

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM VEÍCULO SUBMARINO
DE OPERAÇÃO REMOTA

Christiano Goulart

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Ramon Romankevicius Costa, D.Sc.

Prof. Fernando Cesar Lizarralde, D.Sc.

Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2007

GOULART, CHRISTIANO

Modelagem, Simulação e Controle de um
Veículo Submarino de Operação Remota [Rio
de Janeiro] 2007

XII, 126 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. ROV
2. Inspeção de túneis
3. Identificação de parâmetros
4. Simulador de ROVs
5. Controle

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha Mãe, Sandra Marly Pevidor de Lemos,
por sempre ter me incentivado e acreditado neste sonho,
mesmo quando minhas convicções falhavam.

Ao meu Pai, Ernani Goulart,
pelo exemplo de profissional e de ética.

À minha Tia-avó, Elisabeth Pavolide de Warren, *in memoriam*,
que deixou como legado minha formação profissional.

À minha companheira, Erika Franco Chagas,
pelo apoio e compreensão em todos os momentos do curso.

Agradecimentos

A Deus, primeiramente, por ter me conduzido nesta caminhada e ter possibilitado a conclusão desta etapa com êxito.

Ao professor e orientador nesta dissertação, Ramon Romankevicius Costa, pela amizade, auxílio, incentivo em começar o curso e definição do tema da dissertação. Agradeço pela confiança depositados em minha pessoa.

Aos professores Fernando Cesar Lizarralde e Liu Hsu pelos ensinamentos.

Ao grande amigo Osmar de Souza Cardia Jr. por todo o apoio e incentivo na conclusão deste trabalho.

Aos Engenheiros da Marinha, referências nesta dissertação e amigos, Roberto Blanco Dominguez e Alexandre Alves Santiago, por toda a orientação prestada.

A todos os colegas do curso e do Laboratório de Controle (LabCon) que de alguma forma contribuíram neste trabalho, em especial a Jorge Luiz Venero Ugarte, Ricardo Jorge Barbosa Jr., Téo Cerqueira Revoredo, Ilka Cristina Fernandes de Souza Telles, Tiago Roux de Oliveira, Fernando Pereira dos Santos, Rodrigo Fonseca Carneiro e Alessandro Jacoud Peixoto.

Ao colega Marcelo Torres de Queiroz pelas figuras do ROV LUMA apresentadas nesta dissertação.

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

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM VEÍCULO SUBMARINO DE OPERAÇÃO REMOTA

Christiano Goulart

Junho/2007

Orientador: Ramon Romankevicius Costa

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho foi abordada a modelagem da dinâmica do veículo submarino de operação remota (ROV - *Remotely Operated Vehicle*) desenvolvido pelo GSCAR (Grupo de Simulação e Controle em Automação e Robótica) da COPPE/UFRJ em parceria com a empresa AMPLA para inspecionar dutos de adução em barragens de usinas hidrelétricas, denominado ROV LUMA. Tal veículo é dotado de dois vasos de pressão para a eletrônica e as baterias, um sistema de quatro propulsores, câmeras, luminárias e flutuadores. Propõe-se um simulador de ROVs que apresente resultados bastante realistas do comportamento dinâmico do veículo simulado. Por este fato, são necessários métodos de ajuste para que exista coerência entre os resultados de simulação e os obtidos experimentalmente. São apresentados procedimentos experimentais para identificar as características hidrodinâmicas de veículos submarinos, como as massas adicionais, a força de arraste e o torque restaurador além dos centros de gravidade e de flutuação do veículo. Utiliza-se uma abordagem vetorial para calcular a contribuição de cada propulsor ao movimento do ROV. São apresentadas, também, provas estáticas e dinâmicas, em condições de amarração (*bollard-pull*), para a modelagem dos propulsores. Em seguida, são descritos os compensadores estáticos e de zona morta assim como a matriz de desacoplamento para que os controladores possam atuar em cada grau de liberdade (DOF - *Degree of Freedom*) independentemente.

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

MODELING, SIMULATION AND CONTROL OF A REMOTELY OPERATED UNDERWATER VEHICLE

Christiano Goulart

June/2007

Advisor: Ramon Romankevicius Costa

Department: Electrical Engineering

In this work is approached the modeling of the dynamics of the Remotely Operated Vehicle (ROV) developed by GSCAR (Group of Simulation and Control in Automation and Robotics) of COPPE/UFRJ in partnership with the AMPLA company to inspect dam water delivery ducts in barrages of hydroelectric plants, denominated ROV LUMA. The vehicle is endowed with two pressure vessels for the electronics and the batteries, a system of four propellers, cameras, lamps and floaters. Is proposed a simulator of ROVs that presents results plenty realists of the dynamic behavior of the simulate vehicle. For this fact, are necessary adjustment methods so that coherence exists among the simulation results and obtained them experimentally. Experimental procedures are presented to identify the hydrodynamic characteristics of submarine vehicles, as the additional masses, the force of it drags and the restoring torque besides the centers of gravity and of flotation of the vehicle. A vectorial approach is used to calculate the contribution of each propeller to the movement of ROV. They are presented, also, proofs statics and dynamic, in fastening conditions (bollard-pull), for the modeling of the propellers. Soon after, are described the static compensators and of dead zone as well as the decoupling matrix so that the controllers can act in each degree of freedom (DOF) independently.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Desafios tecnológicos	2
1.3	Projeto conceitual	3
1.4	ROV LUMA	5
1.5	Objetivos deste trabalho	6
1.6	Fases deste trabalho	6
1.7	Revisão bibliográfica	6
1.7.1	Modelagem de ROVs	7
1.7.2	Identificação de parâmetros hidrodinâmicos	8
1.7.3	Inspeção de túneis submersos	9
1.8	Organização desta dissertação	10
2	Modelagem de ROVs	11
2.1	Sistemas de coordenadas	12
2.2	Equações de movimento de um ROV	14
2.2.1	Conversões entre os sistemas de coordenadas	16
2.2.2	Matriz de inércias	19
2.2.3	Efeitos inerciais	23
2.2.4	Efeitos da gravidade e da flutuação	25
2.2.5	Efeitos hidrodinâmicos	28
2.3	Modelagem dos propulsores	32
2.3.1	Determinação de R_{pi} e P_{pi}	34
2.4	Matriz de acoplamento	35
2.4.1	Matriz de acoplamento completa	36
2.4.2	Matriz de acoplamento simplificada	36
3	Identificação dos parâmetros do ROV	38
3.1	Identificação das massas adicionais	38
3.1.1	Método mecânico de oscilação	40
3.1.2	Método de oscilação pelo controle proporcional	42
3.1.3	Método de oscilação com relé	46
3.2	Identificação dos coeficientes de arraste	49
3.3	Obtenção dos centros de gravidade e flutuação	50
3.3.1	Centro de gravidade	51
3.3.2	Centro de flutuação	53

3.4	Identificação dos parâmetros dos propulsores (C_T^* e C_Q^*)	53
4	Simulador de ROVs	55
4.1	Operação do simulador	56
4.1.1	Configuração dos parâmetros	56
4.1.2	Operando o <i>joystick</i>	57
4.1.3	Interface visual	59
4.2	Descrição do simulador	61
4.2.1	Joystick	62
4.2.2	Controlador	65
4.2.3	Dinâmica do ROV	66
4.2.4	Conversor	67
4.2.5	Realidade Virtual	68
4.3	Testes básicos no simulador em malha aberta	69
4.3.1	Testes com condições iniciais nulas	70
4.3.2	Testes com condições iniciais não nulas	73
4.3.3	Testes com condições limites de operação	77
5	Projeto do controlador	82
5.1	Compensadores	83
5.1.1	Compensador de não-linearidade quadrática	85
5.1.2	Compensador de zona morta	85
5.2	Desacoplamento	86
5.3	Modelo simplificado para a dinâmica de ROVs	89
5.3.1	Testes comparativos com o modelo simplificado	90
5.4	Controle automático	91
5.4.1	Controle PD	92
5.4.2	Controle P-PI	95
5.5	Testes no simulador em malha fechada	98
5.5.1	Testes com excitação em degrau nas referências	98
5.5.2	Testes na presença de perturbação	101
5.5.3	Testes do desacoplamento	101
6	Conclusões	103
6.1	Conclusões gerais	103
6.2	Aperfeiçoamentos e continuidade em pesquisas futuras	104
	Referências Bibliográficas	106
	Apêndices	109
A	Projeto mecânico do ROV	109
B	Coefficientes de arraste hidrodinâmico	111
C	Arquivos auxiliares e de configuração do simulador	114

Lista de Símbolos

O_m	Origem do sistema de referência móvel (do corpo do ROV)
x_m	Eixo longitudinal do sistema de referência móvel (do corpo do ROV), positivo à frente
y_m	Eixo lateral do sistema de referência móvel (do corpo do ROV), positivo à direita
z_m	Eixo vertical do sistema de referência móvel (do corpo do ROV), positivo para baixo
O	Origem do sistema de referência estacionário
x	Eixo longitudinal do sistema de referência estacionário, positivo à frente
y	Eixo lateral do sistema de referência do estacionário, positivo à direita
z	Eixo vertical do sistema de referência do estacionário, positivo para baixo
ϕ	Ângulo de jogo (<i>roll</i>) ao redor do eixo x [rad]
θ	Ângulo de arfagem (<i>pitch</i>) ao redor do eixo y [rad]
ψ	Ângulo de rumo (<i>heading</i>) ao redor do eixo z [rad]
η	Vetor posição e orientação do veículo representadas no sistema de referência estacionário
$\dot{\eta}_c$	Velocidade da corrente marinha representada no sistema fixo [m/s]
ν	Vetor velocidade de translação e de rotação do veículo no sistema móvel

u	Velocidade de translação na direção do eixo x_m (sistema móvel) $[m/s]$
v	Velocidade de translação na direção do eixo y_m (sistema móvel) $[m/s]$
w	Velocidade de translação na direção do eixo z_m (sistema móvel) $[m/s]$
p	Velocidade de rotação em torno do eixo x_m (sistema móvel) $[rad/s]$
q	Velocidade de rotação em torno do eixo y_m (sistema móvel) $[rad/s]$
r	Velocidade de rotação em torno do eixo z_m (sistema móvel) $[rad/s]$
ν_c	Velocidade da corrente marinha representada no sistema móvel $[m/s]$
v_{ci}	Velocidade da água que entra no disco do i -ésimo hélice $[m/s]$
$J(\eta_2)$	Matriz de transformação de coordenadas
τ	Vetor força-momento nos seis DOFs
X	Força externa resultante que atua na direção do eixo x $[N]$
Y	Força externa resultante que atua na direção do eixo y $[N]$
Z	Força externa resultante que atua na direção do eixo z $[N]$
K	Torque externo resultante que atua em torno do eixo x $[Nm]$
M	Torque externo resultante que atua em torno do eixo y $[Nm]$
N	Torque externo resultante que atua em torno do eixo z $[Nm]$
∇	Volume de referência $[m^3]$
m	Massa do ROV $[kg]$
m_{ad}	Massa adicional do veículo $[kg]$
M	Matriz de inércias resultante do veículo submerso
M_{CR}	Matriz de inércia do corpo rígido
M_A	Matriz de inércia adicional

I_x, I_y, I_z	Momentos de inércia nos eixos do sistema móvel [$kg\ m^2$]
I_{xy}, I_{yz}, I_{zx} , I_{yx}, I_{zy}, I_{xz}	Produtos de inércia [$kg\ m^2$]
E_I e T_I	Empuxos e torques inerciais [N e Nm]
E_H e T_H	Empuxos e torques de arraste hidrodinâmico [N e Nm]
D_L e D_Q	Matrizes de arraste linear e quadrático
E_{GB} e T_{GB}	Empuxos e torques gerados pela gravidade e pela flutuação [N e Nm]
E_G	Empuxo de gravidade [N]
E_B	Empuxo de flutuação [N]
R_G	Centro de gravidade (ou centro de massa) do ROV representado no sistema móvel [m]
R_B	Centro de flutuação (ou centro de carena) do ROV representado no sistema móvel [m]
ρ	Massa específica da água [kg/m^3]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
E_p e T_p	Empuxos e torques gerados pelo conjunto de propulsores [N e Nm]
E_{prop_i} e T_{prop_i}	Empuxo e torque gerados pelo i-ésimo hélice [N e Nm]
n_{prop_i}	Velocidade de rotação do i-ésimo hélice [rps]
u_{prop_i}	Tensão elétrica aplicada ao i-ésimo propulsor [$volts$]
$C_T^*(\sigma)$	Coefficientes característicos de empuxo dos hélices
$C_Q^*(\sigma)$	Coefficientes característicos de torque dos hélices
D	Diâmetro do hélice [m]

Lista de Acrônimos

ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i> (Veículo Operado Remotamente)
AUV	<i>Autonomus Underwater Vehicle</i> (Veículo Submarino Autônomo)
TSL	<i>Tunnel Sea Lion</i> (ROV <i>Sea Lion</i> para inspeção em Túneis)
DOF	<i>Degree of Freedom</i> (Grau de Liberdade)
PD	<i>Proportional and Derivative</i> (Controle Proporcional e Derivativo)
P-PI	<i>Proportional + Proportional and Integral</i> (Controle Proporcional + Proporcional e Integral)
SISO	<i>Single-input-single-output</i> (Sistema com uma entrada e uma saída)
MIMO	<i>Multiple-input-multiple-output</i> (Sistema com múltiplas entradas e múltiplas saídas)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os veículos de operação remota (ROVs - *Remotely Operated Vehicles*) têm sido utilizados para realizar uma ampla variedade de funções. Geralmente, os robôs submarinos substituem os mergulhadores e conseguem atingir profundidades nunca antes exploradas. São utilizados para tarefas de observação subaquática, estudos científicos sobre os habitats oceânicos, localização e resgate de destroços de navios ou de aviões, sondagens dos solos marinhos para estudos científicos, inspeção e reparo de cabos de telecomunicações subaquáticos, operações de perfuração de petróleo e gás, como apoio para construções, etc. Também são utilizados pela Marinha para empreender observações subaquáticas e recuperação de material bélico perdido, para destruir minas anti-navio e para prestar socorro submarino. Os ROVs são utilizados, ainda, para fins acadêmicos e científicos, uma vez que podem ser instrumentos de estudos ecológicos de *habitats* do mar profundo e obter fotografias e filmagens, de alta qualidade, de locais anteriormente inacessíveis.

Existem ROVs de muitos formatos e tamanhos (Guo, Futukada & Asaka 2003). Sendo que os menores são usados principalmente para observação.

A indústria de petróleo e gás é a maior usuária de ROVs. Os ROVs ajudam na perfuração, instalação e construção de estruturas submersas. Muitas reservas estão situadas a profundidades subaquáticas de 2000 *m* ou mais, não sendo por isso acessíveis aos mergulhadores.

Atualmente, existe um grande interesse no desenvolvimento de ROVs para executar missões de inspeção em estruturas submersas em barragens hidrelétricas e lagos (Clarke 2001, Ageev, Boreyko, Gornak, Matvienko, Scherbatyuk, Vanlin & Zolotarev 2000).

Em meados de 2002, a empresa de energia elétrica do Estado do Rio de Janeiro AMPLA propôs desenvolver, em parceria com o Grupo de Simulação e Controle em Automação e Robótica (GSCAR), Laboratório de Controle (LabCon) da COPPE/PEE, um ROV para realizar missões de inspeção em túneis de adução em barragens de usinas hidrelétricas (Carneiro, Leite, Peixoto, Goulart, Costa, Lizarralde & Hsu 2006).

É prática usual, em outros países, realizar inspeções nos túneis de adução destas barragens em intervalos de cerca de cinco anos para a detecção de eventuais danos às paredes e a verificação do acúmulo de detritos no seu leito. Este tipo de operação poderia ser feito por inspeção direta no interior do túnel após retirada completa da água. No entanto, o seu esvaziamento poderia ocasionar o surgimento de pressões externas, devidas à ação do lençol freático e, conseqüentemente, causar desmoronamentos. Por outro lado, o emprego de mergulhadores para a realização desse tipo de operação é extremamente arriscado devido às distâncias envolvidas durante a realização da inspeção. Desta forma, os ROVs se destacam como uma alternativa tecnicamente viável para realizar missões de inspeção em túneis de adução com segurança.

1.2 Desafios tecnológicos

Apesar de todos os progressos já realizados na construção de ROVs, a sua utilização dentro de túneis ainda apresenta muitos desafios. Diferentemente das operações realizadas em mar aberto, onde tais veículos são posicionados com suas gaiolas nas proximidades do local de trabalho, a inspeção de túneis requer o deslocamento do ROV por longas distâncias na horizontal. Para tanto é necessário que se disponha de um cabo umbilical, através do qual passa toda a comunicação entre o veículo e o operador na superfície, de comprimento apropriado para a missão. O cabo umbilical é um elemento chave que requer uma certa estrutura para sua manipulação e que pode, dependendo do caso, influenciar diretamente no próprio dimensionamento do ROV, já que ele deve ser capaz de puxar tal cabo dentro do túnel.

Um outro desafio associado às inspeções de túneis é a baixa visibilidade. Nestas

condições, a utilização de métodos convencionais de iluminação do ambiente, semelhante aos que são empregados em expedições em mar aberto, podem não permitir a obtenção de imagens suficientemente nítidas. A luz incidente nas partículas em suspensão é refletida causando o fenômeno conhecido como *back scattering*. Algumas das opções para contornar esses problemas são a utilização de métodos não convencionais de iluminação, a utilização de câmeras especiais com intensificador de luminosidade e, em casos mais extremos, a geração de imagens através de sonar.

1.3 Projeto conceitual

Para contornar os problemas tecnológicos mencionados anteriormente, foi idealizado um projeto conceitual de ROV com as seguintes características:

1. Alimentação por baterias para eliminar os condutores no cabo umbilical que seriam necessários para a transmissão de energia elétrica.
2. Comunicação entre o ROV e a console de comando através de fibra óptica.
3. Sistema de lançamento e recolhimento de fibra óptica instalado a bordo do ROV para reduzir problemas causados pelo arraste do cabo.
4. Sistema de flutuação ajustável para compensar a variação do peso do ROV à medida que a fibra óptica é lançada ou recolhida e, assim, reduzir o consumo de energia pelo propulsor vertical.
5. Sistema de iluminação composto por diodos emissores de luz (LEDs - Light Emitting Diodes) de alta intensidade e baixo consumo visando reduzir o consumo de energia das baterias.
6. Sistema de navegação composto por uma unidade de navegação inercial (para medição do rumo), um sensor de profundidade e um sonar (para medir a distância do veículo em relação à parede do túnel).
7. Sistema de inspeção composto por uma câmera de vídeo colorida, uma câmera de vídeo preto e branco, uma câmera de alta sensibilidade e um sonar.

8. Configuração mínima de quatro propulsores sendo dois instalados no sentido longitudinal, um no sentido transversal e um no sentido vertical. A combinação dos empuxos destes quatro propulsores deve permitir o controle de quatro graus de liberdade (DOFs - *Degrees of freedom*) do ROV (rumo, posição no eixo transversal, posição no eixo longitudinal e profundidade).
9. Estrutura sem carenagem (*open-frame*) visando facilitar o acesso às partes do veículo para manutenção.
10. Formato final do veículo sem arestas ou partes salientes de tal maneira que permita o seu recolhimento através da tração do cabo umbilical em caso de pane.

Este projeto conceitual incorpora elementos já utilizados em dois ROVs especificamente configurados para operações em túneis descritos na literatura. O sistema de câmeras e sonar é semelhante ao empregado pelo ROV da Mantaro (Clarke 2001). A utilização de baterias embarcadas e comunicação através de fibra óptica foram inspiradas no ROV *Tunnel Sea Lion* (TSL) (Ageev et al. 2000).

O TSL tem um sistema que libera um cabo de fibra óptica livremente à medida que o ROV avança. No projeto proposto, um dispositivo tipo bobinadeira realiza a tarefa de liberação de um cabo contendo a fibra durante a penetração do ROV no túnel e o seu recolhimento durante a manobra de retorno para a base.

Uma novidade introduzida neste projeto é o sistema de iluminação composto por LEDs de alta intensidade e baixo consumo. Este sistema foi objeto de um pedido de patente (Peixoto, Lizarralde, Cunha, Hsu, Gomes, Costa & Carneiro 2003).

O veículo deverá operar na posição horizontal. Esta condição será mantida por um torque restaurador resultante da distribuição uniforme dos equipamentos pela sua estrutura e pelo posicionamento adequado dos flutuadores, na parte superior da estrutura, e dos lastros, na parte inferior (Filho 1996).

A solução adotada neste projeto conceitual para a navegação do ROV dentro do túnel, requer a utilização de três malhas de controle que, quando habilitadas, garantem a regulação da:

- profundidade, cuja medição será feita por um sensor de pressão diferencial,
- rumo, fornecido por uma unidade de medição inercial (IMU) e

- distância em relação às paredes do túnel, cuja medição será feita por um sensor hidroacústico (sonar).

Quando as três malhas de controle estiverem habilitadas, o operador do sistema ficará somente com o controle manual da posição do ROV na direção longitudinal do túnel a se inspecionar. A idéia é facilitar a operação do ROV durante a inspeção reduzindo o controle manual do sistema a um único DOF.

1.4 ROV LUMA

Tendo em vista os conceitos apresentados na seção anterior, o GSCAR, em parceria com a empresa AMPLA, desenvolveram o ROV LUMA mostrado na Figura 1.1.

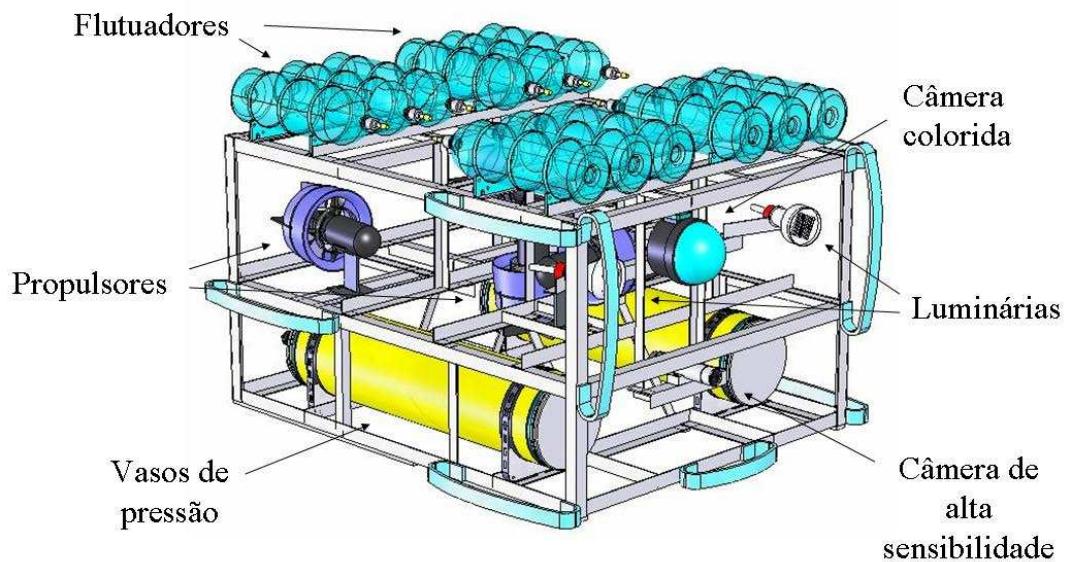


FIGURA 1.1: Vista em perspectiva do ROV LUMA.

Observa-se na Figura 1.1 que foram instaladas duas câmeras de vídeo no ROV LUMA: uma colorida com *pan* e *tilt* e outra fixa, de alta sensibilidade, que captura imagens em preto e branco.

As baterias que compõem o seu sistema de suprimento de energia embarcado foram dimensionadas para permitir a realização de missões de inspeção de até oito horas de duração.

A comunicação do veículo com a superfície é feita através de um cabo de fibra

óptica, cujo projeto das bobinadeiras está sendo desenvolvido em colaboração com a PUC de Poços de Caldas.

Devido à utilização de flutuadores construídos com garrafas PET (Poli-Tereftalato de Etileno) pressurizadas, a máxima profundidade que o veículo pode atingir é de aproximadamente 40 m . A velocidade máxima do ROV à vante é de 2 m/s . Com estas características, espera-se que o veículo tenha um desempenho satisfatório nas missões de inspeções de túneis de adução.

1.5 Objetivos deste trabalho

Os objetivos fundamentais deste trabalho são implementar um simulador de ROVs e ajustá-lo através da identificação de parâmetros do ROV LUMA, para simular o seu comportamento dinâmico.

1.6 Fases deste trabalho

As fases previstas para o desenvolvimento deste trabalho são:

1. Implementação do simulador de ROVs em MATLAB/SIMULINK;
2. Descrição de procedimentos para a identificação dos parâmetros de um ROV;
3. Simulação do comportamento dinâmico do ROV LUMA em malha aberta;
4. Projeto de controladores de profundidade, rumo e distância até a parede do túnel;
5. Simulação do comportamento dinâmico do ROV LUMA em malha fechada.

1.7 Revisão bibliográfica

Esta seção apresenta uma breve revisão das fontes bibliográficas pesquisadas organizadas por temas.

1.7.1 Modelagem de ROVs

Diversos modelos matemáticos para descrever o comportamento dinâmico de ROVs foram propostos ao longo dos anos. Dominguez (1989) comparou diversas propostas de modelagem, existentes até então. Em sua dissertação foram detalhadamente comparados os equacionamentos propostos por Nomoto & Hattori (1986) e Ishidera, Tsusaka, Ito, Oishi, Chiba & Maki (1986).

De maneira resumida, podemos dizer que Nomoto & Hattori (1986) descreveram as características hidrodinâmicas do sistema *Dolphin 3K* e analisaram a manobrabilidade do veículo através de simulações em computador. Ishidera et al. (1986) abordaram o veículo *MURS 300 Mark II*, desenvolvido para inspeção em represas hidrelétricas, e construíram um modelo matemático que descreve o movimento do veículo nos seis graus de liberdade. Nesse trabalho, as forças hidrodinâmicas foram equacionadas em função das velocidades de translação e rotação do veículo e determinadas por meio de testes em tanque de provas.

Dominguez (1989) também tratou do desenvolvimento de um programa de simulação de ROVs altamente interativo com o usuário denominado Simulador *Off-Line* (SOL) pelo fato de que o tempo gasto para realizar a simulação poderia ser maior do que o tempo físico efetivamente simulado. No SOL foram avaliadas estratégias convencionais de controle para sistemas tipo duplo integrador e controladores Proporcional e Derivativo (PD - *Proportional and Derivative*) e Proporcional + Proporcional e Integral (P-PI - *Proportional + Proportional and Integral*) para o rumo e a profundidade a serem utilizadas no ROV TATUÍ. Este veículo foi desenvolvido pela Consub Equipamentos e Serviços LTDA. em parceria com a Petrobras para inspeções em águas profundas.

Cunha (1992) revisou o modelo apresentado em (Dominguez 1989) e propôs um sistema de controle adaptativo por modelo de referência e estrutura variável (VS-MRAC - *Variable Structure Model-Reference Adaptive Controller*) para o ROV TATUÍ. Foram projetados controladores para os quatro DOFs manipuláveis diretamente. Tal estratégia foi comparada no programa SOL com os controladores convencionais propostos em (Dominguez 1989). Além disso, foram abordados diversos aspectos desses projetos de controle, destacando-se a proposta de uma versão em tempo discreto.

Filho (1996) dissertou sobre o controle de cota de submarinos. Porém, uma série de conceitos apresentados sobre comportamento de veículos submarinos tripulados são também aplicáveis a ROVs e, por isso, citados na descrição do modelo matemático que representa o comportamento do sistema.

Mais recentemente, Soares (2002) apresentou uma comparação entre os sistemas constitutivos de veículos submarinos não tripulados, ROVs e AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles* - Veículos Submarinos Autônomos), e propôs um projeto de plataforma de testes de baixo custo para o desenvolvimento desse tipo de veículo submarino.

Na representação feita por ângulos de *Euler* da rotação completa nos três eixos de coordenadas há singularidades para determinados ângulos de atitude. Antonelli, Caccavale, Chiaverini & Fusco (2003) utilizaram *Quaternions* para representar a orientação do ROV de maneira que este pudesse rotacionar em todos os eixos sem atingir nenhuma singularidade. Esta abordagem é importante nos projetos dos ROVs que possuem a capacidade de realizar tais manobras. Entretanto, isso é desnecessário no caso estudado nesta dissertação uma vez que a distância entre os centros de gravidade e flutuação é suficientemente grande para que o ROV não opere próximo às singularidades.

Souza (2003) dissertou sobre o emprego de técnicas de controle P-PI, PID (*Proportional, Integral and Derivative* - Proporcional, Integral e Derivativo) e VSC (*Variable Structure Controller* - Controle por Estrutura Variável) em veículos submarinos. Os propulsores foram modelados considerando-se os efeitos eletromecânicos dos motores elétricos e hidrodinâmicos causados pela interação entre a água e o propulsor.

1.7.2 Identificação de parâmetros hidrodinâmicos

No que diz respeito à identificação dos parâmetros, diversos métodos podem ser encontrados na literatura.

Wilczynski & Diehl (1995) apresentaram métodos de aproximação alternativa na determinação dos centros de gravidade e de flutuação de embarcações que servem de referência na identificação destes parâmetros em ROVs.

Avila (2004) apresentou uma abordagem experimental para estimar as características hidrodinâmicas de veículos submarinos nos movimentos longitudinal, lateral e vertical. Tal abordagem consiste em ensaios com um modelo em escala reduzida no tanque de

provas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). Foi utilizada uma barra interligando uma célula de carga ao propulsor, para identificar seus parâmetros, ou ao veículo, para identificar seus coeficientes de arraste deslocando o mesmo com velocidade constante. Para determinar as massas adicionais do ROV, foi empregada uma estrutura metálica, em formato de gaiola, com molas ligadas ao veículo. Com este aparato, uma oscilação é imposta ao veículo na direção desejada e, com isso, são estimadas as massas adicionais do sistema submerso. Anteriormente (Goodman 1960), um sistema mecânico de oscilação, denominado PMM (Planar Motion Mechanism) fazia o veículo vibrar pela ação de um motor.

Santiago (2004) apresentou um processo de obtenção das massas adicionais através de malhas de controle proporcional que se comportam como molas virtuais. Para isso, foi utilizado um tanque oceânico com capacidade de geração de perturbações ambientais causados pelo vento, correntes e ondas. Foi dedicada atenção especial à obtenção de coeficientes de amortecimento quadráticos e lineares com base em ensaios de decaimento passivo. A técnica havia sido proposta para um modelo de plataformas de petróleo, não-linear, com três graus de liberdade e válido para baixas frequências. Entretanto, o procedimento também se mostrou adequado à identificação de parâmetros de ROVs.

Outra abordagem interessante ao desafio de identificar os parâmetros hidrodinâmicos é a utilização de redes neurais artificiais. Ven, Johansen, Sorensen, Flanagan & Toal (2004a) propõem usar redes neurais em paralelo com o modelo de um determinado veículo submarino para identificar os parâmetros hidrodinâmicos tais como o arraste e os coeficientes de massas adicionais. A grande vantagem deste método é que, mesmo diante de incertezas paramétricas, a rede é treinada até obter uma boa aproximação dos valores dos parâmetros a identificar.

1.7.3 Inspeção de túneis submersos

O ROV LUMA foi idealizado para operações de inspeção em túneis submersos e, portanto, seu projeto deve levar em consideração as vantagens e dificuldades encontradas neste tipo de ambiente.

Ageev et al. (2000) descreveram características do veículo submarino *TSL* (*Tunnel Sea Lion*) desenvolvido para operações de inspeção em túneis submersos. A comu-

nicação de dados entre este veículo e a interface com o usuário é feita por fibra óptica. Além disso, o *TSL* carrega sua própria fonte de energia (baterias) e, por isso, necessita apenas de um cabo umbilical com diâmetro pequeno.

Clarke (2001) apresentou o veículo submarino *ASI MANTARO*, também desenvolvido para inspeções em túneis submersos, e descreveu mais algumas regras e técnicas adotadas no projeto para contornar os problemas desse tipo de inspeção.

Carneiro et al. (2006) trataram do projeto conceitual do ROV LUMA desenvolvido para inspeção em barragens e túneis de adução. Foram projetados controladores de rumo e de profundidade para regular a posição e a orientação do veículo em frente à parede que se deseja inspecionar.

1.8 Organização desta dissertação

No Capítulo 1 são apresentados a motivação, dando ênfase a inspeções de dutos, e os objetivos desta dissertação. Em seguida, o projeto conceitual do ROV LUMA é descrito e uma breve revisão bibliográfica é realizada de maneira a mostrar a posição desta dissertação no cenário atual.

O Capítulo 2 é dedicado ao detalhamento dos modelos matemáticos que descrevem o comportamento de um veículo submarino.

No Capítulo 3 são apresentados métodos experimentais e computacionais de identificação de parâmetros de ROVs.

O Capítulo 4 apresenta um simulador bastante realista, no qual o modelo matemático de um veículo submarino é implementado em ambiente MATLAB/SIMULINK. O ajuste deste simulador é realizado através da identificação de parâmetros descrita no Capítulo 3 deste trabalho.

No Capítulo 5 são descritos todos os sistemas empregados no sistema de controle do ROV LUMA. São apresentadas as aproximações consideradas com o objetivo de simplificar a dinâmica do veículo. Com base nas estratégias PD e P-PI, são projetados controles de profundidade, de posição em relação à parede do túnel e de rumo. Por fim, tais estratégias de controle são comparadas e avaliadas.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões desta dissertação e as perspectivas e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelagem de ROVs

Modelos dinâmicos para ROVs são importantes para o projeto de sistemas precisos de posicionamento dinâmico e desenvolvimento de simuladores para o treinamento de operadores (Goheen & Jefferys 1990).

Neste capítulo são descritos inicialmente o sistema de coordenadas estacionário e o sistema de coordenadas móvel. Em seguida, são apresentadas as equações matemáticas que regem o comportamento de um veículo submarino. São abordados dois modelos para simulação da dinâmica de ROVs com comportamentos bastante coerentes e todos os seus termos são descritos e comparados.

Fenômenos importantes como os efeitos inerciais, gravitacionais, de flutuação e hidrodinâmicos são explicados e devidamente equacionados de maneira a compor os modelos matemáticos do veículo.

São descritas algumas aproximações e simplificações no modelo dinâmico do veículo que podem ser adotadas devido às suas características construtivas como a simetria, a disposição dos propulsores, a distribuição de peso na estrutura e etc.

Os propulsores são modelados, com suas não-linearidades, e os vetores que descrevem a posição e a orientação de cada um são explicados detalhadamente. É apresentada a matriz de desacoplamento, que relaciona a contribuição de cada propulsor com as forças e momentos resultantes na dinâmica do movimento.

Uma vez que o escopo deste trabalho é o ROV LUMA para inspeções em túneis submersos, o efeito do cabo umbilical não é considerado pois, para este tipo de operação, o cabo utilizado influencia muito pouco na dinâmica do veículo.

2.1 Sistemas de coordenadas

Na representação da dinâmica do ROV são adotados dois sistemas de coordenadas. O primeiro, denominado sistema móvel, está referenciado ao próprio veículo e se movimenta com ele, enquanto que o outro, denominado sistema inercial, está fixo em relação à Terra. A nomenclatura utilizada para cada um destes sistemas de coordenadas é apresentada a seguir.

Sistema móvel (fixo em relação ao ROV):

- O_m ... origem do sistema móvel,
- x_m ... eixo longitudinal, positivo à frente,
- y_m ... eixo transversal, positivo à direita,
- z_m ... eixo vertical, positivo para baixo.

Sistema inercial ou estacionário (fixo em relação à Terra):

- O ... origem do sistema,
- x, y, z ... eixos.

A atitude (ou orientação) do ROV no sistema de coordenadas estacionário é descrita pelos ângulos:

- ϕ ... ângulo de jogo ou *roll* (ao redor do eixo x) [rad],
- θ ... ângulo de arfagem ou *pitch* (ao redor do eixo y) [rad],
- ψ ... ângulo de rumo, *yaw* ou *heading* (ao redor do eixo z) [rad].

A posição e a atitude do veículo em relação à origem do sistema estacionário (O) pode ser escrita na forma vetorial como:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}, \quad \eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

onde:

- η_1 ... posição do veículo em relação ao sistema estacionário [m],
- η_2 ... orientação do veículo em relação ao sistema estacionário [rad].

Logo, as velocidades de translação e de rotação em relação ao sistema de coordenadas estacionário são descritas como:

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{\eta}_1 = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad \dot{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

enquanto que as velocidades do veículo no sistema de coordenadas móvel são dadas por:

$$\nu = \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix}, \quad \nu_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad \nu_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

onde:

ν_1 ... velocidade de translação no sistema móvel $[m/s]$,

ν_2 ... velocidade de rotação no sistema móvel $[rad/s]$,

u ... componente de ν_1 na direção do eixo x_m $[m/s]$,

v ... componente de ν_1 na direção do eixo y_m $[m/s]$,

w ... componente de ν_1 na direção do eixo z_m $[m/s]$,

p ... componente de ν_2 em torno do eixo x_m $[rad/s]$,

q ... componente de ν_2 em torno do eixo y_m $[rad/s]$,

r ... componente de ν_2 em torno do eixo z_m $[rad/s]$.

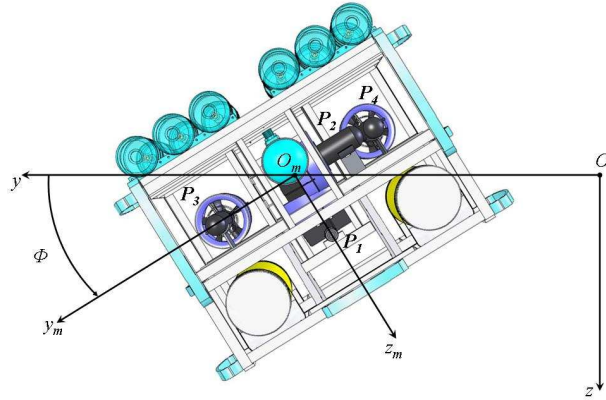


FIGURA 2.1: Vista frontal do ROV LUMA. Destaca-se o ângulo de jogo (ϕ).

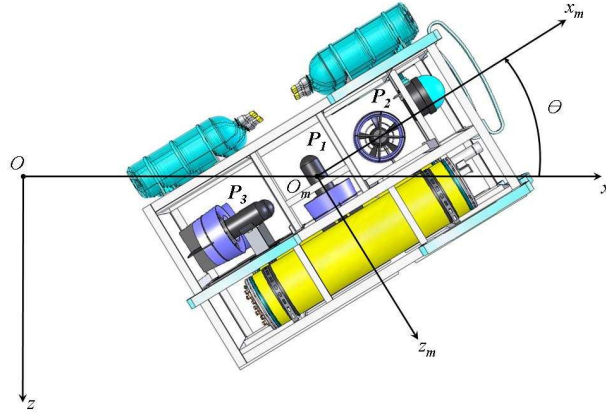


FIGURA 2.2: Vista lateral do ROV LUMA. Destaca-se o ângulo de arfagem (θ).

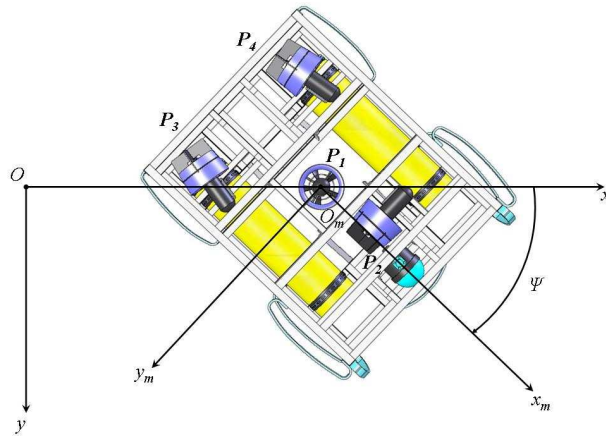


FIGURA 2.3: Vista superior do ROV LUMA. Destaca-se o ângulo de rumo (ψ).

Nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3, são ilustradas as vistas parciais dos sistemas de coordenadas supra citados. Para uma melhor visualização do posicionamento dos propulsores, algumas partes do veículo foram retiradas dos desenhos.

2.2 Equações de movimento de um ROV

Foram propostos diversos modelos dinâmicos para ROVs na literatura. Inicialmente, foi estudado o modelo matemático apresentado por Dominguez (1989) e revisado por Cunha (1992). Este modelo foi produzido a partir de um levantamento bastante abrangente acerca dos modelos dinâmicos existentes (Nomoto & Hattori 1986, Ishidera et al. 1986) e, por isso, foi considerado nas primeiras simulações. Neste modelo, o

comportamento do veículo submarino é descrito por

$$\dot{\nu} = M^{-1} \begin{bmatrix} E_H + E_{GB} + E_P + E_C - E_I \\ T_H + T_{GB} + T_P + T_C - T_I \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

onde:

$\dot{\nu}$... é a derivada do vetor velocidade (aceleração) de translação e rotação do veículo no sistema móvel,

M ... é a matriz de inércias,

E_H e T_H ... são os empuxos e torques de arraste hidrodinâmico [N e Nm],

E_{GB} e T_{GB} ... são os empuxos e torques de restauração, gerados pela interação entre os efeitos de gravidade e de flutuação [N e Nm],

E_P e T_P ... são os empuxos e torques resultantes do conjunto de propulsores [N e Nm],

E_C e T_C ... são os empuxos e torques causados pelo cabo umbilical [N e Nm],

E_I e T_I ... são os empuxos e torques inerciais [N e Nm].

Neste equacionamento, a velocidade da correnteza $\dot{\eta}_c$, representada no sistema fixo, foi considerada constante.

Outra abordagem para o modelo dinâmico de ROVs, encontrada na literatura mais recente (Fossen 1994, Avila 2004, Ross, Fossen & Johansen 2004, Caccia, Indiveri & Veruggio 2000, Ven, Flanagan & Toal 2004b), é descrita a seguir para ser comparado com o modelo anterior. Nesta outra abordagem, a dinâmica do veículo submarino é dada por

$$M_{CR} \dot{\nu} + C_{CR}(\nu) \nu = -M_A \dot{\nu} - C_A(\nu) \nu - D_L \nu - D_Q \nu |\nu| + G(\eta) + \tau_{prop} + \varepsilon, \quad (2.5)$$

onde:

M_{CR} ... é a matriz de inércia do corpo rígido,

C_{CR} ... é a matriz de Coriolis e centrípeta do corpo rígido,

M_A ... é a matriz de inércia adicional,

C_A ... é a matriz de Coriolis e centrípeta adicional,

D_L e D_Q ... são as matrizes de arraste linear e quadrático,

$G(\eta)$... é o vetor força-momento de restauração do ROV (peso/flutuação),

τ_{prop} ... é o vetor força-momento aplicado pelos propulsores,

ε ... é o vetor das perturbações devidas à dinâmica do cabo e à correnteza marinha ($\dot{\eta}_c$).

Na equação (2.5) deve-se notar que o vetor velocidade do veículo ν é medido em relação à velocidade do fluido onde ele está imerso. Com isso, é possível considerar, também, uma eventual correnteza marinha com velocidade constante.

Ao comparar os dois modelos, logo de início, é possível afirmar que:

$$M_{CR} + M_A = M, \quad G(\eta) = \begin{bmatrix} E_{GB} \\ T_{GB} \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

$$C_{CR}(\nu) \nu + C_A(\nu) \nu = \begin{bmatrix} E_I \\ T_I \end{bmatrix}, \quad \tau_{prop} = \begin{bmatrix} E_P \\ T_P \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

$$D_L \nu + D_Q \nu |\nu| = \begin{bmatrix} E_H \\ T_H \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} E_C \\ T_C \end{bmatrix} + \dot{\eta}_c. \quad (2.8)$$

Essas afirmações serão melhor explicadas no decorrer deste capítulo.

2.2.1 Conversões entre os sistemas de coordenadas

As velocidades de translação (ν_1) e de rotação (ν_2) estão referenciadas ao sistema de coordenadas do veículo (móvel) e devem ser convertidas para o sistema inercial (fixo) de maneira que suas interações com o comportamento do veículo sejam corretamente consideradas após qualquer movimento (Filho 1996) .

2.2.1.1 Conversão das velocidades de translação para o sistema inercial

A conversão das velocidades de translação (ν_1) referenciadas ao próprio veículo para o sistema de coordenadas estacionário é dada por

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2) \nu_1. \quad (2.9)$$

$J_1(\eta_2)$ é a matriz de transformação de coordenadas entre os dois sistemas que representa as rotações sofridas pelo veículo nos eixos x , y e z e é descrita como

$$J_1(\eta_2) = J_z^T(\psi) J_y^T(\theta) J_x^T(\phi), \quad (2.10)$$

onde:

$$J_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

$$J_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

$$J_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Então, substituindo (2.11), (2.12) e (2.13) em (2.10), teremos

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Deve ser ressaltado que as relações cinemáticas são obtidas através de três transformações lineares sucessivas, que representam as rotações necessárias para coincidir as direções dos eixos do sistema de referência fixo com as do sistema móvel. Como as matrizes finais são obtidas por operações que envolvem o produto das matrizes de rotação (que é uma operação não necessariamente comutativa), a seqüência escolhida para as rotações influencia o resultado final (Filho 1996).

A matriz $J_1(\eta_2)$ é ortogonal. Então

$$J_1^{-1}(\eta_2) = J_1^T(\eta_2), \quad (2.15)$$

ou seja,

$$J_1^{-1}(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Esta relação será utilizada mais adiante (Seção 2.2.4) para converter as forças de restauração de sistemas submarinos, calculadas no sistema de referência estacionário, para o sistema referenciado ao próprio veículo.

2.2.1.2 Conversão das velocidades de rotação para o sistema inercial

As velocidades angulares referenciadas ao sistema de coordenadas do veículo não podem ser integradas diretamente para obter as coordenadas angulares atuais. Isso se deve ao fato de que a integral não possui qualquer interpretação física (Campa & Innocenti 1999). As velocidades angulares referenciadas ao sistema de coordenadas estacionário podem ser interpretadas como as derivadas dos ângulos de orientação do veículo: ϕ , θ e ψ . Então, as velocidades de rotação em relação ao sistema de coordenadas do veículo são dadas por

$$\nu_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + J_x(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + J_x(\phi) J_y(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_2. \quad (2.17)$$

Portanto, a conversão das velocidades de rotação no sistema de coordenadas do veículo para o sistema inercial é dada por

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2) \nu_2, \quad (2.18)$$

onde

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & (\sin \phi \tan \theta) & (\cos \phi \tan \theta) \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Note que

$$J_2^{-1}(\eta_2) \neq J_2^T(\eta_2). \quad (2.20)$$

É fácil observar também que, para $\phi = 0^\circ$ e $\theta = 0^\circ$, a relação entre as velocidades de rotação nos dois sistemas de coordenadas é dada por uma identidade. Além disso, a matriz de transformação de coordenadas mostrada em (2.19) é singular para $\theta = \pm 90^\circ$. Nestas condições, seria necessária a utilização de *Quaternions* para representar a orientação do veículo no sistema inercial de maneira a evitar tal singularidade (Antonelli et al. 2003). Entretanto, neste tipo de veículo em particular, os centros de gravidade e de flutuação estão suficientemente afastados para que o ângulo θ permaneça pequeno, evitando a singularidade e suas complicações (Cunha 1992, Dominguez 1989).

Podemos escrever as transformações de coordenadas para os seis DOFs do sistema como

$$\dot{\eta} = J(\eta) \nu, \quad (2.21)$$

onde

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0^{3 \times 3} \\ 0^{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

2.2.2 Matriz de inércias

A parametrização da matriz de inércias de um corpo rígido é única (Fossen 1994) e satisfaz:

$$M_{CR} = M_{CR}^T > 0, \quad \dot{M}_{CR} = 0. \quad (2.23)$$

A matriz de inércias de corpo rígido (M_{CR}) é composta por:

$$M_{11} = m I_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

$$M_{21} = m R_G \times = \begin{bmatrix} 0 & -mz_G & my_G \\ mz_G & 0 & -mx_G \\ -my_G & mx_G & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

$$M_{22} = I_0 = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

onde:

$m \dots$ é a massa do ROV $[kg]$,

$R_G \times \dots$ é o rotacional do vetor centro de gravidade (R_G) do ROV (representado no sistema móvel) $[m]$,

$I_x, I_y, I_z \dots$ são os momentos de inércia nos eixos do sistema móvel $[kg\ m^2]$,

$I_{xy}, I_{yz}, I_{zx},$

$I_{yx}, I_{zy}, I_{xz} \dots$ são os produtos de inércia $[kg\ m^2]$.

Então,

$$M_{CR} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{21}^T \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

No entanto, quando o corpo se encontra em estado de submersão, este passa a ter massas adicionais a seu comportamento de corpo rígido. A partir deste ponto, a matriz de massas do corpo será expressa como

$$M \triangleq M_{CR} + M_A, \quad (2.28)$$

onde:

$M \dots$ é a matriz de inércias resultante do veículo submerso;

$M_A \dots$ é a matriz de inércias adicionais. Representa o armazenamento de energia cinética no fluido que é deslocado pelo veículo (Filho 1996).

A matriz M_A pode ser dividida nas seguintes matrizes:

$$A_{11} \triangleq - \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} \end{bmatrix}, \quad A_{12} \triangleq - \begin{bmatrix} X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

$$A_{21} \triangleq - \begin{bmatrix} K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} \end{bmatrix}, \quad A_{22} \triangleq - \begin{bmatrix} K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

onde cada elemento é a massa adicional em um eixo para deslocamentos no mesmo ou em outro eixo. Como exemplo, temos que $Y_{\dot{u}}\dot{u}$ é a massa adicional no eixo y_m devido a uma aceleração $\dot{u}$ no eixo x_m (Fossen 1994).

Contudo, a matriz completa de massas adicionais é dada por

$$M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \triangleq - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Entretanto, devido à simetria do ROV, a matriz de inércias M pode ser simplificada desprezando-se os termos menos significativos, isto é, de menor magnitude (Fossen 1994). Portanto, de acordo com o formato de veículo submarino, M poderá ser reescrita das seguintes maneiras:

1. Matriz de massas para veículos com simetria no plano xy (simetria base/topo)

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{61} \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 & 0 & m_{62} \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{43} & m_{53} & 0 \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} & m_{45} & 0 \\ 0 & 0 & m_{53} & m_{54} & m_{55} & 0 \\ m_{61} & m_{62} & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix}; \quad (2.32)$$

2. Matriz de massas para veículos com simetria no plano xz (simetria bombordo/esti-

bordo)

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & 0 & m_{51} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{42} & 0 & m_{62} \\ m_{31} & 0 & m_{33} & 0 & m_{53} & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & m_{46} \\ m_{51} & 0 & m_{53} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & m_{62} & 0 & m_{64} & 0 & m_{66} \end{bmatrix}; \quad (2.33)$$

3. Matriz de massas para veículos com simetria no plano yz (simetria proa/popa)

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{51} & m_{61} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{42} & 0 & 0 \\ 0 & m_{32} & m_{33} & m_{43} & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & m_{43} & m_{44} & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & 0 & 0 & 0 & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix}; \quad (2.34)$$

4. Matriz de massas para veículos com simetria no plano xz e no plano yz (simetria bombordo/estibordo e proa/popa)

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{51} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{42} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix}; \quad (2.35)$$

5. Matriz de massas para veículos com simetria no plano xz , no plano yz e no plano xy (simetria bombordo/estibordo, proa/popa e base/topo)

$$M = \text{diag} \{ m_{11}, m_{22}, m_{33}, m_{44}, m_{55}, m_{66} \}. \quad (2.36)$$

De maneira geral, a matriz de massas resultante para um veículo com simetria no

plano ij e no plano jk é formada pela intersecção

$$m_{ij} \cap m_{jk} = m_{ij} \cap m_{jk}. \quad (2.37)$$

Além do mais,

$$m_{ij} = m_{ji}. \quad (2.38)$$

O ROV LUMA, abordado neste trabalho, possui simetria no plano xz e no plano yz (simetria bombordo/estibordo e simetria proa/popa) cuja matriz de massas é descrita em (2.35). Desta maneira, teremos:

$$M_{21} = \begin{bmatrix} 0 & -mz_G & 0 \\ mz_G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M_{22} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

$$A_{11} = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} \end{bmatrix}, \quad A_{12} = - \begin{bmatrix} 0 & X_{\dot{q}} & 0 \\ Y_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

$$A_{21} = - \begin{bmatrix} 0 & K_{\dot{v}} & 0 \\ M_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = - \begin{bmatrix} K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}. \quad (2.41)$$

Na descrição do procedimento para a obtenção dessas massas adicionais, a nomenclatura adotada é m_{ad} (Avila, Adamowski & Barbarini 2004).

Independentemente da simetria do ROV modelado, a matriz M_{21} terá apenas elementos nulos quando a origem do sistema de coordenadas móvel (O_m) for adotada na mesma posição que o centro de gravidade (C_G) do veículo (Fossen 1994).

2.2.3 Efeitos inerciais

No modelo adotado em (Dominguez 1989, Cunha 1992), a força inercial E_I e o momento inercial T_I são descritos em função das velocidades do sistema e das matrizes

de massas apresentadas na seção anterior. Então, temos que:

$$E_I = \nu_2 \times [M_{11} \nu_1 + A_{11} \nu_{1r} + (M_{21} + A_{21})^T \nu_2] + A_{11}(\nu_2 \times \nu_{1c}), \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} T_I = \nu_2 \times [M_{21} \nu_1 + A_{21} \nu_{1r} + (M_{22} + A_{22}) \nu_2] + \nu_1 \times (M_{21}^T \nu_2) + \\ + \nu_{1r} \times [A_{11} U_R + A_{21}^T \nu_2] + A_{21}(\nu_2 \times \nu_{1c}), \end{aligned} \quad (2.43)$$

onde:

$\nu_{1c} \dots$ é a velocidade da correnteza representada no sistema móvel $[m/s]$,

$\nu_{1r} \triangleq \nu_1 - \nu_{1c} \dots$ é a velocidade relativa do veículo representada no sistema móvel $[m/s]$.

Tais efeitos representam as forças centrípetas e de Coriolis do sistema robótico. Na literatura mais recente (Fossen 1994, Avila 2004, Souza 2003), os efeitos devidos à dinâmica de corpo rígido e os efeitos devidos à dinâmica de corpo submerso são reescritos separadamente. Então, as forças centrípetas e de Coriolis do corpo rígido são dadas por

$$C_{CR}(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & C1 \\ -C1^T & C2 \end{bmatrix}, \quad (2.44)$$

onde:

$$C1 = \begin{bmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \end{bmatrix}, \quad (2.45)$$

$$C2 = \begin{bmatrix} 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xz} p - I_y q \\ I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ -I_{yz} r - I_{xz} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.46)$$

enquanto que a matriz centrípeta e de Coriolis hidrodinâmica é descrita como

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.47)$$

onde:

$$a_1 = X_{\dot{u}} u + X_{\dot{v}} v + X_{\dot{w}} w + X_{\dot{p}} p + X_{\dot{q}} q + X_{\dot{r}} r, \quad (2.48)$$

$$a_2 = X_{\dot{v}} u + Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{w}} w + Y_{\dot{p}} p + Y_{\dot{q}} q + Y_{\dot{r}} r, \quad (2.49)$$

$$a_3 = X_{\dot{w}} u + Y_{\dot{w}} v + Z_{\dot{w}} w + Z_{\dot{p}} p + Z_{\dot{q}} q + Z_{\dot{r}} r, \quad (2.50)$$

$$b_1 = X_{\dot{p}} u + Y_{\dot{p}} v + Z_{\dot{p}} w + K_{\dot{p}} p + K_{\dot{q}} q + K_{\dot{r}} r, \quad (2.51)$$

$$b_2 = X_{\dot{q}} u + Y_{\dot{q}} v + Z_{\dot{q}} w + K_{\dot{q}} p + M_{\dot{q}} q + M_{\dot{r}} r, \quad (2.52)$$

$$b_3 = X_{\dot{r}} u + Y_{\dot{r}} v + Z_{\dot{r}} w + K_{\dot{r}} p + M_{\dot{r}} q + N_{\dot{r}} r. \quad (2.53)$$

2.2.4 Efeitos da gravidade e da flutuação

Corpos submersos sofrem uma força de empuxo, intensificada com a adoção de flutuadores, em oposição à força de peso, causada pela aceleração da gravidade (Filho 1996).

De acordo com a relação entre as forças da gravidade e de flutuação, a flutuabilidade do ROV pode ser definida como:

- negativa,
- positiva,
- neutra.

A flutuabilidade é denominada negativa quando

$$|E_G| > |E_B| , \quad (2.54)$$

onde:

E_G ... é o empuxo de gravidade, diretamente proporcional à massa $[N]$,

E_B ... é o empuxo de flutuação, diretamente proporcional ao volume submerso $[N]$.

Esta condição é adotada para veículos de grande porte que se desloquem pelo fundo do mar através de rodas ou esteiras.

Para ROVs, usualmente, o sistema é dimensionado para que a flutuabilidade seja ligeiramente positiva, ou seja,

$$|E_G| < |E_B| , \quad (2.55)$$

de maneira que o veículo venha à superfície naturalmente, visando facilitar o resgate, em caso de problema.

A flutuabilidade é denominada neutra quando estas forças se anulam mutuamente, isto é,

$$|E_G| = |E_B| . \quad (2.56)$$

Para o caso dos veículos autônomos (AUVs), a flutuabilidade neutra, por apresentar força vertical resultante nula, representa a condição de menor esforço de deslocamento o que otimiza a reserva de energia conduzindo ao aumento da autonomia das baterias do veículo (Soares 2002). Pelo mesmo motivo, os ROVs para operações de inspeção em dutos de adução devem ser projetados para ter flutuabilidade neutra. Uma vez que estes dutos são muito longos e, geralmente, na horizontal, não seria interessante projetar o veículo com flutuabilidade positiva nem negativa.

Pelo fato dessas forças estarem referenciadas ao sistema inercial (fixo), devem ser primeiramente transformadas para o sistema de referência do veículo (móvel) para serem adicionadas ao modelo dinâmico. Isto é feito com a pré-multiplicação de tais forças pela inversa da matriz de transformação de coordenadas $J_1(\eta_2)$ descrita na equação

(2.16), ou seja:

$$E_G = J_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m g \end{bmatrix}, \quad E_B = J_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho g \nabla \end{bmatrix}, \quad (2.57)$$

onde:

ρ ... é a massa específica da água [Kg/m^3],

g ... é a aceleração da gravidade [m/s^2],

∇ ... é o volume do ROV [m^3].

A força de gravidade é descrita por um vetor paralelo ao eixo vertical do sistema estacionário (z) que atua sobre o centro de gravidade do ROV (R_G) e a força de flutuação é um vetor, paralelo ao mesmo eixo, que atua sobre o centro de flutuação (R_B). Como estes dois pontos geralmente não coincidem, o efeito de restauração irá introduzir forças e momentos, respectivamente, ao longo e em torno dos três eixos referenciados ao veículo no sentido de alinhar tais centros ao eixo z (Ven et al. 2004b).

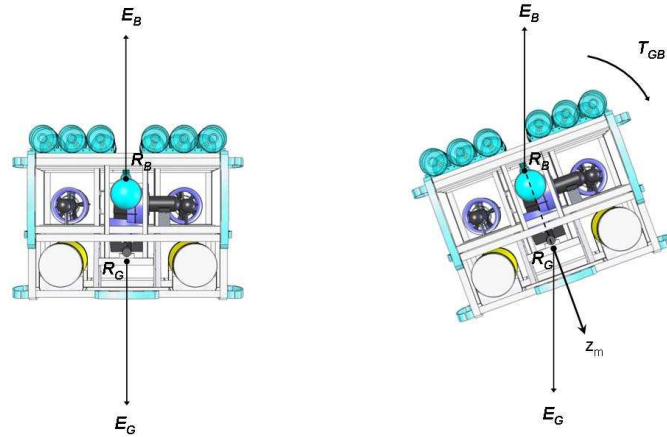


FIGURA 2.4: Ação do torque restaurador nos centros de gravidade e de flutuação.

A Figura 2.4 representa tal efeito onde R_G e R_B estão posicionados de maneira meramente ilustrativa uma vez que, apesar de tais pontos ainda não serem conhecidos com precisão, é de se esperar que com os flutuadores na parte superior e os lastros na parte inferior o centro de flutuação se situe acima do centro de gravidade.

A reação ilustrada para movimentos de rotação no eixo x_m é similar à de rotação no eixo y_m ou em qualquer outro eixo neste plano que passe pela origem O_m . Quanto

maior for a distância metacêntrica entre esses dois pontos, maior será a atuação do torque restaurador (T_{GB}) buscando estabilizar o sistema na condição de alinhamento dos mesmos com o eixo z .

Então, com base nas equações apresentadas em (2.57), a força e o torque restauradores resultantes são dados por:

$$E_{GB} = E_G + E_B, \quad (2.58)$$

$$T_{GB} = R_G \times E_G + R_B \times E_B. \quad (2.59)$$

Então,

$$G(\eta) = \begin{bmatrix} E_{GB} \\ T_{GB} \end{bmatrix}. \quad (2.60)$$

2.2.5 Efeitos hidrodinâmicos

O arraste hidrodinâmico é um efeito dissipativo (Cunha, Lizarralde, Costa, Hsu, Smith Jr., Wollmann Jr. & Sant'Anna 1994), isto é,

$$F_H \cdot \nu_{1_r} \leq 0, \quad (2.61)$$

onde

ν_{1_r} ... é o vetor de velocidades relativas de translação.

Caso a característica de dissipatividade descrita por (2.61) não fosse atendida em alguma das direções, haveria uma aceleração naquela direção que instabilizaria o modelo (Dominguez 1989). Tal efeito representa a resistência que a água exerce sobre o veículo quando este se move e pode ser modelado como (Ishidera et al. 1986):

$$E_H = \frac{\rho}{2} |\nu_{1_r}|^2 \nabla_R^{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} C_x(\alpha, \beta) \\ C_y(\beta, \gamma) \\ C_z(\alpha, \gamma) \end{bmatrix}, \quad (2.62)$$

$$T_H = \frac{\rho}{2} \left\{ |1_r|^2 \nabla_R \begin{bmatrix} C_k(\gamma) \\ C_m(\alpha) \\ C_n(\beta) \end{bmatrix} + \nabla_R^{\frac{5}{3}} \begin{bmatrix} C_p p |p| \\ C_q q |q| \\ C_r r |r| \end{bmatrix} \right\}, \quad (2.63)$$

onde:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{w_r}{u_r} \right), \quad \beta = \arctan \left(\frac{v_r}{u_r} \right), \quad \gamma = \arctan \left(\frac{w_r}{v_r} \right), \quad (2.64)$$

são, respectivamente, os ângulos de ataque, deriva (*drift*) e ataque lateral. Tais ângulos definem a direção e o sentido da velocidade relativa do veículo enquanto que, os coeficientes C_p , C_q e C_r , que são obtidos experimentalmente em tanque de prova, determinam o amortecimento no movimento de rotação.

Os coeficientes $C_x(\alpha, \beta)$, $C_y(\beta, \gamma)$ e $C_z(\alpha, \gamma)$ devem ser calculados, a partir de combinações das funções de cada ângulo separadamente, da seguinte maneira:

$$C_x(\alpha, \beta) = C_{x\alpha}(\alpha) \left| \frac{C_{x\beta}(\beta)}{C_{x\beta}(0^\circ)} \right|, \quad (2.65)$$

$$C_y(\beta, \gamma) = C_{y\beta}(\beta) \left| \frac{C_{y\gamma}(\gamma)}{C_{y\gamma}(0^\circ)} \right|, \quad (2.66)$$

$$C_z(\alpha, \gamma) = C_{z\gamma}(\gamma) \left| \frac{C_{z\alpha}(\alpha)}{C_{z\alpha}(90^\circ)} \right|. \quad (2.67)$$

$C_{x\alpha}$, $C_{z\alpha}$ e C_m são funções não lineares do ângulo α , $C_{x\beta}$, $C_{y\beta}$ e C_n , do ângulo β e $C_{y\gamma}$, $C_{z\gamma}$ e C_k , do ângulo γ . Portanto, teremos:

$$C_{x\alpha}(\alpha) \triangleq C_x|_{v_r=0}, \quad C_{x\beta}(\beta) \triangleq C_x|_{w_r=0}, \quad C_{z\alpha}(\alpha) \triangleq C_z|_{v_r=0}, \quad (2.68)$$

$$C_{y\beta}(\beta) \triangleq C_y|_{w_r=0}, \quad C_{x\gamma}(\gamma) \triangleq C_x|_{v_r=0}, \quad C_{z\gamma}(\gamma) \triangleq C_z|_{v_r=0}. \quad (2.69)$$

Nas Figuras 2.5 e 2.6, são apresentados gráficos cujas curvas ilustram o comportamento das funções não-lineares dos ângulos α e β para o ROV de Nomoto & Hattori (1986).

Entretanto, as curvas referentes aos coeficientes dependentes do ângulo γ não são apresentadas em (Nomoto & Hattori 1986). Então, Dominguez (1989) propôs uma aproximação de tais curvas baseada no comportamento das demais (Figura 2.7).

No caso de C_x , C_y e C_z , que dependem dos ângulos, as medições foram feitas apenas

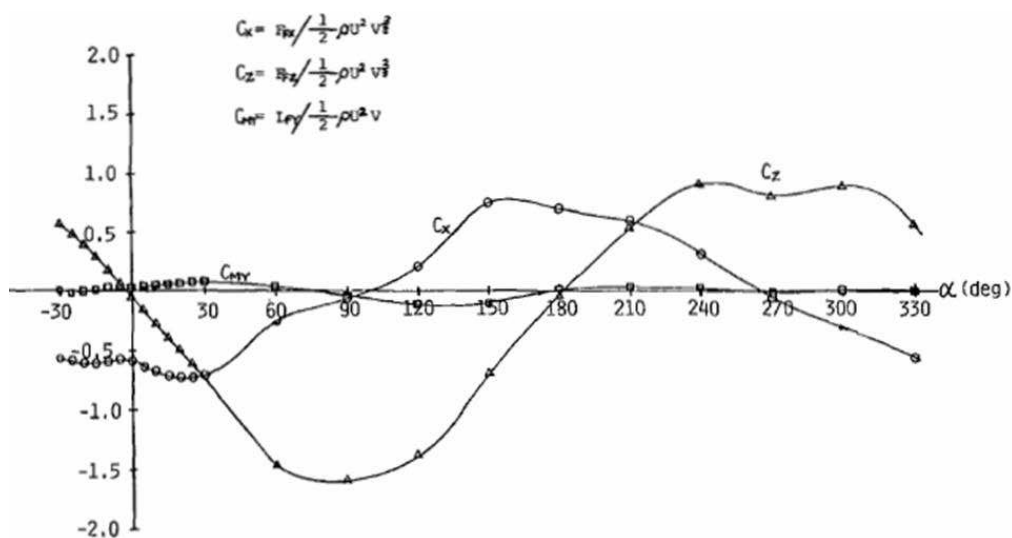


FIGURA 2.5: Coeficiente hidrodinâmico longitudinal do veículo. Extraído de (Nomoto & Hattori 1986).

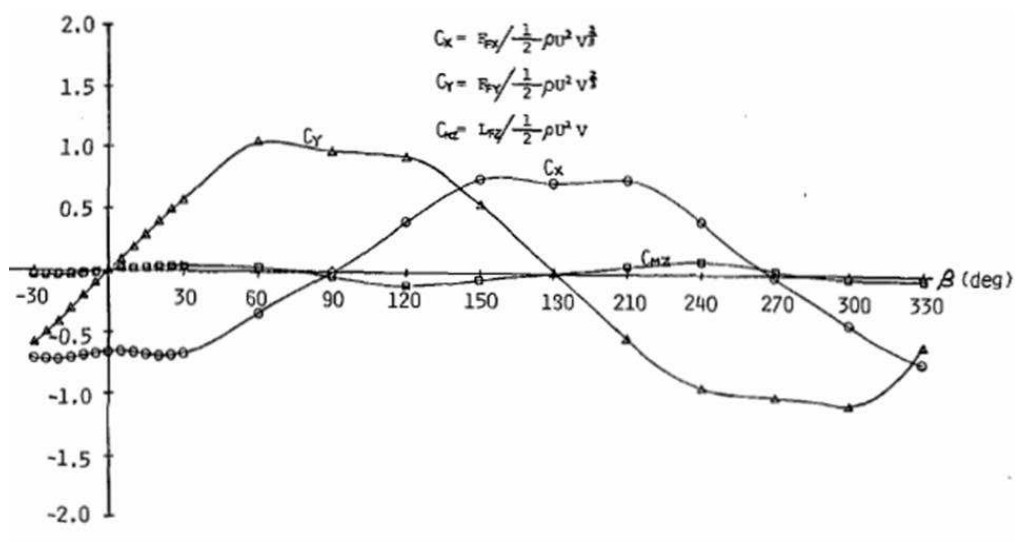


FIGURA 2.6: Coeficiente hidrodinâmico transversal do veículo. Extraído de (Nomoto & Hattori 1986).

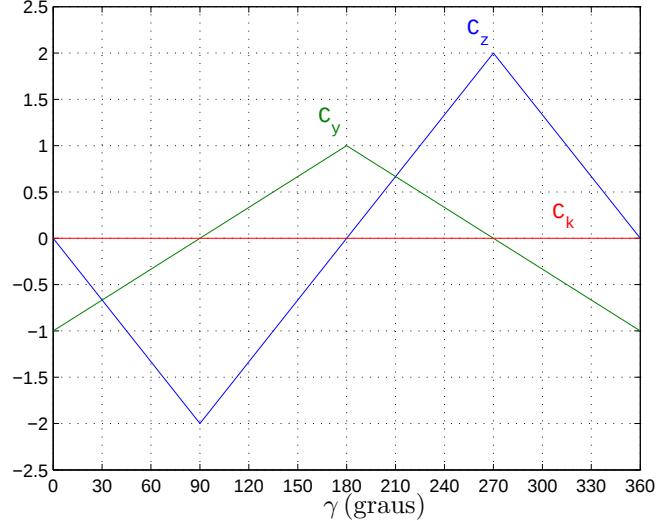


FIGURA 2.7: Curva idealizada para os coeficientes referentes ao ângulo γ , segundo Dominguez (1989).

para algumas combinações angulares.

No outro modelo estudado, o arraste é representado por duas matrizes: uma de arraste linear,

$$D_L = - \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix}, \quad (2.70)$$

e outra de arraste quadrático,

$$D_Q = - \begin{bmatrix} X_{u|u} & X_{v|v} & X_{w|w} & X_{p|p} & X_{q|q} & X_{r|r} \\ Y_{u|u} & Y_{v|v} & Y_{w|w} & Y_{p|p} & Y_{q|q} & Y_{r|r} \\ Z_{u|u} & Z_{v|v} & Z_{w|w} & Z_{p|p} & Z_{q|q} & Z_{r|r} \\ K_{u|u} & K_{v|v} & K_{w|w} & K_{p|p} & K_{q|q} & K_{r|r} \\ M_{u|u} & M_{v|v} & M_{w|w} & M_{p|p} & M_{q|q} & M_{r|r} \\ N_{u|u} & N_{v|v} & N_{w|w} & N_{p|p} & N_{q|q} & N_{r|r} \end{bmatrix}. \quad (2.71)$$

Cada elemento destas matrizes podem ser interpretado de maneira análoga às massas adicionais. Isto significa que cada elemento representa a força em um determinado

eixo para deslocamentos no mesmo ou em outro eixo. Como exemplo, temos que $Y_u u$ é a força de arraste no eixo y_m devido a uma velocidade u no eixo x_m .

Uma vez que o ROV opera em baixas velocidades, assumir que o veículo executa movimentos não-acoplados é uma boa aproximação (Fossen 1994). Com esta abordagem, os elementos fora da diagonal principal podem ser desprezados, ou seja, as matrizes de arraste hidrodinâmico, apresentadas em (2.70) e (2.71), podem ser reescritas como:

$$D_L = -\text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\}, \quad (2.72)$$

$$D_Q = -\text{diag}\{X_{u|u|}, Y_{v|v|}, Z_{w|w|}, K_{p|p|}, M_{q|q|}, N_{r|r|}\}. \quad (2.73)$$

2.3 Modelagem dos propulsores

Um modelo preciso dos propulsores se faz necessário para a correta determinação dos empuxos gerados pela combinação vetorial dos mesmos.

No modelo estático descrito a seguir (Hsu, Lizarralde, Costa & Cunha 2000), o empuxo (E_{prop_i}) e o momento axial (T_{prop_i}) produzidos por cada hélice são dados por:

$$E_{prop_i} = C_T^*(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_{c_i}^2 + (0,7 \pi n_{prop_i} D)^2] \pi D^2, \quad (2.74)$$

$$T_{prop_i} = C_Q^*(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_{c_i}^2 + (0,7 \pi n_{prop_i} D)^2] \pi D^3, \quad (2.75)$$

onde:

n_{prop_i} ... é a velocidade de rotação do i-ésimo hélice [rpm],

$C_T^*(\sigma)$ e $C_Q^*(\sigma)$... são os coeficientes de empuxo e torque do hélice calculados como descrito posteriormente em (3.27) e (3.28),

D ... é o diâmetro do hélice [m],

v_{c_i} ... é a velocidade da água que entra no disco do i-ésimo hélice [m/s],

$$\sigma = \arctan \left(\frac{v_{c_i}}{0,7 \pi n_{prop_i} D} \right). \quad (2.76)$$

A resultante destas forças no sistema de coordenadas do veículo será dada por:

$$\tau_{prop} = \begin{bmatrix} E_p \\ T_p \end{bmatrix}, \quad (2.77)$$

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{prop_i} P_{pi} = \begin{bmatrix} X_{prop} \\ Y_{prop} \\ Z_{prop} \end{bmatrix}, \quad (2.78)$$

$$T_p = \sum_{i=1}^n [T_{prop_i} P_{pi} + R_{pi} \times (E_{prop_i} P_{pi})] = \begin{bmatrix} K_{prop} \\ M_{prop} \\ N_{prop} \end{bmatrix}, \quad (2.79)$$

onde:

n ... é o número de propulsores do ROV,

R_{pi} ... é um vetor que representa no sistema móvel o centro de empuxo do i -ésimo hélice $[m]$,

P_{pi} ... é um vetor unitário que define no sistema móvel a direção do empuxo do i -ésimo hélice,

X_{prop} ... é a componente de força no eixo x_m ,

Y_{prop} ... é a componente de força no eixo y_m ,

Z_{prop} ... é a componente de força no eixo z_m ,

K_{prop} ... é a componente de momento no eixo x_m ,

M_{prop} ... é a componente de momento no eixo y_m ,

N_{prop} ... é a componente de momento no eixo z_m .

Porém, as seguintes hipóteses são assumidas na formulação acima:

- o acoplamento cruzado devido à interferência do fluxo de água de um propulsor em outro é desprezado,
- v_{ci} é assumida como sendo a componente da velocidade relativa do veículo, paralela ao eixo de rotação do hélice definido por P_{pi} (Dominguez 1989).

A inércia dos propulsores não deve ser desprezada e foi representada na simulação pela adição de atrasadores (Campa & Innocenti 1999).

Além disso, foram levadas em consideração, na simulação, características importantes dos propulsores como:

1. Saturação,
2. Zona Morta.

Os propulsores modelados operam com motores elétricos de corrente contínua. No caso desses motores, as velocidades dos hélices dependem das tensões elétricas aplicadas nos mesmos. Como as dinâmicas dos propulsores são bem mais rápidas do que a dinâmica do veículo, pode-se utilizar um modelo estático para estimar as tensões necessárias à produção das velocidades desejadas (Tavares, Gomes & Cunha 2004).

2.3.1 Determinação de R_{pi} e P_{pi}

A contribuição ao movimento do ROV dada por cada propulsor depende do posicionamento e da direção do mesmo. Essas são características construtivas do veículo submarino cujo método de determinação é descrito a seguir.

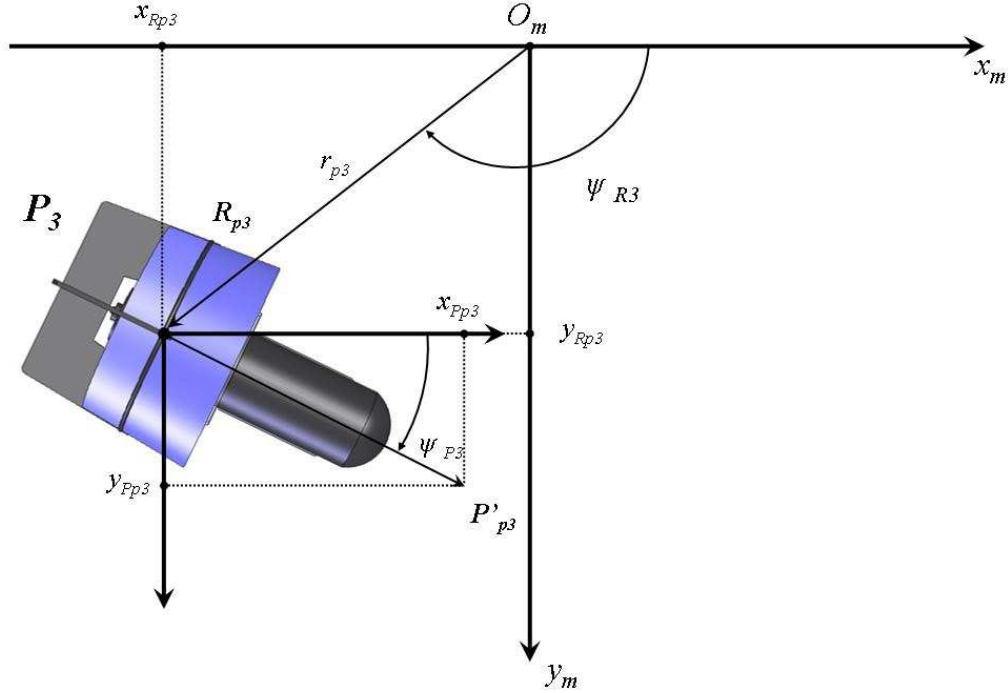


FIGURA 2.8: Diagrama de posicionamento e orientação do propulsor P_3 .

A posição e a orientação do i -ésimo propulsor são expressas pelos vetores R_{pi} e P_{pi} , respectivamente, referenciados ao sistema de coordenadas do veículo. Então, de acordo com a Figura 2.8, teremos:

$$R_{pi} = \begin{bmatrix} x_{Rpi} \\ y_{Rpi} \\ 0 \end{bmatrix} = r_{pi} \begin{bmatrix} \cos(\Psi_{ri}) \\ \sin(\Psi_{ri}) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.80)$$

$$P_{pi} = \frac{1}{|P'_{pi}|} \begin{bmatrix} x_{Rpi} \\ y_{Rpi} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Psi_{ri}) \\ \sin(\Psi_{ri}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.81)$$

Para o ROV LUMA, os centros de empuxo e a orientação de cada propulsor são:

$$R_{p1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.23 \end{bmatrix}, R_{p2} = \begin{bmatrix} 0.23 \\ 0.11 \\ 0 \end{bmatrix}, R_{p3} = \begin{bmatrix} -0.22 \\ 0.28 \\ 0 \end{bmatrix}, R_{p4} = \begin{bmatrix} -0.22 \\ -0.28 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.82)$$

$$P_{p1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, P_{p2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, P_{p3} = \begin{bmatrix} 0.9067 \\ 0.4217 \\ 0 \end{bmatrix}, P_{p4} = \begin{bmatrix} 0.9067 \\ -0.4217 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.83)$$

Obs: R_{pi} é dado em metros e, no caso dos propulsores P_2 , P_3 e P_4 , não possui componente na direção do eixo z_m devido ao fato dos centros de empuxo destes propulsores estarem contidos no plano x_my_m .

2.4 Matriz de acoplamento

A matriz de acoplamento converte os empuxos e torques, gerados por cada atuador (propulsor), nas forças e momentos resultantes nos três eixos de coordenadas referenciados ao veículo (sistema móvel).

2.4.1 Matriz de acoplamento completa

A matriz de acoplamento é escrita, em sua forma completa, a partir da equação (2.77) de maneira a possibilitar as simplificações que serão detalhadas mais adiante.

Particularmente, para ROVs compostos de quatro propulsores ($n = 4$) em uma dada configuração, o resultado de forças e momentos gerados pelos atuadores será dado por:

$$\tau_{prop} = \begin{bmatrix} P_{p1} & P_{p2} & P_{p3} & P_{p4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_{p1} \times P_{p1} & R_{p2} \times P_{p2} & R_{p3} \times P_{p3} & R_{p4} \times P_{p4} & P_{p1} & P_{p2} & P_{p3} & P_{p4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{prop1} \\ E_{prop2} \\ E_{prop3} \\ E_{prop4} \\ T_{prop1} \\ T_{prop2} \\ T_{prop3} \\ T_{prop4} \end{bmatrix}. \quad (2.84)$$

Então, substituindo (2.82) e (2.83) em (2.84), teremos

$$\tau_{prop} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.9067 & 0.9067 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.4217 & -0.4217 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9067 & 0.9067 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.4217 & -0.4217 \\ 0 & 0.23 & -0.3467 & 0.3467 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{prop1} \\ E_{prop2} \\ E_{prop3} \\ E_{prop4} \\ T_{prop1} \\ T_{prop2} \\ T_{prop3} \\ T_{prop4} \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

para determinar as forças e momentos resultantes no ROV LUMA a partir da contribuição de cada um de seus quatro atuadores.

Cabe ressaltar que a equação (2.85) pode ser usada para qualquer veículo submarino com o conjunto de propulsores disposto nesta configuração.

2.4.2 Matriz de acoplamento simplificada

Devido às características construtivas do veículo, algumas simplificações na equação da matriz de acoplamento, mostrada em (2.85), são possíveis. Então:

- Foram desprezados os momentos de reação gerados pelos propulsores, ao redor

de seus respectivos eixos de atuação, por serem muito pequenos em relação às outras grandezas;

- Foram desprezados também os momentos K_{prop} e M_{prop} do vetor τ_{prop} na equação 2.85 uma vez que estes não podem ser controlados diretamente, devido à configuração de propulsores adotada no projeto do ROV LUMA, e são intrinsecamente estáveis pelo torque restaurador (T_{GB}).

Então, o modelo simplificado de acoplamento é descrito como:

$$\begin{bmatrix} X_{prop} \\ Y_{prop} \\ Z_{prop} \\ N_{prop} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.9067 & 0.9067 \\ 0 & 1 & 0.4217 & -0.4217 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.23 & -0.3467 & 0.3467 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{prop_1} \\ E_{prop_2} \\ E_{prop_3} \\ E_{prop_4} \end{bmatrix}. \quad (2.86)$$

Note que a matriz de acoplamento simplificada relaciona apenas os empuxos, gerados por cada propulsor, com os seguintes DOF:

- Deslocamentos no eixo longitudinal;
- Deslocamentos laterais;
- Profundidade;
- Rumo.

Capítulo 3

Identificação dos parâmetros do ROV

Para simular o comportamento de um sistema com razoável precisão deve-se identificar seus parâmetros mais relevantes. Dados como o peso e as dimensões do veículo são facilmente levantados em procedimentos simples, porém são necessárias técnicas mais elaboradas para determinar as massas adicionais, os coeficientes de arraste, os centros de gravidade e flutuação e os parâmetros dos propulsores.

Este capítulo detalha procedimentos práticos de estimação das massas adicionais segundo três métodos de oscilação do veículo. No primeiro, a oscilação é realizada por meio de um sistema de molas mecânicas acopladas ao ROV. No segundo e no terceiro métodos, o ROV oscila através de seus próprios propulsores. Neste caso, um controle em malha fechada tipo proporcional e outro baseado em realimentação por relé, respectivamente, agem sobre o veículo como se fossem molas virtuais. Um ensaio de estimação de coeficientes de arrasto de ROVs em tanque de provas é descrito detalhadamente. São apresentadas técnicas de determinação dos centros de gravidade e flutuação assim, como maneiras de identificar os coeficientes que modelam os propulsores.

3.1 Identificação das massas adicionais

A massa adicional de um sistema mecânico vibrando num líquido é um parâmetro importante no estudo das interações estrutura-fluído. Este parâmetro modela as va-

riações de pressão de fluído que ocorrem em torno dos elementos estruturais do sistema mecânico (Avila 2004).

Uma maneira simples para o entendimento dessas interações é imaginar que, quando em movimento, um corpo submerso carrega parte do fluído com ele. A massa adicional é proporcional ao volume e à densidade do fluído deslocado pelo corpo (Hamilton 1999).

As técnicas descritas a seguir para determinar essas massas consistem em fazer o veículo oscilar harmonicamente na água (Goheen & Jefferys 1990, Ross et al. 2004). Um sistema simples composto de massa, mola e amortecedor (Figura 3.1) ilustra adequadamente a idéia.

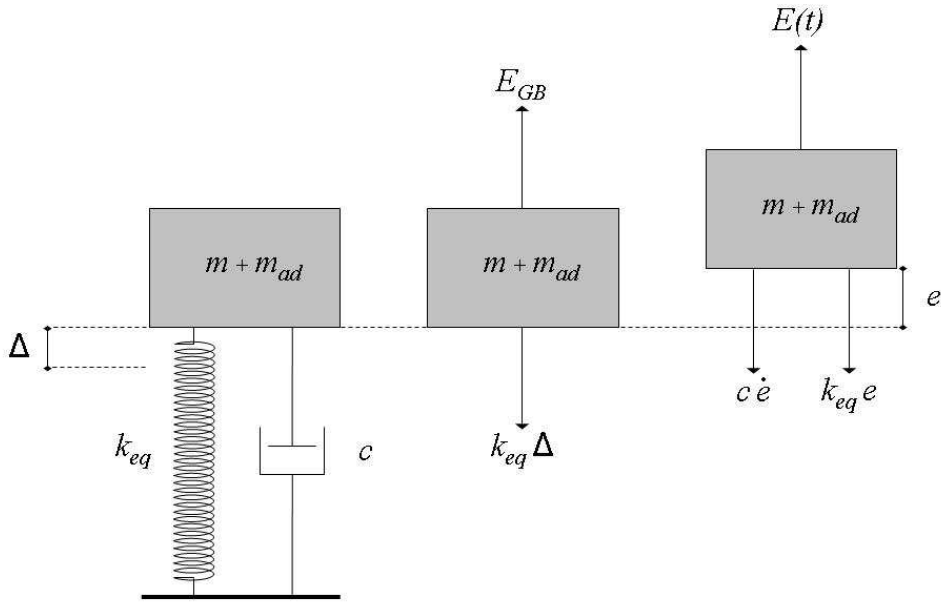


FIGURA 3.1: Diagrama de corpo livre do sistema massa-mola equivalente.

O objetivo fundamental dos ensaios a seguir é identificar os coeficientes da equação diferencial

$$(m + m_{ad}) \ddot{e} + c^{(1)} \dot{e} + c^{(2)} \dot{e} |\dot{e}| + k_{eq} e = 0, \quad (3.1)$$

onde:

e ... é o deslocamento medido desde a posição de equilíbrio $[m]$,

m_{ad} ... é a massa adicional do veículo devido ao movimento acelerado no fluído $[kg]$,

$c^{(1)}$... é o coeficiente de amortecimento linear,

$c^{(2)}$... é o coeficiente de amortecimento quadrático,

k_{eq} ... é o constante elástica equivalente do sistema $[N/m]$,

$(m + m_{ad})$... é a massa virtual do sistema em oscilação livre na água $[kg]$.

Porém, a equação (3.1) pode ser simplificada a um modelo linear de amortecimento descrito como

$$(m + m_{ad})\ddot{e} + c\dot{e} + k_{eq}e = 0, \quad (3.2)$$

onde

c ... é o coeficiente de amortecimento viscoso $[kg/s]$.

O modelo apresentado na equação (3.2) é aqui utilizado por ser mais representativo para pequenos deslocamentos em torno do ponto de equilíbrio.

3.1.1 Método mecânico de oscilação

Avila (2004) propôs fazer oscilar o veículo harmonicamente na água através de um sistema mecânico de molas reais com constantes elásticas conhecidas. Desta maneira, fazendo o veículo oscilar livremente em água como um sistema massa-mola, pode-se medir a frequência natural que possibilita a determinação da massa adicional.

3.1.1.1 Sistema mecânico de oscilação

O sistema mecânico consiste no veículo suspenso por oito molas de rigidez k_i em paralelo (Figura 3.2).

O cálculo da frequência natural de oscilação na água é semelhante ao do sistema oscilando no ar, com a diferença de que no primeiro a massa do sistema deve incluir, além da massa do modelo, o termo de massa adicional. A expressão para o cálculo da frequência natural em água é

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{(m + m_{ad})}}. \quad (3.3)$$

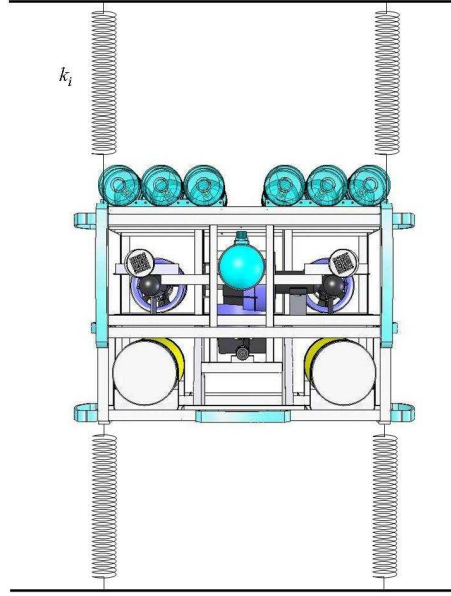


FIGURA 3.2: Esquema do sistema mecânico de determinação das massas adicionais.

3.1.1.2 Seleção das molas

As molas devem ser escolhidas de maneira a fornecer uma frequência natural não muito alta ao sistema ($\cong 2Hz$) (Avila 2004). A frequência natural em Hz é dada por

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{m}}. \quad (3.4)$$

Reescrevendo a equação (3.4), teremos

$$k_{eq} = 4\pi^2 f_n^2 m, \quad (3.5)$$

onde a massa do veículo no ar (m) é conhecida. Como o sistema será composto por oito molas, então

$$k_i = \frac{k_{eq}}{8}. \quad (3.6)$$

Nos casos em que a rigidez de uma mola não for fornecida, esta poderá ser calculada por

$$k_i = \frac{D_a^4 G}{8 D_m^3 N_e}, \quad (3.7)$$

onde:

D_a ... é o diâmetro do arame [m],

G ... é o módulo de cisalhamento [M Pa],

D_m ... é o diâmetro médio da mola [m],

N_e ... é o número de espiras.

3.1.1.3 Verificação experimental das constantes das molas

Para se obter maior precisão nos ensaios, deve-se verificar a rigidez de cada mola do sistema mecânico. Tal verificação é feita experimentalmente medindo-se o alongamento de cada mola para diferentes forças conhecidas. A constante de rigidez de cada mola é determinada a partir de uma análise de regressão linear com os dados coletados.

Cabe ressaltar que esse método de oscilação comumente é usado em modelo em escala reduzida, entretanto, devido às dimensões reduzidas do ROV LUMA, tal método poderia ser empregado diretamente no veículo.

3.1.2 Método de oscilação pelo controle proporcional

Outro modo de identificação das massas adicionais de um ROV pode ser feita por meio de um algoritmo de controle (Santiago 2004). Para isso é necessário que o veículo em questão esteja dotado de eletrônica embarcada e propulsores, ou seja, em condição de operação.

3.1.2.1 Ensaio de carga estática

O ensaio de carga estática exige a implementação de controles proporcionais derivativos para cada DOF a ser identificado.

O ganho derivativo contribui para o amortecimento do movimento, diminuindo a duração do transitório.

É necessário que os propulsores do ROV já tenham sido ensaiados em água aberta para se levantar as curvas de empuxo nominal em função da rotação segundo o modelo descrito anteriormente (Seção 2.3).

Substituindo (2.74) em (2.86), pode-se calcular de maneira aproximada o empuxo resultante numa determinada direção a partir das contribuições individuais de cada

propulsor devido a tensão elétrica aplicada respectivamente em cada um. Então, tal relação é dada por

$$\begin{bmatrix} X_{prop} \\ Y_{prop} \\ Z_{prop} \\ N_{prop} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.9067 & 0.9067 \\ 0 & 1 & 0.4217 & -0.4217 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.23 & -0.3467 & 0.3467 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_T^*(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_{c_1}^2 + (0,7 \pi n_{prop_1} D)^2] \pi D^2 \\ C_T^*(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_{c_2}^2 + (0,7 \pi n_{prop_2} D)^2] \pi D^2 \\ C_T^*(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_{c_3}^2 + (0,7 \pi n_{prop_3} D)^2] \pi D^2 \\ C_T^*(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_{c_4}^2 + (0,7 \pi n_{prop_4} D)^2] \pi D^2 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

A partir das curvas dos propulsores é possível determinar o ganho proporcional nominal k'_P , através da equação

$$E_p = k'_P \Delta, \quad (3.9)$$

que deve ser relacionado inicialmente ao deslocamento Δ (*offset*) por uma constante em cada direção.

O dispositivo para ensaio de carga estática, ilustrado na Figura 3.3, consiste em um esquema com roldanas, um cabo de pouco peso e um corpo de massa conhecida.

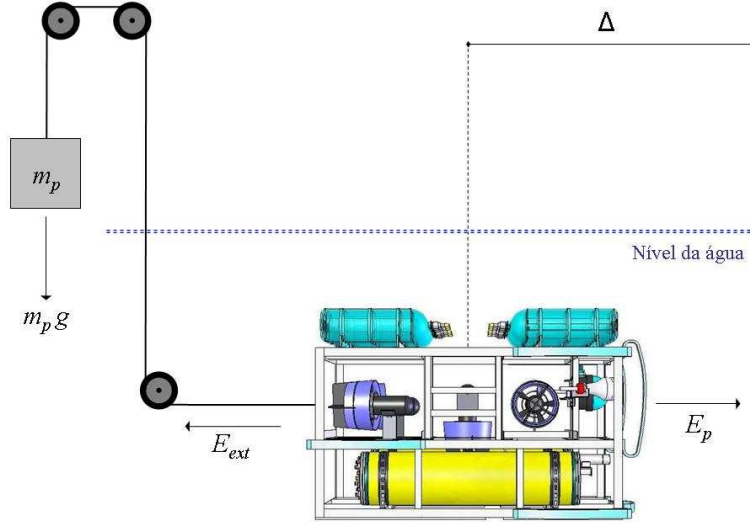


FIGURA 3.3: Esquema do sistema mecânico de ensaio de carga estática.

O ensaio é iniciado com a medição do deslocamento Δ gerado ao se aplicar uma força externa conhecida ($E_{ext} = m_p g$) na direção de cada um dos eixos do sistema de coordenadas do veículo. O ganho proporcional efetivo, dado no equilíbrio por

$$k_P = \frac{E_{ext}}{\Delta}, \quad (3.10)$$

será diferente do ajustado na eletrônica embarcada. A diferença entre o ganho proporcional ajustado e o efetivo decorre da diferença entre o empuxo nominal e o efetivo, devido à interação entre os propulsores, e entre estes e o casco.

Quando o procedimento for realizado para o movimento linear no eixo z deve-se levar em conta a diferença entre as forças de gravidade e flutuação (E_{GB}).

Este procedimento se mostra ineficaz para a aferição dos ganhos proporcionais nos movimentos de giro em torno dos eixos x_m e y_m , uma vez que os mesmos são estabilizados pelas forças de gravidade e flutuação. Entretanto, uma idéia inicial para o movimento de giro em torno do eixo z_m seria como a montagem mostrada na Figura 3.4.

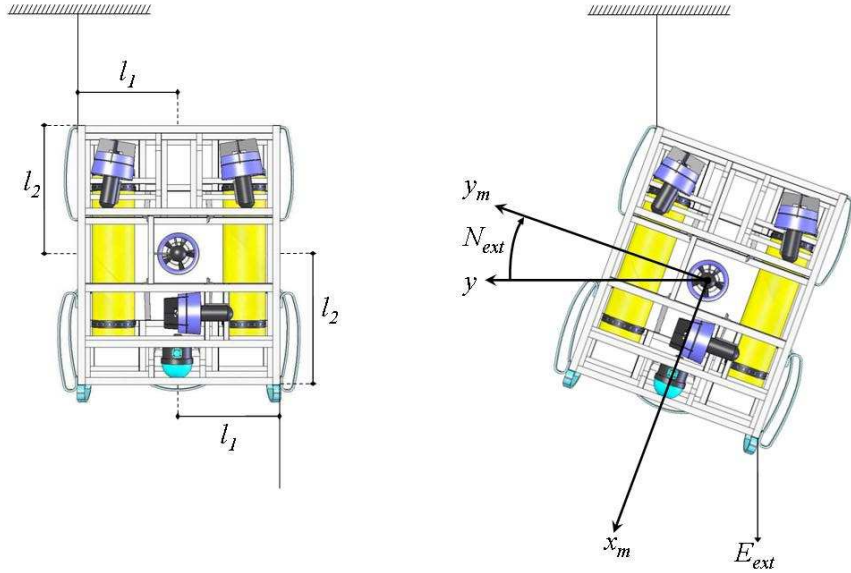


FIGURA 3.4: Ensaio de carga estática para momento em z_m .

Neste ensaio uma das extremidades do veículo estará presa a um ponto fixo. Tal ponto e o ponto de aplicação da força deverão estar equidistantes do eixo z_m . O momento gerado pelas forças é dado por

$$N_{ext} = 2 E_{ext} l_1. \quad (3.11)$$

O problema desse método é que não se pode garantir que o movimento será apenas o de rotação em torno do eixo z_m . Então, a utilização de um sistema composto por extensômetros elétricos (*strain-gage*) fixados em uma barra metálica será necessária para se determinar o torque do veículo nestas condições.

Todavia, a diferença entre o ganho efetivo medido e o nominal calculado não é tão significativa que justifique a implementação de todo o aparato. Logo, seria interessante se dispor de uma maneira mais simples de se aferir esse ganho.

Impondo um deslocamento conhecido na direção a ser analisada, é possível se determinar o empuxo gerado pelo sistema para corrigir a posição.

3.1.2.2 Ensaio de decaimento passivo

Os ganhos proporcionais efetivos medidos para cada DOF são equivalentes à instalação de molas lineares ideais, ou seja, molas virtuais com constantes elásticas invariáveis para grandes distensões. O ganho derivativo contribui para o amortecimento do ensaio, diminuindo a duração do transitório.

Portanto, será implementado um controlador proporcional para o DOF a ser aferido enquanto que serão mantidos ganhos proporcionais e ganhos derivativos para os demais movimentos.

Com a retirada do ganho derivativo, o objetivo é fazer com que o amortecimento do movimento seja feito pela ação da massa virtual do sistema.

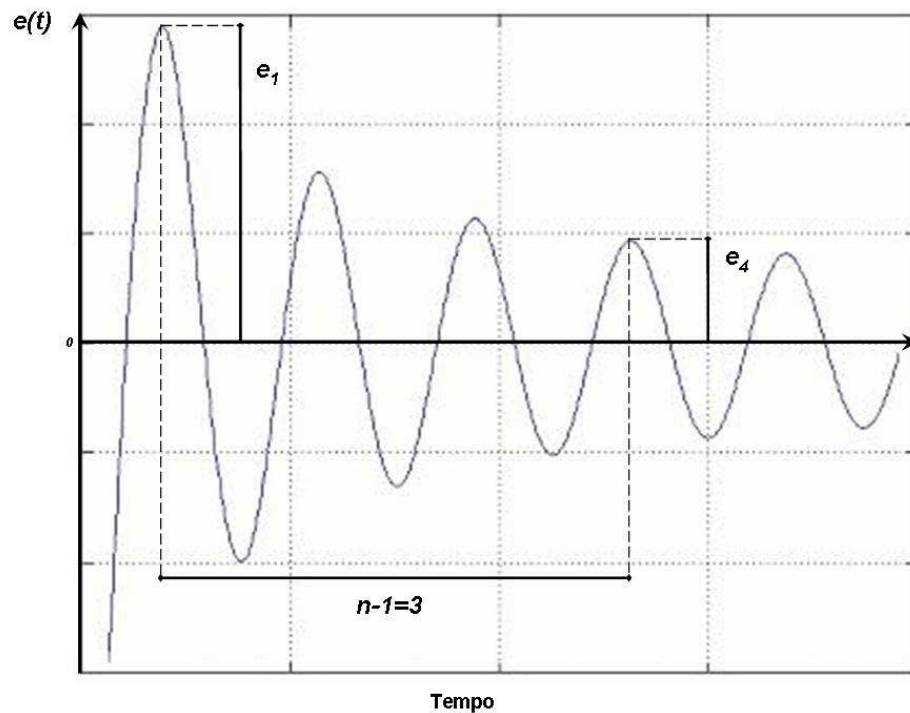


FIGURA 3.5: Oscilação com amortecimento obtido no ensaio de decaimento passivo.

O comportamento do sistema descrito em (3.1) está ilustrado na Figura 3.5, onde:

$e(t)$... é a evolução no tempo do movimento e [m],

e_n ... é a amplitude do movimento na n -ésima oscilação [m].

Porém, como o veículo realizará apenas pequenos deslocamentos durante o ensaio, o modelo linear descrito em (3.2) foi utilizado. Neste caso, o coeficiente de amortecimento é determinado com base no decremento logarítmico dado por

$$\delta = \frac{\ln e_1 - \ln e_n}{n - 1}. \quad (3.12)$$

Devido à maior velocidade, o efeito do amortecimento é mais notável nos primeiros ciclos.

Recomenda-se não adotar um número grande de ciclos pois, para amplitudes pequenas, o amortecimento pode estar descaracterizado pela presença de ciclo limite de baixa amplitude gerado por *time-delay* ou pela dinâmica do atuador.

Logo, para se ter uma medição mais precisa do decremento logarítmico, o correto é usar os três ou cinco primeiros ciclos.

O coeficiente de amortecimento é dado por

$$c_D = \frac{\delta k_P}{\pi e}. \quad (3.13)$$

Finalmente, a estimativa da massa adicional é descrita por

$$m_{ad} = \left(\frac{c_D \pi}{e} \right) - m, \quad (3.14)$$

a partir dos dados coletados durante os ensaios.

3.1.3 Método de oscilação com relé

Outra técnica de identificação das massas adicionais do sistema consiste em fazer o sistema oscilar com a adição de um relé (Åström & Wittenmark 1984). Neste método, um relé fecha uma malha de realimentação negativa de forma que o sinal de controle fornecido pelo mesmo será

$$u = -A_r \text{sign}(e), \quad \text{sign}(e) = \begin{cases} 1, & \text{se } e > 0, \\ -1, & \text{se } e < 0, \end{cases}$$

onde:

$u \dots$ é o sinal de controle,

$A_r \dots$ é a amplitude do sinal na saída do relé.

O diagrama em blocos do sistema, mostrado na Figura 3.6, ilustra o método do relé para determinar o ganho de um sistema tipo duplo integrador.

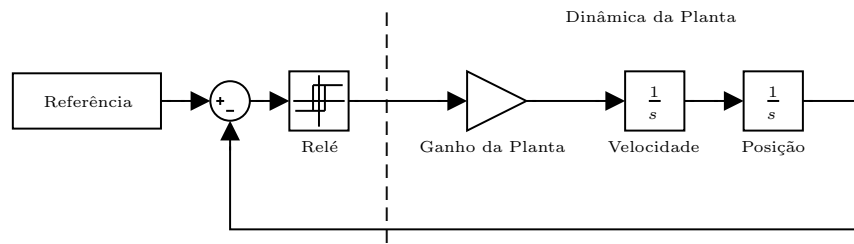


FIGURA 3.6: Diagrama em blocos para o ensaio com relé.

Com a aplicação deste sinal de controle, a trajetória no plano de fase ($e - \dot{e}$) é formada por dois ramos de parábola, como mostrado na Figura 3.7.

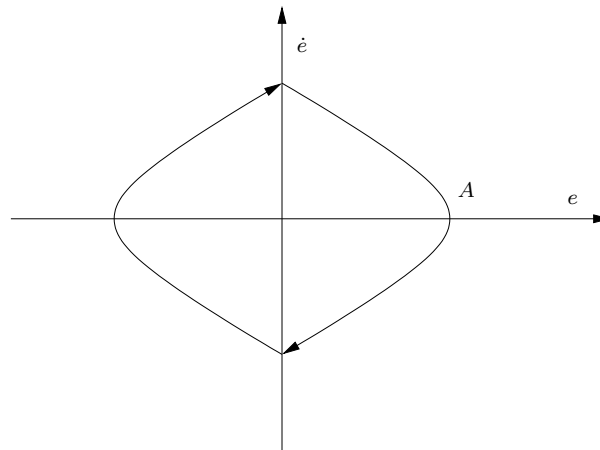


FIGURA 3.7: Trajetórias de fase ($e \times \dot{e}$) com o controle a relé.

Para $u = -A_r$, tem-se

$$\dot{e}^2 = -2kA_r(e - e_0) + \dot{e}_0^2, \quad (3.15)$$

onde:

$e_0 \dots$ é a posição inicial $e(0)$,

$\dot{e}_0 \dots$ é a velocidade inicial $\dot{e}(0)$.

Analogamente, para $u = A_r$, tem-se

$$\dot{e}^2 = 2 k A_r (e - e_0) + \dot{e}_0^2. \quad (3.16)$$

O ganho de alta frequência (k) pode ser determinado em função do período de oscilação da trajetória. Para determinar este período de oscilação, considere o ponto $(A > 0, 0)$ (Figura 3.7) como a condição inicial e o ponto $(0, B)$ como a condição final. Neste trecho a dinâmica é dada por $\ddot{e} = -k A_r$, o que implica em

$$e(t) = A - k A_r \frac{t^2}{2}, \quad \forall t \geq 0. \quad (3.17)$$

Portanto, o tempo necessário para o estado evoluir de $(A > 0, 0)$ até $(0, B)$ é

$$t = \sqrt{\frac{2 A}{k A_r}}, \quad (3.18)$$

o que resulta em um período de oscilação $T = 4t = 4\sqrt{\frac{2 A}{k A_r}}$.

Portanto, o ganho de alta frequência pode ser expresso por

$$k = \frac{32 A}{A_r T^2}. \quad (3.19)$$

Como será melhor explicado no Capítulo 5, este ganho é dado aproximadamente por

$$k \approx \frac{1}{m + m_{ad}}, \quad (3.20)$$

para o respectivo DOF.

Na Figura 3.8, a curva contínua representa o comportamento da variável e enquanto que a curva tracejada, o sinal de comando fornecido pelo relé.

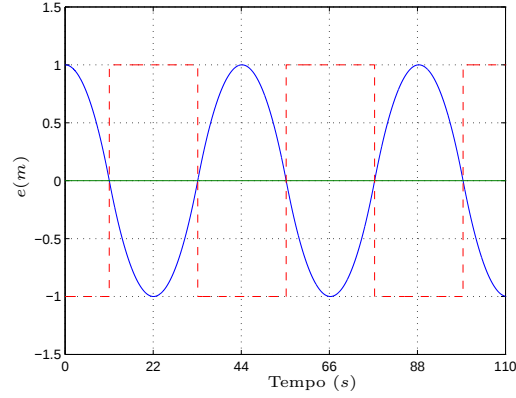


FIGURA 3.8: Resposta do sistema realimentado por relé.

3.2 Identificação dos coeficientes de arraste

A identificação dos coeficientes de arraste de um veículo marinho pode ser realizada deslocando-se o mesmo com velocidades conhecidas (Avila et al. 2004). Para isso, utiliza-se um sistema composto por uma alavanca articulada ligada ao veículo, em uma de suas extremidades, e à célula de carga, na outra extremidade. O sistema para a identificação do coeficiente de arraste na direção x_m , por exemplo, como ilustrado na Figura 3.9, onde:

E_{cel} ... é a força medida na célula de carga $[N]$;

d_1 ... é o comprimento do braço da alavanca entre a célula de carga e a articulação $[m]$;

d_2 ... é o comprimento do braço entre a articulação e o ponto de fixação ao veículo $[m]$;

d_3 ... é a distância entre o ponto de fixação e o centro de pressão do veículo $[m]$.

O braço referente ao comprimento d_3 depende do ponto de aplicação da força X_u , o qual é chamado de centro de pressão do veículo. O centro de pressão pode ser considerado, em uma primeira aproximação, como sendo o centro geométrico da área projetada do veículo na direção do movimento (Avila et al. 2004).

A força de arraste é determinada aplicando-se a soma dos momentos em torno da articulação, isto é,

$$X_u = \frac{d_1 E_{cel}}{d_2 + d_3}. \quad (3.21)$$

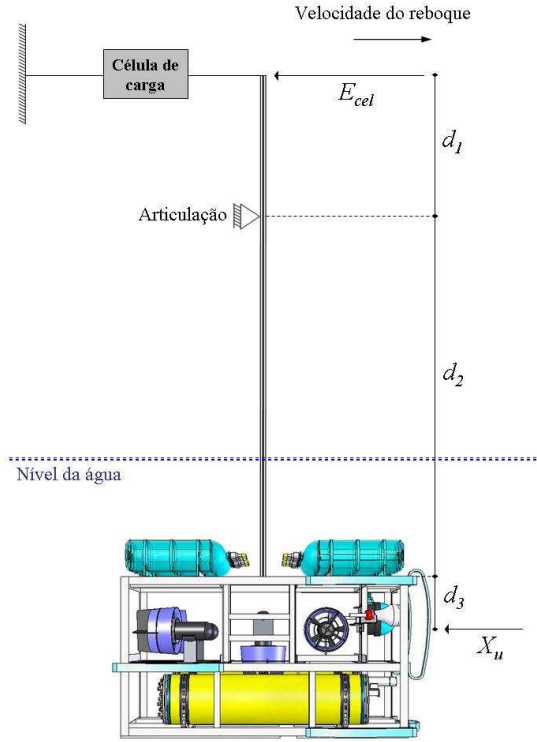


FIGURA 3.9: Esquema de medição de força de arraste.

Primeiramente, deve-se rebocar somente a barra para se obter o arraste adicional a ser descontado nos ensaios seguintes. Em seguida, a barra deve ser rebocada com o veículo preso a ela promovendo os movimentos nas direções desejadas.

Para o movimento em cada direção, deve-se medir as forças de arraste com velocidade variando de $0,2\text{ m/s}$ à $0,8\text{ m/s}$ com passos de $0,1\text{ m/s}$.

Os coeficientes de arraste nos movimentos de avanço, lateral e vertical são calculados respectivamente como:

$$C_x = \frac{2 X_u}{\rho u^2 \nabla_R^{\frac{2}{3}}}, \quad C_y = \frac{2 Y_v}{\rho v^2 \nabla_R^{\frac{2}{3}}}, \quad C_z = \frac{2 Z_w}{\rho w^2 \nabla_R^{\frac{2}{3}}}. \quad (3.22)$$

3.3 Obtenção dos centros de gravidade e flutuação

Como foi dito anteriormente, os ROVs são projetados normalmente com o centro de gravidade (R_G) suficientemente afastado do centro de flutuação (R_B) de maneira que exista um torque restaurador (T_{GB}) tendendo a estabilizar o veículo na horizontal ($\Phi \approx 0$ e $\theta \approx 0$) (Cunha 1992).

Porém, como o veículo foi equilibrado de forma experimental, a determinação precisa se faz necessária para a correta parametrização do sistema.

Nesta seção, serão descritos os métodos experimentais e computacionais de obtenção dos centros de gravidade e flutuação de veículos submarinos.

3.3.1 Centro de gravidade

O peso de um corpo é definido como sendo a força que a Terra atrai o corpo. O ponto de aplicação do peso de um corpo é denominado centro de gravidade (R_G).

Se um corpo homogêneo apresentar um elemento de simetria (um ponto, um eixo ou um plano), o centro de gravidade pertence necessariamente a esse elemento. Isto significa que o centro de gravidade coincide, neste caso, com o centro geométrico. Entretanto, quando a estrutura apresenta uma complexidade maior de constituição ou forma, métodos mais avançados de identificação se fazem necessários.

3.3.1.1 Centro de gravidade de corpos irregulares

A determinação do centro de gravidade de corpos irregulares pode ser feita suspendendo-se o corpo por dois de seus pontos. Um fio de prumo (Figura 3.10) passando pelo ponto de suspensão irá passar também por R_G . A interseção de duas dessas direções marcadas definirá o R_G corpo.

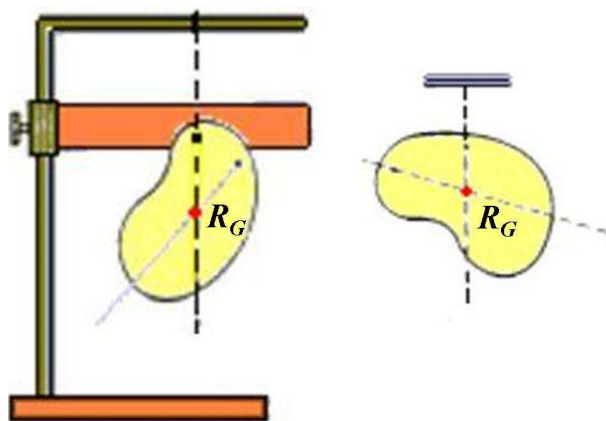


FIGURA 3.10: Esquema de obtenção do centro de gravidade de corpos irregulares.

Nos casos em que não for possível suspender o veículo inteiro, este procedimento pode ser realizado com as partes mais complexas (e.g. câmeras, garrafa da eletrônica,

propulsores) enquanto que a estrutura (*frame*) é determinada utilizando o programa SOLIDWORKS devido à simplicidade para a sua utilização. O centro de gravidade do conjunto será determinado como a seguir.

3.3.1.2 Centro de gravidade de conjuntos de corpos

Os centros de gravidade de dois polígonos homogêneos estão localizados precisamente nos respectivos centros geométricos e suas posições são dadas pelos vetores:

$$r_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}, \quad r_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

em relação a um único referencial.

No entanto, quando os dois polígonos são acoplados, o cálculo do centro de gravidade do conjunto formado por estes deve considerar as massas de cada um (m_1 e m_2) e seus respectivos vetores de posição (Figura 3.11).

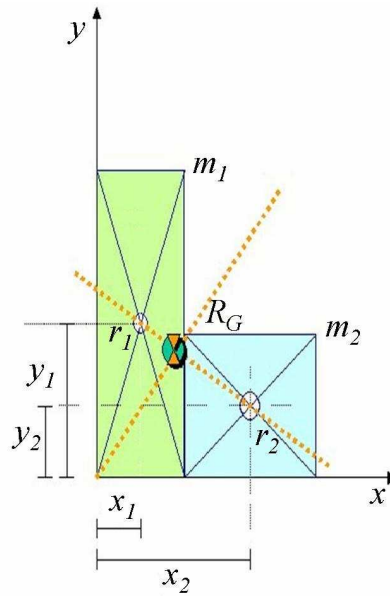


FIGURA 3.11: Determinação gráfica do centro de gravidade de dois corpos.

De maneira geral, para um conjunto de n corpos com massas $m_1, m_2 \dots m_n$, cujas posições são dadas por $r_1, r_2 \dots r_n$, respectivamente, a localização do centro de

gravidade é descrita por

$$R_G = \frac{m_1 r_1 + m_2 r_2 + \dots + m_n r_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}. \quad (3.24)$$

3.3.2 Centro de flutuação

O fenômeno de flutuação é regido pelo “Princípio de Arquimedes”, que determina que todo o corpo imerso em um líquido sofre uma força de baixo para cima igual ao peso do volume de líquido deslocado. Ou seja, o equilíbrio vertical estático acontece quando o peso da embarcação se iguala ao peso de água que ela desloca (flutuabilidade neutra), que é igual ao produto entre o seu volume submerso e o peso específico da água, ou seja,

$$m = \rho \nabla. \quad (3.25)$$

O centro de flutuação de um corpo é o centro geométrico da estrutura submersa e também pode ser calculado com um programa específico como o SOLIDWORKS.

No caso de estruturas complexas (e.g. ROVs tipo *openframe*), o *software* pode ser usado na determinação dos centros geométricos de cada um dos componentes, enquanto que, o centro de carena do veículo, será calculado da mesma maneira apresentada na seção anterior para se determinar o centro de gravidade de um conjunto de corpos.

Uma maneira de comprovação prática dos resultados obtidos é que os centros de gravidade e de flutuação tendem sempre a um alinhamento pelo eixo z do sistema inercial quando o veículo estiver submerso (Wilczynski & Diehl 1995).

3.4 Identificação dos parâmetros dos propulsores

$$(C_T^* \text{ e } C_Q^*)$$

A relação entre a velocidade de rotação do hélice com a força e o momento gerado pelo mesmo é dada pelos coeficientes C_T^* e C_Q^* , respectivamente. Tais valores são características específicas do hélice e expressam a sua assimetria.

A Figura 3.12 ilustra um sistema de identificação desses parâmetros encontrado na literatura recente (Bachmayer, Whitcomb & Grosenbaugh 2000, Healey, Rock, Cody, Miles & Brown 1995).

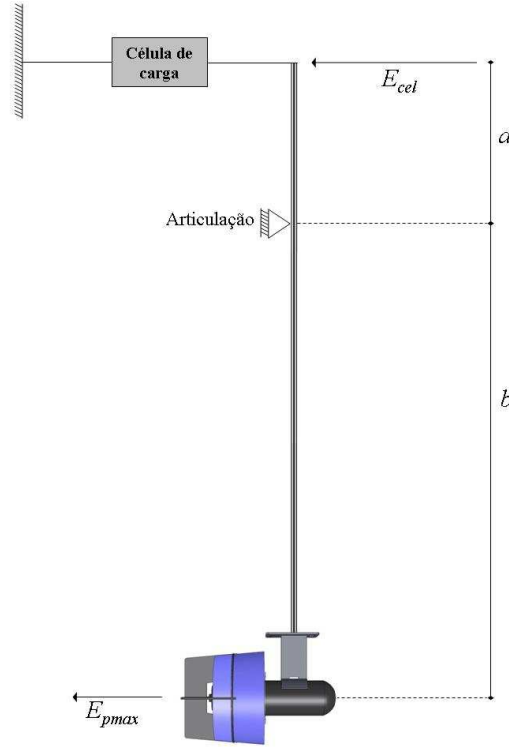


FIGURA 3.12: Esquema de medição de empuxo de propulsores.

Ao se acionar o propulsor em questão, o empuxo produzido é transmitido através da barra à célula de carga para a correspondente leitura como descrito por:

$$E_{pmax} = E_{cel} \frac{a}{b}. \quad (3.26)$$

Todavia, um sistema composto por *strain-gages* fixados em uma barra metálica é o mais indicado para este tipo de medição devido a sua maior simplicidade de montagem e calibração.

De posse dos dados adquiridos neste experimento, pode-se determinar esses coeficientes manipulando-se as equações (2.74) e (2.75) da seguinte maneira:

$$C_T^* = \frac{8 E_{pmax}}{0,7 \rho \pi^3 n_{pmax}^2 D^4}, \quad (3.27)$$

$$C_Q^* = \frac{8 T_{pmax}}{0,7 \rho \pi^3 n_{pmax}^2 D^5}. \quad (3.28)$$

Capítulo 4

Simulador de ROVs

Neste capítulo, é descrito o simulador de veículos submarinos implementado em ambiente MATLAB/SIMULINK, com base nas equações apresentadas no Capítulo 2 deste trabalho, cuja função é apresentar o comportamento dinâmico de um ROV durante a operação. Tal simulador será útil para auxiliar no projeto, por exemplo de controladores, e também no treinamento de operadores. Com ele é possível simular efeitos inerciais, hidrodinâmicos e gravitacionais, entre outros, que podem atuar no ROV. Os componentes deste simulador e seus principais sub-sistemas são descritos e referenciados a estas equações.

O simulador desenvolvido permite a visualização em três dimensões ($3D$) da dinâmica do ROV dentro do túnel. Para tanto, foi utilizada uma ferramenta do MATLAB, V-REALM BUILDER onde é possível criar um ambiente virtual. Este ambiente, onde é possível visualizar o ROV e todos os seus movimentos dentro do túnel, é apresentado e seus detalhes mais pertinentes são descritos.

Os procedimentos de configuração e operação de cada parte do simulador são detalhadamente apresentados visando fornecer aos usuários do simulador as informações necessárias para explorar todo o potencial desta ferramenta.

No final do capítulo, são listados uma série de procedimentos de teste que foram adotados para a validação deste simulador. Tais testes visam a comprovar também a coerência do modelo implementado com a apresentação dos resultados obtidos na simulação.

4.1 Operação do simulador

Esta seção é destinada a explicar como utilizar o simulador corretamente. A seguir, serão descritos os procedimentos de configuração e operação do simulador de ROVs desenvolvido no decorrer desta dissertação.

4.1.1 Configuração dos parâmetros

Um dos principais objetivos deste trabalho consistiu em desenvolver um simulador para diversos modelos de ROVs com diferentes características. Então, para simular o comportamento do veículo submarino desejado, primeiramente, deve-se executar um arquivo de configuração que carregue seus respectivos parâmetros. Este arquivo fornece ao simulador as seguintes informações:

1. a massa (m) e o volume (∇) do ROV;
2. as matrizes de massas do corpo rígido (M_{CR}) e de massas adicionais (M_A);
3. os coeficientes de arraste linear (D_L) e quadrático (D_Q) do veículo;
4. os centros de gravidade (R_G) e flutuação (R_B);
5. as matrizes de acoplamento e desacoplamento referentes ao posicionamento dos propulsores;
6. os coeficientes de empuxo ($C_T^*(\sigma)$) e torque ($C_Q^*(\sigma)$) dos propulsores;
7. as condições iniciais do sistema, como a velocidade (ν_0) e a posição (η_0);
8. os dados externos, como a massa específica da água (ρ), a força da gravidade (g) e a velocidade da correnteza representada no sistema de coordenadas do ROV (ν_r);
9. os parâmetros dos controladores implementados ($k_D, k_P, k_I...$).

Quando houver a necessidade de se alterar algum desses parâmetros, isso poderá ser feito no arquivo de configuração ou diretamente na janela de comando do MATLAB (**Workspace**). Desta maneira, é possível realizar simulações de diversas concepções de veículos submarinos com diferentes características.

ROV fictício: Como não foi possível realizar os testes de identificação de parâmetros mencionados no Capítulo 3, foram adotados parâmetros fictícios para a simulação. Estes parâmetros fictícios foram estimados e sintonizados de maneira que fossem observados, no simulador, resultados similares aos obtidos experimentalmente com o LUMA. O arquivo `luma.m`, apresentado no Apêndice C, configura o simulador com os parâmetros referentes a este veículo.

4.1.2 Operando o *joystick*

Através desta interface, o usuário atua diretamente nos quatro DOFs controláveis (translação nos eixos x_m , y_m e z_m e rotação no eixo z_m).

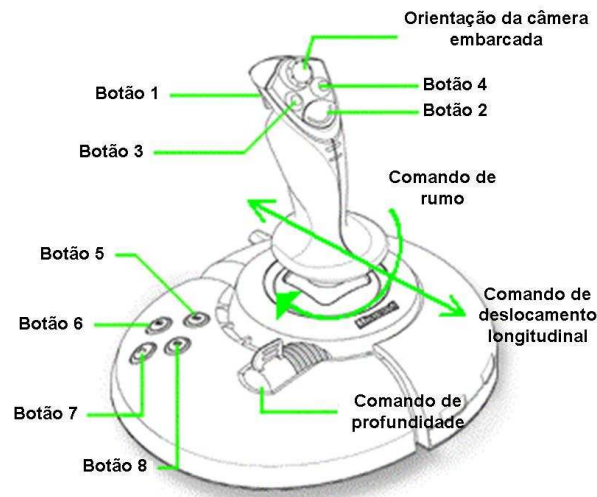


FIGURA 4.1: Comandos e botões do joystick.

Além disso, os controles automáticos de profundidade, rumo e distância do veículo até a parede do túnel podem ser acionados pelos botões enumerados no *joystick*, como mostrado na Tabela 4.1.

TABELA 4.1: Botões de acionamento das malhas de controle.

Controle automático	Botão de acionamento
Profundidade	1
Rumo	2
Distância do veículo até a parede do túnel	3

Os comandos de translação e rotação no eixo z_m e de deslocamento lateral, no

joystick serão desprezados enquanto os controles estiverem acionados, respectivamente, para estes DOFs, isto é, quando os três controladores estiverem atuando, restará para o operador a tarefa de controlar manualmente apenas um DOF. Este único DOF restante consistirá em deslocamentos em direções paralelas à parede do túnel feito por meio dos comandados do *joystick* nos sentidos para a esquerda ou direita.

O valor da posição ou orientação medido, no instante do acionamento da malha de controle, para o respectivo eixo do sistema de coordenadas estacionário, será adotado como a referência para esses controladores. No entanto, a qualquer momento na simulação, em que o controle estiver atuando, é possível alterar a referência na janela de comando do MATLAB (*Workspace*).

Os *joysticks* utilizados possuem uma pequena alavanca na parte superior denominada seletor do ponto de vista. Optou-se por configurá-la de maneira a atuar diretamente na interface visual, controlando a orientação da câmera embarcada no ROV, como será melhor explicado a seguir (Seção 4.1.3).

O simulador foi testado com os dois modelos de *joysticks* mostrados na Figura 4.2. Estes dois modelos de *joysticks* apresentaram algumas diferenças que serão detalhadas



FIGURA 4.2: (a) *Joystick* CLONE/Cobra & (b) *Joystick* MICROSOFT Force Feedback.

na Seção 4.2.1. No entanto, é importante antecipar que uma variável ($j\mathbf{k}$) foi criada para configurar as entradas do simulador de acordo com o modelo de *joystick* adotado. Por isso, temos que para:

$j\mathbf{k} = 0$, todas as saídas do Joystick serão anuladas (condição ideal para alguns testes que serão detalhados mais adiante);

$j\mathbf{k} = 1$, as entradas do simulador serão calibradas para o *joystick* CLONE/Cobra (condição padrão);

$jk = 2$, as entradas do simulador serão calibradas para o *joystick* MICROSOFT Force Feedback;

além disso, jk pode assumir ainda novos valores para ajustar o simulador às saídas de outros modelos de *joystick* previamente configurados no programa JK-config.m (Apêndice C).

4.1.3 Interface visual

A interface visual utilizada, VR sink (renomeado aqui como Realidade Virtual), se mostrou muito adequada para se analisar o comportamento do ROV simulado. A representação em 3D do túnel, do veículo e de seus movimentos fornece uma idéia muito realista do que aconteceria com o sistema real sob as mesmas condições.

No universo virtual criado para representar o ROV no túnel, foram configurados quatro pontos de vista possíveis:

1. Vista interna do túnel;
2. Vista lateral do túnel;
3. Vista superior do túnel;
4. Vista da câmera embarcada.

As telas referentes aos quatro pontos de vista implementados são mostradas nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

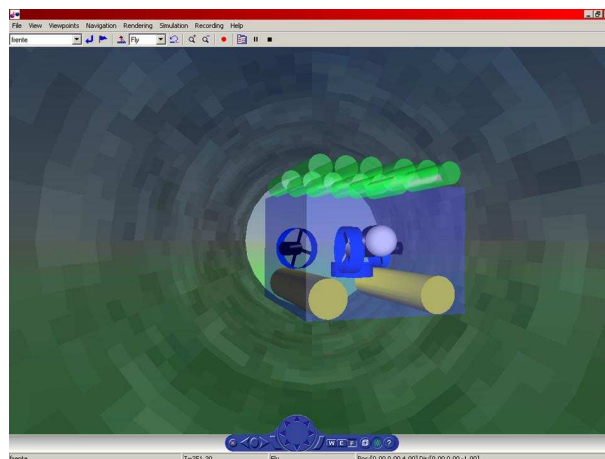


FIGURA 4.3: Vista interna do túnel.

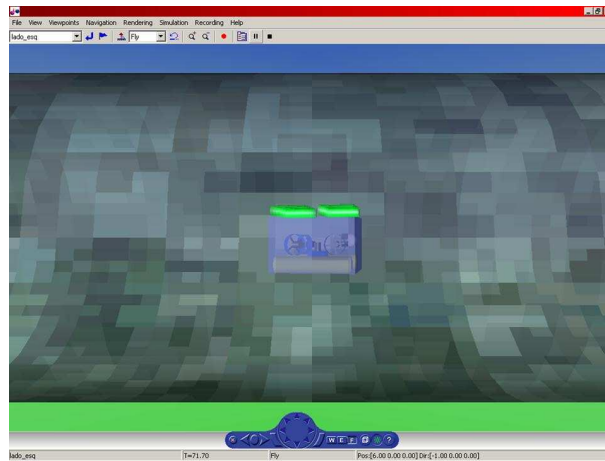


FIGURA 4.4: Vista lateral do túnel.

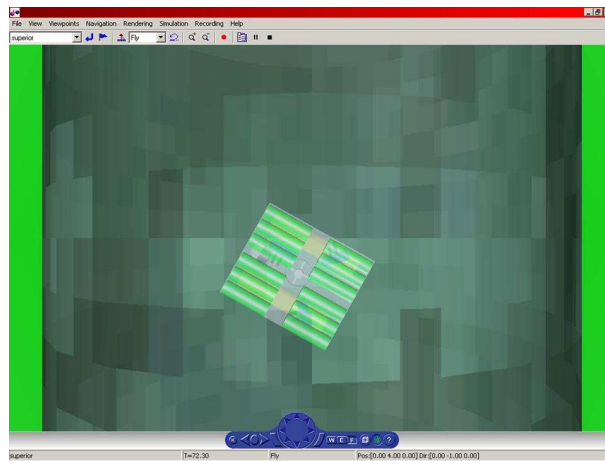


FIGURA 4.5: Vista superior do túnel.

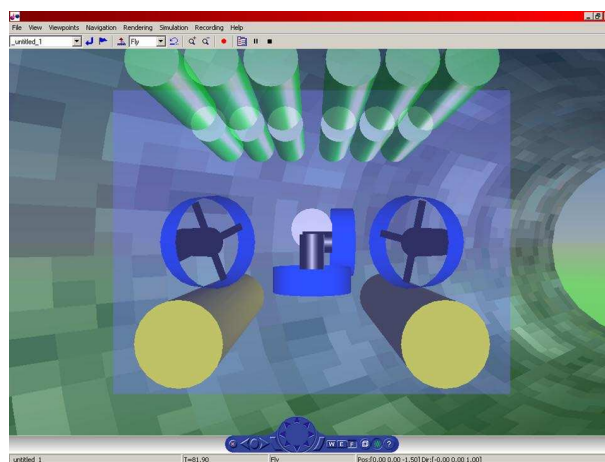


FIGURA 4.6: Vista da câmera embarcada.

Como pode ser melhor notado nas Figuras 4.4 e 4.5, optou-se por ilustrar o túnel com uma certa transparência nas paredes. Com isso, é possível observá-lo de uma maior distância para ter uma noção melhor do posicionamento do veículo submarino.

Enquanto que as vistas interna, lateral e superior do túnel estão referenciadas ao sistema de coordenadas estacionário, a câmera embarcada simulada está referenciada ao veículo e, por isso, é solidária às variações de posição e atitude do mesmo. Além disso, todos os pontos de vista implementados podem ter suas posições alteradas, quando, ao menos, uma dentre as teclas $\uparrow$, $\downarrow$, $\leftarrow$ e $\rightarrow$ do teclado é pressionada, e suas orientações alteradas, se a tecla **shift** é pressionada simultaneamente.

A orientação referente à vista da câmera embarcada pode ser diretamente manipulada pelo usuário através do seletor de ponto de vista (uma pequena alavanca localizada na parte superior do *joystick*) da seguinte maneira:

- $\uparrow$ visualização abaixo;
- $\downarrow$ visualização acima;
- $\leftarrow$ visualização à esquerda;
- $\rightarrow$ visualização à direita;
- $\swarrow$ visualização na diagonal inferior esquerda;
- $\searrow$ visualização na diagonal inferior direita;
- $\nearrow$ visualização na diagonal superior esquerda;
- $\nwarrow$ visualização na diagonal superior direita.

4.2 Descrição do simulador

No ambiente de programação MATLAB/SIMULINK, no qual o simulador foi implementado, o modelo é descrito basicamente por diagramas em blocos que representem as equações que regem o sistema. A implementação do modelo matemático em diagrama de blocos se mostra uma interface bastante agradável e de simples visualização.

A Figura 4.7 mostra o simulador de ROVs implementado sob a forma de diagrama de blocos no SIMULINK. Os blocos **Joystick** e **Realidade Virtual** são oriundos do

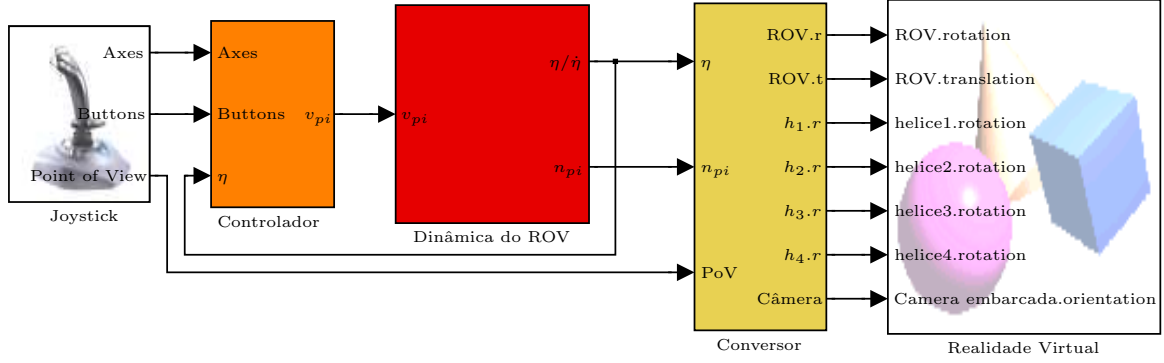


FIGURA 4.7: Simulador de ROV.

pacote VIRTUAL REALITY TOOLBOX encontrado na biblioteca do referido programa.

A seguir, serão descritos os funcionamentos de cada bloco do diagrama deste simulador.

4.2.1 Joystick

O bloco *Joystick*, apresentado aqui como a principal interface de entrada do simulador, possibilita uma conveniente interação entre o modelo simulado e o mundo virtual associado ao bloco *Realidade Virtual*. Através dele, o usuário pode controlar o veículo diretamente, a orientação de um dos pontos de vista simulados e acionar os controles automáticos implementados. De maneira geral, os sinais recebidos são codificados na forma de vetores que refletem os estados dos eixos e botões do *joystick* como é descrito a seguir:

- A saída **Axes** fornece um vetor contendo os valores correspondentes à posição da alavanca de comando principal do *joystick* para os seus respectivos eixos. Cada elemento corresponde a comandos de translação e rotação nos eixos do sistema de coordenadas referenciado ao veículo, pode variar de -1 a $+1$. Quando não há aplicação de comando pelo bloco *Joystick* para um determinado eixo, o respectivo elemento assume o valor 0. Este vetor comporta até oito eixos de controle. Porém, a dinâmica do tipo de ROV adotado, apesar de apresentar seis DOFs, requer apenas quatro eixos de comando.
- Na saída **Buttons**, é apresentado, um vetor com os valores correspondentes aos

estados dos interruptores tipo *pushbutton* do *joystick*. Os valores dos elementos deste vetor podem ser:

0 $\Rightarrow$ indicando que botão não está acionado;

1 $\Rightarrow$ quando o botão é pressionado.

Podem ser introduzidos os sinais de até 32 botões na simulação. No entanto, apenas os três primeiros serão necessários para acionar as malhas de controle implementadas no sistema.

- Na saída **Point of View** é representado o estado do seletor do ponto de vista do *joystick*, conforme mostrado na tabela 4.2.

TABELA 4.2: Valores da saída **Point of View**.

Posição do seletor	Valor na saída
↑	0
↗	45
→	90
↘	135
↓	180
↙	225
←	270
↖	315
“inativo”	−1

Deve-se notar que, quando acionado o seletor, os valores apresentados representam os ângulos de rotação, ao redor do eixo longitudinal, em graus, no sentido horário de um vetor de observação posicionado inicialmente na diagonal superior à frente do veículo.

Estes dois modelos de *joysticks* adotados apresentaram algumas diferenças entre seus eixos de controle e outras particularidades. Na Tabela 4.3, onde são comparadas as principais características desses *joysticks*, o u_i é o i -ésimo elemento do vetor na saída **Axes**.

TABELA 4.3: Parâmetros dos *joysticks*.

Característica	CLONE/Cobra	MICROSOFT Force Feedback
empuxo em x_m	$-u_2$	$-u_2$
empuxo em y_m	u_1	u_1
empuxo em z_m	u_3	u_4
torque em z_m	u_4	u_3
número de botões	12	6

Além disso, o *joystick* CLONE/Cobra apresentou uma necessidade calibração (adição de $offsets = 0.0079$) para se adequar à esta faixa de variação dos elementos da saída **Axes**.

Para resolver os problemas de sintonia e calibração entre os comandos no *joystick* adotado e o simulador, optou-se por criar uma rotina em MATLAB denominada **JK-config.m** que configure as entradas do sistema. Isso é feito por meio de uma variável *jk* para identificar o *joystick* que está sendo utilizado. Para isso, a seguinte expressão foi implementada:

$$JK_{out} = offset + cc * JK_{in}, \quad (4.1)$$

onde:

JK_{out} ... é o vetor de saída calibrada da função **JK-config**,

JK_{in} ... é o vetor de saída do bloco **Joystick**,

$offset$... é o vetor de ajuste dos valores fornecidos pelo **Joystick** com a faixa de operação determinada,

cc ... é a matriz de transformação de coordenadas entre os eixos do *joystick* e o sistema de coordenadas adotado no modelo.

Segundo a Tabela 4.3, as matrizes que realizam a transformação de coordenadas no caso do *joysticks* CLONE/Cobra e do MICROSOFT Force Feedback são, respectiva-

mente:

$$CC_{CLONE} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad CC_{MICROSOFT} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

4.2.2 Controlador

Neste bloco, foram implementadas estruturas de controle para movimentos em algumas direções visando simplificar a atuação do operador durante a inspeção.

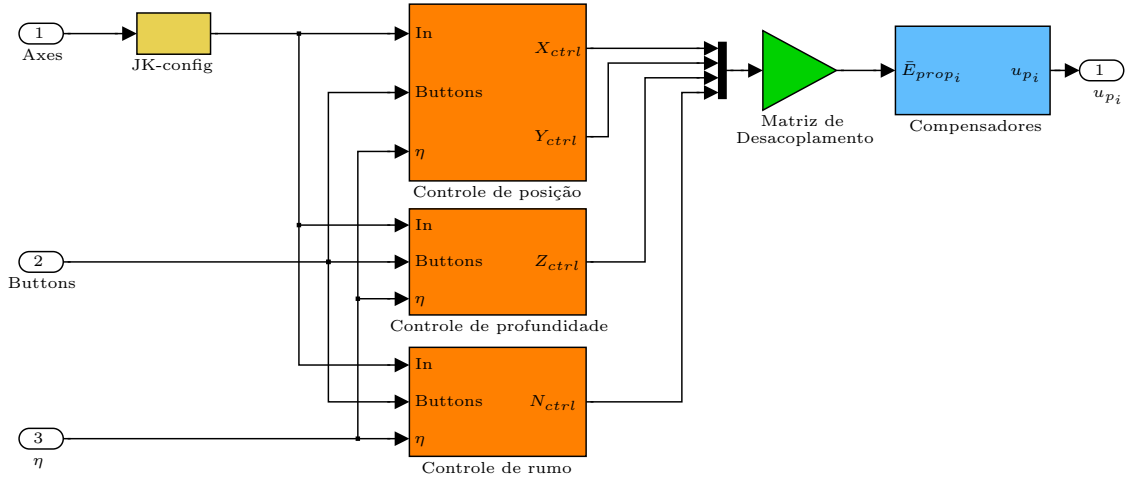


FIGURA 4.8: Diagrama em blocos do controlador do ROV LUMA.

As variações de posição, nos eixos x_m e z , e de orientação, no eixo ψ , são monitoradas durante toda a simulação. Entretanto, no instante do acionamento dos sistemas de controle, contidos no bloco **Controlador** (Figura 4.8), os valores medidos para os respectivos DOFs são armazenados em *buffers* e passam a ser as referências dos sistemas de controle de cada um até o momento em que novas referências forem dadas ao simulador. Isso pode ser feito sempre que o respectivo controle estiver acionado, digitando a nova coordenada no **Workspace**. As variáveis associadas aos valores de posição e atitude desejados na saída do sistema são:

ref_x ... referência de distância até a parede do túnel;

ref_z ... referência de profundidade;

ref_phi ... referência de rumo.

Cabe salientar que o controle da distância do ROV até a parede do túnel impõe uma restrição do movimento no plano x_my_m .

O funcionamento dos sistemas de controle serão explicados mais detalhadamente no Capítulo 5.

4.2.3 Dinâmica do ROV

O modelo matemático apresentado em (Cunha 1992, Dominguez 1989) e abordado no Capítulo 2 desta dissertação foi implementado no bloco **Dinâmica do ROV**.

O vetor com as tensões elétricas geradas no controle para cada propulsor (u_{p_i}) é a entrada deste bloco, enquanto que, um vetor, com a posição, a orientação, a velocidade de translação e a velocidade angular do veículo representados no sistema estacionário (η e $\dot{\eta}$), e outro, com as velocidades angular dos hélices de cada propulsor (n_{p_i}), aparecem na saída do mesmo.

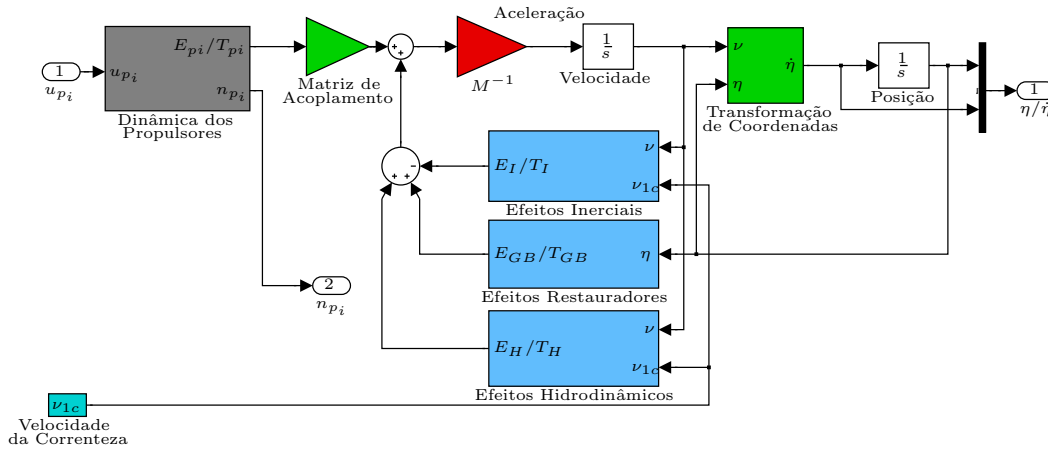


FIGURA 4.9: Dinâmica do ROV.

A Figura 4.9 mostra o diagrama interno do bloco **Dinâmica do ROV** composto pelos seguintes sub-blocos:

- **Dinâmica dos Propulsores** - este bloco implementa as equações que regem o comportamento dinâmico dos propulsores. O bloco transforma as tensões elétricas aplicadas em cada propulsor (u_{p_i}) em empuxos (E_{prop_i}), torques (T_{prop_i}) e na velocidade de rotação de cada um (n_{p_i}),
- **Matriz de Acoplamento** - este bloco converte os empuxos e torques, impostos

por cada propulsor (E_{prop_i} e T_{prop_i}), em forças e momentos resultantes nos três eixos de coordenadas referenciados ao sistema móvel (τ_{prop}),

- **Efeitos Inerciais** - este bloco apresenta os efeitos causados pelas massas e inércias do sistema (E_I e T_I),
- **Efeitos Restauradores** - este bloco representa a interação entre os esforços de gravidade e flutuação (E_{GB} e T_{GB}),
- **Efeitos Hidrodinâmicos** - este bloco é encarregado em dissipar a energia do ROV pelo arrasto hidrodinâmico (E_H e T_H),
- **Transformação de Coordenadas** - este bloco converte as velocidades do sistema de coordenadas referenciado ao móvel (ν) para o estacionário ($\dot{\eta}$),
- **Matriz de Inércias Inversa** (M^{-1}) - este bloco pré multiplica todas as forças que atuam sobre o veículo (τ), fornecendo as acelerações do mesmo ($\dot{\nu}$).

A Tabela 4.4 referencia cada sub-bloco do diagrama da dinâmica do ROV com as equações, do modelo matemático apresentado no Capítulo 2, utilizadas na implementação dos mesmos.

TABELA 4.4: Equações implementadas no simulador.

Bloco da dinâmica do ROV	Equações implementadas
Dinâmica dos propulsores	(2.74) e (2.75)
Matriz de acoplamento	(2.84)
Efeitos Inerciais	(2.42), (2.43), (2.45), (2.46) e (2.47)
Efeitos Restauradores	(2.16), (2.57), (2.58) e (2.59)
Efeitos Hidrodinâmicos	(2.62), (2.63), (2.64), (2.65), (2.66) e (2.67)
Transformação de Coordenadas	(2.9), (2.10), (2.11), (2.12), (2.13), (2.14) e (2.18)

4.2.4 Conversor

Este bloco realiza a adaptação de todos os dados, gerados durante a simulação ou fornecidos pelo Joystick, de maneira que estes possam ser interpretados pelo bloco

de visualização (Realidade Virtual). Essa adaptação se faz necessária para a associação correta do posicionamento dos eixos do sistema de coordenadas estacionário com os eixos da interface visual e para converter os ângulos de *Euler* de rotação, em torno destes eixos, para uma representação dada por *Quaternions* (usada pelo bloco Realidade Virtual). Esta conversão dos ângulos de rotação é utilizada também para os hélices de cada propulsor de maneira que esses girem de acordo com o modelo dos propulsores.

4.2.5 Realidade Virtual

O bloco Realidade Virtual apresenta uma interface visual com o usuário, em 3D, bastante realista, através da qual é possível acompanhar todos os deslocamentos e rotações do veículo nos três eixos de coordenadas. Para isso, foi necessário gerar um ambiente virtual chamado `rov_tunel.wrl`, no aplicativo V-REALM BUILDER (Figura 4.10), com os desenhos em 3D do ROV LUMA em um túnel com 4m de diâmetro.

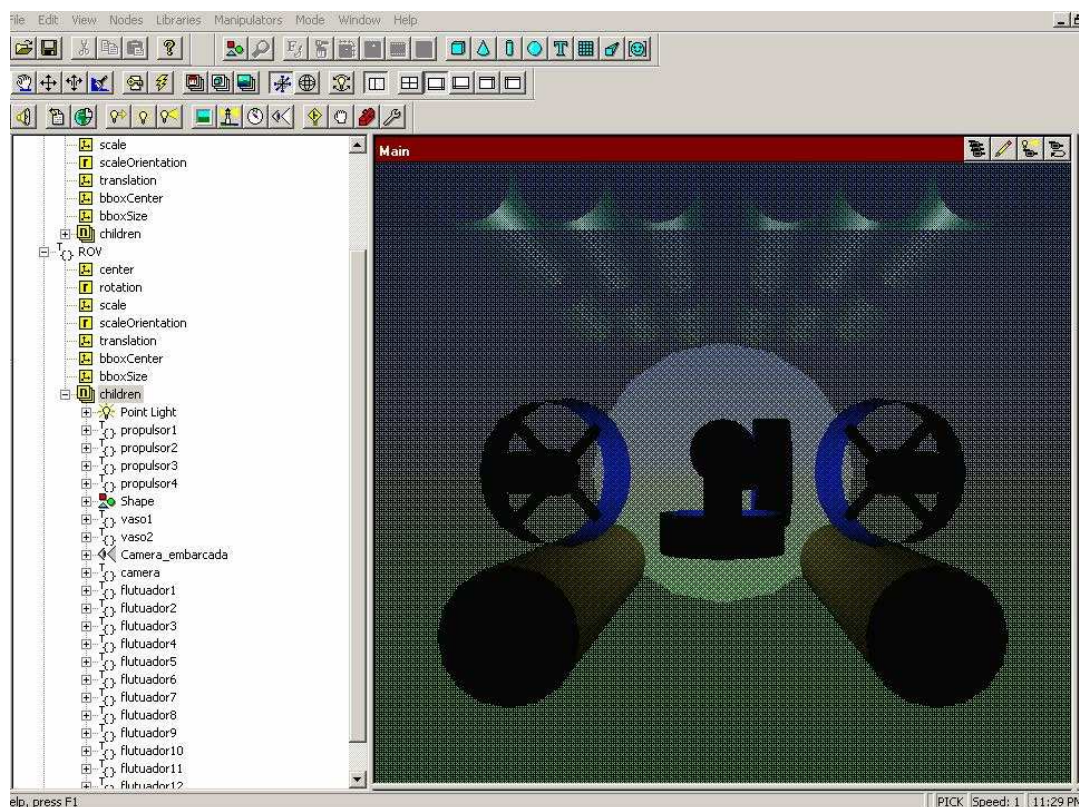


FIGURA 4.10: Tela do aplicativo V-REALM BUILDER.

As variáveis do universo virtual correspondentes aos DOFs do ROV e a efeitos meramente ilustrativos foram definidas como entradas do bloco **Realidade Virtual**. Tais entradas são descritas a seguir:

- `ROV.rotation` é a posição do ROV descrita nos três eixos do sistema estacionário;
- `ROV.orientation` é a atitude (ou orientação) do ROV representada por *Quaternions*;
- `helice(i).orientation` é o ângulo de rotação do hélice do i-ésimo propulsor variando, proporcionalmente, sempre que este é acionado;
- `Camera embarcada.orientation` é a orientação do ponto de vista referenciado ao veículo simulando a imagem da câmera embarcada.

As entradas com as extensões `rotation` e `orientation` representam, respectivamente, a posição e a atitude do objeto virtual. Essas extensões são dadas pelo *software* V-REALM BUILDER e não podem ser renomeados para elucidar melhor qual DOF está sendo manipulado.

Além da imagem da câmera embarcada simulada optou-se por possibilitar a visualização, do veículo durante a simulação, a partir de três pontos fixos ao sistema de coordenadas estacionário. Como foi mostrado na Seção 4.1.3, desses pontos é possível ter a visão interna, lateral ou superior do túnel a ser inspecionado.

4.3 Testes básicos no simulador em malha aberta

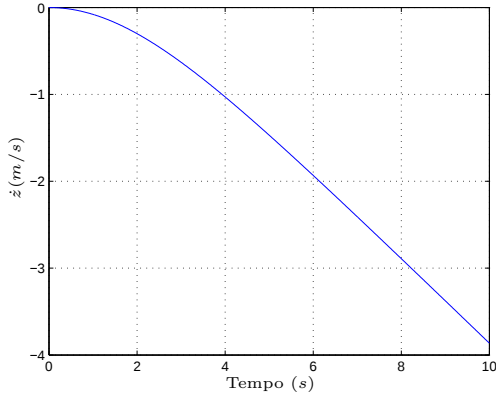
Foram feitos testes simples na resposta do sistema em malha aberta para diversas condições iniciais com o objetivo de validar o seu modelo ainda sem a implementação da malha de controle.

Os resultados descritos a seguir foram obtidos em testes realizados no simulador de ROVs configurado com os parâmetros do ROV fictício (Seção 4.1.1) através do programa `luma.m` apresentado no Apêndice C.

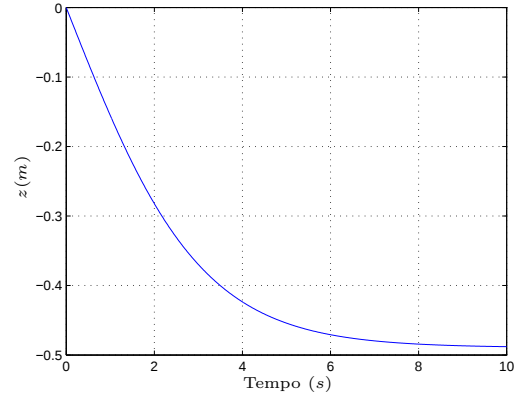
4.3.1 Testes com condições iniciais nulas

Inicialmente, a simulação foi realizada com condições nulas de movimento, ou seja, com o veículo em repouso. O comportamento observado foi o seguinte:

1. Quando nenhuma força é aplicada nas direções x_m e y_m , não há deslocamento nessas direções assim como não existe rotação ao redor de z_m quando não há momento em torno do mesmo;
2. Sem a aplicação de forças na direção do eixo vertical referenciado ao corpo (z_m), o movimento é realizado pela força resultante da diferença entre gravidade e flutuação.

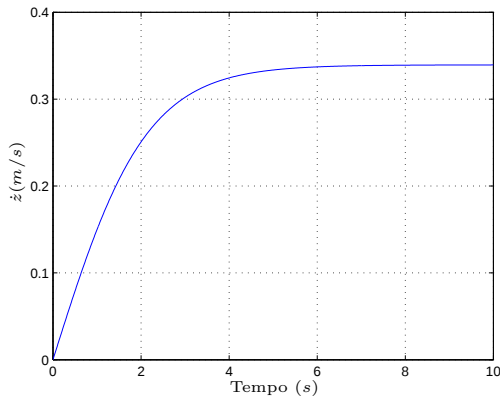


(a)

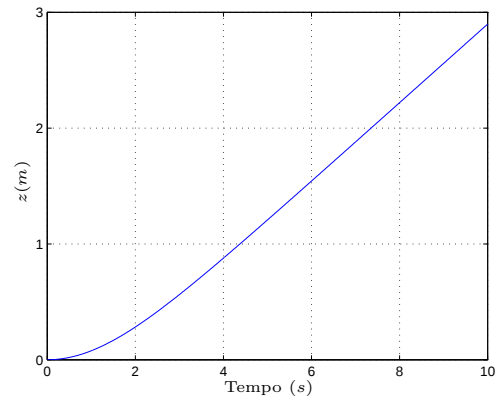


(b)

FIGURA 4.11: (a) velocidade e (b) posição no eixo vertical quando flutuabilidade é positiva ($\rho\nabla - g = 1[Kg]$).



(a)



(b)

FIGURA 4.12: (a) velocidade e (b) posição no eixo vertical quando flutuabilidade é negativa ($\rho\nabla - g = -1[Kg]$).

O veículo se desloca no sentido negativo deste eixo quando a flutuabilidade é positiva (Figura 4.11) e vice e versa (Figura 4.12). Não há deslocamento nesta direção quando se ajusta a massa ou o volume de maneira que a flutuabilidade fique neutra.

3. Nos casos em que os centros de gravidade e de flutuação não estão alinhados pelo eixo z_m , existe movimento de rotação oscilatório ao redor de x_m e/ou y_m até alinhar esses dois centros paralelamente ao eixo z (Figuras 4.13 e 4.14).

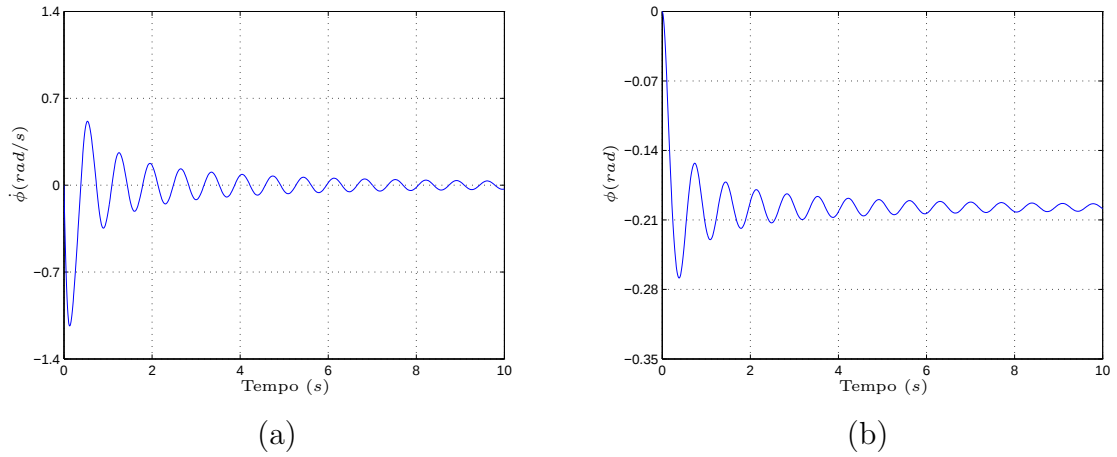


FIGURA 4.13: (a) velocidade angular e (b) orientação em torno do eixo x quando o centro de flutuação (R_G) é deslocado 10cm à direita do ROV.

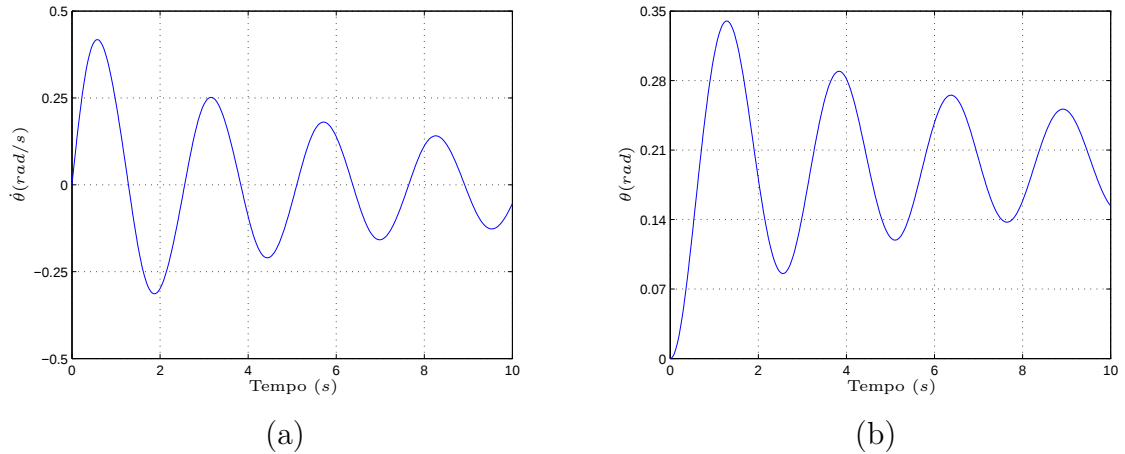


FIGURA 4.14: (a) velocidade angular e (b) orientação em torno do eixo y quando o centro de flutuação (R_G) é deslocado 10cm à frente do ROV.

Uma vez que a atitude inicial do veículo propicie este alinhamento com o eixo z , tal movimento não existe, mesmo não havendo o alinhamento com z_m .

4. Foram aplicados pulsos unitários com duração de $2s$ ($2 \leq t \leq 4$) como forças nas três direções (Figuras 4.15, 4.16 e 4.17) e momento em torno de z_m (Figura 4.18).

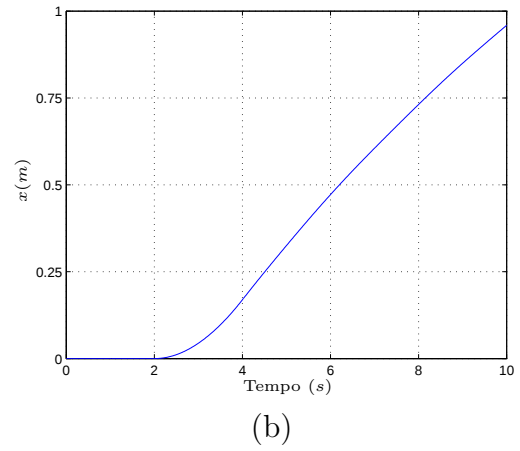
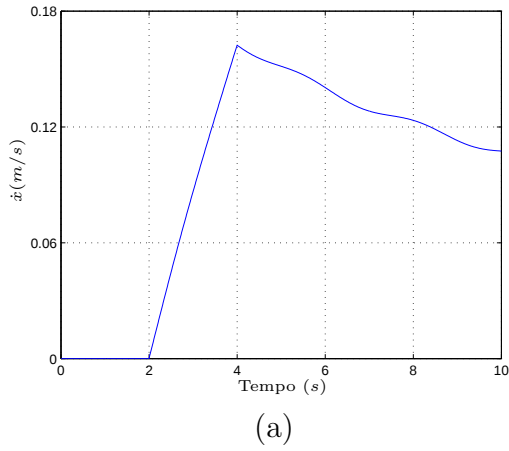


FIGURA 4.15: (a) velocidade e (b) posição no eixo longitudinal (x) para um comando de força tipo impulso com largura de $2s$.

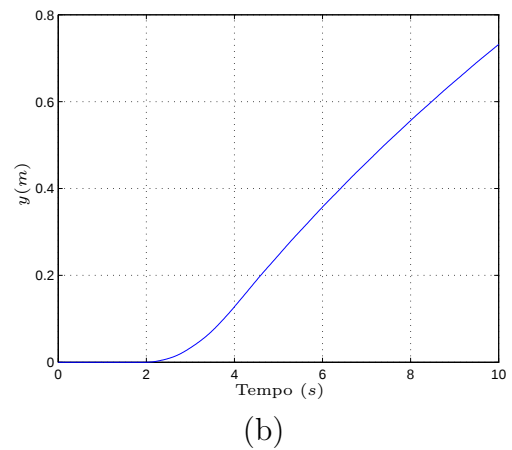
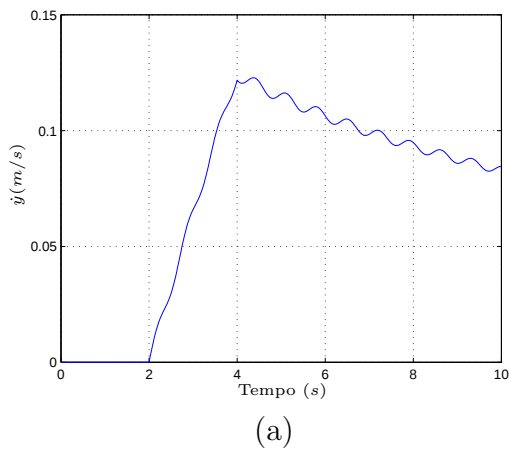


FIGURA 4.16: (a) velocidade e (b) posição no eixo transversal (y) para um comando de força tipo impulso com largura de $2s$.

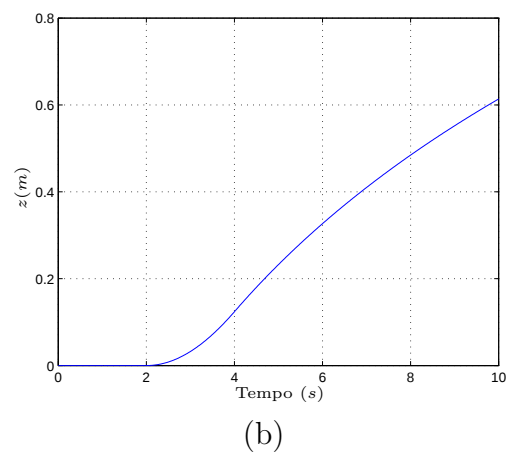
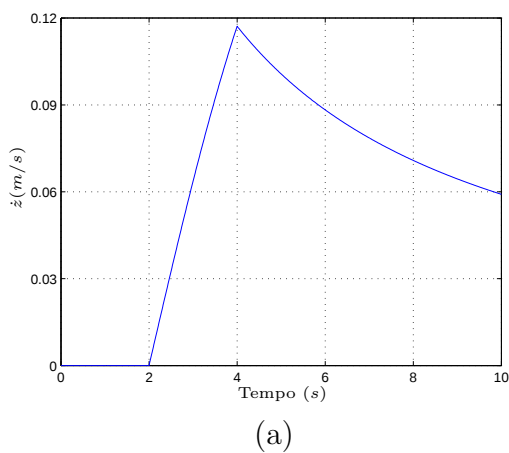


FIGURA 4.17: (a) velocidade e (b) posição no eixo vertical (z) para um comando de força tipo impulso com largura de $2s$.

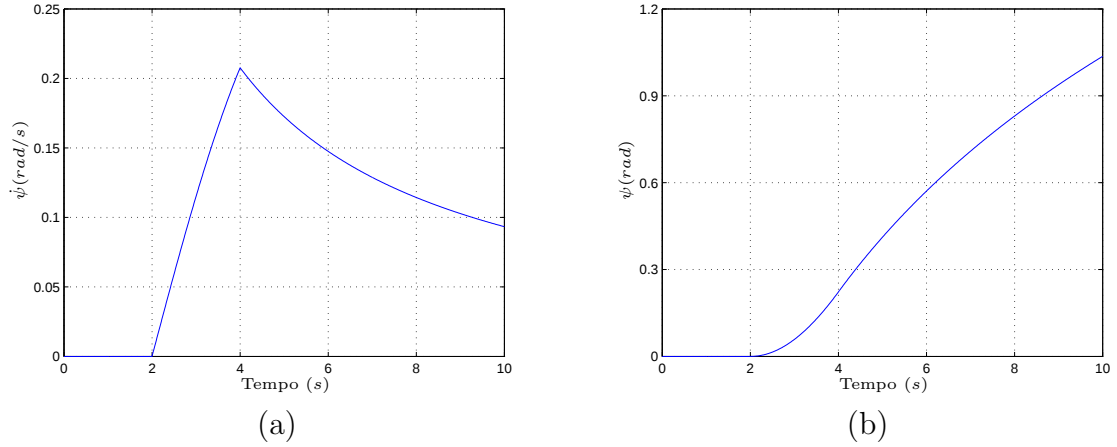


FIGURA 4.18: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo vertical (z) para um comando de força tipo impulso com largura de $2s$.

Neste caso, o ROV acelera durante a aplicação da força e, em seguida, desacelera até a condição de repouso novamente.

4.3.2 Testes com condições iniciais não nulas

Em seguida, simulações foram realizados testes em condições não nulas (Dominguez 1989), isto é, com determinadas velocidades iniciais e com condições instáveis para os ângulos de atitude no intuito de se verificar a passividade do sistema. Foram eles:

1. Teste com as velocidades de translação iniciais não nulas ($u = 0,5 m/s$, $v = 0,5 m/s$, $w = 0,5 m/s$):

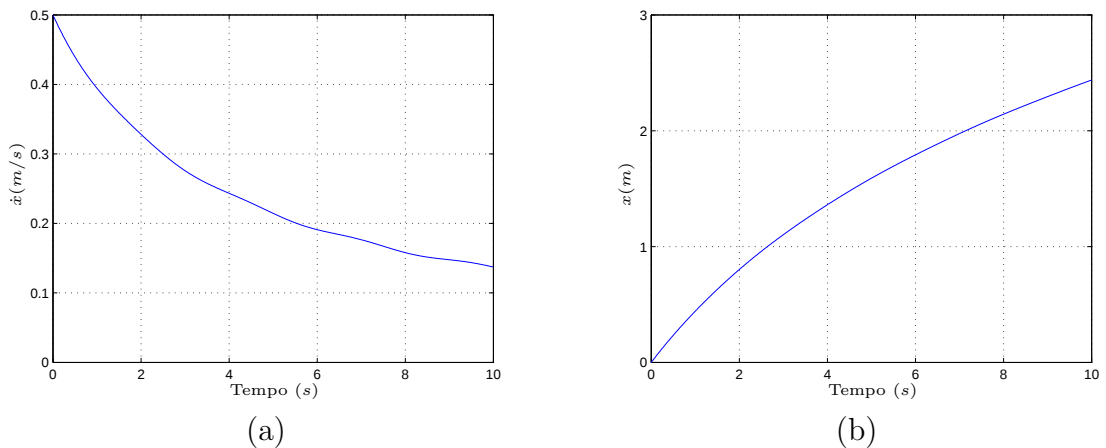
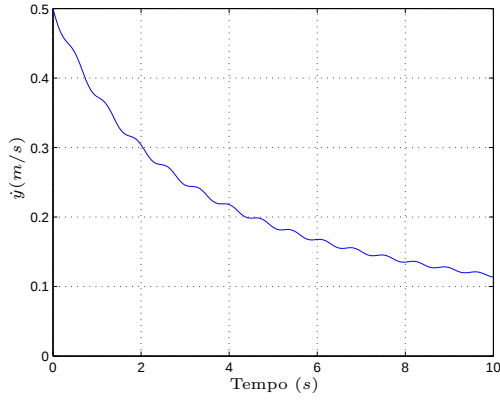
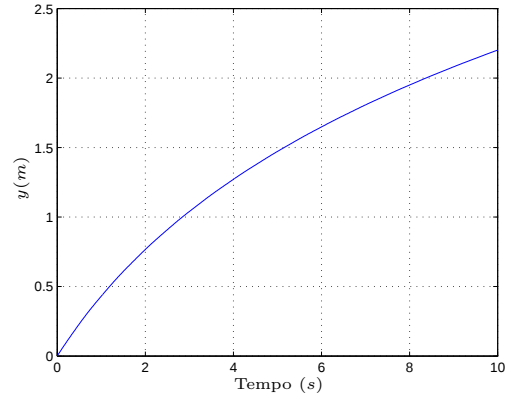


FIGURA 4.19: (a) velocidade e (b) posição no eixo longitudinal (x) a partir de uma condição inicial não nula ($u = 0,5 m/s$).

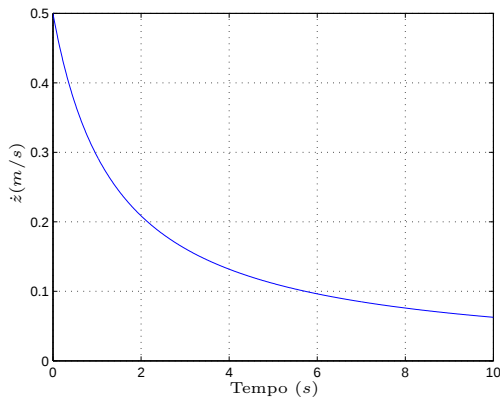


(a)

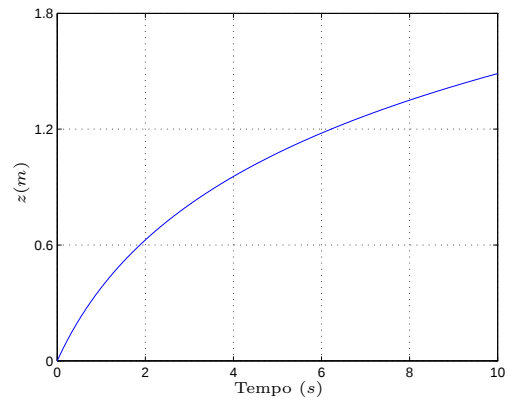


(b)

FIGURA 4.20: (a) velocidade e (b) posição no eixo transversal (y) a partir de uma condição inicial não nula ($v = 0,5 \text{ m/s}$).



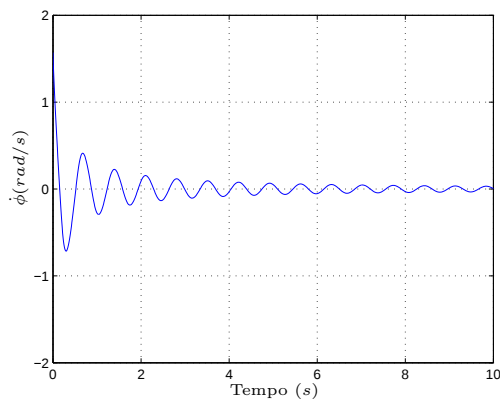
(a)



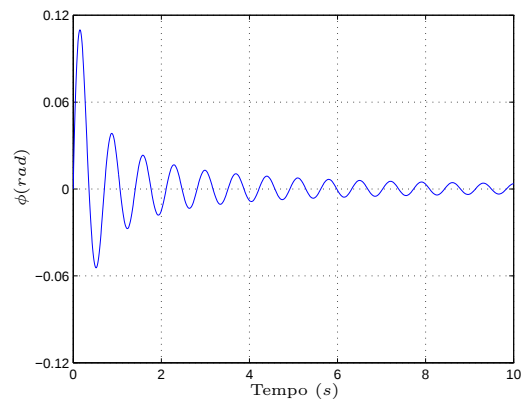
(b)

FIGURA 4.21: (a) velocidade e (b) posição no eixo vertical (z) a partir de uma condição inicial não nula ($w = 0,5 \text{ m/s}$).

2. Teste com as velocidades angulares iniciais não nulas ($p = 90^\circ/\text{s}$, $q = 90^\circ/\text{s}$, $r = 90^\circ/\text{s}$):

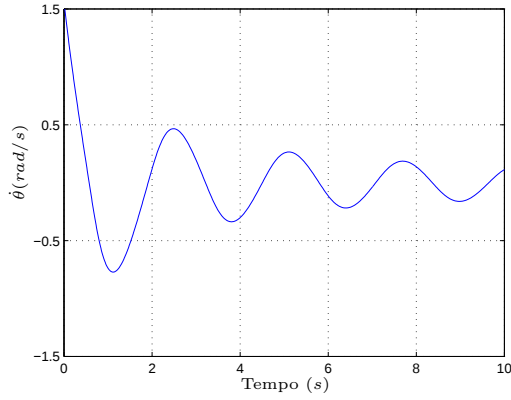


(a)

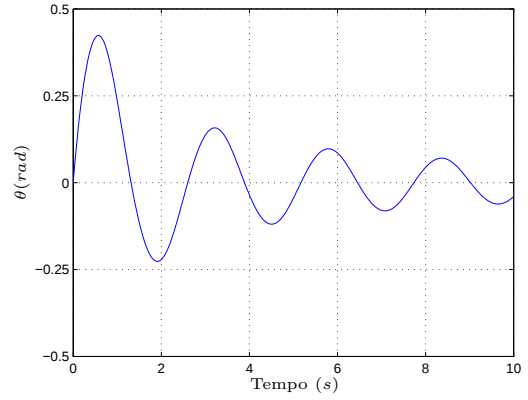


(b)

FIGURA 4.22: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo longitudinal (x) a partir de uma condição inicial não nula ($p = 90^\circ/\text{s}$).

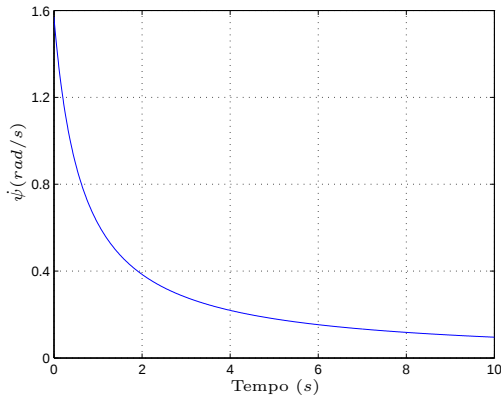


(a)

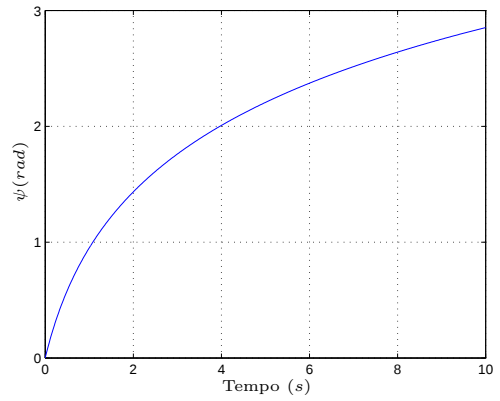


(b)

FIGURA 4.23: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo transversal (y) a partir de uma condição inicial não nula ($q = 90^\circ/s$).



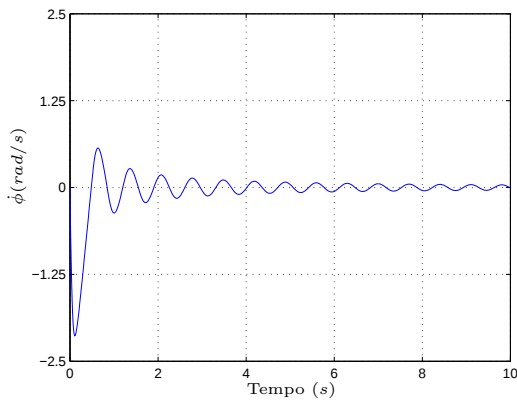
(a)



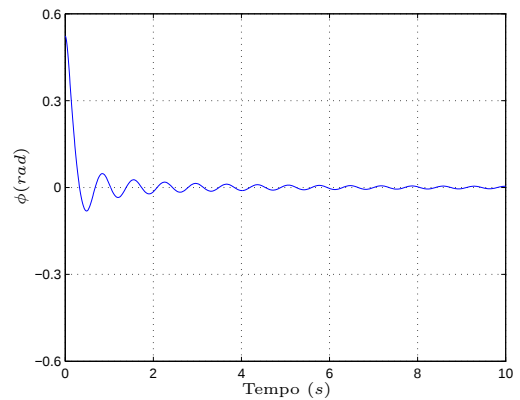
(b)

FIGURA 4.24: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo vertical (z) a partir de uma condição inicial não nula ($r = 90^\circ/s$).

3. Testes com ângulos de rotação iniciais não nulos ($\phi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\psi = 30^\circ$):

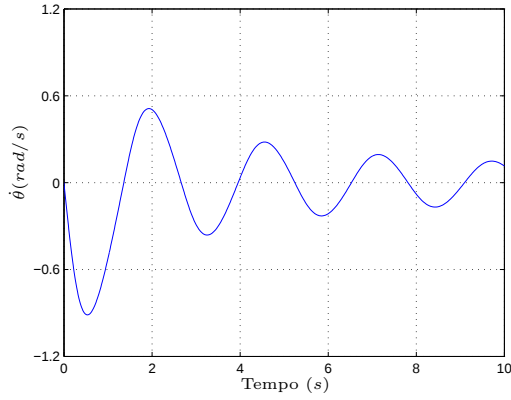


(a)

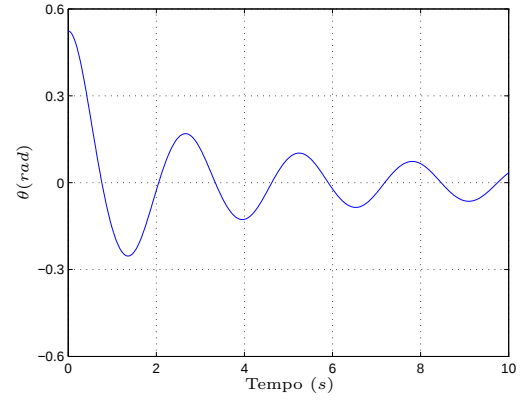


(b)

FIGURA 4.25: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo longitudinal (x) a partir de uma condição inicial não nula ($\phi = 30^\circ$).

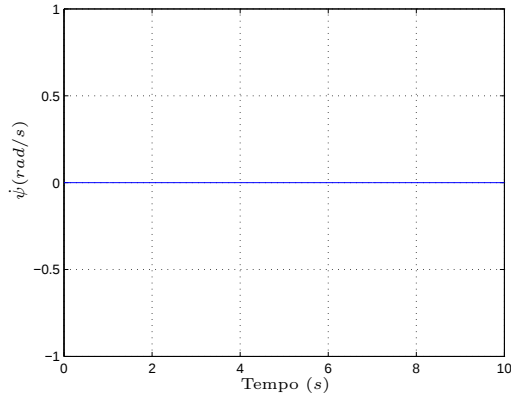


(a)

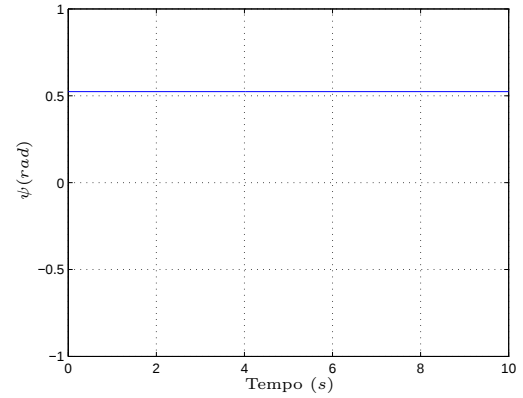


(b)

FIGURA 4.26: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo transversal (y) a partir de uma condição inicial não nula ($\theta = 30^\circ$).



(a)



(b)

FIGURA 4.27: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo vertical (z) a partir de uma condição inicial não nula ($\psi = 30^\circ$).

Nas Figuras 4.22, 4.23, 4.25 e 4.26, é possível observar a participação do torque restaurador (T_{GB}) atuando de maneira a anular os valores dos ângulos de rotação em torno dos eixos x e y .

Para cada DOF, foram testados os movimentos nos dois sentidos e ficou comprovado que, após um determinado intervalo de tempo, o sistema se encontra em repouso ou, quando a flutuabilidade não é neutra, com velocidade constante no eixo z .

4.3.3 Testes com condições limites de operação

Foram realizados, também, outros testes no intuito de ser verificada a coerência no comportamento do simulador para condições adversas de operação.

1. Teste de reversão nos propulsores:

Neste teste, o ROV sofre uma aceleração constante de $0,2m/s^2$ ($0,2rad/s^2$ no caso da rotação em torno de z_m) durante $2s$, em seguida, acelera de $-0,2m/s^2$ ($-0,2rad/s^2$ no caso da rotação em torno de z_m) durante $2s$ e, por fim, desacelera naturalmente até o repouso novamente (Figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31). O teste de reversão foi baseado no teste de *crash stop* (Dominguez 1989) onde o veículo foi submetido a essa seqüência de comando com velocidades máximas.

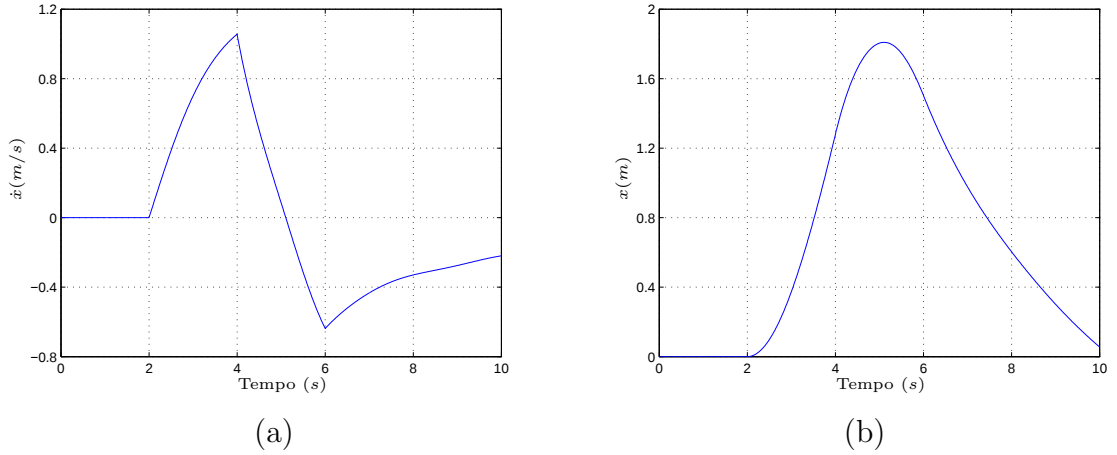


FIGURA 4.28: (a) velocidade e (b) posição no eixo longitudinal (x) durante o teste de reversão nesta direção.

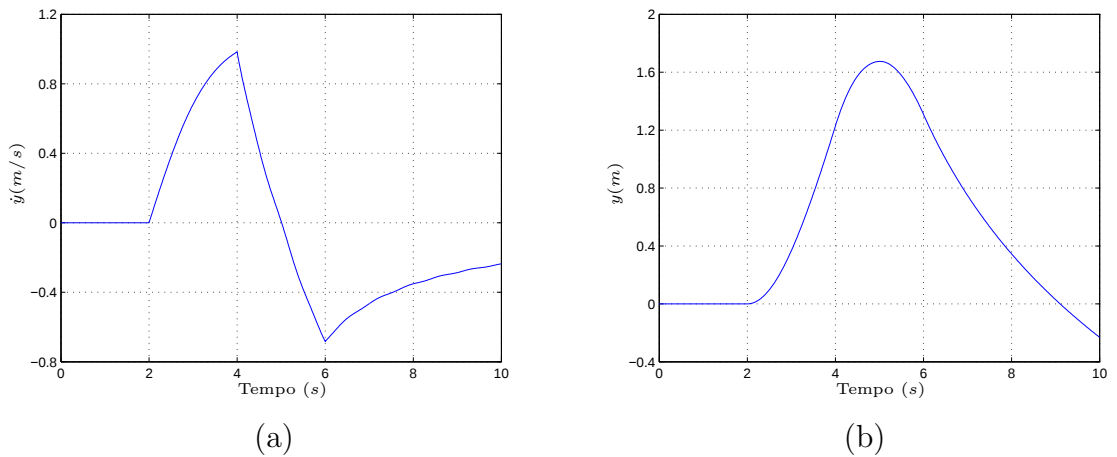
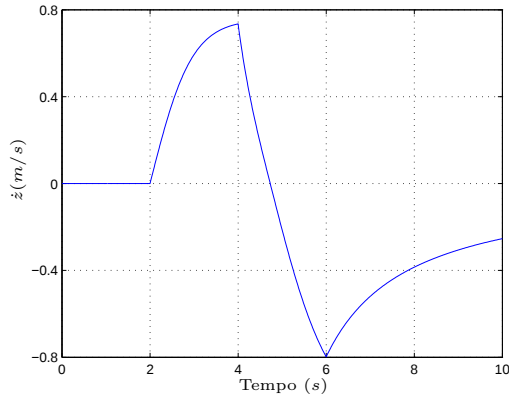
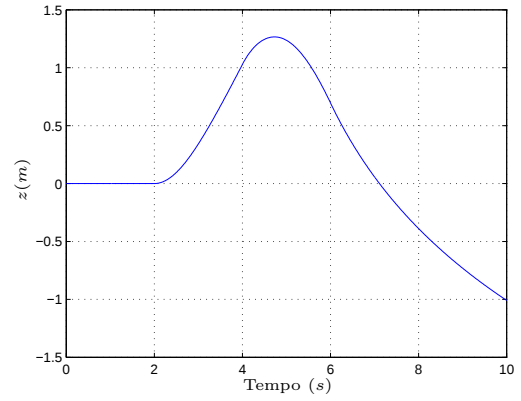


FIGURA 4.29: (a) velocidade e (b) posição no eixo transversal (y) durante o teste de reversão nesta direção.

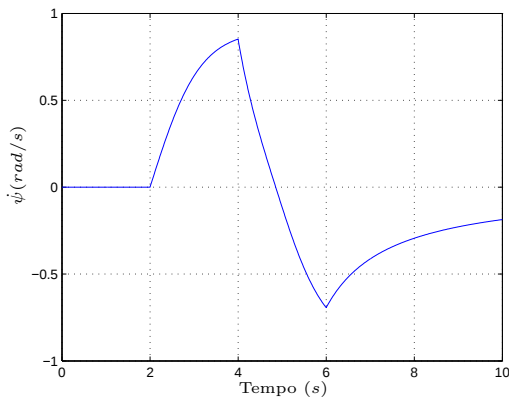


(a)

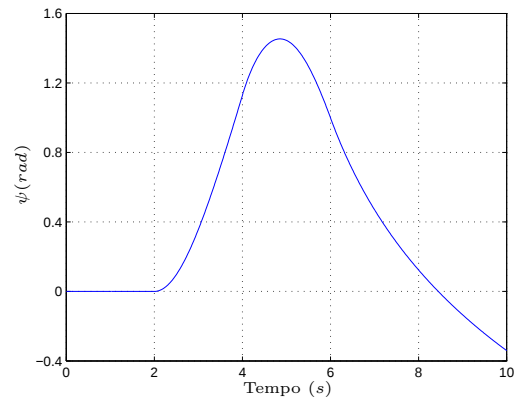


(b)

FIGURA 4.30: (a) velocidade e (b) posição no eixo vertical (z) durante o teste de reversão nesta direção.



(a)

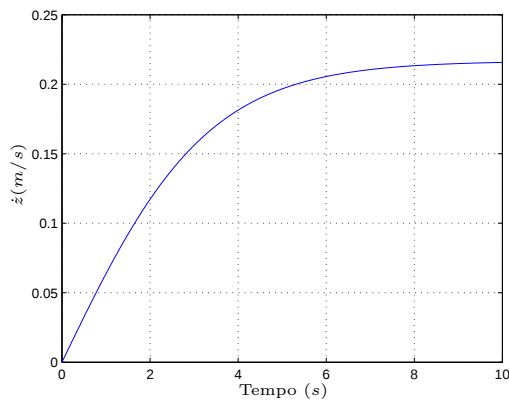


(b)

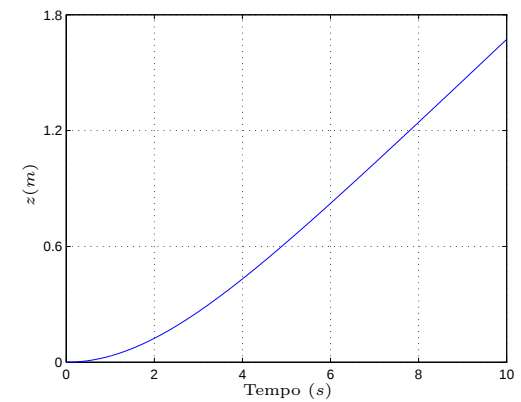
FIGURA 4.31: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo vertical (z) durante o teste de reversão em torno do mesmo.

2. Teste de acionamento do propulsor vertical:

Neste teste, apenas o propulsor P_1 foi acionado (Figura 4.32).



(a)



(b)

FIGURA 4.32: (a) velocidade e (b) posição no eixo vertical (z) quando apenas P_1 é acionado.

3. Teste de acionamento do propulsor transversal:

Neste teste, apenas o propulsor P_2 foi acionado (Figuras 4.33 e 4.34).

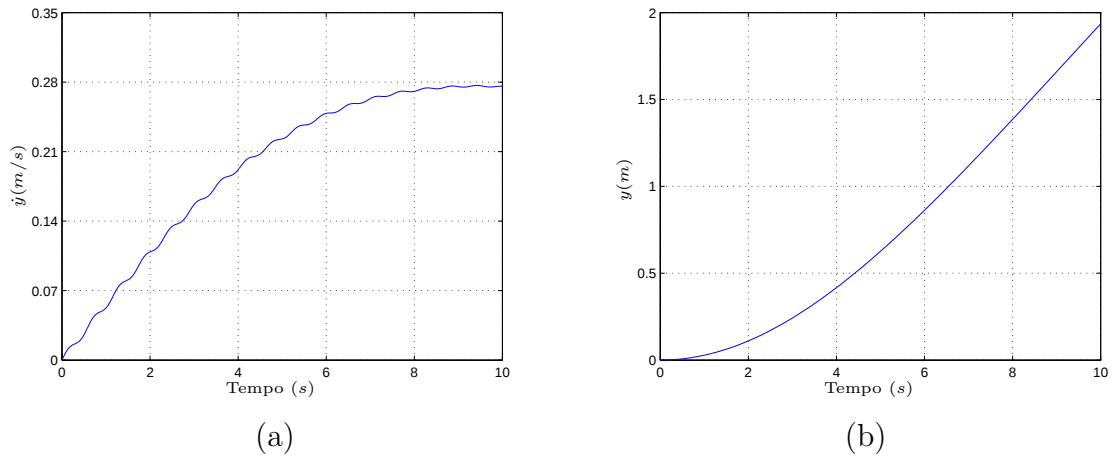


FIGURA 4.33: (a) velocidade e (b) posição no eixo transversal (y) quando apenas P_2 é acionado.

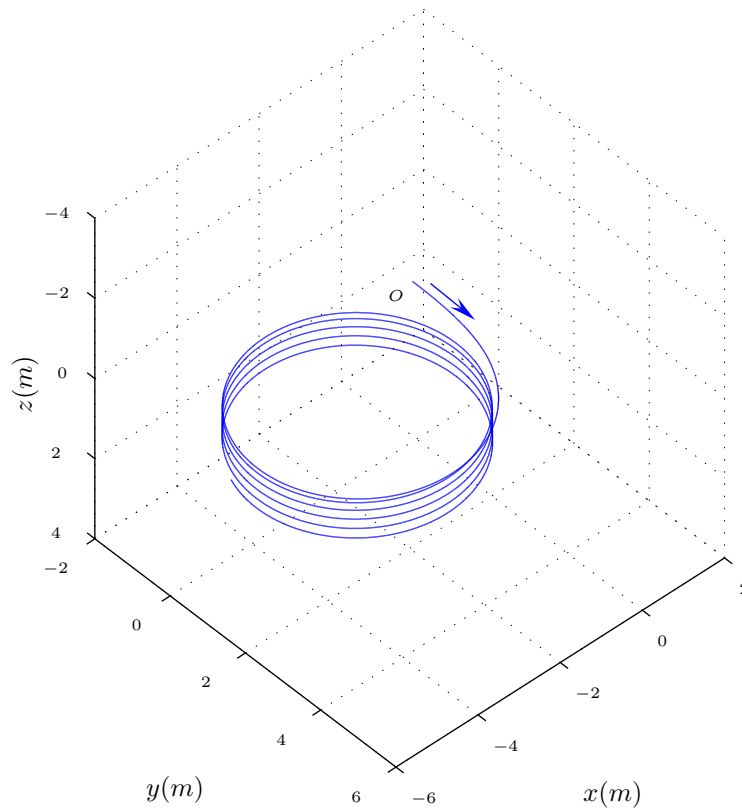


FIGURA 4.34: Deslocamento do ROV nos três eixos quando apenas P_2 é acionado.

4. Teste de acionamento dos propulsores traseiros (P_3 e P_4) com sentidos inversos:

Neste teste, P_3 foi acionado no sentido direto e P_4 no sentido reverso (Figuras 4.35 e 4.36).

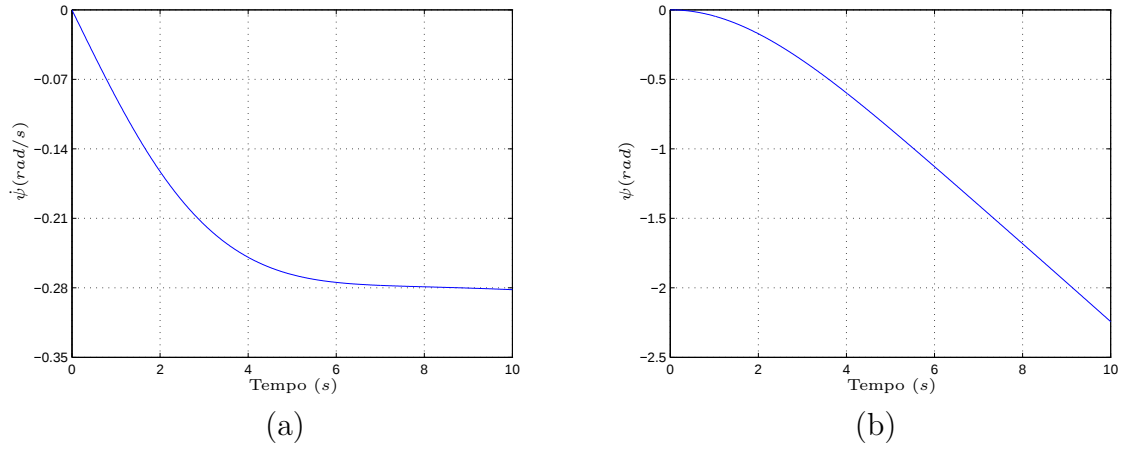


FIGURA 4.35: (a) velocidade angular e (b) orientação no eixo transversal (z) quando P_3 e P_4 são acionados com sentidos inversos.

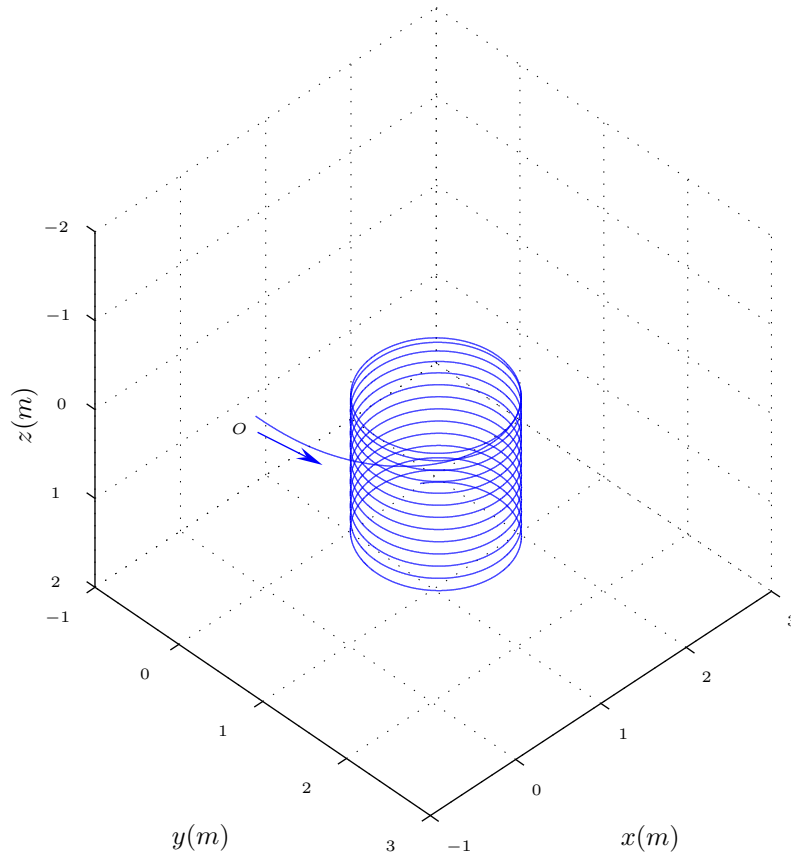


FIGURA 4.36: Deslocamento do ROV nos três eixos quando os propulsores traseiros P_3 e P_4 são acionados com sentidos inversos.

Nas Figuras 4.34 e 4.36, onde são mostrados os deslocamento do ROV nos três eixos, observa-se que, após um determinado tempo, o veículo descreve trajetórias circulares com pequenas translações no eixo vertical. Tais gráficos resultaram de testes realizados em uma janela de tempo consideravelmente maior ($\cong 300\text{ s}$). No Capítulo 5 será apresentado um algoritmo de desacoplamento que elimina esse movimento de translação observado na simulação. O Algoritmo aciona simultaneamente os propulsores P_2 , P_3 e P_4 de forma que resulte somente a rotação em torno do eixo z .

Em conclusão, pode-se afirmar que o simulador implementado com o modelo dinâmico descrito apresenta um comportamento coerente e adequado.

Capítulo 5

Projeto do controlador

Este capítulo descreve todas as etapas do projeto do sistema de controle para o ROV LUMA, desenvolvido para inspecionar túneis submersos. O sistema de navegação adotado necessita de três malhas de controle regulatório: uma para a regulação da distância do veículo até a parede do túnel, uma para a profundidade e uma para o rumo. Quando todos os controladores estiverem habilitados, restará para o operador realizar o controle manual somente do deslocamento longitudinal do veículo paralelo à parede do túnel, o que facilita consideravelmente a tarefa de inspeção.

Inicialmente, neste capítulo, são apresentados os compensadores propostos para linearizar a dinâmica dos propulsores. Em seguida, é descrito um mecanismo para realizar o desacoplamento dos quatro DOFs (graus de liberdade) do ROV. O LUMA é um sistema multivariável com quatro entradas (isto é, comandos para os quatro propulsores) e quatro saídas (DOFs que podem ser controlados). O mecanismo de desacoplamento irá permitir realizar o controle independente de cada DOF. Em outras palavras, o sistema multivariável pode ser visto como um conjunto de quatro sistemas monovariáveis. Considerações adicionais permitem obter modelos linearizados simplificados para a dinâmica de cada um dos DOFs de interesse.

A partir dos modelos linearizados simplificados, são projetadas estratégias de controle PD (Proporcional e Derivativo) e P-PI (Proporcional + Proporcional e Integral) para os três DOFs de interesse. Por fim, são apresentados os resultados dos testes no simulador com estes sistemas de controle.

5.1 Compensadores

A Figura 5.1 apresenta um diagrama simplificado da dinâmica do ROV LUMA, onde estão claramente mostrados os blocos correspondentes aos propulsores e ao acoplamento entre eles.

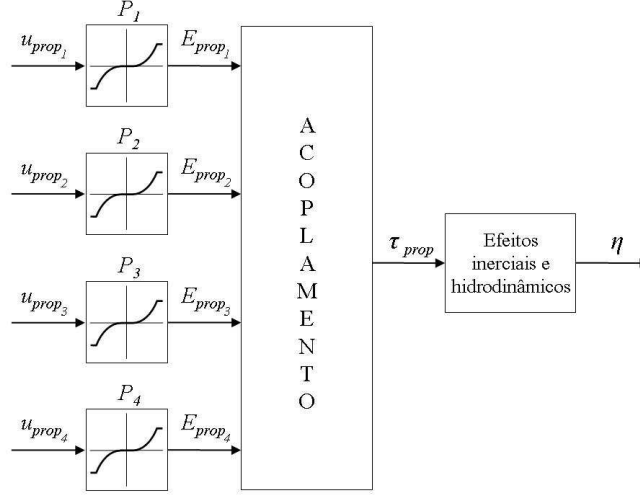


FIGURA 5.1: Diagrama de blocos da dinâmica do ROV LUMA.

Os propulsores utilizados no veículo apresentam as seguintes não-linearidades:

- característica tensão $\times$ empuxo quadrática;
- zona morta e
- saturação.

Os propulsores também possuem uma dinâmica de primeira ordem. A resposta a um comando tipo degrau unitário não é instantânea, ela tem uma constante de tempo associada. Por simplicidade, nesta seção, esta constante de tempo será desprezada. Este efeito, no entanto, é considerado no simulador.

A saturação é uma característica construtiva do propulsor que determina seus limites de operação. Como esta característica não pode ser compensada, a solução será evitar fornecer comandos que saturem os propulsores.

A característica quadrática e a zona morta dos propulsores do ROV LUMA foram levantadas experimentalmente e estão ilustradas na Figura 5.2, onde a velocidade de rotação do hélice é medida pela frequência de pulsos no *encoder* do propulsor. Estas características podem dificultar muito a operação do veículo e, principalmente, o projeto

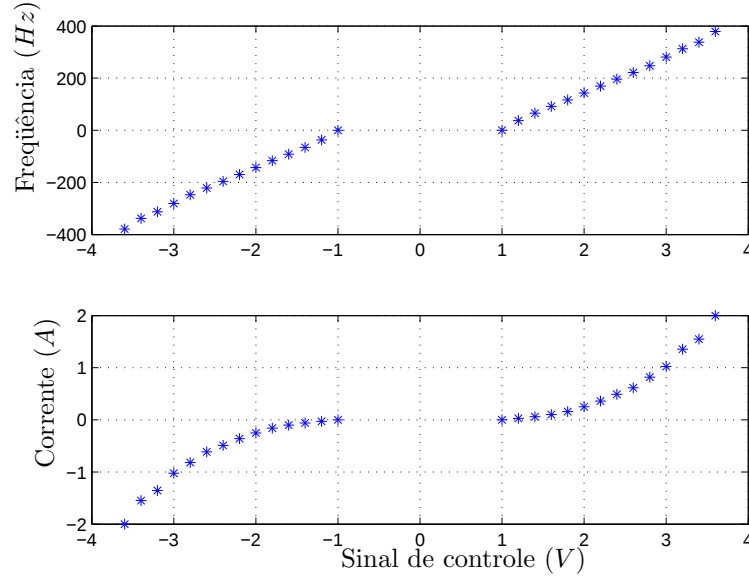


FIGURA 5.2: Curvas características dos propulsores utilizados no projeto do ROV LUMA, obtidas experimentalmente. A velocidade de rotação do hélice é medida pela frequência de pulsos no *encoder*.

dos controladores. Para contornar estes problemas, é necessário adicionar compensadores estáticos de maneira que o conjunto formado pelo propulsor e seus compensadores apresente um comportamento aproximadamente linear, dentro de certos limites (vide Figura 5.3). Tais compensadores são descritos a seguir.

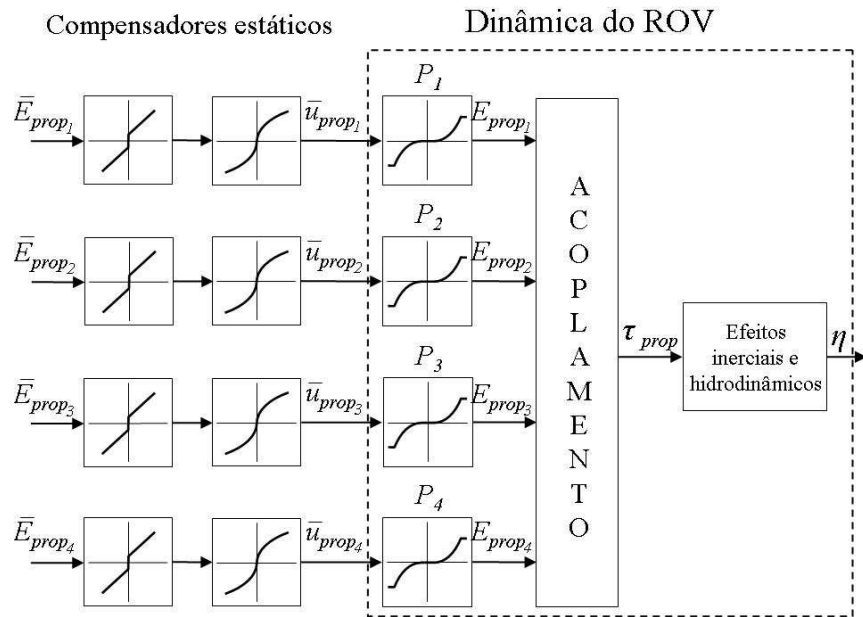


FIGURA 5.3: Diagrama em blocos da dinâmica do ROV LUMA com sistema de compensação dos propulsores.

Após a adição dos compensadores, os blocos referentes aos propulsores podem praticamente ser omitidos no diagrama da dinâmica do ROV.

5.1.1 Compensador de não-linearidade quadrática

A característica quadrática do propulsor pode ser compensada introduzindo-se um operador com característica inversa (Cunha 1992), conforme mostrado na Figura 5.4.

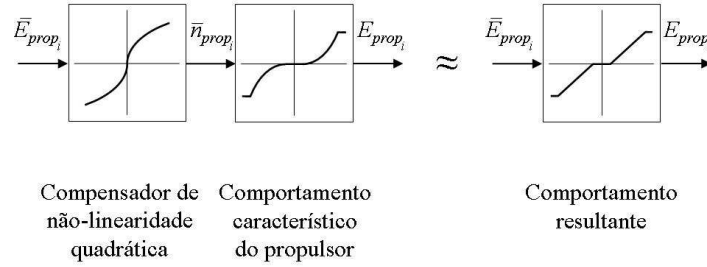


FIGURA 5.4: Característica resultante do propulsor com o compensador de não-linearidade quadrática.

O compensador não-linear implementado é do tipo raiz quadrada e seu sinal de saída, para cada propulsor, é dado por:

$$\bar{n}_{prop_i} = \text{sign}(\bar{E}_{prop_i} \alpha_i^+) \sqrt{\left| \frac{\bar{E}_{prop_i}}{\alpha_i^*} \right|}, \quad (5.1)$$

onde:

$\bar{n}_{prop_i} \dots$ é a referência de rotação do i-ésimo propulsor e

$$\alpha_i^* = \begin{cases} \alpha_i^+ = C_T^*(0^\circ) \frac{\rho}{8} 0,7^2 \pi^3 D^4, & \text{se } \text{sign}(\bar{E}_{prop_i}) \alpha_i^+ \geq 0, \\ \alpha_i^- = -C_T^*(180^\circ) \frac{\rho}{8} 0,7^2 \pi^3 D^4, & \text{se } \text{sign}(\bar{E}_{prop_i}) \alpha_i^+ < 0. \end{cases} \quad (5.2)$$

5.1.2 Compensador de zona morta

Os motores dos propulsores só entram em funcionamento quando alimentados com uma tensão superior a um valor mínimo (u_{min}). Os ensaios realizados com um dos propulsores, mostrados na Figura 5.2, mostram que este propulsor não responde para

uma tensão entre -1 e $+1$ V. Tal característica é denominada *zona morta* e apresenta um problema para o controle direto, uma vez que os sinais de pequena amplitude fornecidos pelo controlador são desprezados. Por isso, tal característica foi compensada com a adição de uma tensão mínima ao módulo do sinal de comando (Carneiro et al. 2006) como a seguir:

$$u_{prop_i} = \begin{cases} \bar{n}_{prop_i} + u_{min}, & \text{se } \bar{n}_{prop_i} > 0, \\ \bar{n}_{prop_i} - u_{min}, & \text{se } \bar{n}_{prop_i} < 0, \\ \bar{n}_{prop_i}, & \text{se } \bar{n}_{prop_i} = 0. \end{cases} \quad (5.3)$$

onde

u_{prop_i} ... é a tensão de alimentação do i -ésimo propulsor.

Com isso, as respostas dos propulsores aos sinais de comando passam a ser imediatas pois, ainda que o módulo da tensão do sinal seja muito pequeno, haverá resposta imediata no propulsor.

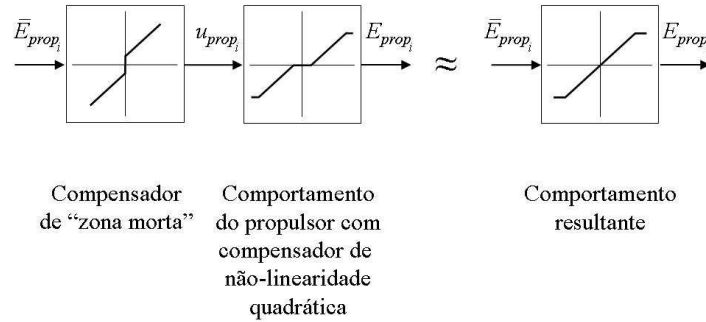


FIGURA 5.5: Comportamento resultante do propulsor com o compensador de zona morta.

5.2 Desacoplamento

Como foi explicado no Capítulo 2, a dinâmica do ROV é bastante acoplada. Para realizar movimentos translacionais ou rotacional em torno de um dos seus eixos, é necessário em geral que um conjunto de propulsores atue simultaneamente. Por exemplo, devido à configuração dos propulsores do ROV LUMA, uma alteração do rumo requer o acionamento simultâneo dos propulsores P_2 (transversal), P_3 e P_4 (traseiros). O pro-

pulsor P_1 (vertical) pouco afeta esta dinâmica. Na Figura 5.6 é apresentada uma idéia de desacoplamento para simplificar a modelagem da dinâmica do rumo e (portanto o controle) resultando em um sistema SISO tendo como entrada o momento desejado $\bar{N}_{prop}$ e como saída o ângulo de rumo (ψ).

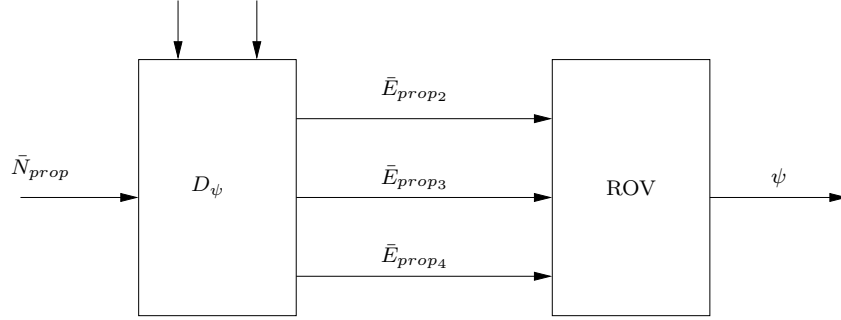


FIGURA 5.6: Modelo SISO para a dinâmica do rumo (ψ).

Onde:

D_ψ ... representa o sistema de desacoplamento para o ângulo ψ (rumo),

$\bar{N}_{prop}$... representa o momento desejado em torno do eixo z (vertical),

$\bar{E}_{prop_i}$... é o sinal de comando (empuxo) do i -ésimo propulsor $[N]$.

Com o mecanismo de desacoplamento completo, é possível projetar independentemente um controlador monovariável para cada DOF no qual se deseja atuar (Cunha, Costa & Hsu 1991), isto é, o sinal de entrada do i -ésimo DOF atuará somente na dinâmica correspondente.

Desconsiderando-se as forças hidrodinâmicas, o seguinte modelo para a dinâmica do rumo (ψ) poderia ser utilizado para o projeto do controlador:

$$\ddot{\psi}(t) = k'_\psi \bar{N}_{prop}(t), \quad (5.4)$$

onde

$k'_\psi > 0$... é o ganho de alta frequência para o rumo.

A Figura 5.7 apresenta o sistema de desacoplamento para os seis DOFs da dinâmica do ROV LUMA, com todos os propulsores devidamente compensados.

A matriz de desacoplamento para os DOFs do ROV LUMA é a inversa da matriz

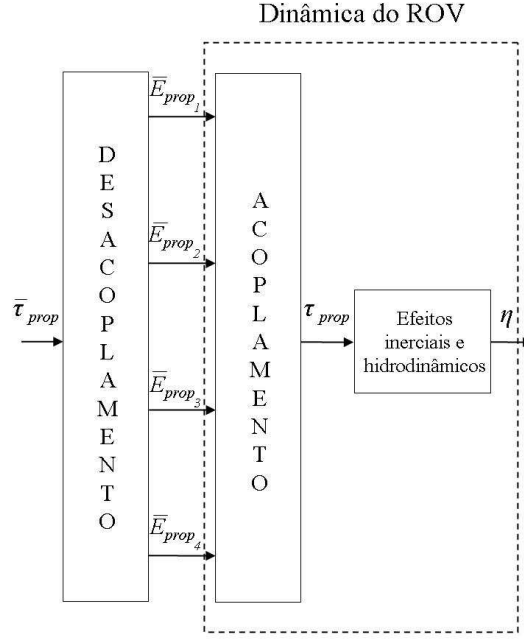


FIGURA 5.7: Diagrama de blocos da dinâmica do ROV LUMA desacoplada.

de acoplamento simplificada descrita em (2.86). O desacoplamento será dado por:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_{prop_1} \\ \bar{E}_{prop_2} \\ \bar{E}_{prop_3} \\ \bar{E}_{prop_4} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.7814 & 0 & 0.9505 \\ 0.5515 & 0.2592 & 0 & -1.1270 \\ 0.5515 & -0.2592 & 0 & 1.1270 \end{bmatrix}}_D \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{X}_{prop} \\ \bar{Y}_{prop} \\ \bar{Z}_{prop} \\ \bar{N}_{prop} \end{bmatrix}}_{\bar{\tau}_{prop}}, \quad (5.5)$$

onde:

D ... representa a matriz de desacoplamento para o ROV LUMA,

$\bar{Z}_{prop}$... é o comando de deslocamento no eixo vertical z (profundidade).

$\bar{\tau}_{prop}$... é o vetor de comandos com os empuxos e momento desejados

O diagrama da dinâmica do ROV está resumido ao bloco denominado **Efeitos inerciais e hidrodinâmicos**. Desta forma, é possível atuar diretamente em cada DOF do ROV.

5.3 Modelo simplificado para a dinâmica de ROVs

Com o objetivo de facilitar o projeto do controle automático, a dinâmica de cada DOF do ROV, que apresenta um comportamento não linear, pode ser simplificado a um sistema composto por um duplo integrador multiplicado por um ganho. Para tanto, é necessário que o sistema opere dentro de faixas de variação pré determinadas. Os modelos simplificados que auxiliam na determinação dos ganhos dos controladores são descritos a seguir e, em seguida, são apresentados os resultados obtidos nos testes comparativos com o modelo completo.

De maneira geral, ROVs apresentam baixas velocidades quando em condição de posicionamento dinâmico. Isso simplifica consideravelmente o modelo dinâmico apresentado no Capítulo 2 e, conseqüentemente, facilita o projeto dos controladores. Além disso, assume-se que:

- As dinâmicas referentes a cada DOF estão totalmente desacopladas;
- O veículo opera na posição horizontal ($\phi \approx 0$ e $\theta \approx 0$);
- Os propulsores, por estarem devidamente compensados, apresentam um comportamento aproximadamente linear;
- Os propulsores não operam saturados.

Então, com base na equação (2.5), os modelos dinâmicos simplificados e desacoplados podem ser dados por:

$$m \dot{u} = X_{\dot{u}} \dot{u} + X_u u + X_{u|u|} u|u| + \tau_x, \quad (5.6)$$

$$m \dot{v} = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_v v + Y_{v|v|} v|v| + \tau_y, \quad (5.7)$$

$$m \dot{w} = Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_w w + Z_{w|w|} w|w| + Z_{GB} + \tau_z, \quad (5.8)$$

$$I_z \dot{r} = N_{\dot{r}} \dot{r} + N_r r + N_{r|r|} r|r| + \tau_\psi. \quad (5.9)$$

Para o ROV LUMA, serão projetados controladores de distância até a parede do túnel, de profundidade e de rumo. O modelo dinâmico simplificado para o eixo y_m (movimentos laterais) mostrado em (5.7) não será usado no projeto dos controladores

pois caberá ao operador controlar manualmente os deslocamentos do ROV neste eixo. Então, com base nas equações (5.6), (5.8) e (5.9), os ganhos da planta simplificada para cada DOF podem ser calculados pelas seguintes aproximações:

$$k_x \approx \frac{1}{m - X_{\dot{u}}} , \quad (5.10)$$

$$k_z \approx \frac{1}{m - Z_{\dot{w}}} , \quad (5.11)$$

$$k_\psi \approx \frac{1}{I_z - N_{\dot{r}}} . \quad (5.12)$$

5.3.1 Testes comparativos com o modelo simplificado

Com o objetivo de validar o modelo simplificado, foram realizados testes comparativos com o modelo completo. Para estes testes, ambos os modelos de dinâmica de ROVs foram implementados e excitados por sinais tipo degrau unitário para cada DOF.

Nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10, a curva contínua representa o comportamento do sistema com o modelo completo implementado enquanto que a curva tracejada representa o comportamento do sistema com o modelo simplificado.

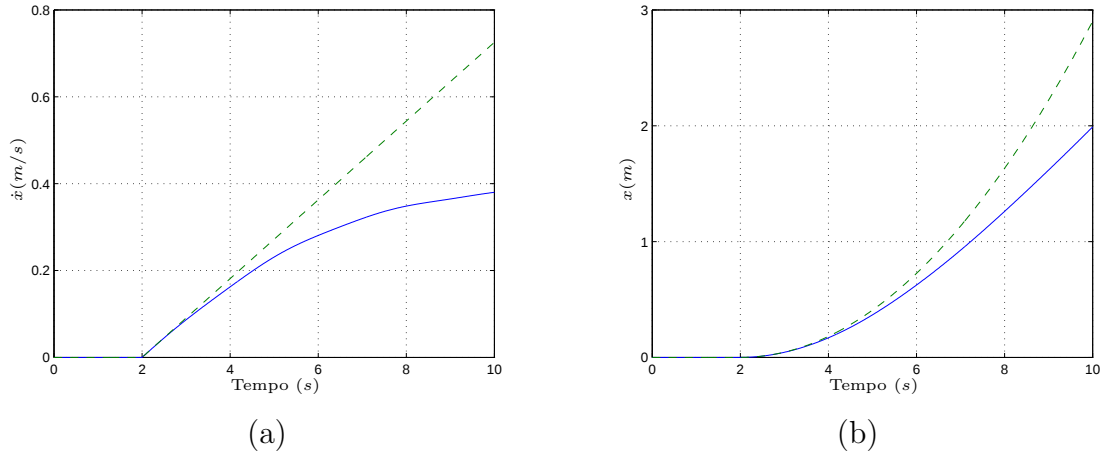


FIGURA 5.8: (a) Velocidade e (b) posição no eixo longitudinal (x) para uma excitação tipo degrau unitário.

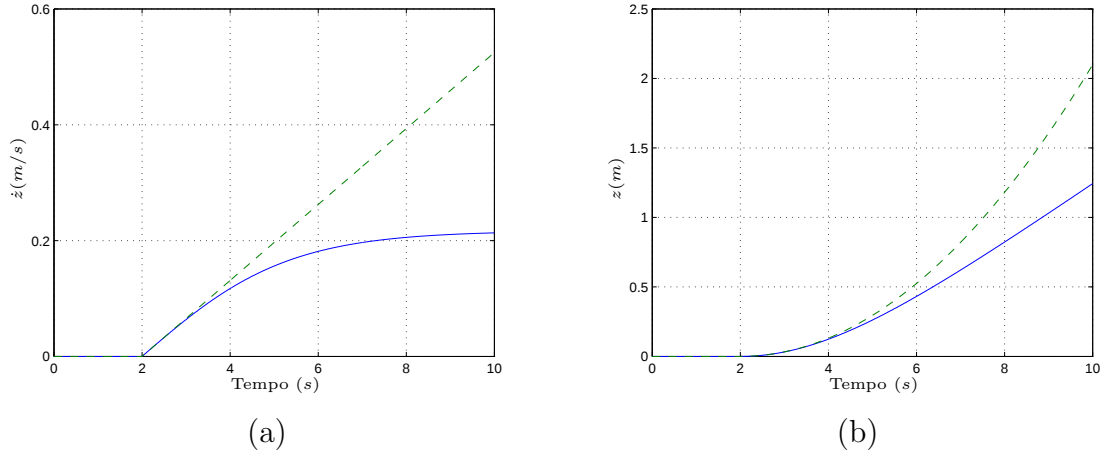


FIGURA 5.9: (a) Velocidade e (b) posição no eixo vertical (z) para uma excitação tipo degrau unitário.

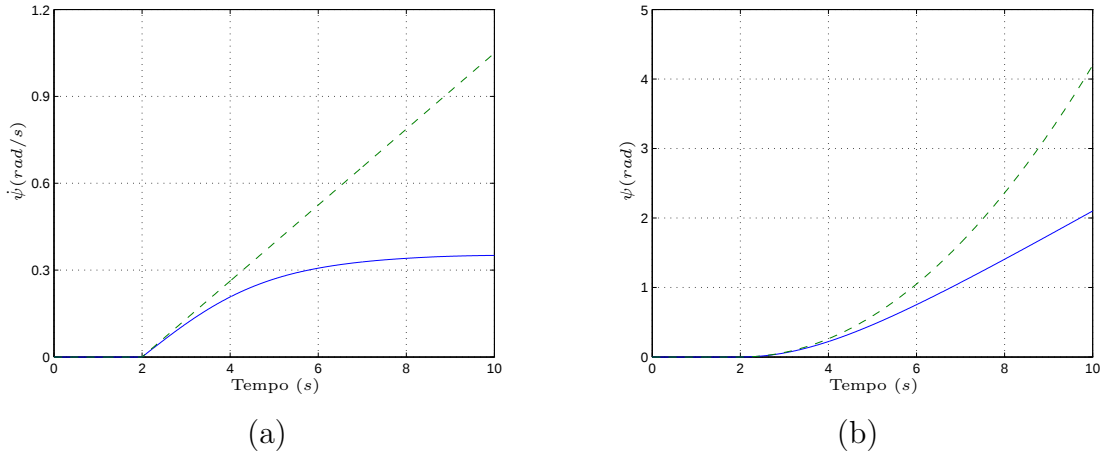


FIGURA 5.10: (a) Velocidade angular e (b) atitude no eixo vertical (z) para uma excitação tipo degrau unitário.

É possível observar que, para baixas velocidades, o comportamento do sistema simplificado se assemelha muito ao do sistema completo. No entanto, com o aumento da velocidade, é possível observar que os dois modelos reagem de maneiras distintas. Esta diferença de comportamento se deve, principalmente, à ausência do efeito do arrasto hidrodinâmico no modelo simplificado.

5.4 Controle automático

Para o controle do ROV LUMA, foram adotados algoritmos lineares bem conhecidos (PD e P-PI). Estes sistemas de posicionamento dinâmico devem manter os valores de

x_m , z e ψ próximos às referências fornecidas pelo operador ou obtidas nos momentos em que as malhas de controle foram acionadas.

No final desta seção, serão apresentados os resultados obtidos em simulação de testes com os sistemas de controle PD e P-PI no ROV fictício apresentado na Seção 4.1.1.

5.4.1 Controle PD

Supondo-se que os DOFs do veículo foram desacoplados, como descrito anteriormente (Seção 5.2), então é possível controlar cada um dos DOFs independentemente.

O controlador PD é o algoritmo mais simples que se pode usar para um sistema tipo duplo integrador (modelo simplificado para a dinâmica de ROVs) e, por isso, foi implementado no simulador e testado para cada DOF de interesse.

Para efeito de análise, vamos considerar inicialmente o controlador PD mostrado na Figura 5.11, onde:

k_D ... é o ganho derivativo do controlador,

k_P ... é o ganho proporcional do controlador.

Neste esquema, a velocidade do ROV é medida.

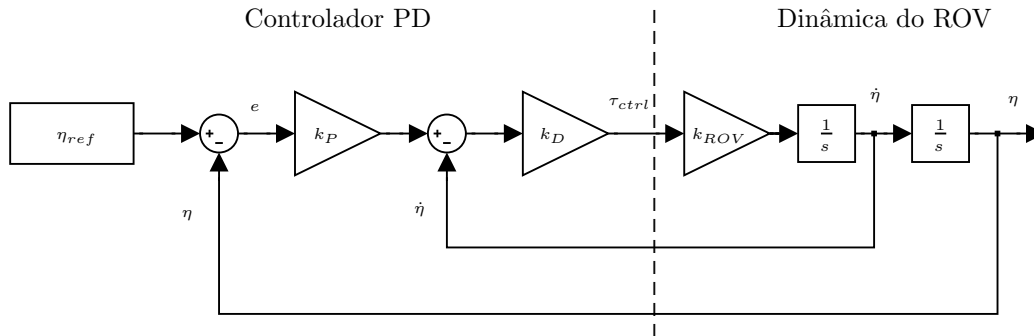


FIGURA 5.11: Diagrama de blocos do controlador PD.

De acordo com a Figura 5.11, a equação característica de malha fechada da dinâmica do ROV com o controle PD é dada por

$$s^2 + k_{ROV} k_D s + k_{ROV} k_P k_D = 0, \quad (5.13)$$

onde

k_{ROV} ... é o ganho aproximado da planta do ROV para o DOF em questão.

O algoritmo PD acima pode ser visto como uma realimentação de estado onde a determinação dos ganhos k_D e k_P é feita baseada no posicionamento das raízes da equação característica da malha fechada (pólos) conforme a equação

$$s^2 + k_{ROV} k_D s + k_{ROV} k_P k_D = (s - cb)(s - b), \quad (5.14)$$

onde:

b ... é o pólo dominante desejado para o sistema em malha fechada;

c ... é uma constante maior do que 1 (que posiciona o outro pólo).

O pólo da equação característica da malha interna deve ser alocado em

$$\sigma_{\dot{\eta}} = cb. \quad (5.15)$$

Uma vez selecionados os pólos b e cb , os ganhos k_P e k_D são ajustados como a seguir:

$$k_D = -b \frac{c+1}{k_{ROV}}, \quad (5.16)$$

$$k_P = -\frac{cb}{c+1}. \quad (5.17)$$

Como a velocidade do ROV não é medida, o controlador PD implementado é o mostrado pelo diagrama da Figura 5.12.

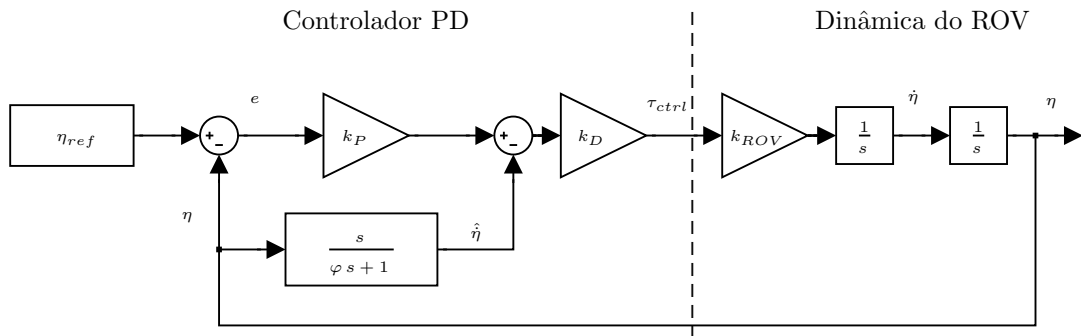


FIGURA 5.12: Diagrama de blocos do controlador PD implementado.

Neste esquema, a velocidade é estimada por um filtro *lead* (Cunha, Costa & Hsu 1995). Desta forma, o estado estimado é dado por

$$\hat{\eta} = \frac{s}{\varphi s + 1} \eta, \quad (5.18)$$

onde

$\varphi \dots$ é a constante de tempo do filtro.

A constante φ deve ser escolhida suficientemente pequena para que o pólo do filtro seja rápido o bastante e não influencie no comportamento do sistema.

Considerando a dinâmica de rotação no eixo vertical como exemplo, o sinal de comando para o controle de rumo é dado por

$$N_{ctrl} = k_D (k_P e_\psi - \hat{\dot{\psi}}), \quad (5.19)$$

onde:

$$e_\psi = \psi_{ref} - \psi, \quad (5.20)$$

$$\hat{\dot{\psi}} = \frac{s}{\varphi s + 1} \dot{\psi}. \quad (5.21)$$

Na equação (5.21), $\hat{\dot{\psi}}$ é uma estimativa de $\dot{\psi}$, uma vez que este não é medido diretamente.

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros do ROV fictício (Seção 4.1.1) para cada um dos DOFs controlado e os respectivos parâmetros do controlador PD calculados.

TABELA 5.1: Parâmetros do ROV e dos controladores PD.

Controlador	k_{ROV}	b	k_P	k_D
x	0,0227	-1	0,75	176,4705
z	0,0164	-1	0,75	244
ψ	0,0328	-1,2	0,9	146,3988

Para o cálculo dos ganhos k_P e k_D , foi usado $c = 3$. A constante de tempo dos filtro foi adotada como $\varphi = 0,01$.

Por estar referenciado ao sistema de coordenadas inercial, o vetor τ_{ctrl} , composto

por sinais de controle como N_{ctrl} , deverá ser pré-multiplicado pelo operador $J^T(\eta)$ para ser aplicado aos comandos do ROV.

5.4.2 Controle P-PI

Para se eliminar o erro de regime causado por perturbações externas no controlador PD, utiliza-se um controlador do tipo cascata P-PI que difere do anterior pela inclusão de ação integral no mesmo. O sistema de controle P-PI é composto por uma malha interna com estrutura PI para o controle de velocidade e uma malha externa com um ganho proporcional para o controle de posição.

A Figura 5.13 ilustra um controlador P-PI para o DOF desejado e devidamente desacoplado supondo que a velocidade é mensurável.

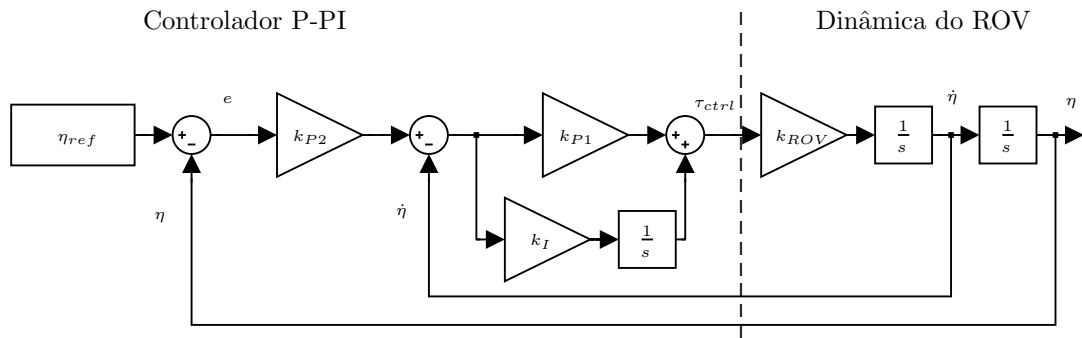


FIGURA 5.13: Diagrama de blocos do controlador P-PI.

É possível observar que o controlador P-PI atua como um controlador PD quando

$$k_I = 0. \quad (5.22)$$

Para o controlador P-PI não é possível determinar arbitrariamente os pólos da malha fechada (Cunha 1992). Dominguez (1989) optou por ajustar os ganhos na seguinte ordem:

1. Ajusta-se a malha de controle interna (velocidade);
2. Ajusta-se a malha de controle externa (posição).

Na primeira etapa de ajuste (sintonia do controle de velocidade), a malha externa deverá estar aberta. Desta maneira, a equação característica da função de transferência

da malha interna, para cada DOF, é dada por

$$s^2 + k_{ROV} k_{P1} s + k_{ROV} k_I = 0. \quad (5.23)$$

O pólo da equação característica da malha interna é duplo e deve ser alocado da mesma maneira que no caso controlado por um PD. Então, desprezando-se as parcelas de atraso e perturbação, os ganhos da malha interna são dados por:

$$k_{P1} = -\frac{2cb}{k_{ROV}}, \quad (5.24)$$

$$k_I = \frac{c^2 b^2}{k_{ROV}}, \quad (5.25)$$

Na etapa seguinte, a malha externa (malha de posição) é fechada e seu ajuste é feito de maneira que a equação característica

$$s^3 - 2cb s^2 + (c^2 b^2 - 2cb k_{p2}) s + c^2 b^2 k_{p2} = 0, \quad (5.26)$$

apresente b como pólo dominante.

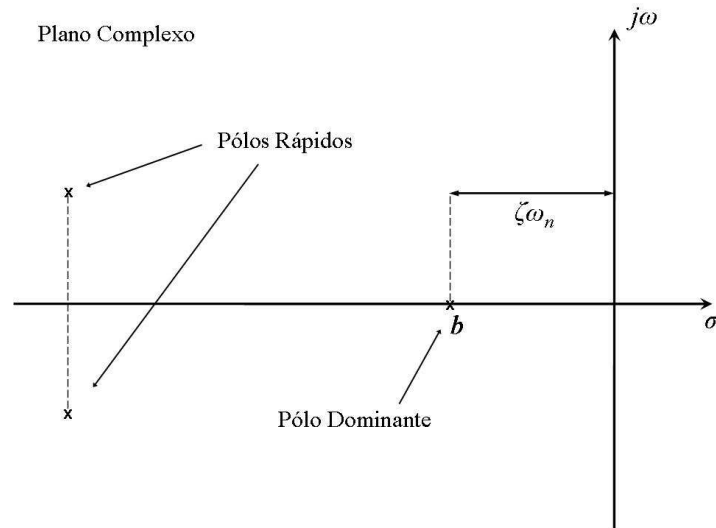


FIGURA 5.14: Alocação dos pólos em malha fechada com controle P-PI.

Desta maneira, o ganho proporcional da malha externa é determinado por

$$k_{P2} = b \frac{2c - c^2 - 1}{c(c - 2)}. \quad (5.27)$$

Lembrando que no sistema real as velocidades não são medidas, novamente optou-se por estimar tal variável com a adição de um filtro *lead* semelhante ao utilizado na estratégia PD. Com isso, o sistema de controle P-PI foi implementado conforme mostrado no diagrama da Figura 5.15.

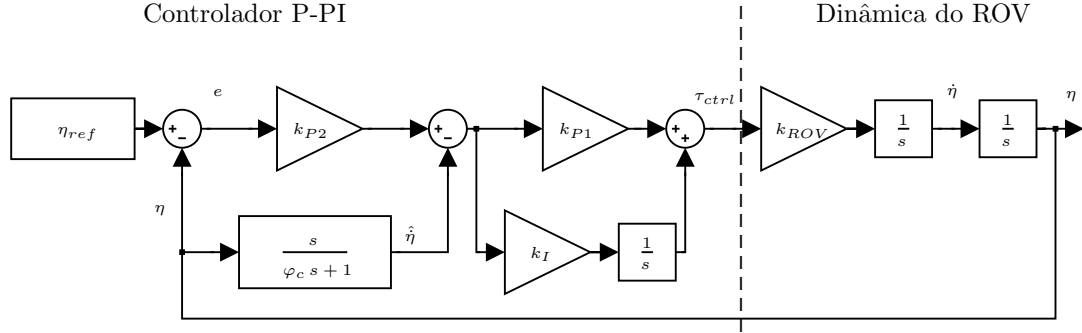


FIGURA 5.15: Diagrama de blocos do controlador P-PI implementado.

A lei de controle para a profundidade, por exemplo, fica determinada como

$$Z_{ctrl} = \left(\frac{k_{P1} s + k_I}{s} \right) [k_{P2} (z_{ref} - z) - \hat{z}]. \quad (5.28)$$

Na Tabela 5.2 são apresentados os parâmetros do ROV fictício (Seção 4.1.1) e os parâmetros calculados para o controlador P-PI.

TABELA 5.2: Parâmetros do ROV e dos controladores P-PI.

Controlador	k_{ROV}	b	k_I	k_{P1}	k_{P2}
x	0,0227	-0.3	36.9364	80.7353	0.4067
z	0,0164	-0,235	30.3185	86.0100	0.3133
ψ	0,0328	-0,33	29.8928	60.3895	0.4400

Assim como no projeto do controlador PD, para o cálculo dos ganhos k_I , k_{P1} e k_{P2} , foi usado $c = 3$. Novamente a constante de tempo dos filtro foi adotada como $\varphi = 0,01$.

Cabe lembrar que o sinal de controle Z_{ctrl} , por ser componente do vetor τ_{ctrl} e estar referenciado ao sistema de coordenadas inercial, também necessita do operador $J^T(\eta)$ para ser aplicado aos comandos do ROV.

5.5 Testes no simulador em malha fechada

Foram feitos testes simples na resposta do sistema em malha fechada para diferentes condições de operação com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema com as malhas de controle PD e P-PI implementadas.

Os resultados descritos a seguir foram obtidos em testes realizados no simulador de ROVs configurado com os parâmetros do ROV fictício (Seção 4.1.1). Todos os parâmetros utilizados estão no arquivo `luma.m` apresentado no Apêndice C.

5.5.1 Testes com excitação em degrau nas referências

Inicialmente, cada controlador foi excitado separadamente, na referência, por um degrau de $0,5\text{ m}$, nos controladores de posição nos eixos longitudinal e vertical, e $0,5\text{ rad}$, no controlador de rumo. Os comportamentos observados são representados pelas linhas contínuas, nas Figuras 5.16, 5.18 e 5.21, enquanto que as referências desejadas, pelas linhas tracejadas.

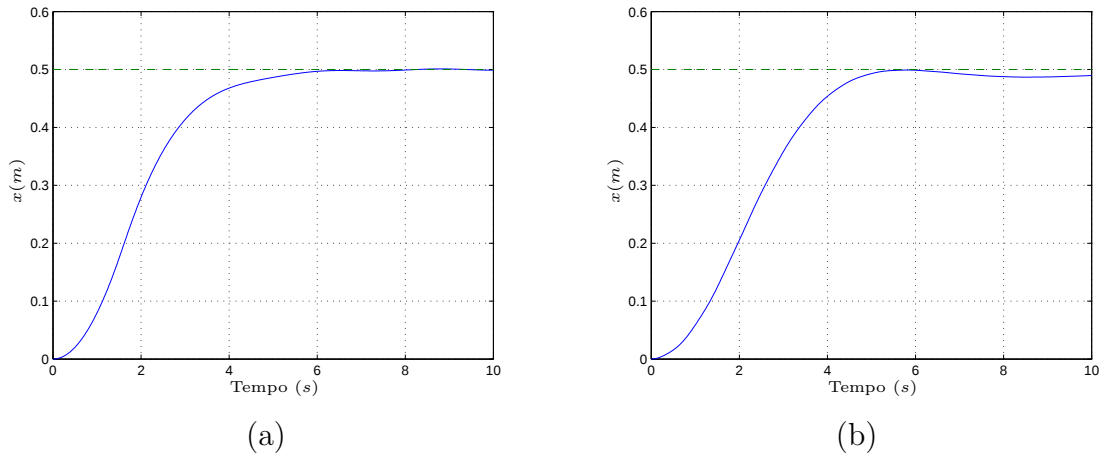
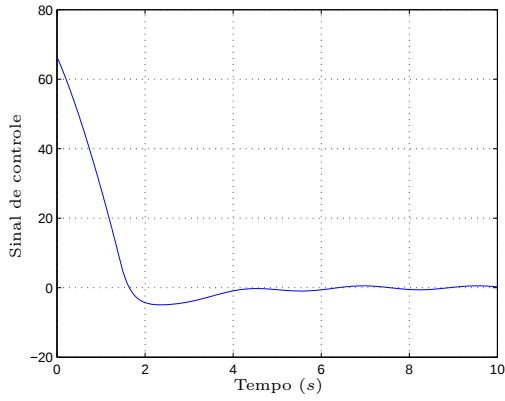
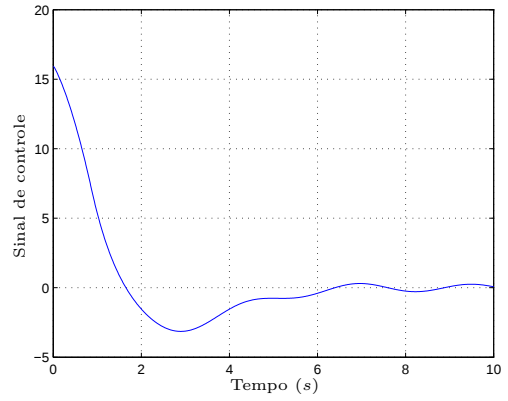


FIGURA 5.16: Resposta do ROV para uma variação degrau de $0,5\text{ m}$ na referência para a posição no eixo x (distância até a parede). (a) controlador PD e (b) controlador P-PI.

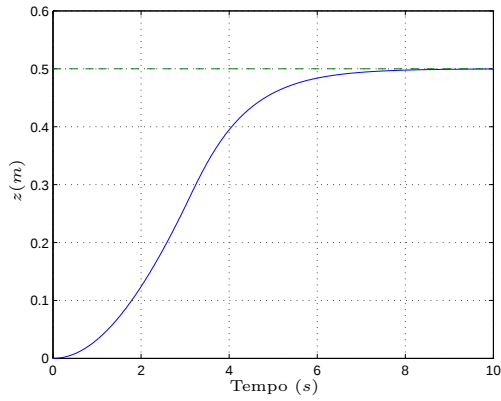


(a)

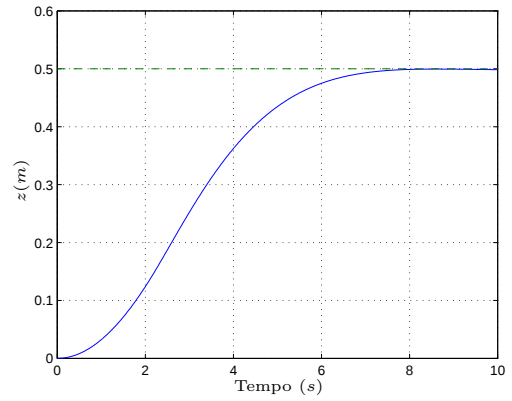


(b)

FIGURA 5.17: Sinal de controle para uma variação degrau de $0,5\text{ m}$ na referência para a posição no eixo x (distância até a parede). (a) controlador PD e (b) controlador P-PI.

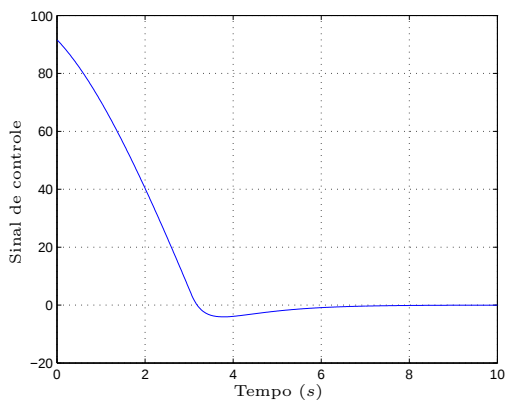


(a)

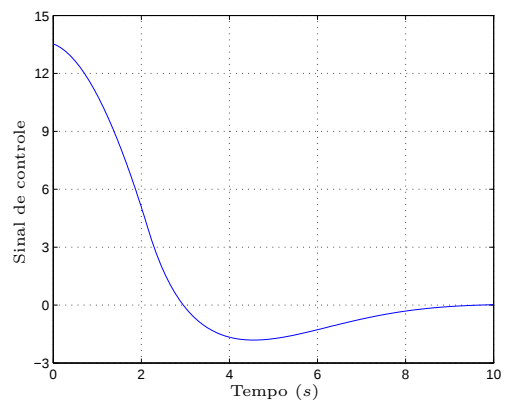


(b)

FIGURA 5.18: Resposta do ROV para um degrau de $0,5\text{ m}$ na referência para profundidade. (a) controlador PD e (b) controlador P-PI.

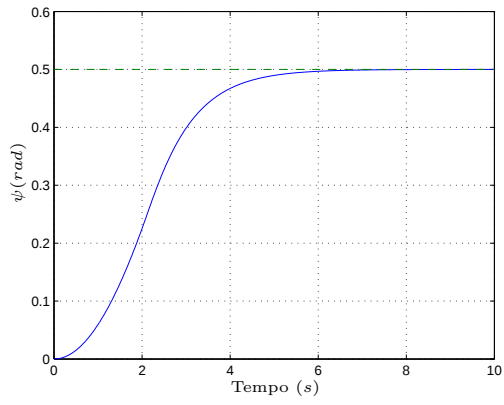


(a)

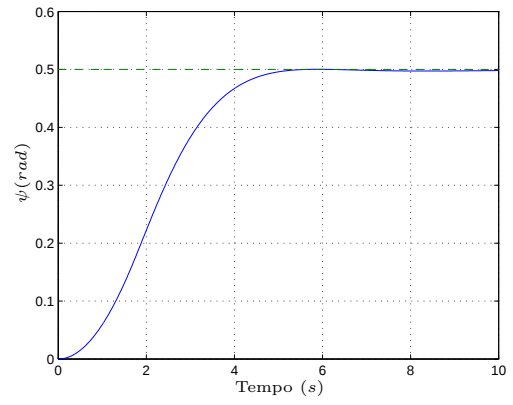


(b)

FIGURA 5.19: Sinal de controle para um degrau de $0,5\text{ m}$ na referência para profundidade. (a) controlador PD e (b) controlador P-PI.

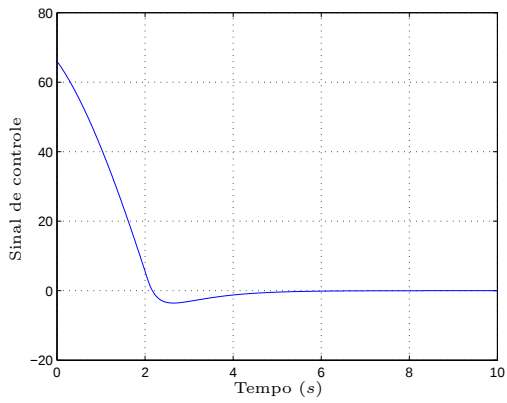


(a)

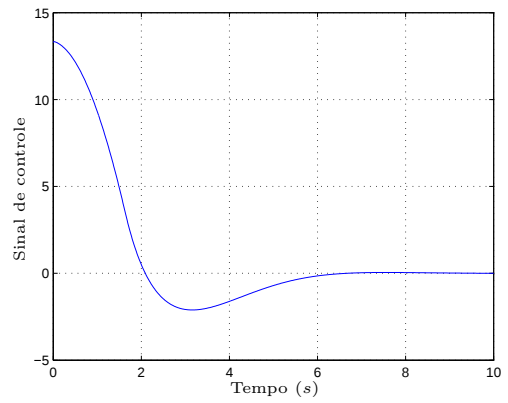


(b)

FIGURA 5.20: Resposta do ROV para uma variação degrau de de $0,5 \text{ rad}$ na referência de rumo. (a) controlador PD e (b) controlador P-PI.



(a)



(b)

FIGURA 5.21: Sinal de controle para uma variação degrau de de $0,5 \text{ rad}$ na referência de rumo. (a) controlador PD e (b) controlador P-PI.

5.5.2 Testes na presença de perturbação

Os gráficos mostrados na Figura 5.22 resultaram de testes, no controle automático de profundidade, com o ROV apresentando acréscimo na massa de $0,2kg$ em relação à condição de flutuabilidade neutra, ou seja, neste caso a flutuabilidade do veículo é negativa ($E_G > E_B$).

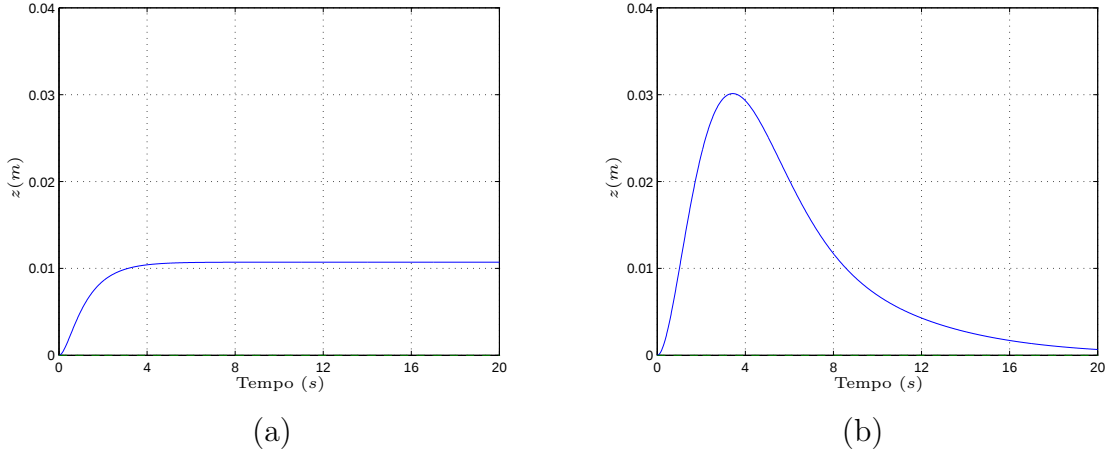


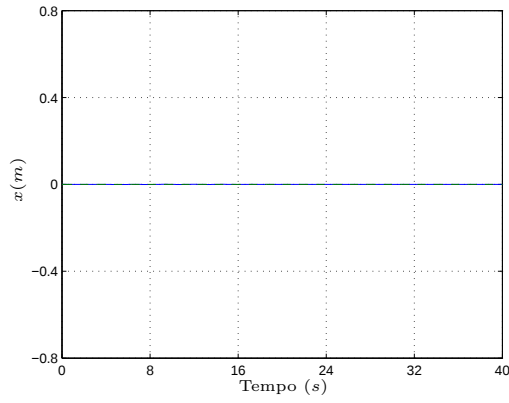
FIGURA 5.22: Resposta do controlador de profundidade a uma perturbação tipo degrau. (a) PD e (b) P-PI.

É possível observar um erro de regime no sistema controlado pelo PD quando este sofre uma perturbação tipo degrau. Quando a estratégia adotada é o controle P-PI, a ação integral do controlador elimina tal erro de regime.

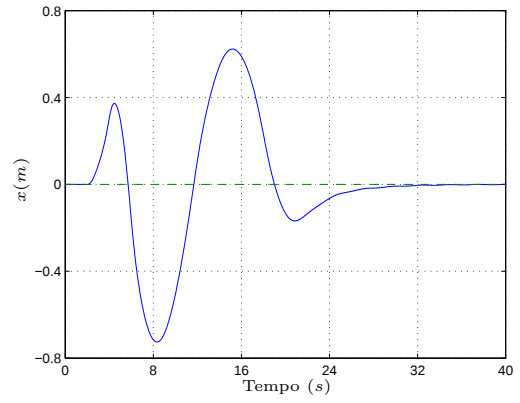
5.5.3 Testes do desacoplamento

Para verificar o desempenho do algoritmo de desacoplamento, foram feitos vários testes de reversão com todos os controladores ligados. Nesses testes, o ROV foi submetido a uma aceleração constante no eixo y_m de $0,2m/s^2$ durante $2s$, em seguida, a uma desaceleração de $-0,2m/s^2$ durante $2s$. (Figuras 5.23, 5.24 e 5.25).

Verificou-se um melhor desempenho dos controladores PD, para este tipo de perturbação, em relação aos P-PI. Os controladores PD mantiveram as posições e orientação próximos às referências estipuladas. Além disso, o acoplamento entre os DOFs é muito pequeno, mesmo com deslocamentos laterais bruscos do ROV.

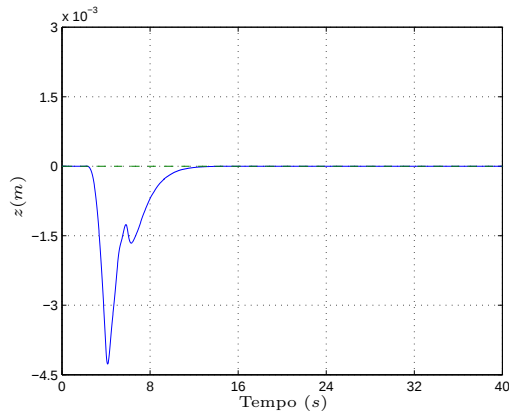


(a)

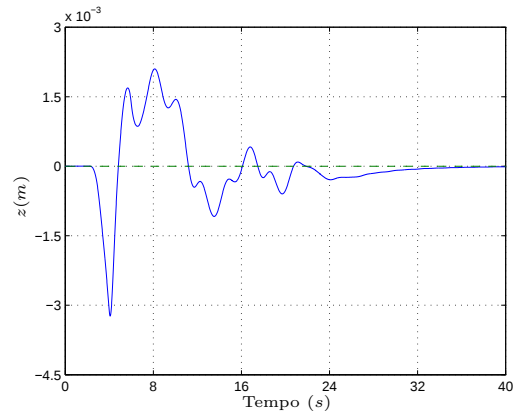


(b)

FIGURA 5.23: Resposta do controlador de distância à parede durante o teste de reversão no eixo transversal. (a) PD e (b) P-PI.

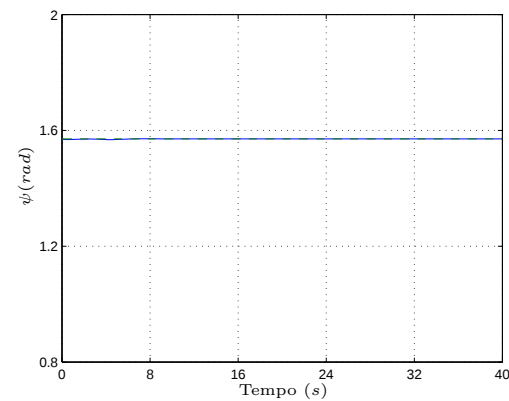


(a)

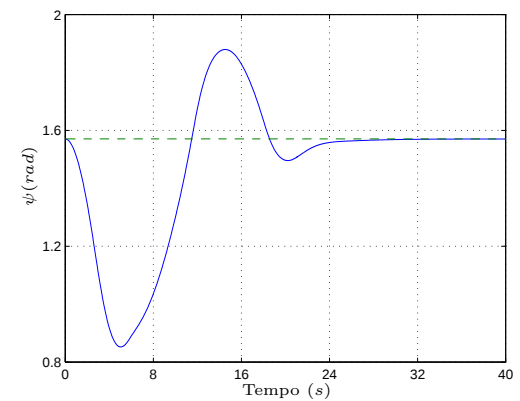


(b)

FIGURA 5.24: Resposta do controlador de profundidade durante o teste de reversão no eixo transversal. (a) PD e (b) P-PI.



(a)



(b)

FIGURA 5.25: Resposta do controlador de rumo durante o teste de reversão no eixo transversal. (a) PD e (b) P-PI.

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais desta dissertação, obtidas durante a pesquisa realizada e no desenvolvimento e teste do simulador de ROVs. Entretanto, algumas linhas de pesquisa podem ser estudadas mais a fundo. Portanto, são propostos aperfeiçoamentos ao que foi apresentado e novas linhas de estudo para os futuros trabalhos.

6.1 Conclusões gerais

Os modelos matemáticos para a dinâmica do ROV se mostraram coerentes e muito completos. Seus comportamentos foram estudados com parâmetros de diferentes ROVs. Foi definido um ROV fictício (Seção 4.1.1), com alguns parâmetros estimados, que apresentou resultados, nas simulações, similares aos observados em testes práticos com o LUMA.

As técnicas de identificação dos parâmetros de veículos submarinos encontradas na literatura se mostraram consistentes e adequadas para o caso do ROV LUMA.

O comportamento do simulador operando com as configurações de um ROV fictício se mostrou coerente e adequado aos testes com as estratégias de controle PD e P-PI. No entanto, o usuário pode testar diferentes estratégias de controle em qualquer ROV.

No que diz respeito ao sistema de controle, o estudo realizado mostrou que apesar da incerteza com relação à dinâmica do veículo submarino, sujeita a distúrbios de naturezas diversas, um controlador linear projetado de forma desacoplada (considerando os DOFs independentes) pode ser capaz de garantir estabilidade de maneira robusta e

até desempenho robusto.

Comparando-se o desempenho dos sistemas com diferentes estratégias de controle implementadas, foi observado que o controlador PD atende às especificações para o controle de profundidade, de posição do ROV em relação à parede do túnel e de rumo do ROV LUMA dentro de um túnel de adução. Isto se deve ao fato de que, nessas condições, não existem os erros de regime causados pela correnteza. No caso do ROV LUMA, deve ser ressaltado que, devido às características construtivas do veículo, sua flutuabilidade foi considerada neutra e as perturbações devido ao cabo umbilical foram desprezadas. Se estas condições são alteradas, é necessário um controlador com ação integral (P-PI) que possibilite eliminar os erros de regime.

Os resultados obtidos, no entanto, só podem ser alcançados com a limitação das condições de operação a baixas velocidades (condição de posicionamento dinâmico). Na região de altas velocidades, em que as não-linearidades dos termos de velocidade ditam o comportamento dinâmico do sistema, as estratégias lineares podem não mais apresentar resultados satisfatórios.

6.2 Aperfeiçoamentos e continuidade em pesquisas futuras

Diante do que foi abordado neste trabalho, algumas possíveis contribuições futuras seriam:

1. Apresentar procedimentos de ensaios para identificação dos parâmetros mais complexos de ROVs como, por exemplo, os elementos fora das diagonais principais nas matrizes de inércias adicionais (M_A).
2. Aplicar diferentes técnicas de identificação de parâmetros tais como: Filtro de Kalman estendido (EKF - *Extended Kalman filter*), Médias Móveis Autoregressivas (ARMA - *Autoregressive Moving Average*)(Goheen & Jefferys 1990), Redes Neurais (Ven et al. 2004a) entre outras.
3. Implementar e testar estratégias de controle robusto e não-linear no simulador de ROVs apresentado. Comparar o desempenho destes controladores com o sistema

de controle aqui utilizado.

4. Implementar o simulador utilizando *Quaternions* na representação dos ângulos de rotação em torno dos eixos do sistema estacionário. Desta maneira, será possível simular o comportamento de ROVs que possuam controle dos seis DOFs.
5. Aperfeiçoar o modelo matemático dos propulsores representando suas não-linearidades, causadas pela proximidade entre eles e aproximando mais o seu comportamento de um sistema real. No caso de um ROV tipo *openframe*, o modelo seria mais preciso na determinação dos empuxos e momentos resultantes do conjunto de propulsores, por considerar as interações entre cada um de acordo com o posicionamento na estrutura.
6. Inclusão de um sistema de medição para o deslocamento na direção paralela às paredes do túnel para implementação de um sistema de controle para este DOF. Desta maneira, a operação do ROV seria totalmente automática. Contudo, seria possível planejar, previamente, a inspeção dentro do túnel de adução e o sistema se encarregaria de acompanhar a trajetória especificada.

Referências Bibliográficas

- Ageev, M., Boreyko, A., Gornak, V., Matvienko, Y., Scherbatyuk, A., Vanlin, Y. & Zolotarev, V. (2000), ‘Modernized tsl-underwater robot for tunnel and shallow-water inspection’, *International Symposium on Underwater Technology* pp. 90–95.
- Antonelli, G., Caccavale, F., Chiaverini, S. & Fusco, G. (2003), ‘A novel adaptive control law for underwater vehicles’, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **11**(2), 221–232.
- Åström, K. J. & Wittenmark, B. (1984), *Computed-controlled systems: theory and design*, Prentice-Hall.
- Avila, J. P. J. (2004), Estimação de coeficientes hidrodinâmicos de um veículo semi-autônomo, Master’s thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Avila, J. P. J., Adamowski, J. C. & Barbarini, L. H. M. (2004), ‘Estimação dos coeficientes hidrodinâmicos de um veículo submarino semi-autônomo’, *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*.
- Bachmayer, R., Whitcomb, L. & Grosenbaugh, M. A. (2000), ‘An accurate four quadrant nonlinear dynamical model for marine thrusters: Theory and experimental validation’, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **25**(1), 146–159.
- Caccia, M., Indiveri, G. & Veruggio, G. (2000), ‘Modeling and identification of open-frame variable configuration unmanned underwater vehicles’, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **25**(2), 227–240.
- Campa, G. & Innocenti, M. (1999), Model of an underwater vehicle, Technical report, Department of Electrical Systems and Automation, University of Pisa.
- Carneiro, R. F., Leite, A. C., Peixoto, A. J., Goulart, C., Costa, R. R., Lizarralde, F. & Hsu, L. (2006), ‘Underwater robot for tunnel inspection: design and control’, *Proc. of the 12th Latin-American Congress on Automatic Control (CLCA)*.
- Clarke, R. (2001), An alternative to dewatering pressure tunnels for inspection purposes. ASI Marine, St. Catharines, Canadá.
- Cunha, J. P. V. S. (1992), Projeto e estudo de simulação de um sistema de controle a estrutura variável de um rov, Master’s thesis, Programa de Eng. Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- Cunha, J. P. V. S., Costa, R. R. & Hsu, L. (1991), Input/output variable structure position control of a remotely operated underwater vehicle, *in* 'Robots in Unstructured Environments', Vol. 2, Programa de Eng. Elétrica, COPPE/UFRJ, Fifth International Conference on Advanced Robotics, Pisa, Italy, pp. 1305–1310.
- Cunha, J. P. V. S., Costa, R. R. & Hsu, L. (1995), 'Design of a high performance variable structure position control of rovs', *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **20**(1), 42–55.
- Cunha, J. P. V. S., Lizarralde, F. C., Costa, R. R., Hsu, L., Smith Jr., R., Wollmann Jr., D. & Sant'Anna, A. C. C. M. (1994), 'Sistema de posicionamento dinâmico para um veículo submarino de operação remota', *X Congresso Brasileiro de Automática* pp. 1309–1314.
- Dominguez, R. B. (1989), Simulação e controle de um veículo submarino de operação remota, Master's thesis, Programa de Eng. Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Filho, A. S. T. (1996), Projeto de controladores de cota de profundidade de submarinos, Master's thesis, Programa de Eng. Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Fossen, T. I. (1994), *Guidance and control of oceans vehicles*, John Wiley and Sons.
- Goheen, K. R. & Jefferys, E. R. (1990), 'The application of alternative modelling techniques to rovs dynamics', *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 1302–1309.
- Goodman, A. (1960), 'Experimental techniques and methods of analysis used in submerged body research', *Third Symp. on Naval Hydrodynamics* pp. 379–449.
- Guo, S., Futukada, T. & Asaka, K. (2003), 'A new type of fish-like underwater micro-robot', *IEEE / Asme transactions on mechatronics* **8**(1).
- Hamilton, J. M. (1999), 'Vibration-based techniques for measuring the elastic properties of ropes and the added mass of submerged objects', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **17**, 688–697.
- Healey, A. J., Rock, S. M., Cody, S., Miles, D. & Brown, J. P. (1995), 'Toward an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles', *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **20**, 354–361.
- Hsu, L., Lizarralde, F. C., Costa, R. R. & Cunha, J. P. V. S. (2000), 'Avaliação experimental da modelagem e simulação da dinâmica de um veículo submarino de operação remota', *Revista de Controle e Automação* **11**(2), 82–93.
- Ishidera, H., Tsusaka, Y., Ito, Y., Oishi, T., Chiba, S. & Maki, Y. (1986), 'Simulation and experiment of automatic controlled rovs', *Proc. Fifth Int. Off-Shore Mechanical and Arctic Eng. Symposium* pp. 260–267.
- Nomoto, M. & Hattori, M. (1986), 'A deep rovs 'dolphin 3k': Design and performance analysis', *IEEE Journal Oceanic Engineering* **11**(3), 373–391.

- Peixoto, A. J., Lizarralde, F. C., Cunha, J. P. V. S., Hsu, L., Gomes, L. P. C. S., Costa, R. R. & Carneiro, R. F. (2003), ‘Aplicação de diodos emissores de luz em ambientes hiperbáricos’, Título da Invenção, do Modelo de Utilidade ou do Certificado de Adição. PI0304842-0.
- Ross, A., Fossen, T. I. & Johansen, T. A. (2004), Identification of underwater vehicle hydrodynamic coefficients using free decay tests, *in* ‘IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems’, Ancona, Italy.
- Santiago, A. A. (2004), Modelagem dinâmica de plataforma semi-submersível sujeita a perturbações ambientais para projeto de controladores a partir de ensaios em tanque oceânico, Technical report, Programa de Engenharia Naval e Oceânica, COPPE/UFRJ.
- Soares, F. J. A. (2002), Projeto e implementação de uma plataforma de testes aplicada para o desenvolvimento de veículos submersíveis não tripulados, Master’s thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Souza, E. C. (2003), Modelagem e controle de veículos submarinos não tripulados, Master’s thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Tavares, A. M., Gomes, S. C. P. & Cunha, M. A. B. (2004), ‘Controle de veículos subaquáticos sub-atuados utilizando linearização por realimentação’, *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)* **XV**.
- Ven, P. W. J., Flanagan, C. & Toal, D. (2004b), ‘Identification of underwater vehicle dynamics with neural networks’, *OCEANS ’04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN ’04* **3**, 1198–1204.
- Ven, P. W. J., Johansen, T. A., Sorensen, A. J., Flanagan, C. & Toal, D. (2004a), Neural network augmented identification of underwater vehicle models, *in* ‘IFAC Symposium on Control Applications in Marine Systems’, Ancona, Italy, pp. 263–268.
- Wilczynski, V. & Diehl, W. J. (1995), ‘An alternative approach to determine a vessel’s center of gravity: The center of buoyancy method’, *Ocean Eng* **22**(6), 563–570.

Apêndice A

Projeto mecânico do ROV

Atendendo às condições do projeto conceitual descrito anteriormente, o ROV LUMA é um veículo não tripulado do tipo *open frame* (estrutura aberta), como mostrado na figura A.1.



FIGURA A.1: ROV LUMA no tanque do Laboratório Oceânico da UFRJ.

As dimensões aproximadas deste ROV são 63cm de altura, 88cm de largura e 1m de comprimento e, seu peso aproximado, de 40kg .

O sistema submarino é composto por:

- Estrutura mecânica em alumínio;
- Dois vasos de pressão em PVC para a eletrônica e as baterias;
- Câmera de vídeo colorida com pan e tilt;
- Câmera de vídeo preto e branco de alta sensibilidade;
- Sonar tipo *profilling*;
- Duas luminárias utilizando *leds* de alta intensidade;
- Cabo umbilical de $1km$ contendo fibra ótica;
- Alimentação embarcada usando baterias de $72V$ e $40Ah$;
- Quatro propulsores;
- Doze flutuadores;
- Lastros de chapa de chumbo;
- Eletrônica embarcada.

A estrutura mecânica (*frame*) foi montada utilizando-se cantoneiras de alumínio com perfil em “L” por ser um material leve e resistente mecanicamente.

Na parte central do veículo foram fixados os propulsores, as câmeras e, consequentemente, as luminárias.

Na parte superior foram colocados os doze flutuadores, dispostos de forma homogênea, com uma abertura no centro com a finalidade de facilitar o deslocamento do fluxo de água, principalmente no propulsor disposto verticalmente. O posicionamento dos flutuadores na parte superior visa aumentar consideravelmente o volume neste local sem aumentar o peso. Isso faz com que o centro de flutuação (R_B) seja deslocado para cima no corpo do veículo.

Na parte inferior foram colocados os componentes mais pesados do sistema como: o vaso da eletrônica, o vaso de baterias e os lastros de chapa de chumbo. Com isso, desloca-se o centro de gravidade (R_G) para baixo no corpo do veículo.

Esse posicionamento torna o veículo intrinsecamente estável para rotações nos eixos x_m e y_m , ou seja, mantém naturalmente pequenos os ângulos de jogo e arfagem.

Apêndice B

Coeficientes de arraste hidrodinâmico

Nomoto & Hattori (1986) apresentaram gráficos cujas curvas ilustram o comportamento dos coeficientes de arraste hidrodinâmico, do sistema *Dolphin 3K*, como funções não lineares dos ângulos α e β (figuras 2.5 e 2.6). Foram feitas “amostragens” nestas curvas em intervalos de 30° no intuito de quantizar seus valores para tais condições. Os valores medidos são apresentados na Tabela B.1.

TABELA B.1: Coeficientes Hidrodinâmicos referentes a α e β .

α/β	$C_{x\alpha}$	$C_{z\alpha}$	C_m	$C_{x\beta}$	$C_{y\beta}$	C_n
-180	0.71	-0.05	0	0.72	-0.03	0
-150	0.63	0.55	0.05	0.75	0.5	0.06
-120	0.32	0.91	0.03	0.41	0.93	0.1
-90	-0.07	0.76	0	-0.02	1	0.03
-60	-0.25	0.81	0	-0.38	1.07	-0.03
-30	-0.51	0.67	0	-0.74	0.6	-0.05
0	-0.59	-0.05	0	-0.65	0	0
30	-0.67	-0.67	0.07	-0.68	-0.57	0.3
60	-0.25	-1.45	0.04	-0.30	-1.04	0.01
90	-0.07	-1.58	-0.04	-0.05	-0.98	-0.05
120	0.24	-1.37	-0.10	0.41	-0.93	-0.1
150	0.76	-0.67	-0.11	0.75	-0.57	-0.05
180	0.71	-0.05	0	0.72	-0.03	0

Interpolações lineares foram empregadas nos valores coletados visando simular o comportamento do arrasto hidrodinâmico para quaisquer ângulos de α e β . Com este método, é possível aproximar os valores intermediários aos amostrados de $C_{x\alpha}$, $C_{z\alpha}$,

$C_{x\beta}$, $C_{y\beta}$, C_m e C_n às curvas ilustradas nas Figuras 2.5 e 2.6 (Nomoto & Hattori 1986).

Nas figuras B.1 e B.2 são ilustradas as curvas que serão interpretadas pelo simulador.

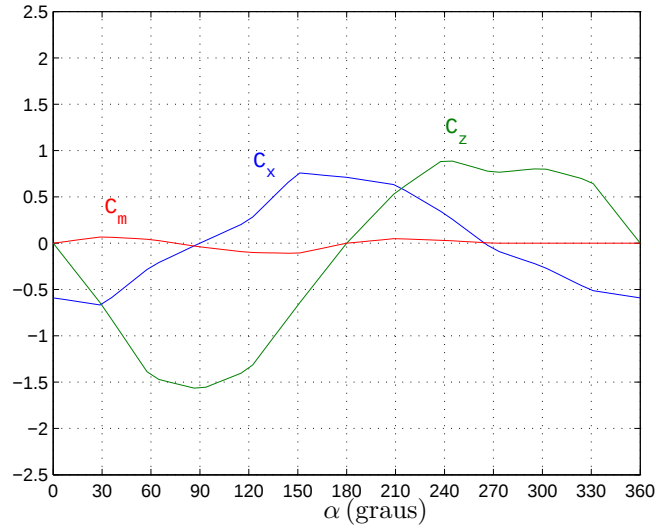


FIGURA B.1: Coeficientes hidrodinâmicos longitudinais do veículo.

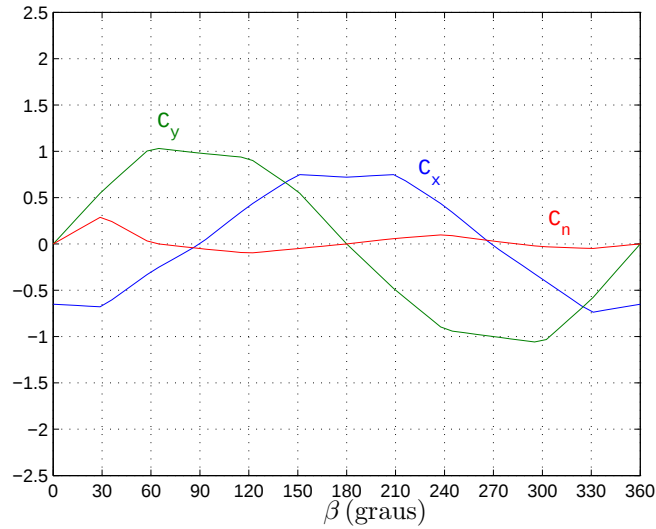


FIGURA B.2: Coeficientes hidrodinâmicos transversais do veículo.

É possível observar que o erro de aproximação agregado pelas interpolações lineares, que ocorre entre os valores amostrados, é desprezível e não compromete o comportamento do sistema.

Então, a partir da análise dos comportamentos das funções para medidas em α e β , $C_{y\gamma}$ e $C_{z\gamma}$ foram determinados para as medidas mais importantes de γ (vide Tabela B.2).

TABELA B.2: Coeficientes Hidrodinâmicos referentes a γ .

γ	$C_{y\gamma}$	$C_{z\gamma}$	C_k
-180	1	0	0
-150	0.866	1.025	0
-120	0.5	1.7754	0
-90	0	2.05	0
-60	-0.5	1.7754	0
-30	-0.866	1.025	0
0	-1	0	0
30	-0.866	-1.025	0
60	-0.5	-1.7754	0
90	0	-2.05	0
120	0.5	-1.7754	0
150	0.866	-1.025	0
180	1	0	0

A partir dos valores apresentados na Tabela B.2, são estimadas as curvas para os coeficientes hidrodinâmicos em γ , apresentas na Figura B.3.

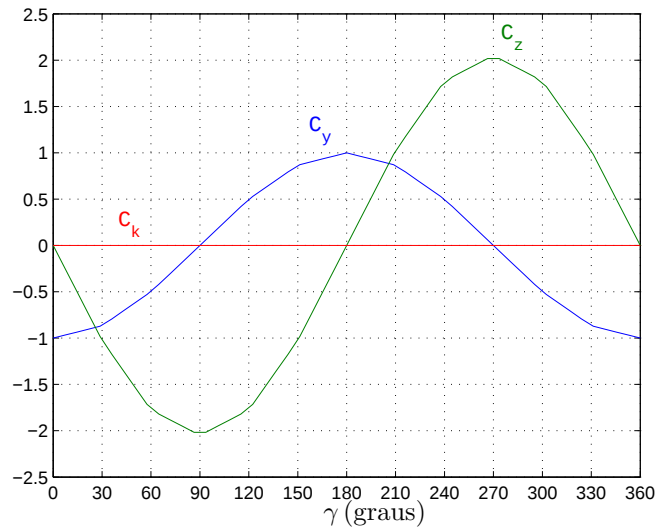


FIGURA B.3: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos referentes a γ .

Apêndice C

Arquivos auxiliares e de configuração do simulador

Neste apêndice, serão apresentados todos os arquivos auxiliares e de configuração para o funcionamento do simulador de ROVs. São eles:

- luma.m

O simulador desenvolvido deve ser configurado com os parâmetros do veículo desejado. A seguir é apresentado a arquivo de configuração para o ROV LUMA:

```
disp('          R.O.V. LUMA (protótipo)');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                        %PARÂMETROS EXTERNOS%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Massa específica da água [Kg/m^3]
ro=998.56; % água doce
%ro=1025;  % água salgada

% Gravidade [m/s^2]
g=9.81;

%intervalo de amostragem para o Workspace
Tsamp=0.5;
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Condições iniciais %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Velocidades iniciais [m/s] e [rad/s]
nu_o=[0
      0
      0
      0
      0
      0];

% Posição inicial [m] e [rad]
eta_o=[0
        0
        0
        0
        0
        0];

% Velocidade da Correnteza [m/s]
nuc=[0
      0
      0];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                                %PARÂMETROS DO VEÍCULO%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Massa [Kg]
m=40;

% Volume deslocado pelo ROV [m^3]
%v=m/ro;
v=0.0401;

% Volume de referência [m^3]
vr=0.0240;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Centro de gravidade & Centro de flutuação %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Centro de gravidade [m]
xG=0;
yG=0;
zG=0.2;

RG=[xG
    yG
    zG];

% Centro de flutuação [m]
xB=0;
yB=0;
zB=-0.3;

RB=[xB
    yB
    zB];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Matrizes de Inércias %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Inércias de corpo rígido
% - Matriz de massas
M11=m*eye(3); % [Kg]

M21=m*[0    -zG    yG
        zG    0    -xG
        -yG    xG    0]; % [Kg.m]

% - Momentos de inércia e produtos de inércia
Ix=3.5; Iy=20; Iz=16.5; Ixy=0; Iyz=0.09; Izx=0;

M22=[Ix  -Ixy  -Izx
     -Ixy  Iy   -Iyz
     -Izx  -Iyz  Iz]; % [Kg.m^2]

```

```

Mcr=[M11 M21'
      M21 M22];

% Inércias adicionais
A11=[6 0 0
      0 21 0
      0 0 21]; % [Kg]

A21=[0 0 0
      0 0 0
      0 0 0]; % [Kg.m]

A22=[0 0 0
      0 14 0
      0 0 14]; % [Kg.m^2]

Ma=[A11 A21'
      A21 A22];

% Matriz de inércias resultante
M=Mcr+Ma;

InvM=inv(M);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Coeficientes hidrodinamicos %%%%%%%%%%

ang=[-180 -150 -120 -90 -60 -30 0 30 60 90 120 150 180]; axa=ang;
aza=ang; am=ang; ayb=ang; axb=ang; an=ang; azg=ang; ayg=ang; ak=ang;

% Coeficientes hidrodinamicos da translação -----

% - Referentes ao ângulo ALPHA

Cxa=[0.71 0.63 0.32 0 -0.25 -0.51 -0.59 -0.67 -0.25 0 0.24 0.76
0.71]; Cza=[0 0.55 0.91 0.76 0.81 0.67 0 -0.67 -1.45 -1.58 -1.37
-0.67 0]; Cm=[0 0.05 0.03 0 0 0 0 0.07 0.04 -0.04 -0.10 -0.11 0];

```

% - Referentes ao ângulo BETA

```
Cyb=[0 0.5 0.93 1 1.07 0.6 0 -0.57 -1.04 -0.98 -0.93 -0.57 0];  
Cxb=[0.72 0.75 0.41 0 -0.38 -0.74 -0.65 -0.68 -0.30 0 0.41 0.75  
0.72]; Cn=[0 0.06 0.1 0.03 -0.03 -0.05 0 0.3 0.01 -0.05 -0.1 -0.05  
0];
```

% - Referentes ao ângulo GAMMA

```
Czg=[0.0000 1.025 1.7754 2.05 1.7754 1.025 0 -1.025 -1.7754 -2.05  
-1.7754 -1.025 -0.0000]; Cyg=[1.0000 0.8660 0.5000 0.0000 -0.5000  
-0.8660 -1.0000 -0.8660 -0.5000 0.0000 0.5000 0.8660 1.0000]; Ck=[0  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
```

% Coeficientes hidrodinamicos da rotaçao -----

```
Cp=-15; % amortecimento da rotaçao em x (psi)  
Cq=-47; % amortecimento da rotaçao em y (theta)  
Cr=-30; % amortecimento da rotaçao em z (phi)
```

%% Parâmetros dos propulsores %%%%%%%%%%

% Diâmetro dos hélices [m]

D=0.234;

% Atraso dos propulsores [s]

delay=0.2;

% Tensão mínima dos propulsores (Zona morta) [volts]

umin=0.2;

% Tensão máxima dos propulsores (Saturação) [volts]

umax=4; % Ganho de tensão para os propulsores

% Filtro de primeira ordem

tal=0.1;

```

% Velocidade máxima de rotação do hélice [rps]
%npmax=2500; rpm
npmax=1;

% Máximos empuxos [kgf]          1 [lbf] = 0.4536 [Kgf] = 4.4483 [N]
Ffmax=97.8626; %9.9792[Kgf]; % 22[lbf] "Forward thrust"
Fbmax=57.8279; %5.8968[Kgf]; % 13[lbf] "Reverse thrust"

% Máximos momentos
Mfmax=0.058968; % "Forward" 0,13 estimados
Mbmax=0.099792; % "Reverse" 0.22 estimados

CTf=8*Ffmax/(ro*0.7*pi^3*npmax^2*D^4);
CTb=8*Fbmax/(ro*0.7*pi^3*npmax^2*D^4);

CT=[-CTb
    CTf
    -CTb];

CQf=8*Mfmax/(ro*0.7*pi^3*npmax^2*D^5);
CQb=8*Mbmax/(ro*0.7*pi^3*npmax^2*D^5);

CQ=[-CQb
    CQf
    -CQb];

sigma=[-180
        0
        180];

% Posição de empuxo de cada hélice
Rp1=[0
     0
    -0.23]; % [m]

Rp2=[0.23

```

```

0.11
0]; % [m]

Rp3=[-0.22
0.28
0]; % [m]

Rp4=[-0.22
-0.28
0]; % [m]

% Orientação de cada hélice
Pp1=[0
0
1];

Pp2=[0
1
0];

Pp3=[0.9067
0.4217
0];

Pp4=[0.9067
-0.4217
0];

% Matriz de Acoplamento -----
% Completa (6x8)
Ac=[Pp1 Pp2 Pp3 Pp4 [0 0 0]' [0 0 0]' [0 0 0]' [0 0 0]';
cross(Rp1,Pp1) cross(Rp2,Pp2) cross(Rp3,Pp3) cross(Rp4,Pp4) Pp1 Pp2 Pp3 Pp4];

% Simplificada para o controle (4x4)
InvDesac=[Pp1 Pp2 Pp3 Pp4
Ac(6,1) Ac(6,2) Ac(6,3) Ac(6,4)];

```

```

% Matriz de desacoplamento (controle)
Desac=inv(InvDesac);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                                %PARÂMETROS DO CONTROLADOR%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Parâmetros do Joystick -----
global jk
%jk=0; % Desabilita o Joystick
jk=1; % Configura o Joystick CLONE Cobra como padrão
%jk=2; % Configura o Joystick Microsoft Force Feedback como padrão

% Parâmetros do Controle -----
talc=0.01;
c=3;

% - Controle de distância à parede do túnel -----
global ref_x
ref_x=0;
K_x=InvM(1,1);

% PD
b_x=-1;
Kp_x=-b_x*c/(c+1);
Kd_x=-b_x*(c+1)/K_x;

% PPI
b_x=-0.3;
Kp1_x=-2*c*b_x/K_x;
Kp2_x=b_x*(2*c-c^2-1)/(c*(c-2));
Ki_x=(c^2*b_x^2)/K_x;

% - Controle de profundidade -----
global ref_z
ref_z=0;

```

```

K_z=InvM(3,3);

% PD
b_z=-1;
Kp_z=-b_z*c/(c+1);
Kd_z=-b_z*(c+1)/K_z;

% PPI
b_z=-0.235;
Kp1_z=-2*c*b_z/K_z;
Kp2_z=b_z*(2*c-c^2-1)/(c*(c-2));
Ki_z=(c^2*b_z^2)/K_z;

% - Controle de rumo -----
global ref_psi
ref_psi=0;
K_psi=InvM(6,6);

% PD
b_psi=-1.2;
Kp_psi=-b_psi*c/(c+1);
Kd_psi=-b_psi*(c+1)/K_psi;

% PPI
b_psi=-0.33;
Kp1_psi=-2*c*b_psi/K_psi;
Kp2_psi=b_psi*(2*c-c^2-1)/(c*(c-2));
Ki_psi=(c^2*b_psi^2)/K_psi;

```

- JK-config.m

O programa JK-config.m é encarregado de realizar a configuração das entradas do simulador de acordo com o *joystick* utilizado. Tal programa é apresentado abaixo:

```
function [out_JK] = JK_config(in_JK) global jk

dofc=[in_JK(1)
      in_JK(2)
      in_JK(3)
      in_JK(4)];

if isempty(jk)
    jk=1;
end

if jk==0 % Testes sem a atuação do Joystick
cc=zeros(4); offset=0*[1
    1
    1
    1];
end

if jk==1 % Joystick CLONE Cobra
cc=[0 -1 0 0
    1 0 0 0
    0 0 1 0
    0 0 0 1];
offset=0.0079*[-1
    1
    1
    1];
end

if jk==2 % Joystick MICROSOFT Force Feedback
cc=[0 -1 0 0
    1 0 0 0
    0 0 0 1
```

```

        0 0 1 0];
offset=0*[1
        1
        1
        1];
end

out_JK=((cc*dofc)+offset)';

```

Para a adição de outro *joystick* ao programa, é necessário atribuir um novo valor à variável *jk* e configurá-la com a matriz de transformação de coordenadas (*cc*) e o vetor de *offset* novos.

- **x-referencial.m**

A referência do controlador de distância até a parede do túnel, usado no simulador *rov.mdl*, precisa ser gravada no instante do acionamento deste sistema de controle e atualizada no *Workspace* a qualquer momento. Para isso, foi utilizada a rotina *x-referencial.m* apresentada abaixo:

```

function [out_x] = x_referencial(vet)

global out_x global ref_x

if isempty(ref_x)
    ref_x=0;
end

en=vet(2);
ref=vet(1);
if en==1
    ref_x=ref;
end

out_x=ref_x;

```

De maneira análoga, foram desenvolvidas as rotinas *z-referencial.m* e *psi-referencial.m* para os sistemas de controle de profundidade e rumo, respectivamente.

- `desac.m`

A rotina `desac.m`, a seguir, implementa a matriz de desacoplamento (equação 5.5) que converte os comandos nos quatro DOF do ROV em comandos para cada propulsor.

```
function [npi] = desac(Fpi)

global npi
global np
global alfamais
global alfamenos
global np1
global np2
global np3
global np4
global CT

Fp1 = Fpi(1);
Fp2 = Fpi(2);
Fp3 = Fpi(3);
Fp4 = Fpi(4);

alfamais=CT(2)*ro/8*0.7^2*pi^3*D^4;
alfamenos=-CT(3)*ro/8*0.7^2*pi^3*D^4;

if sgn(Fp1)*alfamais>=0
    np1=sgn(Fp1*alfamais)*sqrt(abs(Fp1/alfamais));
else np1=sgn(Fp1*alfamais)*sqrt(abs(Fp1/alfamenos));

if sgn(Fp2)*alfamais>=0
    np2=sgn(Fp2*alfamais)*sqrt(abs(Fp2/alfamais));
else np2=sgn(Fp2*alfamais)*sqrt(abs(Fp2/alfamenos));

if sgn(Fp3)*alfamais>=0
    np3=sgn(Fp3*alfamais)*sqrt(abs(Fp3/alfamais));
else np3=sgn(Fp3*alfamais)*sqrt(abs(Fp3/alfamenos));

if sgn(Fp4)*alfamais>=0
```

```

        np4=sgn(Fp4*alfamais)*sqrt(abs(Fp4/alfamais));
    else np4=sgn(Fp4*alfamais)*sqrt(abs(Fp4/alfamenos));

    np=[np1 np2 np3 np4]';

    npi=[np];

```

- `itransf.m`

A inversa da matriz de transformação de coordenadas J_1 , dada em função de η_2 , foi implementada no programa `itransf.m` apresentado a seguir:

```

xin = in_eta2(1);
yin = in_eta2(2);
zin = in_eta2(3);

phi =in_eta2(4);
theta = in_eta2(5);
psi = in_eta2(6);

in=[xin yin zin]';

Jz=[cos(psi) -sin(psi) 0
    sin(psi) cos(psi) 0
    0 0 1];

Jy=[cos(theta) 0 sin(theta)
    0 1 0
    -sin(theta) 0 cos(theta)];

Jx=[1 0 0
    0 cos(phi) -sin(phi)
    0 sin(phi) cos(phi)];

J1=Jz*Jy*Jx;

out=inv(J1)*in;

```