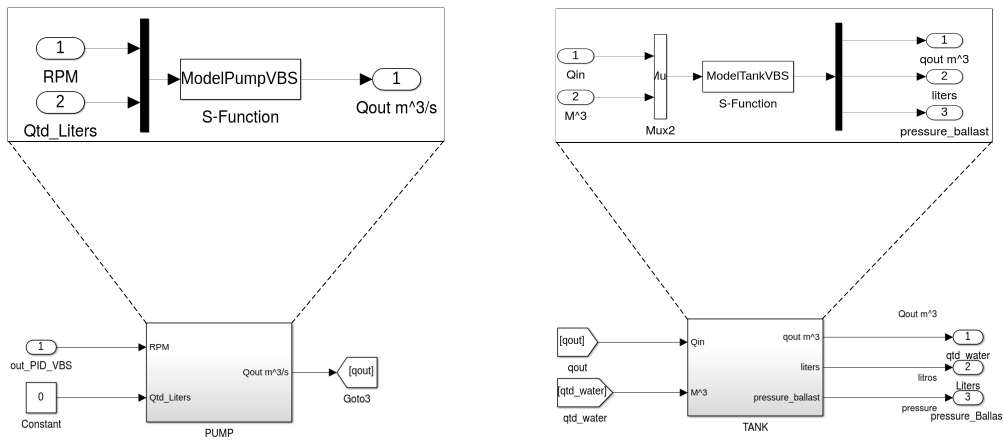


Figura 7.2: Diagrama da simulação do VBS.

A bomba recebe os valores provenientes de uma saída de um controlador que resulta numa rotação e que por sua vez produz um fluxo de água ao longo do tempo. Esse fluxo posteriormente serve de entrada para o depósito que vai integrando esse fluxo ao longo do tempo para obter a quantidade de água armazenada. Na saída do depósito resulta a quantidade de água assim como a pressão existente dentro do mesmo.

Baseado na equação de *Bernouli*, obtém-se a equação do fluxo (7.1):

$$q_{out} = a\sqrt{2 * g * h} \quad (7.1)$$

onde a representa a seção do tubo, g , gravidade e h altura do depósito.

Relativamente à modelização dos *thrusters*, esta foi gerada através de uma função linear tendo por base o gráfico mencionado no capítulo 4, na Figura 4.14. Na Figura 7.3, é apresentado o bloco de *simulink* em que recebe o valor de referência dos *thrusters* e traduz em força para criar o movimento em *heave*.

Para o modelo do TURTLE, nos testes iniciais, optou-se por uma decomposição simples, assumindo que o movimento vertical no veículo apenas depende da variação da massa, ou seja introdução de água no cilindro e da força de propulsão. Não só para o modelo do TURTLE, mas também de outros sistemas, nomeadamente o VBS, recorreu-se a blocos do *Simulink* do tipo "*S-function*", para calculo da evolução do sistema em função dos seus estados e das entradas. Este bloco "*S-function*" tem uma estrutura pré-definida e que durante a sua execução, percorre diversas funções baseadas na *flag* interna do bloco. Este bloco permite a implementação de um sistema dinâmico genérico.

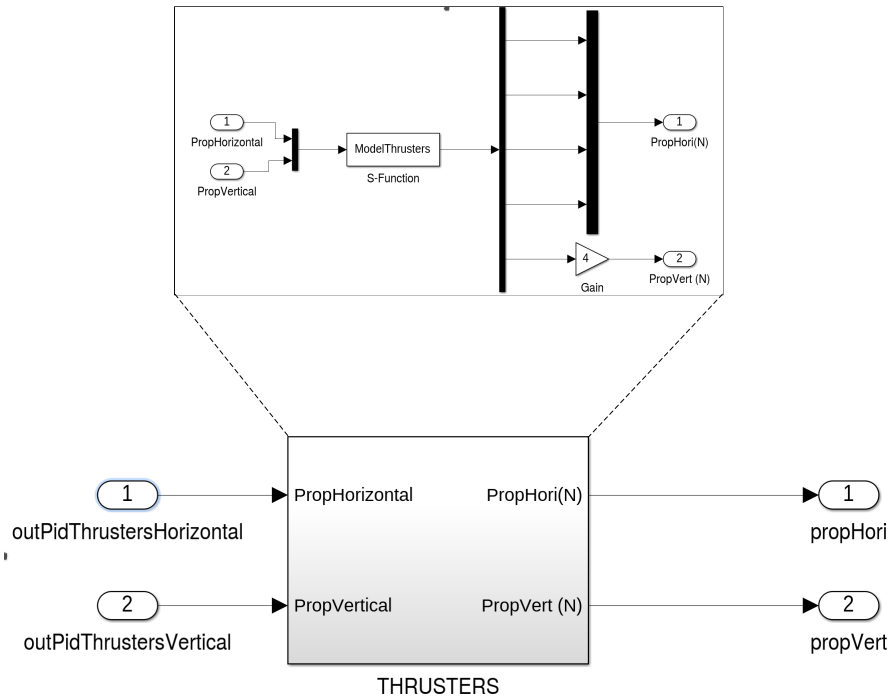


Figura 7.3: Diagrama da simulação dos *thrusters*.

O sistema possui duas entradas (variação de massa no VBS e força de propulsão nos *thrusters*).

$$\begin{cases} u(1) = \Delta_m \\ u(2) = F_{prop} \end{cases} \quad (7.2)$$

e como estados tem-se que:

$$\begin{cases} x(1) = \textit{posição} \\ x(2) = \textit{velocidade} \end{cases} \quad (7.3)$$

neste caso particular, as saídas do sistema, são os próprios estados:

$$\begin{cases} y(1) = \textit{posição} \\ y(2) = \textit{velocidade} \end{cases} \quad (7.4)$$

Baseado na nomenclatura *SNAME(1950)* tem-se que Z , corresponde à posição ver-

tical do veículo e w à velocidade, também vertical. O que quer dizer que:

$$\begin{cases} w = \dot{Z} \\ \dot{w} = \text{aceleração vertical} \end{cases} \quad (7.5)$$

Tendo em conta a segunda lei de Newton, obtém-se a equação diferencial do sistema:

$$(\Delta_m + m) * \ddot{Z} = F_W - F_B - F_D + F_{prop}; \quad (7.6)$$

em que:

- Δ_m = variação de massa, ou seja litros que são introduzidos no depósito
- $F_W = m * g$;
- g = gravidade;
- $F_B = Vol * \rho * g$;
- Vol , volume do veículo;
- $F_D = \frac{1}{2} * C_D * A * \rho * v|v|$, em que C_D corresponde ao coeficiente de *drag*, A é área de superfície em contacto com a água ρ , densidade do fluído e v , velocidade;
- F_{prop} = Força propulsores (*thrusters*).

Resolvendo a equação 7.6, em ordem à aceleração obtem-se:

$$\ddot{Z} = \frac{(\Delta_m * g) - F_D + F_{prop}}{m} \quad (7.7)$$

Considerando a observação de 7.5, obtem-se a seguinte equação de espaço de estados:

$$\begin{cases} \dot{Z} = x(2) \\ \dot{W} = \frac{(\Delta_m * g) - F_D + F_{prop}}{m} \end{cases} \quad (7.8)$$

Na Figura 7.4, é apresentado o bloco da *S-function*, responsável pela solução da equação (7.8). Tem-se como entrada $u(1)$, ou seja os litros que são traduzimos em massa (Δ_m) e $u(2)$ o valor de propulsão vertical. Após a *S-function*, obtem-se as saídas anteriormente mencionadas: posição e velocidade.

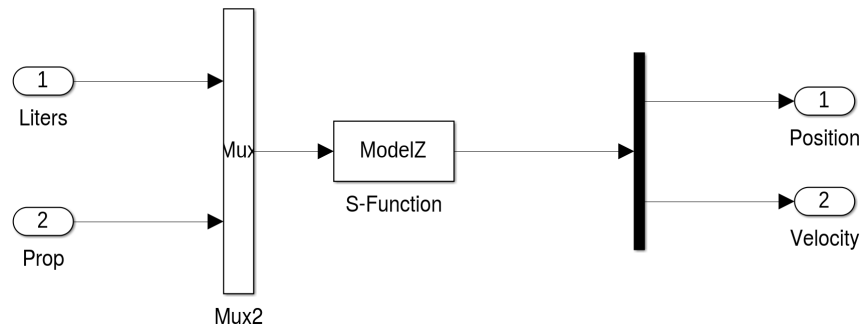


Figura 7.4: Diagrama da simulação do movimento vertical do TURTLE.

7.2 Tuning do controlador PID

Uma das dificuldades que surgem na utilização de controladores PID, refere-se ao ajuste dos ganhos K_p , K_i e K_d . Para cálculos desses ganhos, nesta dissertação, optou-se pelo método *Ziegler-Nichols* desenvolvido em 1942 [61]. Este método baseia-se na resposta ao degrau unitário de um sistema estável e com saída da planta em forma de "S" em malha aberta e é caracterizado por dois parâmetros L - tempo de atraso e T , constante de tempo, os quais são determinados como mostra a Figura 7.5.

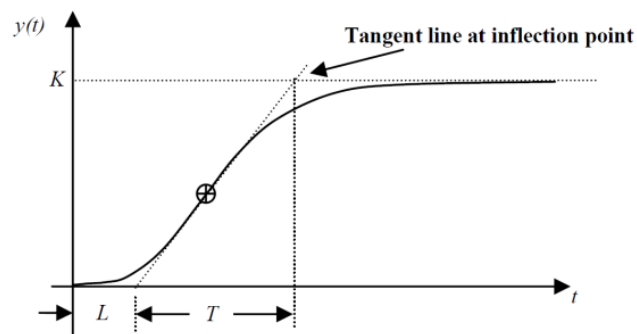


Figura 7.5: Método Ziegler-Nichols [62].

Após obter os valores de L e T , facilmente é possível calcular os respectivos ganhos, pela forma proposta por Ziegler e Nichols, mencionados na tabela 7.1.

Tabela 7.1: Cálculos dos ganhos PID propostos por Ziegler-Nichols [61].

Tipo de Controlo	K_p	T_i	K_d
P	T/L	∞	0
PI	0.9(T/L)	L/0.3	0
PID	1.2(T/L)	2L	0.5L

7.3 Controlo thrusters

Na figura 7.6, pode-se observar três tipos de resposta do sistema com três ganhos diferentes para a profundidade de 100 metros. Não recorrendo ao uso de nenhum método de afinação e seleccionando ganhos de uma forma iterativa, pode-se observar que o sistema convergiu para a profundidade desejada, mas com bastante oscilação. Recorrendo ao método Ziegler-Nichols, conclui-se que existe uma boa prestação na resposta do sistema. Não existe qualquer tipo de *overshoot*, o tempo de estabelecimento é aceitável, contudo existe um pequeno erro estacionário ($\approx 0.6m$) entre saída do sistema e a profundidade desejada. De forma a melhorar ainda mais essa resposta e uma vez que já eram conhecidos os ganhos para uma resposta aceitável, ajustou-se novamente os ganhos de forma a obter uma resposta que reduz o erro para (≈ 0.1) metros.

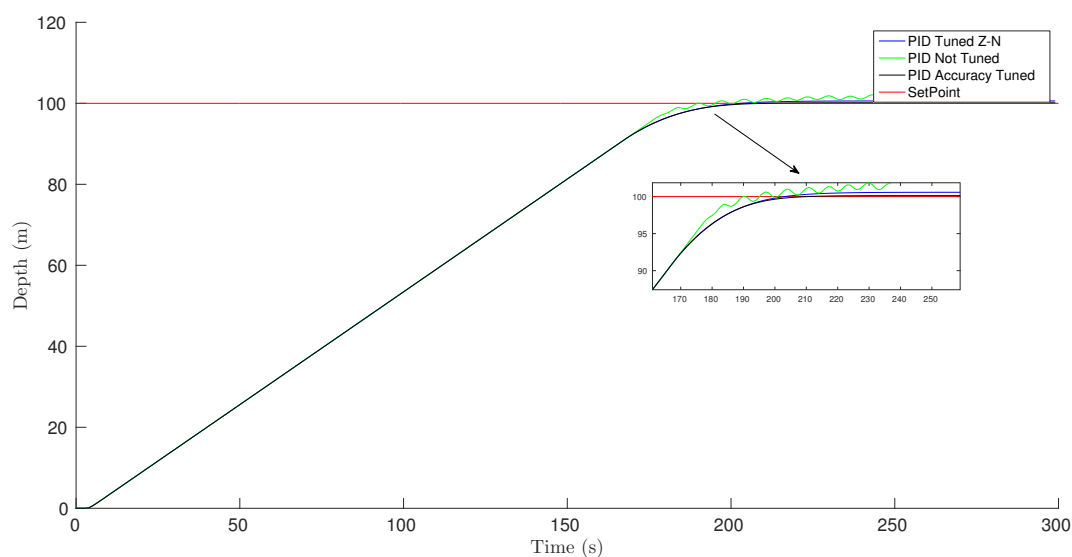
Figura 7.6: Diferentes ganhos para a mesma posição (*thrusters*).

Tabela 7.2: Ganhos usados para o resultado da Figura 7.6.

Descrição	K_P	K_I	K_D
PID <i>Tuned Z-N</i>	19.8	0.1250	2
PID <i>Accuracy Tuned</i>	18	0.0250	1.5

Em muitas aplicações práticas do veículo TURTLE, mais importante do que o erro existente no processo, é também a resposta do controlador. Isto é, a resposta de um controlador será na maior parte das vezes as referências enviadas para um determinado atuador, neste caso, os *thrusters*. Ou seja, se a saída do controlador for uma resposta com bastante variação, prejudicará fisicamente o equipamento em questão.

7.4 Controlo VBS

Relativamente ao controlador do VBS, este difere um pouco do controlo do sistema de propulsão, principalmente pelo grande tempo de reação à resposta do controlador. Na Figura 7.7 pode-se visualizar o comportamento do sistema, quando recorrendo a um controlador do tipo PID ou do tipo PD. Como se pode verificar, utilizando a ação integral este tende a ter um *overshoot* maior e o seu erro tende a diminuir mas muito lentamente. Enquanto o controlador PD, tem um comportamento mais lento, ou seja o tempo de estabelecimento é maior, mas tem um erro estacionário muito menor.

Tabela 7.3: Ganhos usados para o resultado da Figura 7.7.

Descrição	K_P	K_I	K_D
<i>Controller</i> PID	30	3.5	35
<i>Controller</i> PD	30	0	35

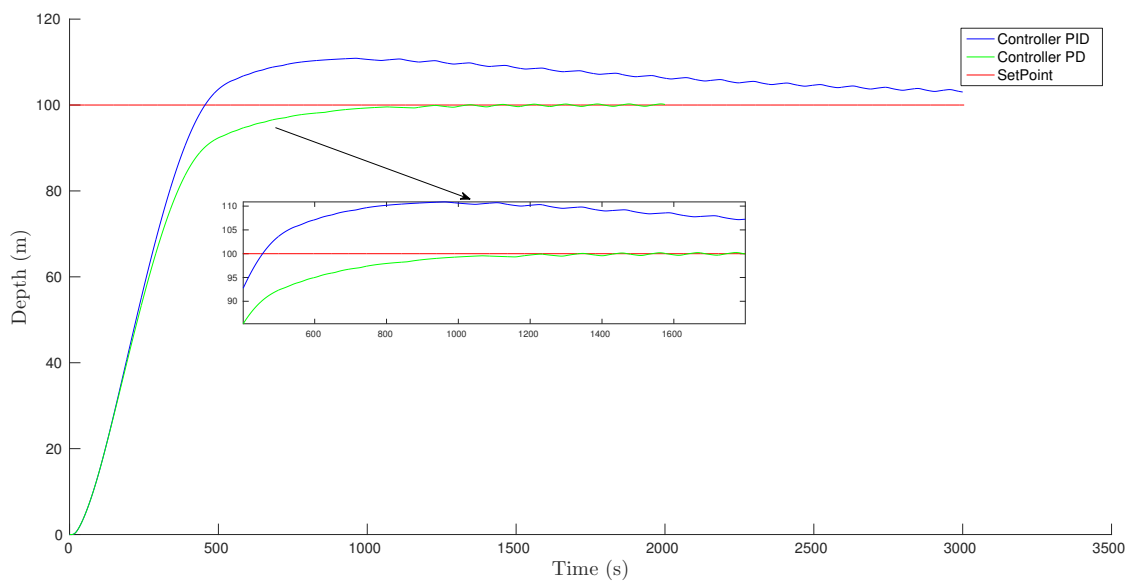


Figura 7.7: Afinação do controlador para o VBS.

Analisando a Figura 7.8, pode-se concluir que a saída do controlador contém oscilação e que não converge para zero, devido ao controlador não conseguir resolver o erro estacionário. Em simulação, recorrendo a técnicas de controlo, muitas vezes obtêm-se boa precisão no valor desejado do processo, contudo por vezes a resposta dos controladores têm bastante oscilação e com grande frequência que pode vir a danificar componentes mecânicos. E neste caso em particular, do VBS instalado no TURTLE, sempre que existe uma variação na direção do fluido (introduzir ou retirar água), é necessário parar o motor, comutar válvulas e só depois rodar o motor para a direção pretendida. Para realização deste processo é necessário um tempo de aproximadamente 3 segundos, o que atrasa ainda mais a reação do sistema. Tendo em conta a aplicação no mundo real do TURTLE, mais importante que a grande precisão (<0.5 metros) em profundidade é a sua robustez e a eficácia na realização das missões.

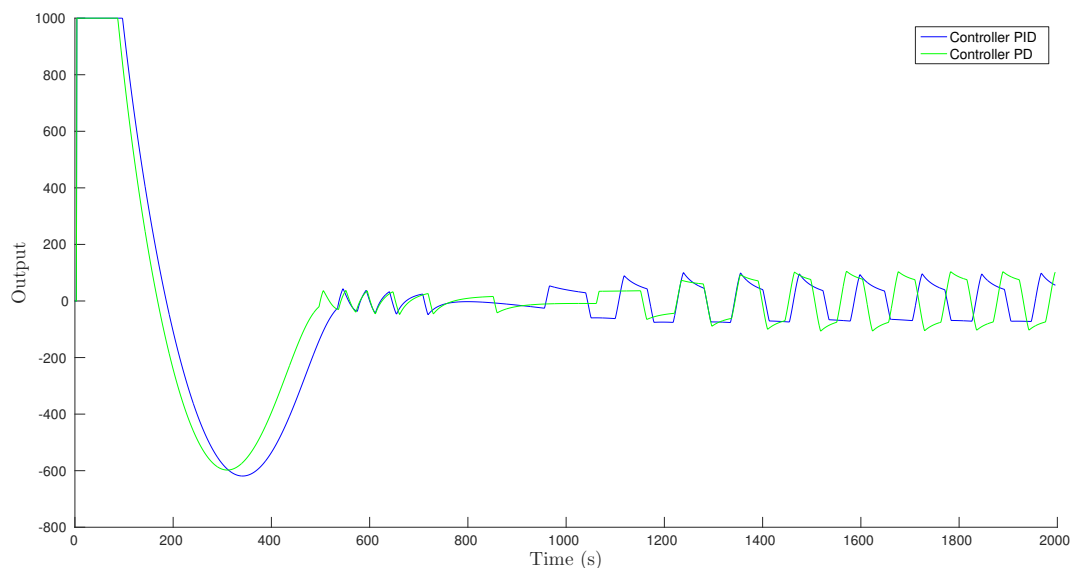


Figura 7.8: Saída do controlador para o VBS.

7.5 Manobras Compostas

Como já explicado no capítulo 6, o controle do TURTLE é constituído por um conjunto de manobras que podem ser usadas para compor a missão pretendida. Como mencionado anteriormente, e tendo em conta o contexto real do TURTLE, é necessário que essas manobras sejam executadas de uma forma robusta reduzindo o desgaste dos componentes mecânicos e melhorar a eficiência energética do movimento. Desta forma, optou-se por implementar em cada manobra uma máquina de estados, de tal forma a que dependendo do comportamento do veículo (sistema VBS e propulsão), vai transitando entre estados e ajustando os coeficientes dos ganhos e valores desejados de cada controlador. Isto permite uma melhor eficiência no controle e uma prevenção no desgaste mecânico de diversos componentes.

Uma das ferramentas exploradas na simulação em *Simulink* foi o *Stateflow*. Trata-se de um produto incorporado no *Simulink* que tem por finalidade projetar uma máquina de estados finitos. Mais concretamente permite a implementação de uma *StateChart* [63]. Ou seja, com esta ferramenta é possível descrever o comportamento de situações específicas oferecendo de uma forma intuitiva e de fácil compreensão a visualização do procedimento considerado. Cada procedimento pode ser composto por um conjunto de estados, que cada qual define uma circunstancia existente na situação que ocorre em qualquer instante do tempo.

A transição entre os diferentes estados é controlada pelo estado atual em questão ou por outros valores de entrada. Na figura 7.9, pode ser visualizado um exemplo de um bloco *Stateflow*.

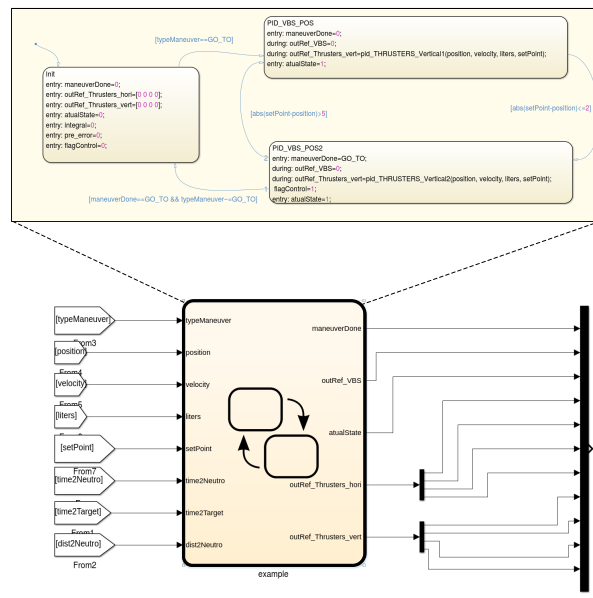


Figura 7.9: Exemplo de um diagrama de estados usando *Stateflow*.

Como se pode constatar pela figura 7.21, a simulação do TURTLE, tem por base três blocos base: *Missions*, *Maneuver* e *Vehicle TURTLE*. No bloco *Missions*, estão descritas todas as missões que o TURTLE poderá realizar. Antes de iniciar qualquer simulação, apenas é necessário mencionar qual a missão a executar, posteriormente a simulação termina quando toda a missão estiver concluída. O bloco *Maneuvers*, contém as manobras que são executados perante a missão pretendida. Cada manobra tem implementado o seu controlador. Tanto o processo de missões como o de manobras está implementado em simulação usando o *Stateflow*, o que facilita a definição de manobras e implementação bem como a simplicidade em acrescentar novas manobras ou missões. Por fim, o modelo dinâmico do TURTLE está contido no bloco *Vehicle TURTLE*. Neste bloco estão também contidos os modelos dos sistemas responsáveis pela movimentação do TURTLE, o sistema de propulsão e o VBS.

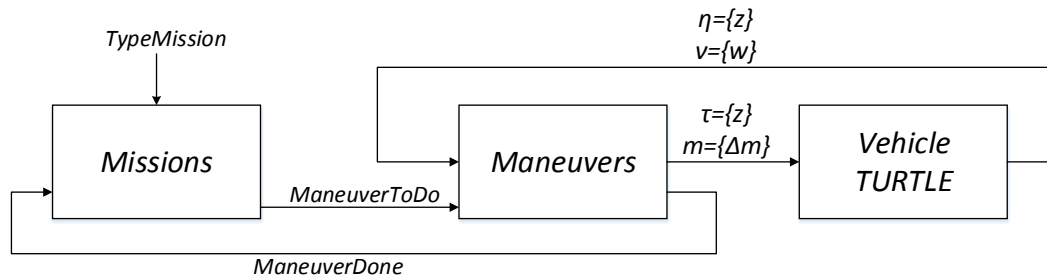


Figura 7.10: Arquitetura do sistema de simulação.

7.5.1 Manobra DIVE

Tendo em conta mais uma vez a eficiência e rebustez que se pretende no controlo do TURTLE a manobra "DIVE" é executada tendo em conta a máquina de estados apresentada na Figura 7.11. Esta manobra está dividida em duas partes: Se a posição desejada for maior ou igual a 132 metros, opta-se por um controlo diferente comparado com posições desejadas inferiores a 132 metros. Enquanto o VBS introduz ou retira água do reservatório, a velocidade vertical do TURTLE tende a variar. Mas quando o reservatório estiver totalmente cheio, haverá um momento em que o TURTLE atinge a velocidade terminal e se mantém até retirar água do reservatório. Sabendo o fluxo da bomba instalada no TURTLE, facilmente se consegue estimar o tempo que demora a esvaziar o reservatório até o TURTLE permanecer neutro. Sabendo também a velocidade terminal do veículo, facilmente se consegue prever quanto tempo este demorará até atingir a posição desejada. Ou seja, quando o tempo para ficar neutro foi maior que o tempo para atingir a posição desejada, é nesse instante que se inicia o processo de retirar a água do reservatório até o veículo ficar neutro.

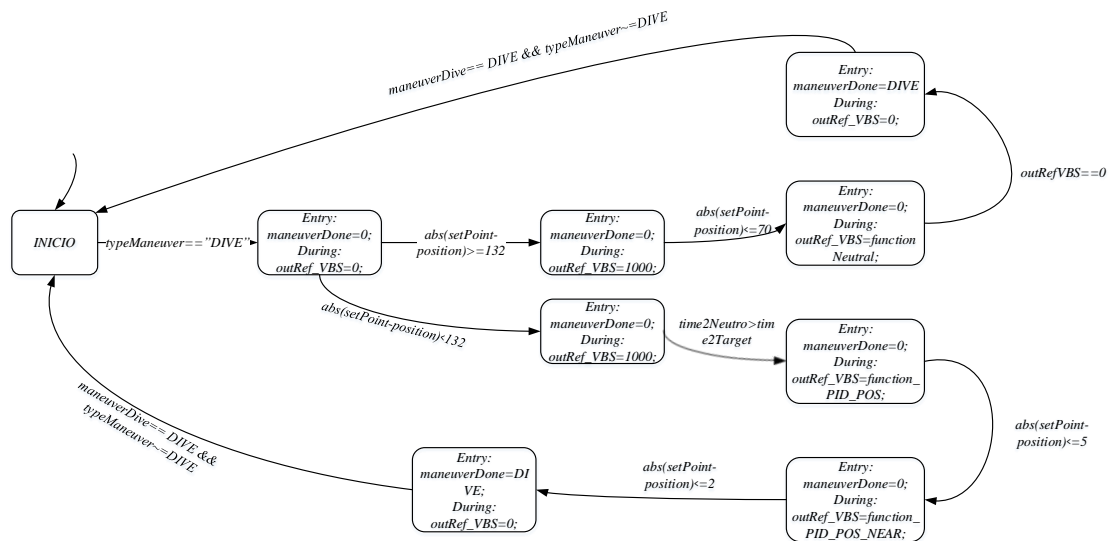


Figura 7.11: Diagrama *Stateflow* da manobra "DIVE".

O resultado da manobra "DIVE" para uma posição inferior a 132 metros é mostrado na Figura 7.12. Como se pode observar, devido à ausência da ação integrador, o erro estacionário mantém-se ao longo do tempo. Contudo a saída do controlador PI contém valores que permitem o VBS ter um comportamento estável sem oscilações como mostrado na Figura 7.8.

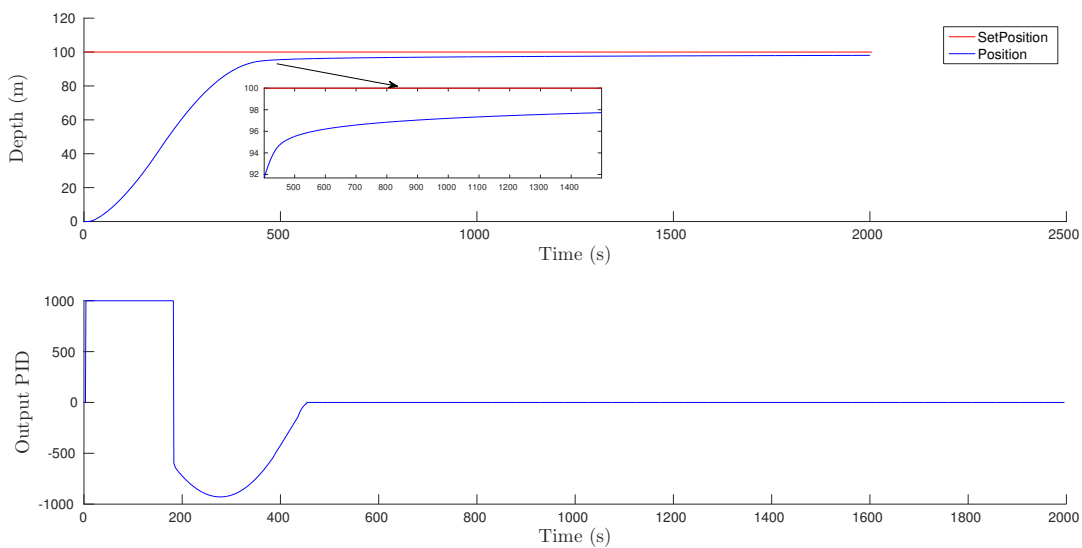


Figura 7.12: Manobra "DIVE".

Em relação á velocidade da manobra "DIVE" para 100 metros, pode-se verificar pela Figura 7.13 que o TURTLE nunca chega a atingir a sua velocidade terminal, isto também porque não continha o reservatório cheio.

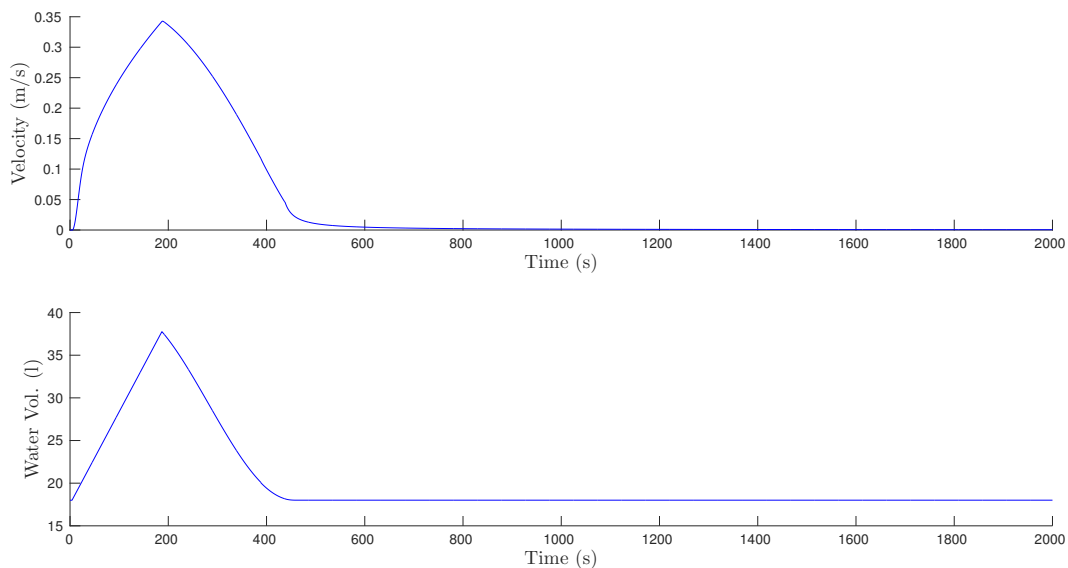


Figura 7.13: Velocidade vs volume de água.

7.5.2 Manobra DIVE para 1000 metros

Na Figura 7.14 é possível observar-se o comportamento do TURTLE para profundidade de 1000 metros (profundidade máxima do TURTLE). Como se pode verificar obtêm-se uma boa exatidão na posição.

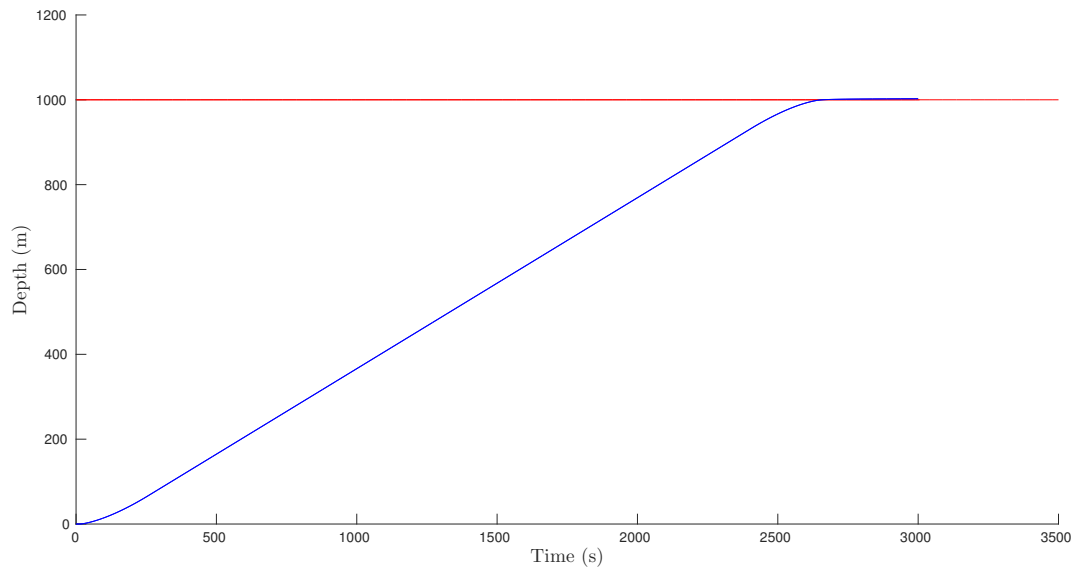


Figura 7.14: Posição do veículo para 1000 metros usando apenas o VBS.

Além da boa exatidão, o tempo em que a bomba está em funcionamento é muito pouco, isto para profundidades de 1000 metros. Ou seja, para atingir a profundidade de 1000 metros, durante todo o percurso a bomba está inativa durante 80% do processo o que torna o seu movimento em *heave* muito eficiente.

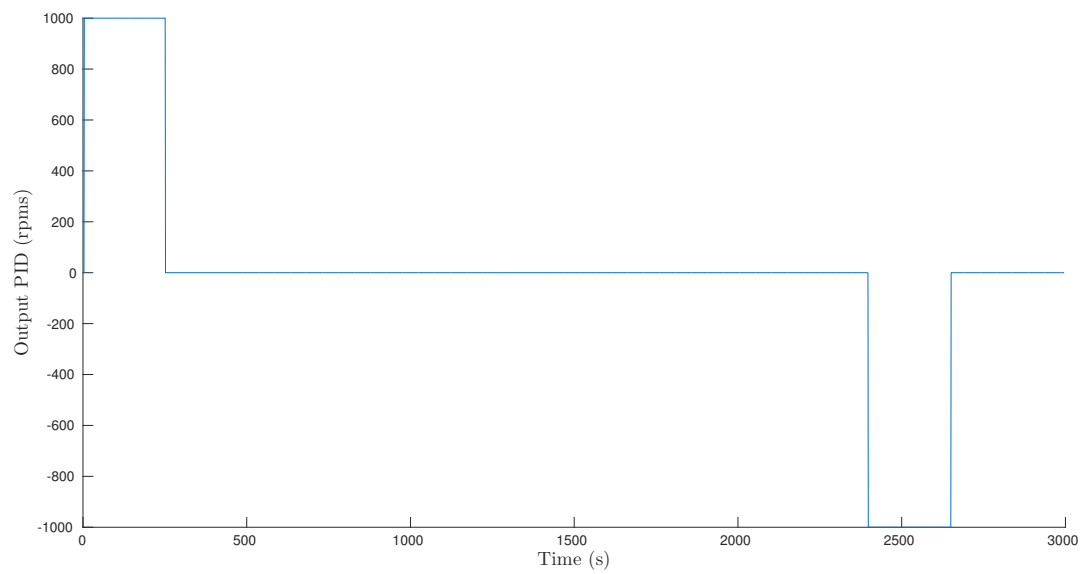


Figura 7.15: Saída do controlador PID.

Relativamente à velocidade, como era de esperar, atinge a velocidade terminal quando o reservatório fica totalmente cheio.

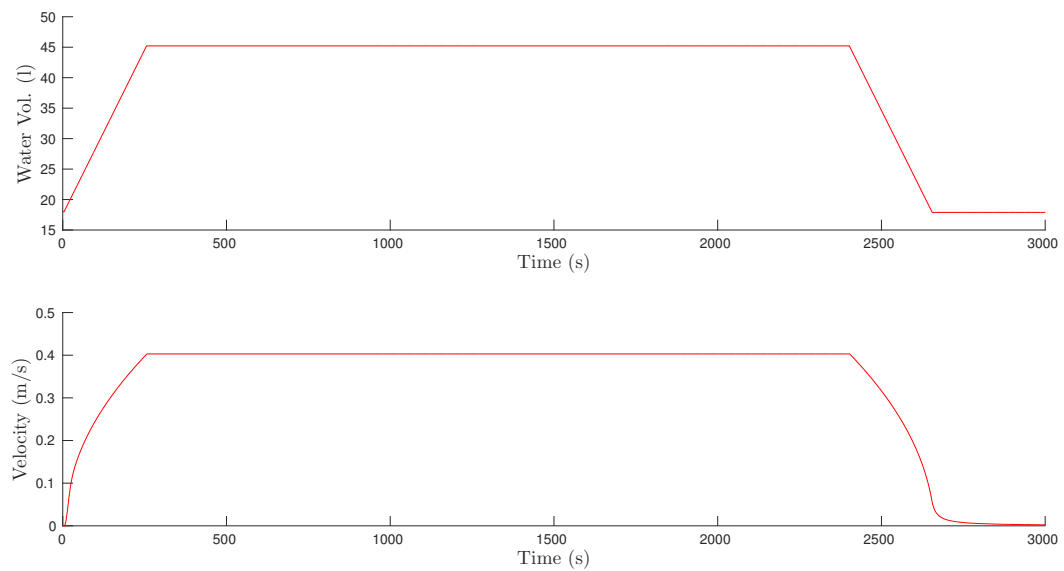


Figura 7.16: Velocidade e volume de água.

7.5.3 Manobra DIVE e GOTO

Nesta secção será explicado a junção de duas manobras: "DIVE" e "GOTO". Como já explicado anteriormente, apenas com a manobra "DIVE" não é possível alcançar com exatidão a profundidade desejada, pelo menos para profundidades inferiores a 132 metros. Para isso é possível recorrer ao sistema de propulsão para alcançar a profundidade desejada. Relativamente à manobra "DIVE" o seu processo de execução em máquina de estados já foi mencionado na figura 7.11, quando à máquina de estados da manobra "GOTO", esta pode ser observada na Figura 7.17. Como é possível observar, para esta manobra existem um controlador PID para erros maiores que 5 metros e outro para erros inferiores a 2 metros.

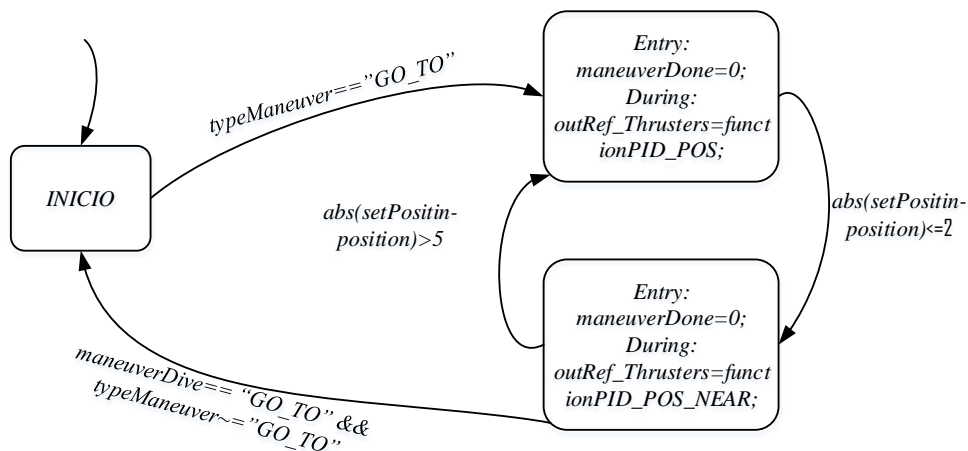


Figura 7.17: Diagrama *StateFlow* da manobra "GOTO".

O resultado destas duas manobras pode ser observado na Figura 7.18. Como se pode verificar é notável a mudança da manobra "DIVE" para a "GOTO". Ou seja, inicialmente é executada a manobra "DIVE" e quando termina a sua execução o próprio gestor de missões inicia a nova manobra ("GOTO").

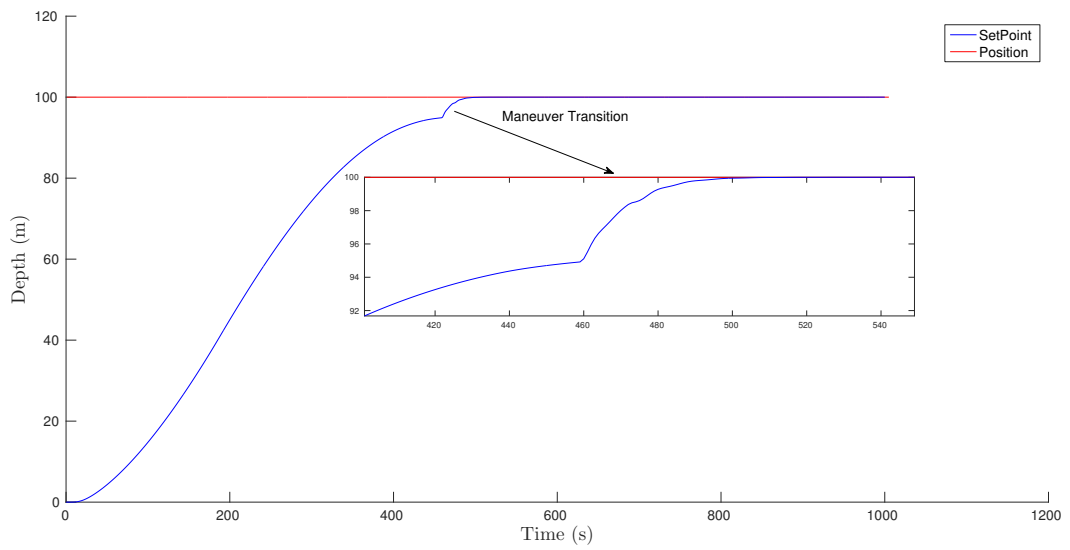


Figura 7.18: Posição do veículo usando VBS e *Thrusters*.

Quanto à saída dos controladores, tanto do VBS como sistema de propulsão, obtém-se uma resposta moderada, sem grandes oscilações.

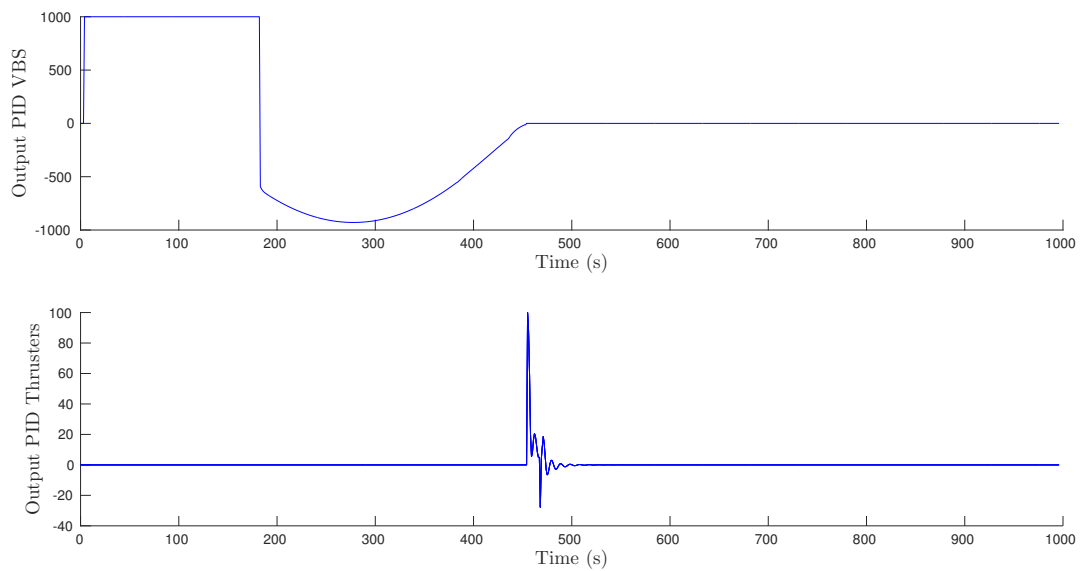


Figura 7.19: Saída do controlador PID do VBS vs *thrusters*.

7.5.4 Manobra SUBMERGE

Outro conceito importante a validar em simulação, é o facto do veículo utilizar o VBS e o sistema de propulsão em simultâneo. Este processo é realizado na manobra "SUBMERGE". Ou seja, nesta manobra o veículo recorre à força dos *thrusters*, e em simultâneo ao VBS para introduzir água no interior do reservatório. Isto permite um aumento na eficiência do tempo da submersão do veículo.

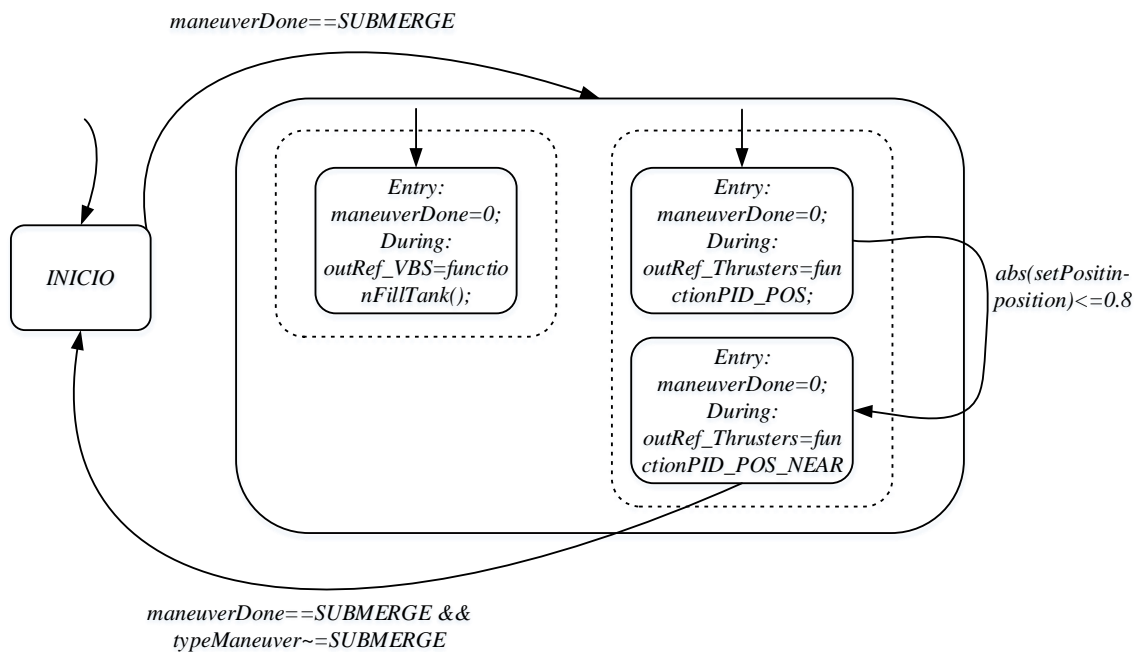


Figura 7.20: Diagrama *Stateflow* da manobra "SUBMERGE".

7.5.5 Missão

Após desenvolvimento e ajuste de cada manobra individual, foi realizada uma missão em simulação que contém todas as manobras mencionadas no capítulo 6. Seguidamente será explicado todo o processo da missão:

- No início desta missão o TURTLE executa a manobra "SUBMERGE", em que alcança a profundidade de 3 metros, com o auxílio dos *thrusters* e do VBS.
- Após conclusão da manobra anterior, o gestor de missões executa a manobra seguinte, "DIVE". Esta manobra tem como objetivo movimentar o TURTLE através

do VBS até uma profundidade mais elevada, neste caso de 150 metros. Se houver a necessidade de ter grande exatidão na posição desejada, o "DIVE" recorre à manobra "GOTO", para que com o sistema de propulsão atinja com mais exatidão essa posição.

- Depois do "DIVE" estar concluído, inicia-se a manobra "NEUTRO", onde o TURTLE é colocado neutro durante 100 segundos. Só depois do TURTLE concluir a manobra "NEUTRO", é que o gestor de missões transita para a manobra "GOTO".
- A manobra "GOTO" utiliza apenas o sistema de propulsão para mover o TURTLE à profundidade de 160 metros, ou seja mais 10 metros que o sua posição anterior.
- Posteriormente à manobra "DIVE" é realizada a manobra "LAND". O objetivo é simular a aterragem em condições moderadas, ou seja, faz uso de um controlador menos reativo aumentando o tempo para executar a manobra. Após isso coloca-se neutro por mais 100 segundos.
- Após os 100 segundos em "NEUTRO", é executada a manobra "ASCEND" para a posição 50 metros. Atingindo a profundidade desejada (50 metros), o veículo é colocado neutro durante 400 segundos. Ao longo deste tempo o TURTLE tem um *drift* na sua posição. De forma a corrigir isto, a manobra "NEUTRO", sempre que deteta que o veículo se afasta da sua posição desejada em cerca de 2 metros, é feita uma aproximação corrigida pelo sistema de propulsão.
- Ao fim do tempo estabelecido (400 segundos), o veículo volta a executar o "ASCEND" até aos 10 metros.
- Por fim a manobra "EMERGE" utiliza os *thrusters* para fazer a emersão do TURTLE com velocidade controlada.

O resultado de todo o processo explicado anteriormente pode ser visualizado na Figura 7.22. Relativamente à descrição da missão, isto é, todos os passos que o TURTLE terá que realizar está apresentado na Figura 7.21.

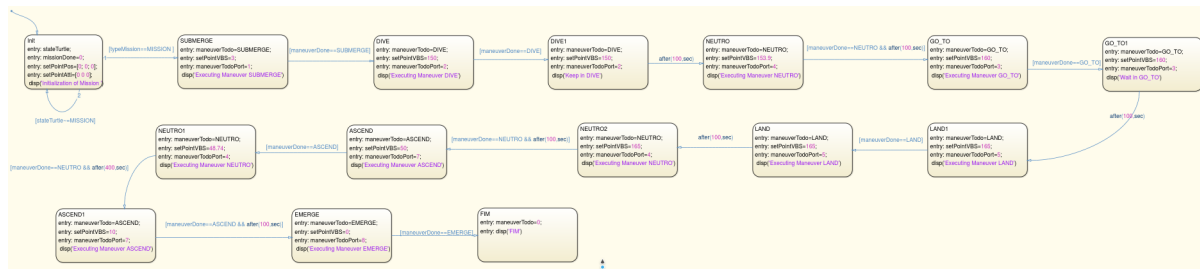


Figura 7.21: Arquitetura do sistema de simulação.

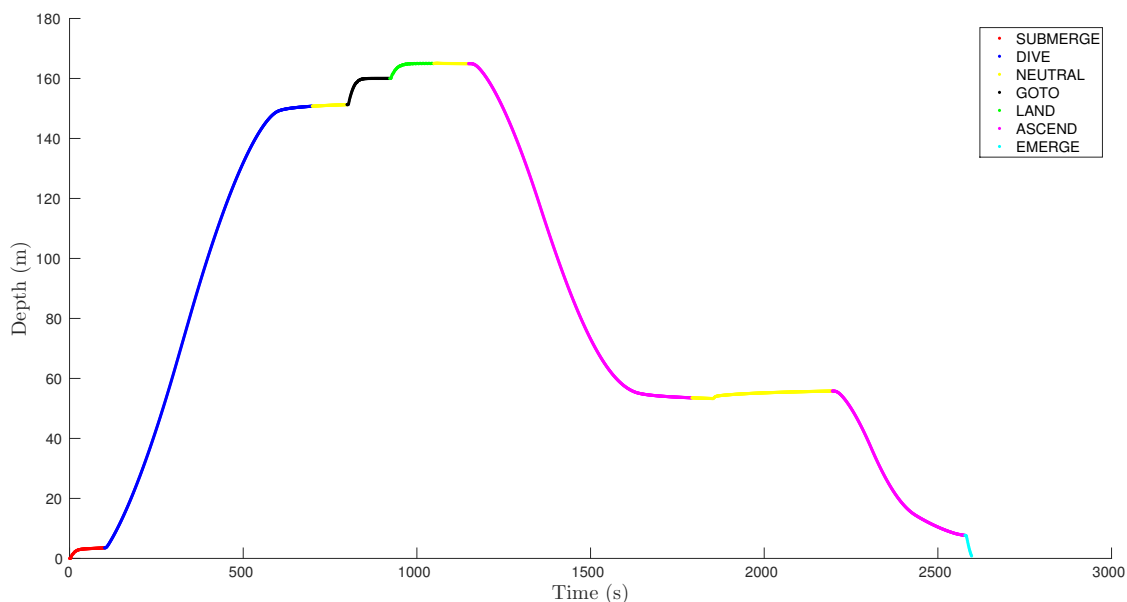


Figura 7.22: Missão executada.

Na Figura 7.23 é possível analisar que a resposta do controlador, tanto no VBS como no sistema de propulsão para cada manobra. Como mencionado ao longo deste capítulo, é importante que o resultado do controlador não coloque em causa a degradação física do VBS e dos *thrusters*. No caso do VBS isso é perfeitamente visível, já nos *thrusters* verifica-se alguma oscilação, mas é proveniente da exatidão que se pretende dos resultados.

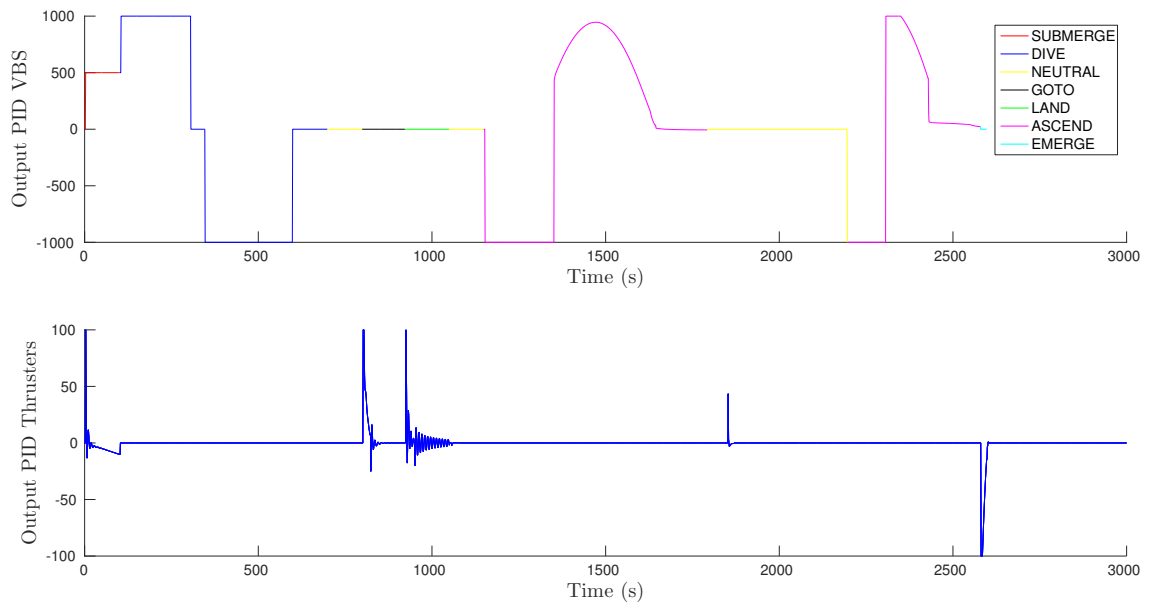


Figura 7.23: Saída do controlador para cada manobra.

Capítulo 8

Resultados

Neste capítulo são apresentados diversos resultados de múltiplas experiências elaboradas em ambiente real com o objetivo de validar vários sistemas existentes no TURTLE, nomeadamente o sistema de variação de lastro (VBS) e o sistema de propulsão (*thrusters*). Os *datasets* apresentados seguidamente, foram realizados no porto de Sesimbra, com a colaboração da Marinha Portuguesa.

Na Figura 8.1 observa-se o TURTLE a ser colocado no mar em Sesimbra.



Figura 8.1: TURTLE na baía de Sesimbra.

8.1 Sistema de variação de lastro - VBS

8.1.1 Mergulhos com VBS

Na Figura 8.2, pode-se observar a posição vertical (profundidade) ao longo do tempo, dos diferentes testes realizados. O objetivo foi realizar vários *datasets* com diferentes profundidades e tempos de permanência no fundo oceânico. Nesta seção de resultados sobre o VBS serão considerados três *logs*, *log 1*, feito numa profundidade relativamente baixa (<5 metros), o *log 2*, realizado com uma carga extra, isto é, um sistema de monitorização de variáveis biológicas integradas em dados ambientais - (*MarinEye*) [7], e por fim o *log 3 e 4*, que foram os dois realizados a profundidades a rondar os 14 metros.

A localização usada pelo TURTLE nestes *datasets* foi baseada na técnica *Dead Reckoning - DR*. Esta técnica consiste em determinar a posição atual estimada, através das velocidades do veículo, sabendo a posição inicial, ou seja, o somatório da posição inicial com a integração das velocidades. A localização por DR é apenas uma aproximação uma vez que não contabiliza os erros associados aos sensores (*bias*, *offset*, atitude, etc). Deste modo pode-se concluir que as figuras seguintes associadas à posição do veículo contem erro inerente à técnica DR.

Na Figura 8.2 é possível visualizar a posição em z do veículo em cada *log*.

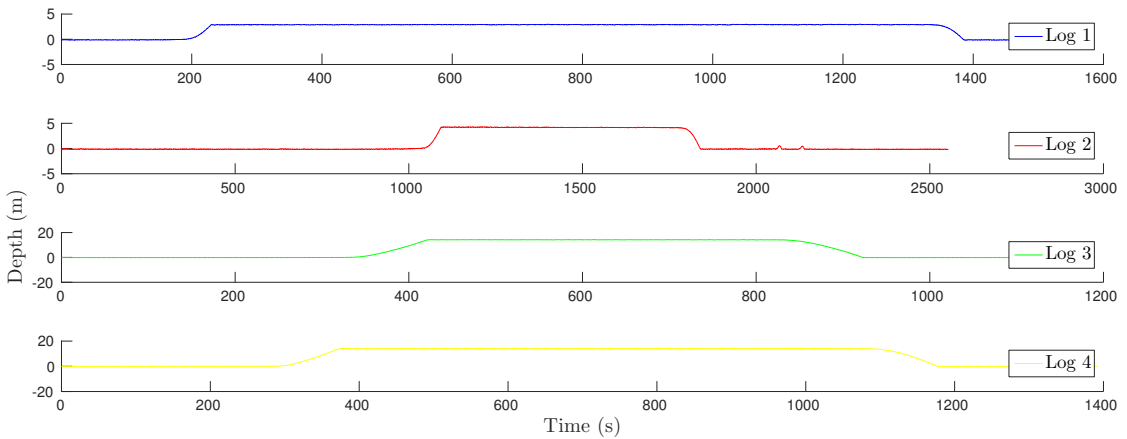


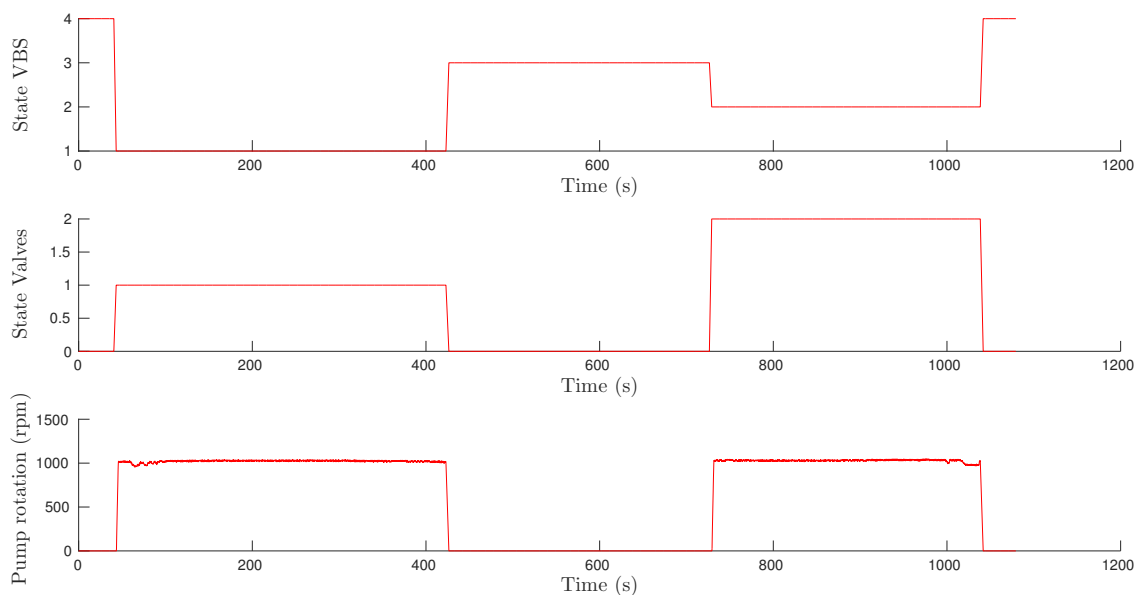
Figura 8.2: Posição em *heave* do TURTLE ao longo do tempo.

Na tabela 8.1, é referida a profundidade máxima de cada *log* assim como o tempo de permanência no fundo do oceano. Este tempo é pré-estabelecido no início de cada missão. Foi apenas colocado um tempo adequado (em função das restrições logísticas e operacionais) para validar os diferentes sistemas.

Tabela 8.1: Descrição geral dos *logs*.

<i>Log</i>	Profundidade Máxima (m)	Tempo no fundo (s)
<i>Log1</i>	2,99	900
<i>Log2</i>	4,28	600
<i>Log3</i>	14,32	300
<i>Log4</i>	14,28	600

Como explicado no capítulo 6, o sistema de VBS é controlador por uma máquina de estados que dependendo do estado atual, realiza uma determinada tarefa. Na Figura 8.3 pode-se observar os estados do VBS e das válvulas e conseqüentemente a rotação da bomba.

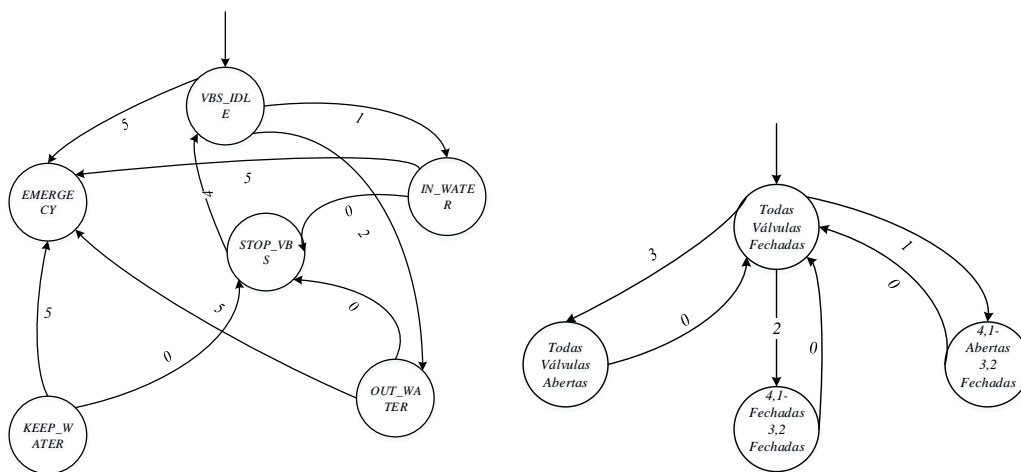
Figura 8.3: Estados do VBS, válvulas e rotação da bomba relativo ao *log 3*.

A Tabela 8.2 descreve cada estado do VBS e das válvulas.

Tabela 8.2: Descrição dos estados do VBS e das válvulas.

Estado VBS	Descrição	Estado Válvulas	Descrição
0	<i>VBS Stop</i>	0	Válvulas Fechadas
1	<i>Input Water</i>	1	Válvulas (4,1) Abertas, Válvulas (3,2) Fechadas
2	<i>Output Water</i>	2	Válvulas (3,2) Abertas, Válvulas (4,1) Fechadas
3	<i>Keep Water</i>	3	Válvulas abertas
4	<i>Idle</i>	-	-
5	<i>Imergency</i>	-	-

Na figuras 8.4a e 8.4b, está representado a máquina de estados do VBS e das válvulas, respetivamente.



(a) Máquina de estados do VBS.

(b) Máquina de estados das válvulas.

Figura 8.4: Velocidade e vorticidade do fluído em *heave*.

Pode-se observar em todos os *logs* realizados, à medida que a pressão interna vai aumentando, aumenta também a corrente consumida pela bomba, contudo a rotação da bomba tem tendência a diminuir. Este último caso acontece devido ao controlo do motor estar em malha aberta, ou seja, não existe realimentação da rotação de forma a manter a mesma rotação independentemente da pressão interna do tanque. Na Figura 8.5, pode-se visualizar esse comportamento que é referido ao *log 1*.

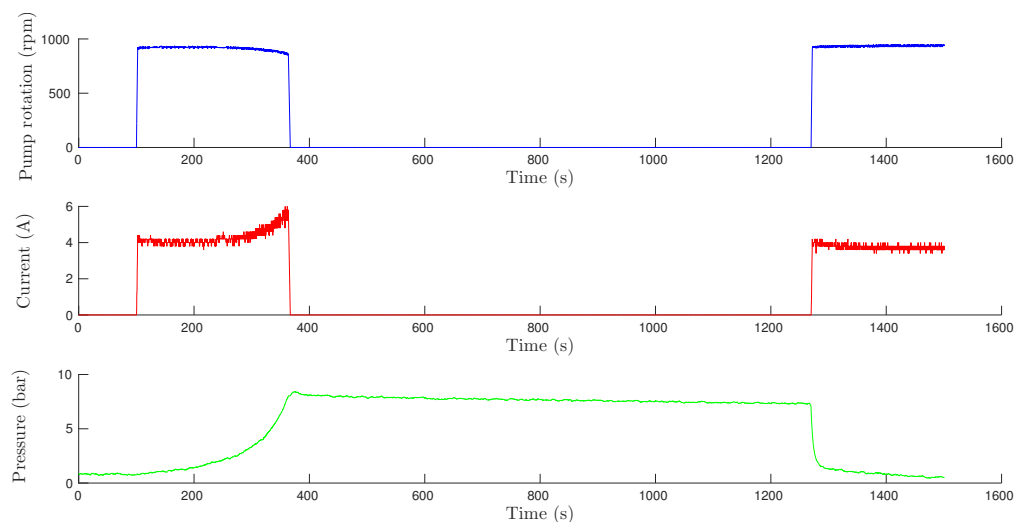


Figura 8.5: Relação dos rpms com a corrente consumida e pressão interna do reservatório do VBS do *log 1*.

O controlo do VBS pode ser facilitado e melhorado através do conhecimento do volume de água existente no interior do tanque do mesmo. Este VBS não incorpora nenhum medidor de caudal (caudalímetro) que seria o sensor mais adequado para contabilizar a quantidade de água no interior do tanque. Para colmatar este problema, recorreu-se ao sensor de pressão instalado no interior do tanque. Através da lei de *Boyle*, que nos diz: "Para uma quantidade fixa de um gás ideal mantido a uma temperatura constante, a pressão e o volume são inversamente proporcionais (enquanto um dobra, o outro fica a metade)". Na prática aplicar esta lei, não é o ideal, isto porque na realidade a temperatura não é constante. Contudo na ausência de outros sistemas mais eficazes optou-se por calcular o volume de água no interior do tanque através da pressão interna do mesmo.

Na Figura 8.6, pode-se analisar a relação entre pressão e volume de água tendo por base a lei de *Boyle*.

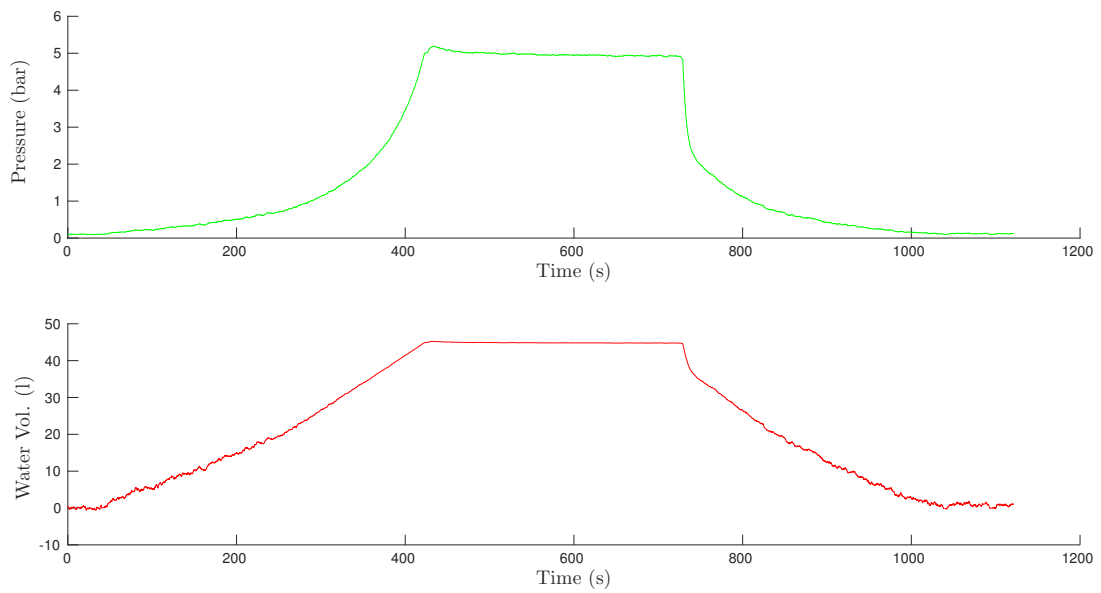


Figura 8.6: Relação entre pressão interna e volume de água *log 3*.

Na Figura 8.7, é possível visualizar a relação entre o volume de água no interior do cilindro com a profundidade ao longo do tempo. Como explicado no capítulo 5, a densidade da água do mar em relação à água doce, altera significativamente a flutuabilidade do veículo. Ou seja, para testes em laboratório o TURTLE iniciava a descida com cerca de 20 litros no interior do VBS, mas em testes no mar verifica-se que o valor aumenta para cerca de 30 litros. Como visto na Tabela 8.3, apenas o *log 2* precisa de menos litros para iniciar a descida devido ao peso extra que tinha ao transportar o sistema *MarinEye*.

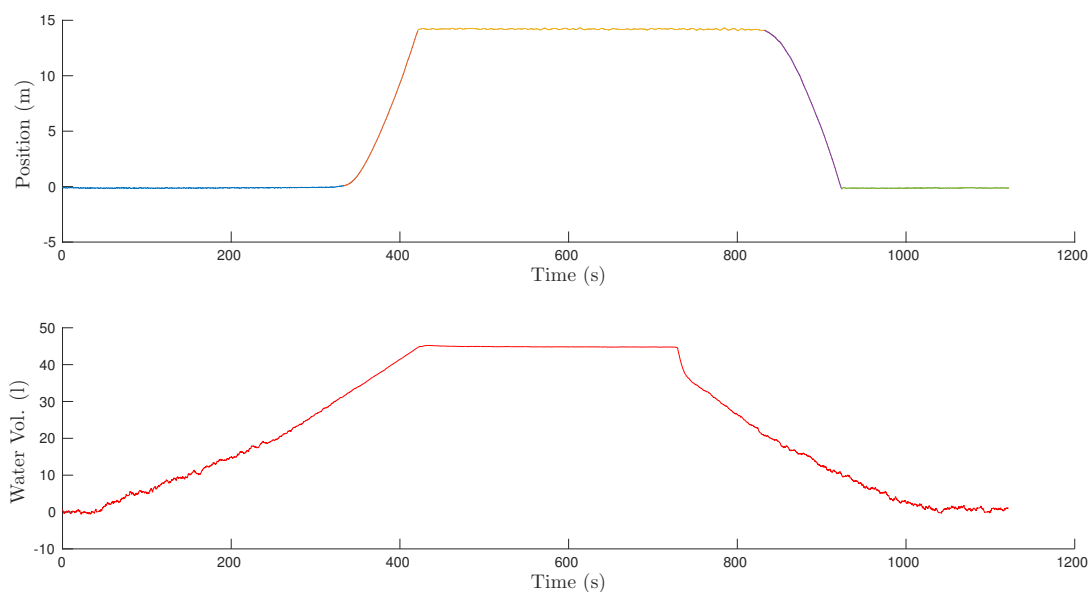


Figura 8.7: Variação de litros ao longo da posição vertical relativo ao *log 3*.

Tabela 8.3: Volume de água durante os vários processos de mergulho.

<i>Log</i>	Descida	Aterragem	TakeOff	Superfície
<i>Log2</i>	30,7	38,3	25,8	17,08
<i>Log3</i>	31,49	44,69	20,74	10,29
<i>Log4</i>	32,3	44,6	20,61	9,4

Tabela 8.4: Tempos de encher/esvaziar tanque VBS.

<i>Log</i>	Encher (s)	Esvaziar (s)
<i>Log2</i>	367	273
<i>Log3</i>	382	315
<i>Log4</i>	370	304

Na Tabela 8.3 não foi mencionado o volume de água relativo ao *log 1*, isto porque o sensor de pressão estava com problemas técnicos, onde posteriormente procedeu-se à sua substituição.

Na Figura 8.8, observa-se a relação da velocidade com a posição do veículo ao longo do mergulho do *log 3*. Verifica-se mesmo com o TURTLE à tona da água, uma variação de velocidade na ordem dos 0.15 m/s . Isto é devido ao ruído criado pela própria oscilação das ondas do mar. Como já esperado, a velocidade vai aumentando mediante a introdução de água no interior do tanque do VBS e haverá um momento em que atinge a velocidade terminal. Apesar de não ser totalmente notório, verifica-se que no final da descida a velocidade tende a estabilizar, alcançando um valor próximo da velocidade terminal. Contudo neste *log*, não é notório que se atinga a velocidade do TURTLE, por isso seria necessário mais profundidade (>14 metros) para validar verdadeiramente o valor da velocidade terminal. Na Figura 8.9, pode-se visualizar a velocidade e o volume de água com maior detalhe.

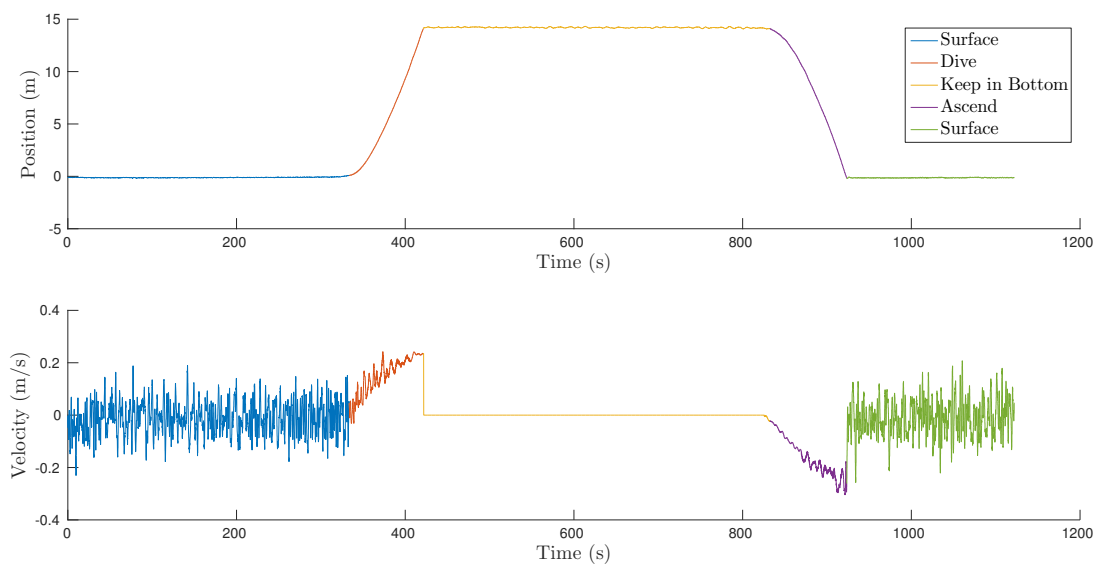


Figura 8.8: Relação entre a velocidade e a posição vertical.

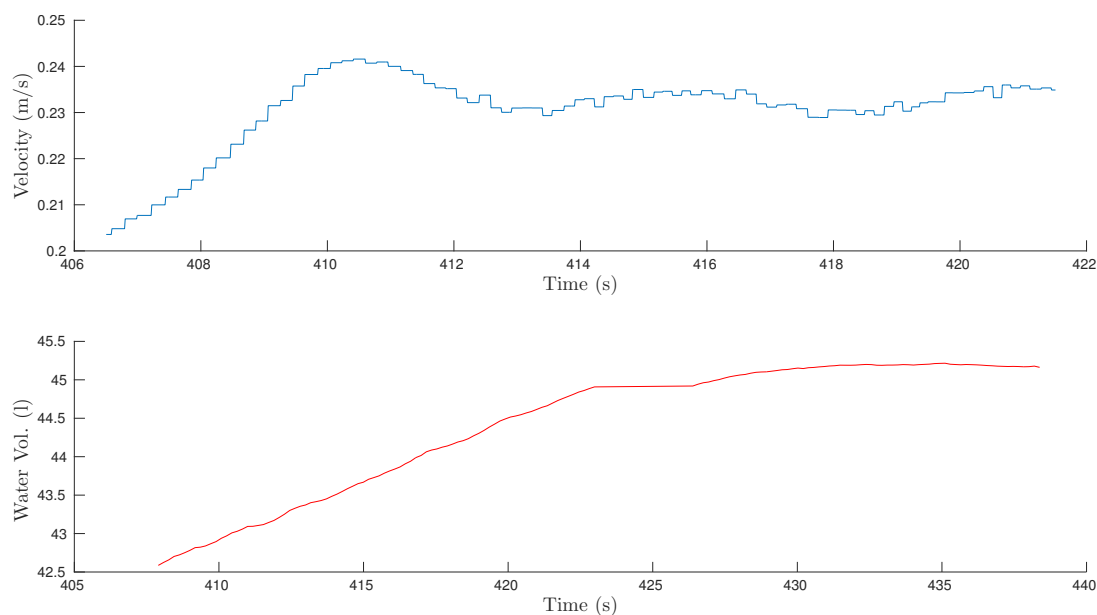


Figura 8.9: Velocidade terminal vs Volume de água.

Na Tabela 8.5, estão apresentados os tempos de subida e descida de cada *log*. A variação do tempo corresponde diretamente com as diferentes profundidades em que o *log* foi realizado.

Tabela 8.5: Tempo de descida e subida do TURTLE.

<i>Log</i>	Tempo Descida (s)	Tempo Subida (s)
<i>Log1</i>	35	46
<i>Log2</i>	49	56
<i>Log3</i>	87	90
<i>Log4</i>	81	93

A Figura 8.10 mostra a diferença de velocidades entre o submergir e o emergir do TURTLE. Como se pode verificar no início da submersão e no fim da emersão existe um maior *drift* das velocidades que se deve à ondulação criada pelas ondas do mar. No decorrer do mergulho e ascensão do veículo as velocidades permanecem semelhantes. Ou seja, mesmo o TURTLE não sendo totalmente simétrico no plano horizontal, é possível que o seu comportamento em termos de velocidade seja muito semelhante.

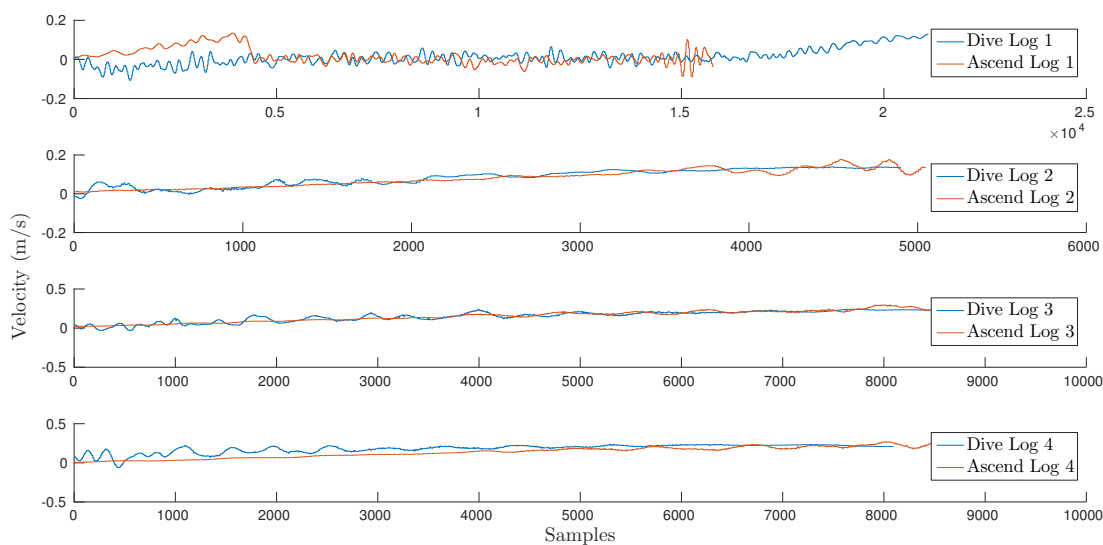


Figura 8.10: Velocidade de descida *versus* subida.

Tabela 8.6: Velocidade vertical máxima.

<i>Log</i>	Descida (m/s)	Subida(m/s)
<i>Log1</i>	0.1293	0.1345
<i>Log2</i>	0.1381	0.1765
<i>Log3</i>	0.2426	0.3039
<i>Log4</i>	0.2719	0.2815

Devido às diferentes medidas do sensor inercial (nomeadamente do acelerômetro), é possível distinguir através da Figura 8.11 algumas fases do processo de mergulho, tais como: determinar quando o veículo deixa de flutuar e inicia a sua descida; verificar o instante em que ocorre a aterragem; assim como o funcionamento da bomba (ligada e desligada).

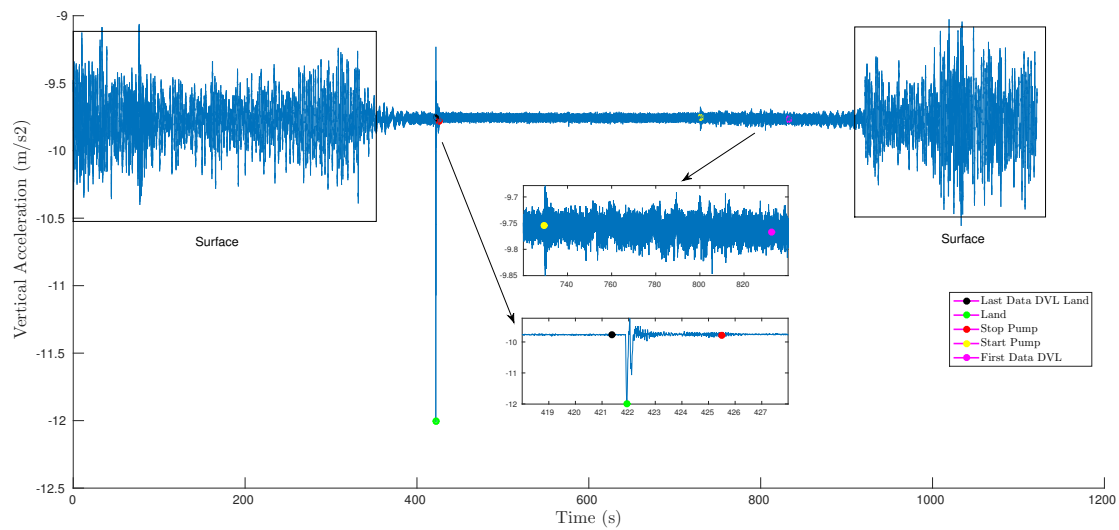


Figura 8.11: Análise da manobra executada através dos dados obtidos pelo IMU (*log 3*).

Outra aspeto que pode ser analisado pelo sensor inercial é o impacto que o TURTLE faz na aterragem. Analisado esses dados é possível melhorar técnicas de controlo para aterragens mais estáveis, e com isso proteger o veículo assim como também o meio envolvente. Pela Figura 8.12, verifica-se que o *log 3*, isto devido ao velocidade que atingiu até chegar ao solo. Uma vez que o *log 4*, foi realizado em condições muito semelhantes ao anterior, também se nota um impacto maior comparando com os restantes *logs*. É de notar no entanto que o impacto em contacto com o fundo marinho é fortemente dependente do tipo de fundo. Tem-se também que dada a velocidade terminal reduzida, bem como a possibilidade de atuação nos *thrusters* verticais, este impacto pode ser controlado.

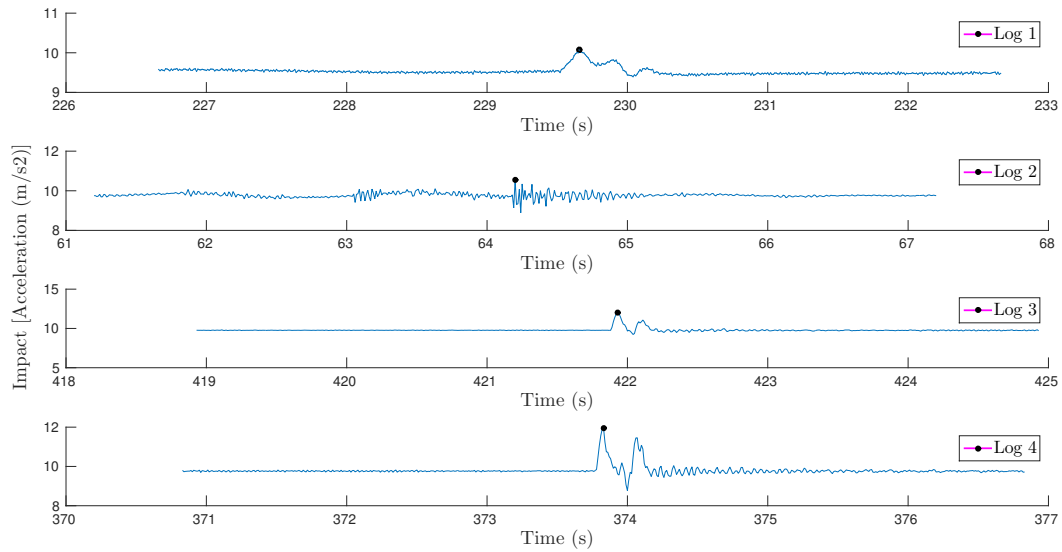
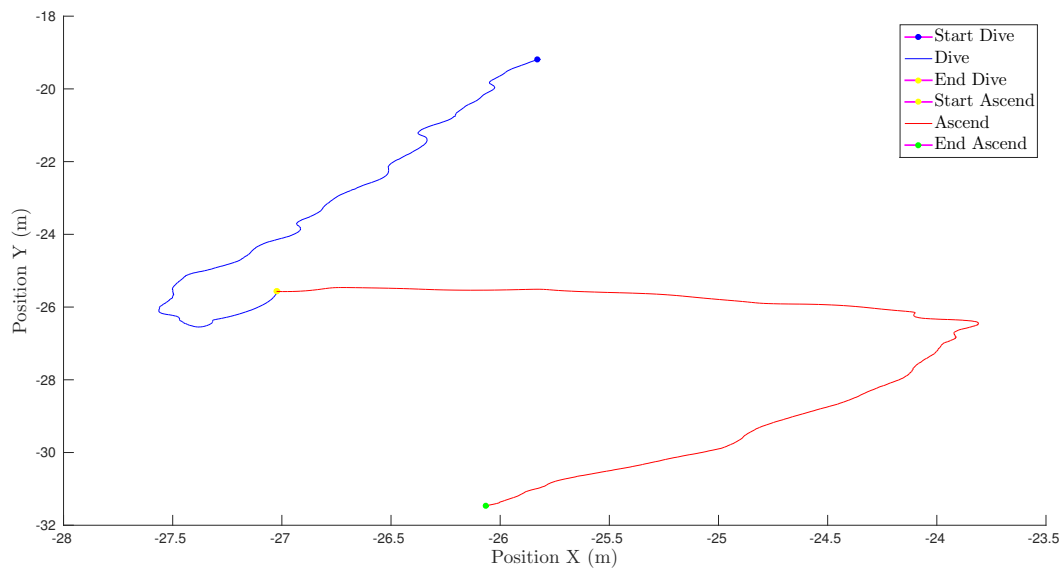
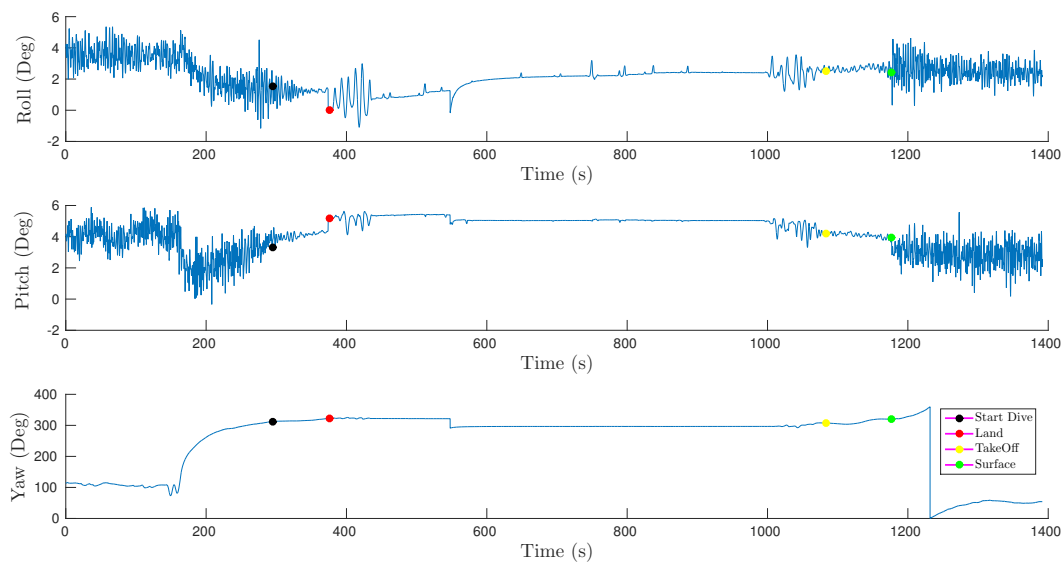


Figura 8.12: Impacto na aterragem.

Na Figura 8.13 é possível visualizar a posição do TURTLE tanto no processo de descida como subida. Como é possível observar existe um maior *drift* em Y do que em X . Na subida o *drift* em Y também é maior que em X , contudo não tão significativo comparado com o processo de descida. Este *drift* é também causado pelo facto de tanto a descida como a subida serem realizadas muito devagar, pelo que torna o veículo mais sensível a correntes e ondulação bem como à atitude inicial. Contudo outra componente deste *drift* advém da integração dos dados do DVL, proporcionarem assim maior erro na posição.

Contudo pela Figura 8.14 verifica-se que o TURTLE não tem rotação sobre o eixo Z , nem mesmo sobre os restantes eixos. Observa-se que depois da aterragem, o veículo muda um pouco a sua atitude em *roll* ($\approx 4^\circ$) e *pitch* ($\approx 2^\circ$), que se deve ao impacto que este tem no momento de aterragem.

Figura 8.13: Posição do TURTLE ao longo do *log 4*.Figura 8.14: Atitude do TURTLE durante o *log 4*.

Na Tabela 8.7 são apresentados os desvios do TURTLE ao longo do seu movimento de submersão e ascensão. De notar que os valores de *drift* observados ocorreram em testes sem controlo de posição horizontal. Estes refletem acima de tudo o efeito das condições iniciais e de ondulação uma vez que o veículo não se encontrava perfeitamente estacionário

nos testes. Outra importante fonte de erro advém de não existirem correções de posição absoluta ao sistema de navegação quando submerso, originando *drift* na localização estimada.

Tabela 8.7: *Drift* da posição.

<i>Log</i>	<i>Drift X Down</i> (m)	<i>Drift Y Down</i> (m)	<i>Drift X Up</i> (m)	<i>Drift Y Up</i> (m)
<i>Log1</i>	-1.4202	-3.9250	15.2893	-10.0017
<i>Log2</i>	0.1861	-0.2534	12.2278	0.6727
<i>Log3</i>	-1.0935	-11.5299	3.8073	-2.6701
<i>Log4</i>	-1.1917	-6.3737	0.9568	5.8968

8.1.2 *Log* com duração de 12 horas

Outro teste significativo para validação de subsistemas do TURTLE, foi realizar um *log* onde a permanência no fundo do oceano ultrapassa-se os tempos dos *logs* anteriores. Neste sentido foi realizado um teste com a permanência do TURTLE no fundo do oceano durante 12 horas.

Na seguinte Figura podemos visualizar a posição em *Z* do TURTLE. Este gráfico pode induzir em erro, devido à variação em forma sinusoidal da posição. Isto acontece, não porque o TURTLE se movimentou no eixo *Z*, mas sim porque a posição é dada pelo sensor de pressão e como a altura da maré variou, alterou a profundidade do TURTLE, contudo o TURTLE permaneceu estático como será analisado posteriormente.

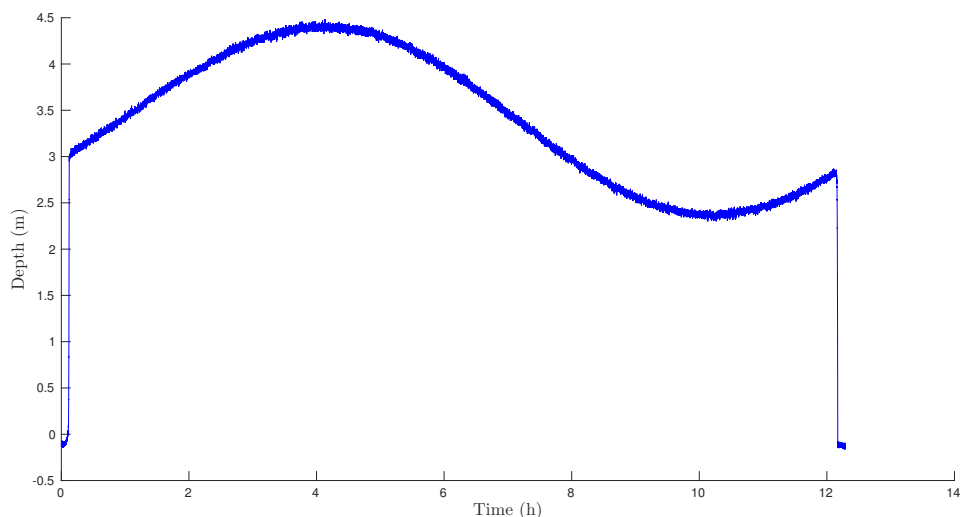


Figura 8.15: Profundidade do TURTLE.

Em testes com maiores tempos de permanência no fundo oceânico, nota-se que a pressão interna do reservatório do VBS vai diminuindo com o decorrer do tempo. Uma vez que a pressão é proporcional à temperatura, a diminuição da pressão pode estar relacionada com a diminuição da temperatura. Contudo verificando a Figura 8.16, verifica-se que a temperatura inicialmente está estável, depois tende a diminuir 1°C , mantendo-se por um período e mais tarde sobe novamente. Relativamente à pressão esta tende sempre a diminuir. Ou seja, perante este facto pode-se concluir que existe uma pequena fuga da pressão, possivelmente através das válvulas.

Contudo através dos dados disponíveis é difícil detetar se a fuga é do ar, água ou dos dois.

Se relacionarmos diretamente a diminuição da pressão com a fuga de água, tem-se o volume de água perdidos ao longo do tempo mostrado na Figura 8.16. Pelos resultados mostrados nos *logs* anteriores, com ≈ 30 litros no interior do tanque, o TURTLE fica com flutuabilidade neutra. Ou seja, com o tanque cheio (45 litros), o TURTLE tem uma flutuabilidade negativa de 15 kg . Se houver uma fuga com um fluxo médio de 0.75 l/h , quer dizer que em termos médios o TURTLE ao fim de 20 horas tornaria-se neutro e assim voltaria à superfície apenas pela fuga de água existente.

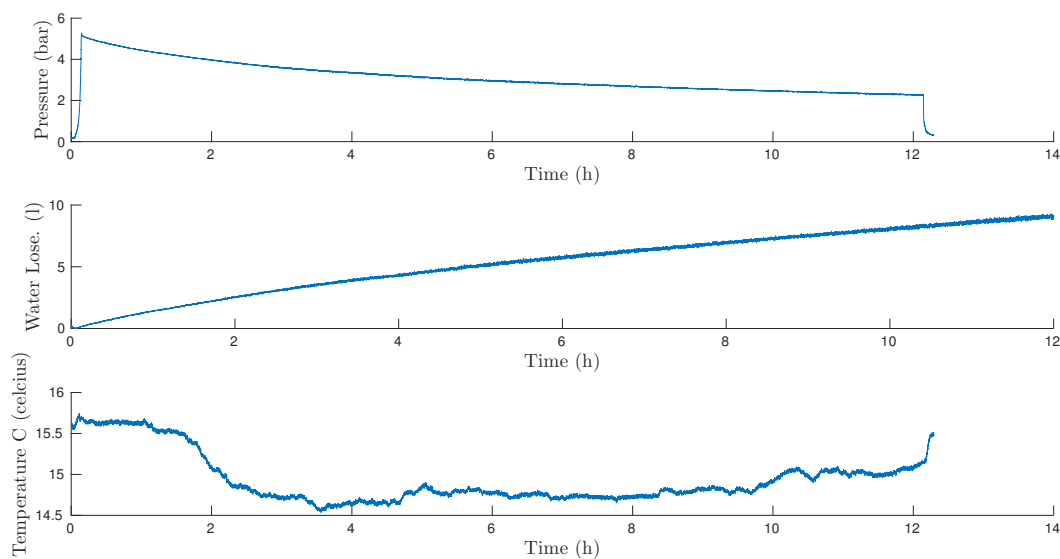


Figura 8.16: Temperatura externa vs pressão vs litros perdidos.

O objetivo da Figura 8.17 é avaliar se o TURTLE quando permanecido no fundo do oceânico por um longo período, (neste caso, cerca de 12 horas) varia a sua posição. Devido ao DVL não fornecer medidas a menos de 60 *cm* do solo, a conclusão acerca do *drift* terá que ser analisado pela atitude do veículo. Pelo que se verifica a oscilação em *roll* tende a ser maior comparativamente a *pitch*, no entanto isto pode ser devido a uma pequena diferença na estimação do *bias* dos *gyros* que é integrada. Depois outro aspeto que se pode ter em conta, é o facto de existir um comportamento diferente depois das 7 horas. Provavelmente isto seja no momento em que a maré começa novamente a descer e o TURTLE fica mais próximo da superfície está mais sujeito a ruído de embarcações que naquela zona passam.

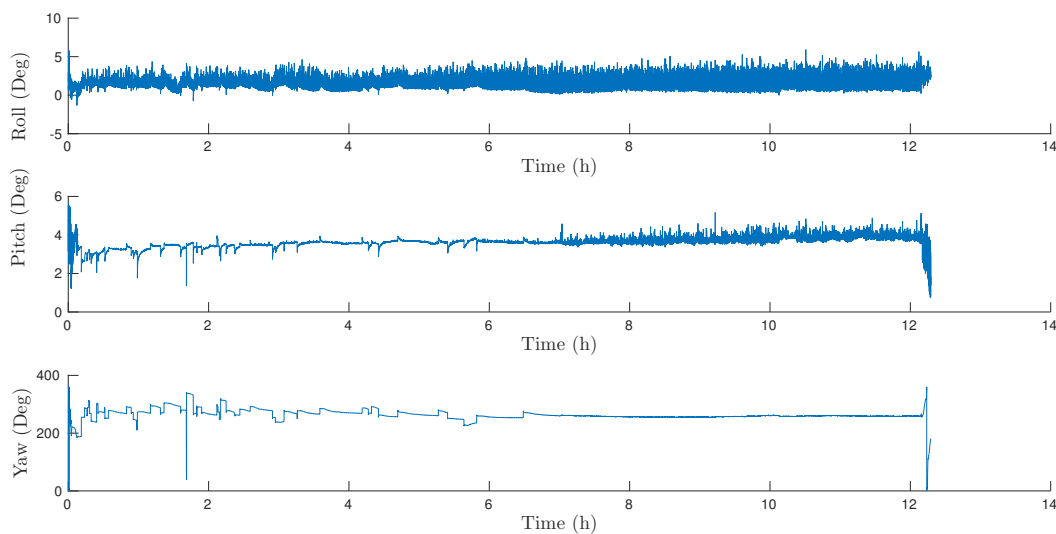


Figura 8.17: Atitude do veículo.

8.2 Thrusters

Neste subcapítulo é analisado o comportamento dos *thrusters* do robô TURTLE. Na Figura 8.18 pode-se verificar a relação que existe entre o *thrust*¹¹ aplicado aos *thrusters*, o seu consumo de corrente e consequentemente a rotação gerada pelos mesmos. Perante as especificações do fabricante, pode-se concluir que os valores de corrente consumida e *rpm* estão dentro daquilo que era expectável. Outro aspeto visível na figura é o facto de que os *thrusters* têm uma rápida resposta ao valor de rotação (*thrust*) que lhe é aplicado.

Outro aspeto já verificado, mas que se pode comprovar pelo comportamento dos *thrusters* é a matriz de alocação de *thrust* do TURTLE. Como explicado anteriormente, a matriz de alocação é necessária para converter, neste caso, direção do movimento, em *thrust* aplicado aos *thrusters*. Baseado na matriz de alocação mencionada no capítulo 5, quando o TURTLE se desloca-se em *surge*, o sinal do valor de *thrust* tem que ser igual para o *thruster 1* e o *thruster 4* e sinal contrário para o *thruster 2* e o *thruster 3*. No caso em que o TURTLE faz uma rotação sobre o eixo *Z*, o sinal do valor *thrust* tem que ser igual para o *thruster 1* e o *thruster 3* e o contrário para *thruster 2* e *thruster 4*. Este processo pode ser verificado na Figura 8.19.

¹¹Ao longo deste documento *thrust* refere-se ao valor de referência (0-100) dado aos *thrusters* para rotação dos mesmos.

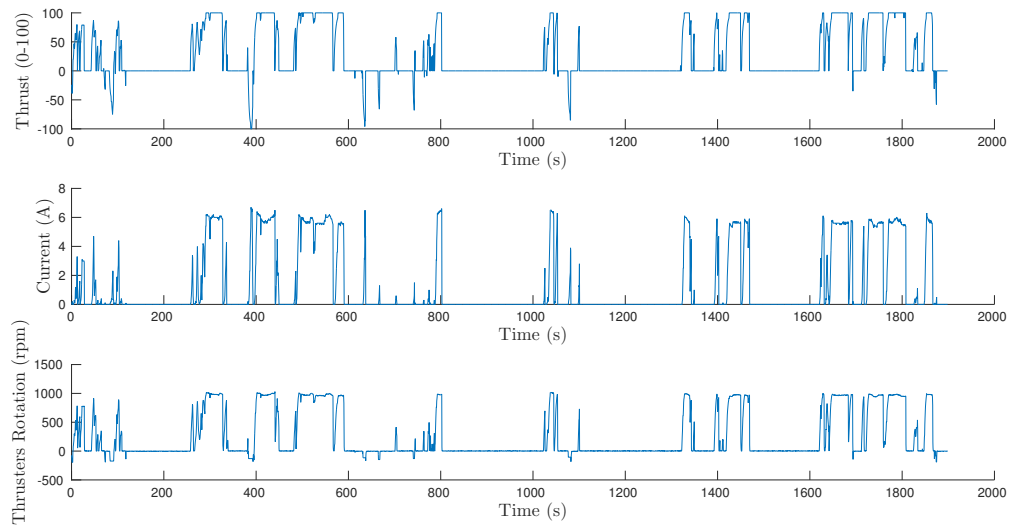


Figura 8.18: Relação entre PWM, corrente consumida e rotação do motor.

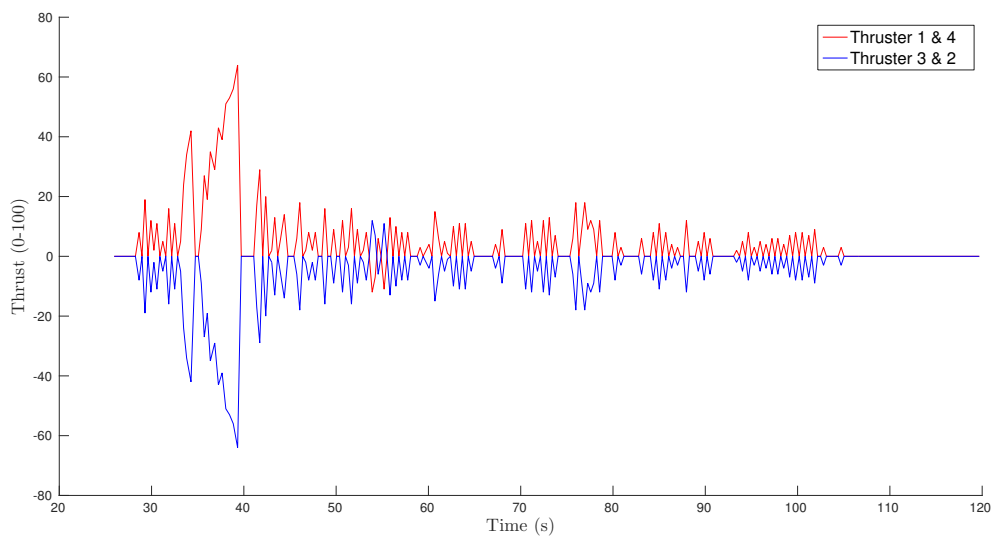


Figura 8.19: Verificação da matriz de alocação *thrust*.

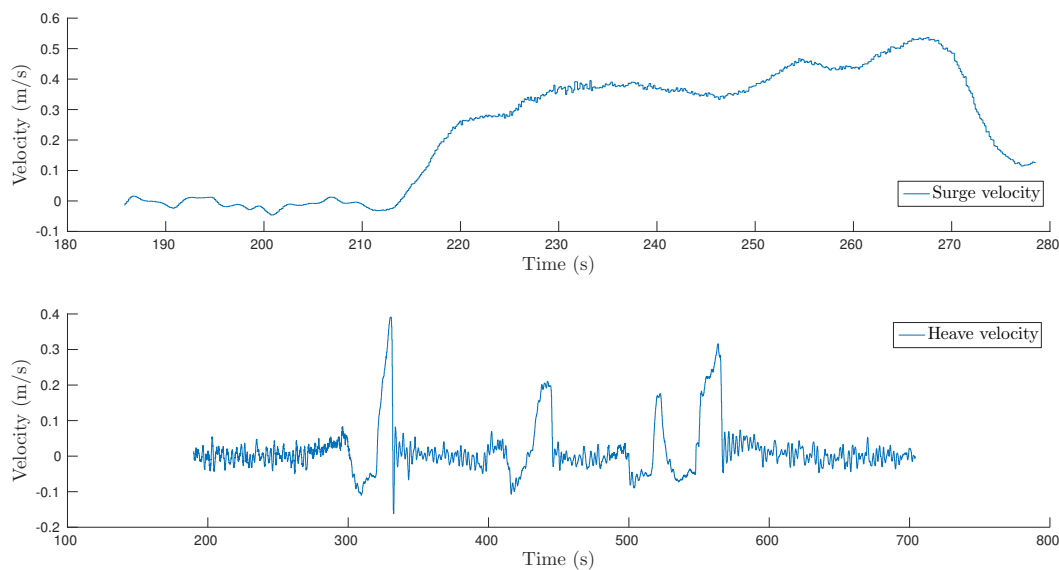


Figura 8.20: Velocidade em *surge* e *heave*.

Na Figura 8.20, pode-se visualizar as velocidades máximas, em *surge* e *heave* dos *datasets* realizados. É possível concluir que em *surge* o TURTLE atinge velocidades máximas de 0.5 m/s. Enquanto em *heave* tem um pico de 0.4 m/s. De notar que a medida de velocidade vertical não corresponde a uma situação em que o veículo possui todos os propulsores operacionais, uma vez que nos testes um dos *thrusters* verticais esteve desabilitado devido a problemas de hardware.

Na Figura 8.21, pode-se visualizar a atuação do sistema de propulsão juntamente com o VBS. Numa primeira fase o TURTLE afunda apenas usando o *thrusters* verticais, fazendo cerca de três mergulhos. Como o TURTLE está com flutuabilidade positiva, assim que os *thrusters* verticais são desligados, o TURTLE volta à superfície. Observa-se numa segunda fase que o TURTLE mergulha apenas com o VBS, e que de seguida usa os *thrusters* verticais para diminuir a profundidade, mas como está com flutuabilidade negativa e ainda a introduzir água, após desligar os *thrusters* verticais o TURTLE volta a mergulhar.

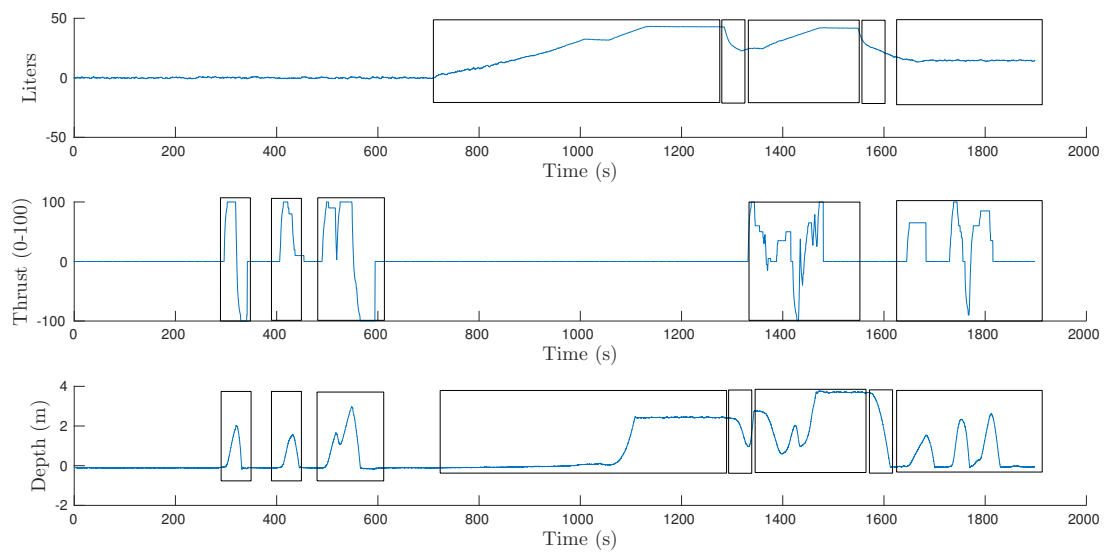


Figura 8.21: Resultado em posição da atuação dos *thrusters* verticais e do VBS.

8.3 Trajetória

Um dos grandes objetivos do TURTLE é sem dúvida a sua capacidade de realocação, ou seja movimentar-se na coluna de água. Na Figura 8.22 pode ser visualizado um movimento onde o veículo inicialmente está a cerca de 2.5 metros, faz a ascensão perto da superfície e depois volta a fazer o mergulho movimentando-se para uma nova posição em *heave* de 1.8 metros e depois volta novamente a superfície.

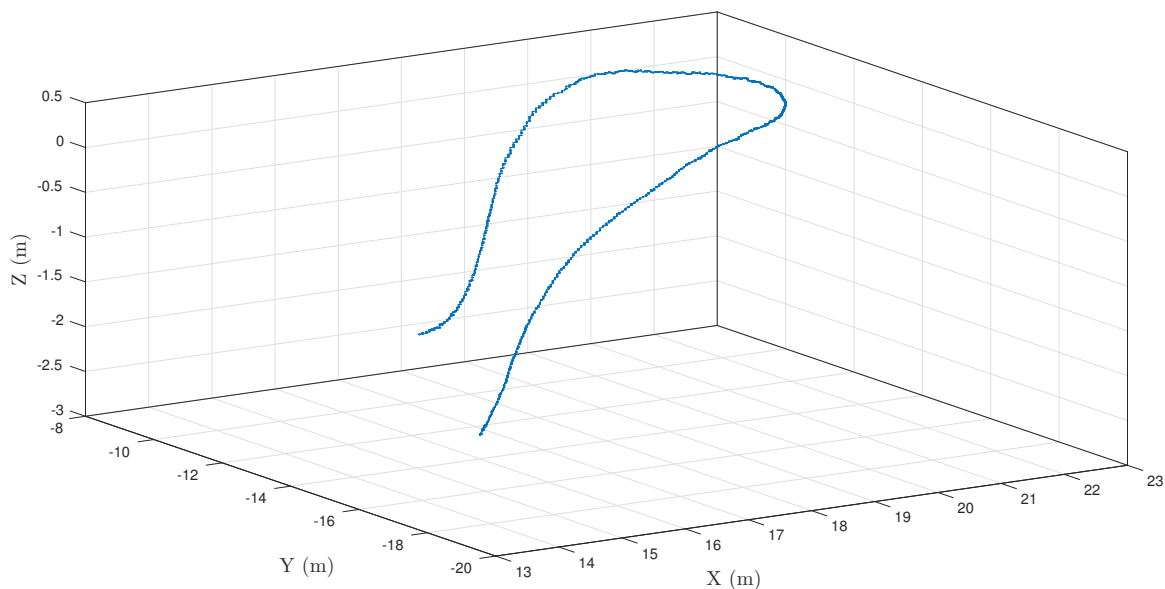


Figura 8.22: Exemplo de uma trajetória na realocação do TURTLE na coluna de água.

Observando a trajetória efetuada, pode-se analisar a Figura 8.23 e verificar que houve uma alteração no *yaw* em cerca de 140° originando uma curva que é vivível na Figura 8.22. Relativamente ao *roll* e *pitch* estes permanecem estáveis.

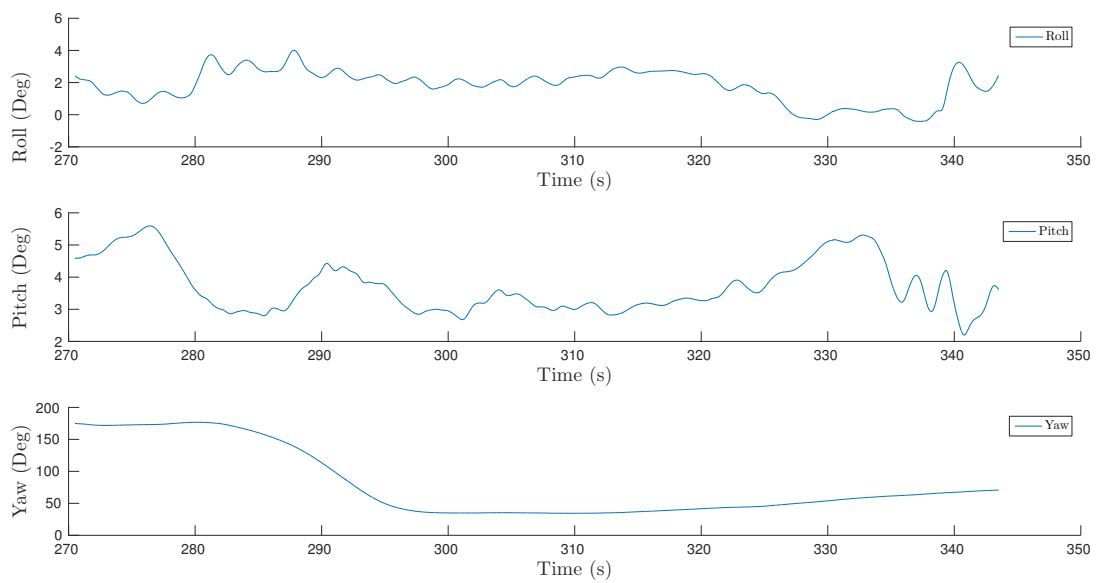


Figura 8.23: Atitude do veículo ao longo da realocação.

A trajetória do TURTLE em que fez parte a sua realocação (Figura 8.22), é mostrada na Figura 8.24 projetada no referencial mundo.



Figura 8.24: Trajetória do TURTLE no largo de Sesimbra.

Capítulo 9

Conclusão e Trabalho Futuro

Esta dissertação visou o desenvolvimento de um sistema de controlo para o veículo TURTLE, com recurso ao sistema de variação de lastro.

Verifica-se que entre os diferentes sistemas de variação de flutuabilidade comuns na literatura, o sistema utilizado pelo TURTLE é o que mais se adequa às necessidades do veículo, uma vez que os restantes sistemas possuem aspetos como a pequena variação de flutuabilidade (<20 litros) e limitação para missões de longo prazo, que seriam entretes ao objetivo final do mesmo. Sendo assim, conclui-se que o sistema de variação de lastro hidráulico é o mais adequado devido à elevada variação de flutuabilidade e poderá facilmente ser escalável alterando apenas a dimensão do reservatório. Contudo, de forma a melhorar o VBS do TURTLE, fica a recomendação de que a introdução de um caudalímetro e de válvulas com controlo de fluxo, permitirá um controlo mais estável e preciso do veículo.

Quanto ao modelo dinâmico do veículo pode-se constatar através da força de arrasto (*drag*), nos seus movimentos mais comuns, *heave* e *surge*, que o TURTLE é mais hidrodinâmico em cerca de 25% no movimento *surge* comparativamente ao movimento *heave*. Esta diferenciação poderia ser mais notável se o TURTLE se movimentasse apenas com recurso ao VBS. No entanto, como a movimentação do TURTLE recorre à ação dos propulsores e do VBS, estes 25% acabam por não ter relevância, pois o veículo no movimento *heave* é eficientemente energético através do uso do VBS. Associando a este fator o sistema de propulsão vertical produz cerca 510N, que representam mais 24% da força produzida em *surge*. Desta forma o movimento menos hidrodinâmico é compensado pela força exercida pelos *thrusters*.

Ainda relativamente ao modelo dinâmico do veículo, mais especificamente à validação prévia dos coeficientes de força e momentos hidrostáticos, os resultados obtidos são

ainda preliminares, uma vez que requerem testes experimentais que devido à própria geometria/dimensão do veículo, não seriam viáveis de executar no tanque do LSA, sendo que o local ideal seria no mar. No entanto esta solução possui custos abusivos que acabou por ser uma limitação a este estudo. Contudo realizaram-se alguns testes recorrendo a sistemas computacionais (CFD), mas que num futuro próximo, seria interessante obter resultados experimentais de identificação do sistema, possibilitando assim a comparação entre os resultados reais e os resultados obtidos com a simulação.

No capítulo referente à arquitectura de controlo de locomoção (integrando a ação dos propulsores e do sistema de variação de lastro (VBS)), foram especificadas um conjunto de manobras de locomoção que seriam a base para o desenvolvimento de diversas missões. Conclui-se que a melhor forma de abordar aspetos práticos de controlo do TURTLE, seria desacoplar os mecanismos de forças de propulsão em três vertentes: VBS, *thrusters* verticais e *thrusters* horizontais. Isto permitiu descentralizar o sistema de controlo e com isso simplificar os seus modelos. O desenvolvimento de diversas manobras surgiu não só pelo desacoplamento das forças de propulsão, mas também pelos diferentes processos existentes ao longo do mergulho a grandes profundidades, bem como pelos requisitos das missões pretendidas.

Foi desenvolvido e implementado um modelo de simulação em *Matlab/Simulink* que incorporou características híbridas (contínuas e discretas) tendo sido usado a ferramenta *Stateflow*. Isto permitiu uma maior facilidade na descrição das várias manobras tornando-as mais intuitivas e facilmente implementáveis. Com esta simulação foi possível concluir que o controlo para manobras que usam apenas os VBS não é uma tarefa simples. No caso da manobra "DIVE", devido às suas intrínsecas características (atuação lenta/ resposta lenta), torna um desafio a sua implementação. Relativamente às manobras que usam o sistema de propulsão (*thrusters*), estas apresentam como esperado um resposta temporal muito mais rápida.

Relativamente aos controladores usados na implementação das manobras foram PID e PD.

Uma possível melhoria na eficácia e eficiência das manobras que recorrem ao VBS, seria utilizar algoritmos de estimação (e.g. EKF), no sentido de prever o comportamento do veículo em termos de posição e velocidade de forma a atuar com antecedência no sistema de variação de lastro.

Uma outra melhoria a implementar no simulador seria criar um módulo que representasse as características de ambientes reais, como ruído nos sensores, parâmetros de correntes, entre outros, para assim aproximar a simulação da realidade.

O controlo em profundidade foi implementado no veículo real bem como a estrutura

de controlo base foi testada no mar. Com isto foi possível verificar que o controlo de baixo nível, isto é arquitetura que faz interface com os *thrusters* e VBS está validada, assim como o controlo manual do veículo. Durante os testes realizados não foi possível concluir qual a velocidade terminal do veículo, devido à baixa profundidade de mergulho (< 14 metros). Contudo pelos dados analisados a uma profundidade de 20 metros talvez já seja possível obter esse dado. Verificou-se pelos mergulhos efetuados que o TURTLE atinge velocidades de emersão e imersão na ordem dos 0.3 m/s , recorrendo ao VBS. Relativamente à velocidade em *surge* usando os *thrusters* chega a alcançar os 0.5 m/s .

Em relação ao mergulho em que o TURTLE permaneceu 12 horas no fundo do oceano, foi possível perceber que o sistema de variação de lastro contém uma fuga de água que ronda os 0.75 lpm . Relativamente à estabilidade do veículo, as conclusões divergem um pouco. Ou seja, verificou-se pela atitude do veículo que este permanece estável tanto na imersão/emersão como na permanência no fundo. Contudo analisando a posição e dependendo da profundidade de mergulho, verifica-se algum *drift* (≈ 8 metros) relativamente à sua posição inicial de mergulho. Provavelmente esta ambiguidade advém do erro acumulado pelo sistema de navegação, uma vez que utiliza apenas o método *Dead Reckoning*. Devido a esta situação, no futuro seria importante a implementação de um sistema de navegação robusto permitindo assim obter um método de *ground truth*, de forma a retirar melhores conclusões relativamente ao sistema de controlo implementado.

A integração de manobras e do gestor de missões que foi abordado nesta dissertação também foi implementado no veículo TURTLE, contudo, apesar do esforço não foi possível gerar resultados que pudessem ser incorporados nesta dissertação. O mesmo se passou com dados relativos à eficiência energética do veículo. Levando em conta todos os aspetos abordados neste documento e tendo em vista o tema abrangente, concluiu-se que foram atingidos os objetivos propostos. Por fim, deseja-se com esta dissertação impulsionar aquele que se espera vir a ser um dos veículos subaquáticos com maior relevância no desenvolvimento científico do país, o TURTLE.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Bibliografia

- [1] Nuno Vieira Matias. A”clusterização” da economia marítima. *Nação e defesa*, (122), 2009.
- [2] Hugo Ferreira, Alfredo Martins, José Miguel Almeida, António Valente, António Figueiredo, Batista da Cruz, Maurício Camilo, Victor Lobo, Carlos Pinho, Augustin Olivier, et al. Turtle—systems and technologies for deep ocean long term presence. In *Oceans-St. John’s, 2014*, pages 1–10. IEEE, 2014.
- [3] year = 2017 url = www.emepc.pt/pt/a-submissao-portuguesa urldate = 2017-10-1 empec, title = Estrutura de missão para a extensão da plataforma continental.
- [4] Hugo Miguel Ferreira, Carlos Almeida, Alfredo Martins, José Miguel Almeida, André Dias, Guilherme Silva, and Eduardo Silva. Environmental modeling with precision navigation using roaz autonomous surface vehicle. In *IROS 2012-IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1–6, 2012.
- [5] J Almeida, A Ferreira, B Matias, A Dias, A Martins, F Silva, J Oliveira, P Sousa, M Moreira, T Miranda, et al. Air and underwater survey of water enclosed spaces for vamos! project. In *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [6] Cameron Sword, Balazs Bodo, Stef Kapusniak, Frank Bosman, Jenny Rainbird, and Eduardo Silva. ¡ vamos!(viable alternative mine operating system)-a’horizon 2020’project. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 19, page 348, 2017.
- [7] Alfredo Martins, André Dias, Eduardo Silva, Hugo Ferreira, Ireneu Dias, José Miguel Almeida, Luís Torgo, Marco Gonçalves, Maurício Guedes, Nuno Dias, et al. Marineye—a tool for marine monitoring. In *OCEANS 2016-Shanghai*, pages 1–7. IEEE, 2016.

-
- [8] Andrea Caiti, Francesco Di Corato, Davide Fenucci, Simone Grechi, Manuel Novi, Francesco Pacini, and Giacomo Paoli. The project v-fides: A new generation auv for deep underwater exploration, operation and monitoring. In *Oceans-St. John's, 2014*, pages 1–7. IEEE, 2014.
- [9] William Kohnen. 2007 mts overview of manned underwater vehicle activity. *Marine Technology Society Journal*, 42(1):26–37, 2008.
- [10] Giacomo Marani, Song K Choi, and Junku Yuh. Underwater autonomous manipulation for intervention missions auvs. *Ocean Engineering*, 36(1):15–23, 2009.
- [11] Xianbo Xiang, Zemin Niu, Lionel Lapierre, and Mingjiu Zuo. Hybrid underwater robotic vehicles: the state-of-the-art and future trends. *HKIE Transactions*, 22(2):103–116, 2015.
- [12] Daniel B Kilfoyle and Arthur B Baggeroer. The state of the art in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 25(1):4–27, 2000.
- [13] Patricia Fryer, James B Gill, and Michael C Jackson. Volcanologic and tectonic evolution of the kasuga seamounts, northern mariana trough: Alvin submersible investigations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79(3):277–311, 1997.
- [14] James Watt Mavor, Harold E Froehlich, William M Marquet, and William O Rainnie. *Alvin, 6000-ft. Submergence Research Vehicle*. Woods Hole Oceanographic Institution, 1967.
- [15] Kimiaki Kudo. Overseas trends in the development of human occupied deep submersibles and a proposal for japan’s way to take. *Sci. Technol. Trends*, 26:104–123, 2008.
- [16] Weicheng Cui. Development of the jiaolong deep manned submersible. *Marine Technology Society Journal*, 47(3):37–54, 2013.
- [17] Marc Nokin. Victor 6000-a deep teleoperated system for scientific research. In *OCEANS’97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 1, pages 167–171. IEEE, 1997.
- [18] WJ Kirkwood and DE Steele. Active variable buoyancy control system for mbari’s rov. In *OCEANS’94. ’Oceans Engineering for Today’s Technology and Tomorrow’s Preservation. ’Proceedings*, volume 2, pages II–471. IEEE, 1994.

- [19] Assistente do Presidente da Eletrobras Eletronuclear e membro do Standing Advisory Group on Nuclear Energy. A nova fronteira: O mar profundo, 2017.
- [20] AYHAN Altintas. Archimedes' principle as a application of the divergence theorem. *IEEE Transactions on Education*, 33(2):222, 1990.
- [21] Sekhar Tangirala and John Dzielski. A variable buoyancy control system for a large auv. *IEEE journal of oceanic engineering*, 32(4):762–771, 2007.
- [22] Steven W Moore, Harry Bohm, and Vickie Jensen. *Underwater robotics: Science, design & fabrication*. Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010.
- [23] WE Schneider and JA Sasse. 12,000-ft sea-water variable ballast system for the submersible 'alvin'. *American Society of Mechanical Engineers, New York*, pages 74–79, 1973.
- [24] Taro Aoki, Satoshi Tsukioka, Hiroshi Yoshida, Tadahiro Hyakudome, Shojiro Ishibashi, Takao Sawa, Akihisa Ishikawa, Junichiro Tahara, Ikuo Yamamoto, Makoto Ohkusu, et al. Advanced technologies for cruising auv urashima. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 18(02), 2008.
- [25] Mathieu Kemp, Matt Palanza, Cheryl Skibski, Josh Ormsby, and Michelle Estaphan. Persistence at full ocean depth. In *Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2012 IEEE/OES*, pages 1–7. IEEE, 2012.
- [26] Jian-an Xu, Ming-jun Zhang, et al. A variable buoyancy system for long cruising range auv. In *Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010 International Conference on*, volume 2, pages 585–588. IEEE, 2010.
- [27] Daniel L Rudnick, Russ E Davis, Charles C Eriksen, David M Fratantoni, and Mary Jane Perry. Underwater gliders for ocean research. *Marine Technology Society Journal*, 38(2):73–84, 2004.
- [28] Shawn A Woods, Robert J Bauer, and Mae L Seto. Automated ballast tank control system for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(4):727–739, 2012.
- [29] Min Xu and SM Smith. Adaptive fuzzy logic depth controller for variable buoyancy system of autonomous underwater vehicles. In *Fuzzy Systems, 1994. IEEE World*

-
- Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the Third IEEE Conference on*, pages 1191–1196. IEEE, 1994.
- [30] Roberto Font and Javier García-Peláez. On a submarine hovering system based on blowing and venting of ballast tanks. *Ocean Engineering*, 72:441–447, 2013.
- [31] KS Wasserman, JL Mathieu, MI Wolf, A Hathi, SE Fried, and AK Baker. Dynamic buoyancy control of an rov using a variable ballast tank. In *OCEANS 2003. Proceedings*, volume 5, pages SP2888–SP2893. IEEE, 2003.
- [32] I Masmitjà, J González, and S Gomáriz. Buoyancy model for guanay ii auv. In *OCEANS 2014-TAIPEI*, pages 1–7. IEEE, 2014.
- [33] Bambang Sumantr, MN Karsiti, and H Agustawan. Development of variable ballast mechanism for depth positioning of spherical urv. In *Information Technology, 2008. ITSIM 2008. International Symposium on*, volume 4, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [34] Thiyagarajan Ranganathan, Vijendra Singh, Ranjith Nair, and Asokan Thondiyath. Design of a controllable variable buoyancy module and its performance analysis as a cascaded system for selective underwater deployment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, page 1475090216688819, 2017.
- [35] Feng Liu, WeiCheng Cui, and XiangYang Li. China’s first deep manned submersible, jiaolong. *Science China Earth Sciences*, 53(10):1407–1410, 2010.
- [36] Yasuharu TERADA, Akira KOMATSU, Shuji KANDA, Morihiko INOKUMA, Minoru MAKIMURA, and Yukiaki NAGATA. 17. development of high pressure sea water plump. *Naval architecture and ocean engineering*, 22:227–232, 1984.
- [37] So-Nam Yun, Young-Bog Ham, Yoshito Tanaka, and Pan-Mook Lee. New circuit strategy of the variable ballast system for a deep sea submersible. In *Fluid Power and Mechatronics (FPM), 2015 International Conference on*, pages 514–517. IEEE, 2015.
- [38] Wu Defa, Liu Yinshui, Cheng Jinyue, Jiang Zhuo, and Jiang Tao. Research on the pump of seawater hydraulic variable ballast system in submersible. In *Fluid Power and Mechatronics (FPM), 2011 International Conference on*, pages 429–434. IEEE, 2011.

- [39] Qiaoling Kong, Jie Ma, and Dongying Xia. Numerical and experimental study of the phase change process for underwater glider propelled by ocean thermal energy. *Renewable Energy*, 35(4):771–779, 2010.
- [40] Douglas C Webb, Paul J Simonetti, and Clayton P Jones. Slocum: An underwater glider propelled by environmental energy. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 26(4):447–452, 2001.
- [41] Aided navigation: Gps with high rate sensors. 2008.
- [42] Peter C Hughes. Spacecraft attitude dynamics john wiley and sons. *New York*, 1986.
- [43] Thor I Fossen. *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [44] Odd Faltinsen. *Sea loads on ships and offshore structures*, volume 1. Cambridge university press, 1993.
- [45] I Fossen Thor. *Guidance and control of ocean vehicles*, 1994.
- [46] Pepijn van de Ven, Colin Flanagan, and Daniel Toal. Identification of underwater vehicle dynamics with neural networks. In *OCEANS'04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, volume 3, pages 1198–1204. IEEE, 2004.
- [47] Maria João Correia Soares da Costa. *Manobras de condução assistida para veículos submarinos subactuados*. PhD thesis, 2013.
- [48] The Editors of Encyclopædia Britannica. Arquimed'sprinciple, 2017.
- [49] Ali Najafi and Antonio Valente. Design and optimization of opencell™ metal sandwich cylindrical panel.
- [50] Jerzy Garus. A method of power distribution in the power transmission system of a remotely operated vehicle. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 42(2):239–251, 2004.
- [51] seaye. Mct1 thruster performance, 2017.
- [52] Matias Bruno. Sistema de localização subaquático para veículos autónomos. INESC-TEC, 2016.

-
- [53] Pan-Mook Lee, Bong-Huan Jun, Kihun Kim, Jihong Lee, Taro Aoki, and Tadahiro Hyakudome. Simulation of an inertial acoustic navigation system with range aiding for an autonomous underwater vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32(2):327–345, 2007.
- [54] Eduardo Silva, Alfredo Martins, José Miguel Almeida, Hugo Ferreira, António Valente, Maurício Camilo, António Figueiredo, and Cláudia Pinheiro. Turtle-a robotic autonomous deep sea lander. In *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [55] KM Tan, A Anvar, and TF Lu. Autonomous underwater vehicle (auv) dynamics modeling and performance evaluation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6:2012–10, 2012.
- [56] G Rui, S Alexandre, F Sergio, S Joao, and P Fernando. A new rov design: Issues on low drag and mechanical symmetry. *Underwater Systems and Technology Laboratory, Porto*, 2005.
- [57] Alvaro García Cazorla et al. Ros: Robot operating system. 2013.
- [58] Karl Johan Åström and Tore Hägglund. *Automatic tuning of PID controllers*. Instrument Society of America (ISA), 1988.
- [59] enacademic. Pid controller, 2017.
- [60] Guilherme Marques Amaral Silva. *Desenvolvimento e Controlo de um Veículo Autónomo Aéreo Quadroto*. PhD thesis, 2009.
- [61] John G Ziegler and Nathaniel B Nichols. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 64(11), 1942.
- [62] None. Tuning for pid controllers, 2017.
- [63] Mary Shaw and David Garlan. *Software architecture: perspectives on an emerging discipline*, volume 1. Prentice Hall Englewood Cliffs, 1996.