

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**ROVFURG-I:
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM VEÍCULO SUBAQUÁTICO NÃO
TRIPULADO DE BAIXO CUSTO**

CARLOS EDUARDO MOTA MORAES

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Cícero Pinheiro Gomes

Rio Grande, junho de 2005.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ROVFURG-I
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM VEÍCULO SUBAQUÁTICO NÃO
TRIPULADO DE BAIXO CUSTO

CARLOS EDUARDO MOTA MORAES

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

tendo sido aprovada em sua forma final pela Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

Prof. Dr. Cláudio Dias
Coordenador da Comissão de Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sebastião Cícero Pinheiro Gomes
Orientador – FURG

Prof. Dr. Álvaro Luiz de Bortoli
UFRGS

Prof. Dr. Sílvia Silva da Costa Botelho
FURG

Prof. Dr. Volnei Anderson
FURG

Este trabalho é dedicado
à minha esposa Juliana Morais de Moraes.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sebastião Cícero Pinheiro Gomes pela excelente orientação, compreensão e amizade.

Aos professores do curso de Engenharia Oceânica pelos conhecimentos transmitidos.

As secretárias da Comcur de Engenharia Oceânica pelo apoio e amizade.

Aos colegas de mestrado pela amizade e companheirismo.

Aos colegas da Cooperativa Arrozeira Extremo Sul Ltda, por terem colaborado muito à realização deste sonho.

Aos meus pais Iraci e Ivete pelo apoio incondicional em todos os momentos.

A minha esposa por ter me acompanhado nesta caminhada, me apoiando e me incentivando sempre.

A Deus por iluminar o meu caminho.

RESUMO

Pesquisas na área de robótica subaquática têm sido desenvolvidas principalmente a partir das últimas duas décadas. Diversos veículos do tipo ROV (*Remotely Operated Vehicle*) ou AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) foram construídos nos Estados Unidos e em alguns países da Europa, por indústrias ou centros de pesquisas. Os custos envolvidos na importação destes sistemas são proibitivamente elevados, não havendo, no momento, fabricação dos mesmos no Brasil. Este fato é o principal motivador da realização do presente trabalho, cujo mais importante objetivo é demonstrar a possibilidade de se construir veículos subaquáticos a um baixo custo, quando comparados a equivalentes importados. Na tentativa de cumprir este objetivo, realizou-se o projeto e o desenvolvimento de um veículo do tipo ROV, intitulado ROVFURG-I. Inicialmente, realizou-se uma ampla revisão bibliográfica sobre os sensores e os atuadores utilizados em ROVs e AUVs, bem como sobre alguns veículos já construídos. Este estudo inicial deu consistência ao desenvolvimento do ROVFURG-I. Desenvolveu-se o projeto estrutural optando-se por uma arquitetura aberta (*open frame*), tendo-se construído os quatro atuadores utilizados. Propôs-se uma eletrônica embarcada com sensores do tipo acelerômetro e giroscópio. Diversos resultados experimentais em malha aberta foram obtidos, com os quais realizou-se a calibração dos sensores. Algumas conclusões são ressaltadas ao final da dissertação, evidenciando-se a necessidade de continuação da presente pesquisa, indicando-se ainda futuros melhoramentos no ROVFURG-I.

Palavras-chave: ROV, AUV, veículos subaquáticos, robótica subaquática, mecatrônica.

ABSTRACT

Research in the area of underwater robotics has been developed mainly in the last two decades. Diverse vehicles of ROV (Remotely Operated Vehicle) or AUV (Autonomous Underwater Vehicle) type were constructed by industries or centers of research in the United States and some countries in Europe. The involved costs for importation of these systems are prohibitively high, do not having, at the moment, manufacture of these systems in Brazil. This fact is the main reason of the accomplishment of the present work, in which the most important objective is to demonstrate the possibility of building low cost underwater vehicles, when compared to equivalent imported ones. To accomplish this objective, it was constructed a ROV, named ROVFURG-I. Initially, an ample bibliographical review was made on the sensors and actuators used in ROVs and AUVs, as well as on some constructed vehicles. This initial study gave consistence to the development of the ROVFURG-I. The structural project was developed adopting an open architecture (open frame). Also, it was constructed the four actuators used by the experimental vehicle. The onboard electronics was constructed using accelerometer and gyroscope sensors. Diverse experimental results were obtained in open loop and these results were important to the calibration of the sensors. Some conclusions are explained at the end of this dissertation and it was also indicated, as future works, the necessary improvements to be implemented in the ROVFURG-I.

Key-words: ROV, AUV, underwater vehicles, underwater robots, mechatronics.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	11
LISTA DE ABREVIATURAS.....	12
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE FIGURAS.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.3 BIBLIOGRAFIA COMENTADA.....	19
1.4 RECURSOS UTILIZADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO	24
2. ESTUDO SOBRE SENSORES.....	25
2.1 INTRODUÇÃO.....	25
2.2 SENSORES DE NAVEGAÇÃO	27
2.2.1 Acelerômetros.....	27
2.2.2 Giroscópios.....	32
2.2.3 Inclinômetros.....	34
2.2.4 Magnetômetros.....	36
2.2.5 Sensores de Pressão.....	42

2.3 SENSORES DE MISSÃO.....	43
2.3.1 Sonares.....	43
2.3.2 Sensores de Imagem.....	44
2.3.3 Sensores de Temperatura.....	45
2.4 SENSORES DE SISTEMA (SENSOR DE CORRENTE).....	46
2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A INTEGRAÇÃO DOS SENSORES NO VEÍCULO.....	48
3. ESTUDO SOBRE ATUADORES.....	54
3.1 INTRODUÇÃO.....	54
3.2 ATUADORES DE NAVEGAÇÃO.....	55
3.2.1 Propulsores.....	55
3.2.2 Esteiras.....	66
3.2.3 Lastro variável.....	67
3.2.4 Lemes.....	67
3.3 PROPULSORES COMERCIAIS.....	68
3.4 ATUADORES DE MISSÃO.....	72
3.4.1 Manipuladores.....	72
3.4.2 Escovas para limpeza	73
3.4.3 Trincheirador.....	74
3.4.4 Módulo de escavação.....	75
3.5 PROPULSORES COMERCIAIS VIÁVEIS AO PROJETO DO VEÍCULO	75
4. ESTUDO SOBRE VEÍCULOS.....	77
4.1 INTRODUÇÃO.....	77
4.2 VEÍCULOS DE INSPEÇÃO COMERCIAIS.....	77
4.2.1 LBV300S FO.....	77

4.2.2 Phantom HD2.....	80
4.2.3 Falcon.....	82
4.2.4 xBOT.....	84
4.2.5 HYBALL.....	85
4.2.6 Nova Ray.....	86
4.3 VEÍCULOS EXPERIMENTAIS.....	87
4.3.1 ORCA.....	88
4.3.2 JHUROV.....	89
4.3.3 Gamera.....	90
4.3.4 RAUVER.....	92
5. REQUISITOS DE PROJETO.....	94
5.1 INTRODUÇÃO.....	94
5.2 CONFIGURAÇÃO CONSTRUTIVA CONCEBIDA - ROVFURG-I	95
5.3 PROJETO DE ELEMENTOS BÁSICOS DA CONFIGURAÇÃO CONSTRUTIVA CONCEBIDA	99
5.3.1 Propulsores.....	99
5.3.2 Cilindro.....	104
5.3.3 Chassi.....	106
5.3.4 O projeto estrutural.....	107
5.4 ELETRÔNICA EMBARCADA.....	110
5.4.1 Comunicação.....	110
5.4.2 Controle dos atuadores.....	112
5.4.3 Sensoriamento.....	113

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	117
6.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	117
6.1.1 Acelerômetros.....	117
6.1.2 Giroscópio.....	122
6.2 RESPOSTAS EM MALHA ABERTA.....	128
6.2.1 Torques restauradores.....	128
6.2.2 Trajetórias livres.....	130
7. CONCLUSÕES	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

LISTA DE SÍMBOLOS

a	aceleração
B_z	campo magnético
E_x, E_H	campo elétrico nas direções x e y , respectivamente
F	vetor força
g	aceleração da gravidade
H_e	densidade do campo magnético terrestre
H_x, H_y, H_z	densidade do campo magnético terrestre nos eixos x, y e z
I_x, I_y, I_z	momentos de inércia
J_x	densidade de corrente
k	constante da mola
m	massa
p	taxa de variação da arfagem
q	taxa de variação do rolamento
r	taxa de variação da guinada
u, v, w	componente da velocidade linear nas direções x, y e z (surge, sway e heave)
V_{dx}	velocidade dos elétrons na direção x
V_e	tensão nos eletrodos de excitação
V_H	tensão na direção y
V_s	tensão no eletrodo coletor
x, y, z	eixos no referencial do corpo
X_g, Y_g, Z_g	coordenadas do centro de gravidade
α	ângulo de inclinação entre as linhas do campo magnético e a superfície terrestre
θ	ângulo de arfagem (roll)
ξ	ângulo entre o eixo de atuação dos atuadores e o eixo longitudinal
ϕ	ângulo de rolamento (pitch)
ψ	ângulo de guinada ou rumo (yaw)

LISTA DE ABREVIATURAS

AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicles</i>
AUVSI	<i>Association for Unmanned Vehicle Systems International</i>
AMR	<i>Anisotropic Magnetoresistive</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CI	Circuito Integrado
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
DOF	<i>Degree of freedom</i>
DVL	<i>Doppler velocity Log</i>
FEM	Força eletromotriz
FOG	<i>Fiber Optic Gyro</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
JHUROV	<i>Johns Hopkins University Remotely Operated underwater robotic Vehicle</i>
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
P	Proporcional
PD	Proporcional e Derivativo
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	Modulação por largura de pulso
ROV	<i>Remotely Operated Vehicles</i>
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Device</i>
TC	Transformador de Corrente
UTV	<i>Underwater Towed Vehicle</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixas de medição de tecnologias existentes para magnetômetros.....	39
Tabela 2.2 – Sistemas para a medição de ângulos e velocidades.....	50
Tabela 2.3 – Sistemas para a medição de ângulos.....	51
Tabela 2.4 – Sensores para a medição de ângulos.....	52
Tabela 2.5 – Sensor de pressão.....	53
Tabela 3.1 – Propulsores comerciais.....	75
Tabela 4.1 – Características do Veículo LBV 300S FO.....	78
Tabela 4.2 – Características do Veículo HD2.....	80
Tabela 4.3 – Características do Veículo Falcon.....	83
Tabela 4.4 – Características do veículo xBOT.....	84
Tabela 4.5 – Características do Veículo HYBALL.....	86
Tabela 4.6 – Características do Veículo Nova Ray.....	87
Tabela 4.7 – Características do Veículo Orca-2.....	89
Tabela 4.8 – Características do Veículo JHUROV.....	90
Tabela 4.9 – Características do Veículo RAUVER.....	92
Tabela 6.1 – Constantes de conversão para unidades físicas obtidas dos sinais dos acelerômetros	119
Tabela 6.2 – Constantes de conversão obtidas dos experimentos.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Acelerômetro massa – mola.....	28
Figura 2.2 – Figura 2.2 – (a)Acelerômetro por pêndulo, (b)Acelerômetro por fluido...	29
Figura 2.3 – (a) Sistema mecânico interno do acelerômetro, (b) Algumas dimensões internas do acelerômetro.....	30
Figura 2.4 – Diagrama interno de um acelerômetro.....	31
Figura 2.5 – (a) Acelerômetro de dois eixos, (b) Molas do acelerômetro.....	31
Figura 2.6 – Arranjo construtivo interno de um giroscópio comercial.....	32
Figura 2.7 – Giroscópio de fibra óptica.....	33
Figura 2.8 – Princípio de medição de inclinação: (a) Corpo na horizontal, (b) Corpo Inclinado	34
Figura 2.9 – Inclinômetro mecânico (pêndulo e potenciômetro).....	35
Figura 2.10 – (a) Inclinômetro com fluido e bolha de gás, (b) Circuito equivalente.....	35
Figura 2.11 – (a) Campo magnético terrestre, (b) Decomposição deste campo.....	37
Figura 2.12 – Carta de declinação - Departamento de Defesa Americano.....	38
Figura 2.13 – Tecnologia flux-gate.....	40
Figura 2.14 – Utilização do sensor AMR.....	41
Figura 2.15 – Pulsos transmitido e recebido por um sonar.....	44
Figura 2.16 – Princípio de funcionamento do sensor de efeito hall.....	47
Figura 2.17 – Técnica de utilização do sensor de efeito hall.....	47
Figura 2.18 – Coordenadas em relação ao veículo.....	48
Figura 3.1 – Motor CC.....	56
Figura 3.2 – Estator do motor BLDC.....	59
Figura 3.3 – Motor BLDC.....	60
Figura 3.4 – Curva de resposta do Propulsor SPE-75.....	60
Figura 3.5 – Motor hidráulico de engrenagens.....	61
Figura 3.6 – Motor hidráulico de engrenagens, Série PL Factor.....	62
Figura 3.7 – Motor hidráulico de palhetas.....	63
Figura 3.8 – Motor hidráulico de pistões axiais:(a) tipo eixo inclinado, (b) tipo disco inclinado	64

Figura 3.9 – Funcionamento do motor hidráulico de pistões axiais.....	64
Figura 3.10 – Nektors – Propulsor desenvolvido pela Nekton Research, LCC.....	65
Figura 3.11 – Gamera – Duke&NC State University.....	66
Figura 3.12 – Trito T500 – Perry Slingsby Systems.....	66
Figura 3.13 – Veículo Cal Poly – California Polytechnic State University.....	67
Figura 3.14 – Propulsor SM4-M – Seaeye.....	69
Figura 3.15 – Propulsor SBT150 – Seabotix, Inc.....	69
Figura 3.16 – Propulsor SEE050 – NorthShore Propulsion Inc.	70
Figura 3.17 – Propulsor 250 – Northshore Propulsion Inc.....	71
Figura 3.18 – Propulsor SPE-75 – Sub-Atlantic.....	72
Figura 3.19 – Manipuladores: (a) um DOF, (b) com seis DOF, (c) Dispositivo de Teleoperação	73
Figura 3.20 – Escova para ROV.....	74
Figura 3.21 – Módulo de escavação Northshore Propulsion.....	75
Figura 4.1 – Veículo LBV300S FO.....	78
Figura 4.2 – Série LBV - Vista frontal, traseira e lateral.....	79
Figura 4.3 – Veículo Phantom HD2.....	80
Figura 4.4 – Phantom HD2 com flutuadores adicionais.....	81
Figura 4.5 – Veículo Falcon.....	82
Figura 4.6 – Configurações dos propulsores.....	83
Figura 4.7 – Veículo xBOT.....	84
Figura 4.8 – Veículo HYBALL.....	85
Figura 4.9 – Veículo Nova Ray.....	86
Figura 4.10 – Veículo Orca-II.....	88
Figura 4.11 – Veículo JHUROV.....	89
Figura 4.12 – Veículo Gamera.....	91
Figura 4.13 – Chassi do Gamera.....	91
Figura 4.14 – RAUVER: (a) veículo, (b) propulsores adicionais.....	92
Figura 5.1 – ROV1 – Vistas frontal, lateral, superior e perspectiva.....	96
Figura 5.2 – ROV2 – Vistas frontal, lateral, superior e perspectiva.....	97
Figura 5.3 – ROVFURG-I – Vistas frontal, lateral, superior e perspectiva.....	98
Figura 5.4 – Motor utilizado nos propulsores.....	99
Figura 5.5 – Hélices testadas, com seis, três e duas pás.....	100

Figura 5.6 – (a) Diagrama do experimento, (b) foto no local dos ensaios.....	101
Figura 5.7 – Comparação entre as hélices com duas e seis pás.....	102
Figura 5.8 – Curvas de resposta dos propulsores no sentido positivo.....	103
Figura 5.9 – Curvas de resposta dos propulsores no sentido negativo.....	104
Figura 5.10 – ROVFURG-I – Cilindro - Vistas frontal, lateral, superior e perspectiva.	105
Figura 5.11 – ROVFURG-I – Chassi - Vistas frontal, lateral, superior e perspectiva ..	106
Figura 5.12 – ROVFURG-I – Projeto - Vistas frontal, lateral, superior e perspectiva .	107
Figura 5.13 – ROVFURG-I – Sistema de referência.....	108
Figura 5.14 – Foto do ROVFURG-I.....	109
Figura 5.15 – Estrutura funcional do veículo.....	111
Figura 5.16 – ROVFURG-I – Circuito para comunicação com a superfície.....	111
Figura 5.17 – ROVFURG-I – Circuito para controle dos atuadores.....	113
Figura 5.18 – ROVFURG-I – Filtro para o sinal dos acelerômetros.....	114
Figura 5.19– ROVFURG-I – Circuito de amplificação.....	115
Figura 5.20 – ROVFURG I – Sistema completo.....	115
Figura 5.21 – ROVFURG-I – Teste de interferência.....	116
Figura 6.1 – Sinais obtidos do acelerômetro (direção X do referencial do corpo).....	119
Figura 6.2 – FFT do ruído proveniente do acelerômetro.....	120
Figura 6.3 – Posições obtidas da integração dos sinais do acelerômetro.....	121
Figura 6.4 – Sobreposição dos sinais de posição.....	121
Figura 6.5 – Aquisição do girômetro, sentido positivo.....	123
Figura 6.6 – Análise do ruído do sinal do giroscópio	124
Figura 6.7 – Posições angulares obtidas de integrações dos sinais do giroscópio	125
Figura 6.8 – Sobreposição das curvas de posição angular obtidas com o giroscópio....	125
Figura 6.9 – Aquisição do girômetro, sentido negativo.....	126
Figura 6.10 – Posições angulares obtidas de integrações dos sinais do giroscópio (sentido negativo).....	127
Figura 6.11 – Sobreposição das curvas de posição angular obtidas com o giroscópio (sentido negativo).....	127
Figura 6.12 – Respostas temporais evidenciando atuações dos torques restauradores..	129
Figura 6.13 – Posição angular de guinada (inercial, gráfico superior) e posição na direção X (referencial do corpo)	131
Figura 6.14 – Posição angular de guinada e posição na direção X (experimento 2).....	131

Figura 6.15 – Posição angular de guinada e posição na direção X (experimento 3).....	132
Figura 6.16 – Posição angular de guinada e posição na direção X (experimento 4).....	132
Figura 6.17 – Curvas inerciais no plano horizontal.....	133

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O oceano cobre em torno de dois terços do planeta e influenciará, de forma marcante, o futuro da humanidade. Geralmente ignora-se a importância dele dando atenção a outras questões na superfície terrestre ou até mesmo no espaço. Ainda hoje não se é capaz de explorar toda a riqueza existente no fundo do mar. Robôs subaquáticos podem ajudar a entender melhor o ambiente marinho, protegendo-o e utilizando seus recursos para o bem-estar da humanidade (Yuh, 2000) .

Veículos Submarinos, tele-operados ou autônomos, têm sido desenvolvidos e utilizados ao longo das últimas três décadas para missões militares, pela comunidade científica e pela indústria de exploração de petróleo. Por outro lado, existe a necessidade de desenvolvimento de métodos a custos acessíveis. Robôs submarinos de baixo custo podem servir como ferramentas de observação e monitoramento de instalações submersas (petrolíferas, barragens, etc.) e ambientes aquáticos, além da possível coleta de materiais (sedimentos, plâncton, fauna, etc.) em lugares que poriam em risco a integridade física de mergulhadores. (Barros e Soares, 2002)

Neste aspecto, destacam-se os ROV's (*Remotely Operated Vehicle*), veículos que são operados remotamente da superfície através de um cabo umbilical. Pode-se citar, como exemplo de trabalho brasileiro nesta área, (Barros e Soares, 2002) que trata do desenvolvimento de um veículo híbrido, podendo operar tanto como ROV quanto em modo autônomo AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), isto é, sem ligação alguma com a superfície.

O número reduzido de trabalhos encontrados, isto é, a falta de tecnologia nacional, e o alto custo dos veículos encontrados no exterior, são as principais motivações para esta dissertação.

1.2 OBJETIVOS

Apesar dos veículos subaquáticos possuírem um grande campo de aplicação, vê-se que o Brasil precisa ainda desenvolver tecnologia nesta área. Por isso, o conhecimento e desenvolvimento de técnicas de construção de sistemas mecânicos e eletrônicos nacionais são importantes para a redução dos custos de fabricação destes veículos, de modo a viabilizar o crescimento da tecnologia nacional na área de exploração subaquática. Os objetivos desta dissertação são:

- desenvolver um estudo sobre os principais sensores e atuadores utilizados em veículos subaquáticos;
- desenvolver um estudo sobre os principais veículos subaquáticos (ROVs e AUVs) existentes;
- desenvolver um protótipo funcional de baixo custo, para testes em piscina, tentando utilizar tecnologia nacional;
- analisar os resultados obtidos, apontando as principais dificuldades e possíveis soluções para a construção de um ROV.

Dentre tais objetivos, o foco principal desta dissertação é o projeto e a construção de um protótipo de veículo subaquático, envolvendo a construção de seus propulsores, assim como o desenvolvimento de sua eletrônica embarcada, de modo a viabilizar alguns testes em um tanque de provas. Assim, espera-se contribuir com o grupo de pesquisa em Robótica e Inteligência Artificial (FURG), ampliando o conhecimento na área de construção e controle de veículos subaquáticos.

1.3 BIBLIOGRAFIA COMENTADA

Esta seção apresenta descrições sucintas de alguns trabalhos consultados durante a elaboração da presente dissertação. Alguns destes trabalhos não estão citados nesta

dissertação, porém constituem uma base de conhecimentos importante para o estudo de robótica subaquática.

M. E. Van Valkenburg (1982)

Analog Filter Design

Este livro trata de circuitos analógicos, sendo dividido em 20 capítulos. A maioria destes, abordam circuitos com amplificadores operacionais, função de transferência, construção de filtros analógicos e osciladores. O livro contém dicas práticas para a implementação de circuitos, como por exemplo, valores máximos e mínimos dos componentes para a implementação de filtros de qualidade.

A.F. D'Souza e V.K. Garg (1984)

Advanced Dynamics: Modeling and Analysis

Esse livro trata, de forma clara, da modelagem e da análise de sistemas mecânicos dinâmicos. Assim, ele se constitui numa boa base para a modelagem do veículo como um corpo rígido. O Capítulo 2 é dedicado totalmente à cinemática. Porém, a análise é feita apenas por ângulos de Euler. O Capítulo 4 apresenta um estudo sobre a dinâmica de corpos rígidos, desenvolvendo as equações de movimento dos mesmos.

R.B. Dominguez (1989)

Simulação e Controle de um Veículo Submarino de Operação Remota

Essa dissertação parece ter sido o primeiro trabalho científico brasileiro tratando, especificamente, de veículos subaquáticos não tripulados. O autor apresenta uma proposta de modelo matemático, baseada em modelos apresentados na bibliografia citada. As equações do modelo não são representadas na forma matricial-vetorial. As únicas variáveis consideradas

para os propulsores são as rotações das hélices e as forças e momentos produzidos, ou seja, a dinâmica dos propulsores é desconsiderada. O modelo utilizado para as forças de arrasto e sustentação é bem realista, pois considera os ângulos de ataque, de deriva e de ataque lateral. Também se apresenta um simulador para veículos subaquáticos, denominado SOL (Simulador Off-Line). Nos capítulos finais são desenvolvidos controladores do tipo PD (proporcional e derivativo) e PI (proporcional e integral) para o controle do ângulo de rumo e da profundidade do veículo.

J.P.V.S. Cunha, (1992)

Projeto e Estudo de Simulação de um Sistema de Controle A Estrutura Variável de um Veículo Submarino de Operação Remota

Esse trabalho é focado no controle de veículos subaquáticos. Após uma rápida apresentação do modelo matemático, o autor desenvolve controladores tipo PD (proporcional e derivativo) e PI (proporcional e integral) para controle de posição e orientação. Também desenvolve um sistema de controle a estrutura variável (denominado I/O VS-MRAC). Através de resultados de simulações, mostra que o controlador I/O VS-MRAC segue a trajetória de referência com maior exatidão do que os controladores convencionais.

A. Creus (1993)

Instrumentacion Industrial

Este livro trata da instrumentação de maneira geral. O capítulo 1 explica os principais conceitos utilizados na área como, por exemplo, faixa de operação, erro, zona morta, sensibilidade e outros. O capítulo 2 trabalha com os principais transmissores industriais, nos capítulos seguintes o livro trata das formas de medição de temperatura, vazão, nível, pressão, velocidade, densidade, viscosidade, umidade e outros. Os capítulos finais mostram alguns controladores industriais, assim como a calibração de instrumentos e o controle automático de processos industriais.

T. I. Fossen (1994)*Guidance and Control of Ocean Vehicles*

Esse livro é citado na maioria dos trabalhos que foram pesquisados. O trabalho é bastante abrangente, tratando não só de veículos subaquáticos, mas também de navios e outras embarcações de superfície. O Capítulo 2 apresenta um estudo sobre modelagem, incluindo cinemática e dinâmica. No Capítulo 3 são modelados os distúrbios ambientais representados pelas ondas, correntes marinhas e ventos. O Capítulo 4 é dedicado ao estudo de controle e estabilidade de veículos subaquáticos, apresentando, resumidamente, diversos tipos de controladores. Os capítulos 5, 6 e 7 são dedicados ao estudo de estabilidade e controle de navios e outras embarcações de superfície.

D.Smallwood, R. Bachmayer e L. Whitcomb (1999)*A New Remotely Operated Underwater Vehicle for Dynamics and Control Research*

Este artigo trata da construção de um ROV para ser utilizado como plataforma de desenvolvimento de sistemas de controle, técnicas de navegação e algoritmos de controle para a Johns Hopkins University. O principal objetivo da construção deste veículo é a redução do tempo gasto para o desenvolvimento e testes de novas tecnologias para veículos subaquáticos. O veículo descrito neste artigo pesa 140kg, possui manipuladores e tem controle de seus seis graus de liberdade.

J.Yuh (2000)*Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey*

Este artigo trata de uma pesquisa sobre os principais AUVs disponíveis comercialmente na década de 90. Possui também detalhes dos veículos como os modelos de sensores e atuadores utilizados, assim como seu sistema de processamento.

E. A. Barros e F. J. A. Soares (2002)*Desenvolvimento de um Robô Submarino de Baixo Custo*

Nesse trabalho é feita uma descrição sobre o desenvolvimento de um veículo subaquático de baixo custo. Trata-se de um veículo híbrido, que pode funcionar como ROV ou como AUV. Inicialmente, são descritos os módulos que compõem o casco do veículo, incluindo os materiais utilizados, os pesos e as dimensões. Na continuação, descreve-se o sistema de propulsão e a transmissão de potência e comando desde o barco de apoio até o veículo, considerando a operação no modo ROV. A próxima seção é dedicada à apresentação dos sensores, do sistema de iluminação e da câmera de vídeo. Outra seção é dedicada ao estudo dos tipos de baterias geralmente utilizadas nos veículos autônomos. No final do trabalho encontram-se curvas características dos propulsores, levantadas experimentalmente.

Tavares A. M. (2002)*Um Estudo Sobre Modelagem e o Controle de Veículos Subaquáticos Não Tripulados*

Esta dissertação trata da modelagem e do controle de veículos subaquáticos não tripulados. O trabalho está fundamentado em estudos comparativos entre trabalhos científicos na área de robótica subaquática e na análise de resultados de simulações para três veículos subaquáticos. A modelagem cinemática é descrita por ângulos de Euler, parâmetros de Euler e parâmetros de Rodrigues. Comparam-se as vantagens e desvantagens destes métodos. A modelagem dinâmica inclui a interação da estrutura mecânica do veículo com o meio aquático e a ação dos propulsores sobre o veículo. Desenvolve-se um sistema de controle de posição e orientação usando o método da linearização por realimentação. Resultados de simulações ilustram as características do controlador considerando a existência de incertezas paramétricas e correntes oceânicas.

1.4 RECURSOS UTILIZADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO

Para o desenvolvimento da presente dissertação foram utilizadas, para a pesquisa mostrada nos capítulos iniciais, algumas ferramentas de busca como, por exemplo, sites de busca na internet, site do IEEE e dos fabricantes mencionados. Além disso, foi necessária uma revisão detalhada da bibliografia citada, realizada objetivando-se a compreensão do comportamento dinâmico de um veículo subaquático.

A construção do chassi e do cilindro do veículo foi realizada por uma empresa especializada em montagens de estruturas e dispositivos industriais, situada em Caxias do Sul (Suplay S/A).

Os componentes físicos para a montagem dos propulsores foram adquiridos no mercado de peças de reposição para automóveis e eletrodomésticos.

Para a construção da eletrônica embarcada utilizou-se componentes facilmente encontrados no mercado devido ao seu baixo custo. Os sensores, pertencentes a esta eletrônica, foram adquiridos em um representante nacional da empresa Analog Devices.

O custo total do projeto ficou abaixo de R\$1.000,00 e foi subsidiado pelo Núcleo de Matemática Aplicada e Controle (NuMA) da Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), local onde a presente dissertação foi desenvolvida.

2. ESTUDO SOBRE SENSORES

2.1 INTRODUÇÃO

Sensores são componentes capazes de converter grandezas físicas (pressão, aceleração, rotação, calor, vibração, etc.) em sinais elétricos, sendo de extrema importância para o correto funcionamento do controle a ser aplicado em sistemas físicos.

A grande evolução na área de sensoriamento ocorreu com uma técnica conhecida como *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS). Esta é responsável por integrar elementos mecânicos, sensores, atuadores e eletrônica em um substrato de silício comum, através de técnicas de microfabricação. Enquanto os componentes eletrônicos são fabricados usando processos de circuitos integrados, componentes micromecânicos são fabricados usando processos compatíveis com micromáquinas que esculpem o silício ou adicionam camadas estruturais formando dispositivos mecânicos ou eletromecânicos, possibilitando assim a construção de sistemas completos em um único chip.

Suas vantagens, além do baixo custo devido a fabricação utilizar técnicas em série similares às utilizadas para a concepção de circuitos integrados, são o baixo consumo, pequeno tamanho, boa confiabilidade, longo MTBF (*Mean Time Between Failures*) e baixa sensibilidade a fatores prejudiciais externos (Cross Bow Technology Inc., Rate Gyro Application Note).

Para que estas vantagens possam ser plenamente aplicadas, a escolha dos sensores deve ser feita de modo que eles possuam características adequadas a cada tipo de aplicação. Alguns fatores devem ser levados em conta para a escolha de um sensor, são eles (Creus, 1998):

- Exatidão ou Grau de conformidade de um valor conhecido com um valor medido, geralmente expressa em termos de porcentagem em relação ao máximo valor que pode ser medido em uma determinada escala;
- Faixa de medição ou *range*, isto é, a região entre os limites nos quais a grandeza é medida, recebida ou transmitida (expressa em limite inferior e superior);
- Sensibilidade, ou seja, a razão entre a variação na saída e a variação da entrada

depois que o regime permanente é alcançado;

- Resolução, ou seja, o menor intervalo possível entre duas medidas discretas adjacentes. Trata-se da menor variação no sinal de entrada que resultará numa variação mensurável na saída;

- Linearidade, característica que ocorre quanto a curva de saída de um sensor se aproxima de uma linha reta;

- Faixa de temperatura na qual o sensor manterá suas características;

- Tensão de offset, isto é, a tensão de saída mesmo que o sensor esteja medindo uma grandeza nula, muito importante nos casos de sinais que serão integrados, pois podem acumular erros excessivos;

- Repetitividade ou a máxima diferença do sinal lido, para várias leituras repetitivas de grandezas idênticas.

Além destes fatores deve-se observar o sinal de saída do sensor, pois dependendo do tipo de saída talvez exista a necessidade da construção de circuitos adicionais como condicionadores de sinais, que além de acarretar em um custo adicional podem inserir interferências à leitura. A resposta em frequência do sensor também é importante e deve ser compatível com a velocidade dos sistemas dinâmicos.

Pode-se dividir os sensores para veículos subaquáticos em três grupos (Yuh, 2000):

- Sensores de navegação:

São responsáveis por medir grandezas físicas do veículo, fornecendo basicamente dados de inclinação, em relação aos três eixos inerciais (rolamento, arfagem e guinada, ou *roll, pitch e yaw*), acelerações lineares e profundidade, essenciais para a navegação e o controle do veículo.

- Sensores de missão:

Realizam a leitura de dados específicos do ambiente, os quais são escolhidos dependendo da missão. Os sensores mais utilizados servem para fornecer dados de temperatura, composições químicas, captura de imagens através de câmeras ou sonares e *scanners lasers*.

- Sensores de sistema:

São utilizados para o diagnóstico do veículo, fornecendo dados internos ou externos ao controlador. São responsáveis também pela compensação de não linearidade dos sensores de navegação e monitoramento dos atuadores.

2.2 SENSORES DE NAVEGAÇÃO

Os sensores de navegação são essenciais para o bom funcionamento do controle, pois deles dependem as ações tomadas pelo controlador.

A seguir serão explicitados alguns dos principais sensores de navegação existentes atualmente.

2.2.1 Acelerômetro

Suas principais funções, em um sistema de navegação, são as medições dinâmicas de acelerações lineares e angulares de um corpo. Porém, em situações estáticas é possível também obter medições de inclinação. Com a medição destas acelerações pode-se calcular a inclinação em estática e em dinâmica, a partir de integrais, a velocidade e a posição, variáveis importantes para o controle e a navegação do veículo.

Existem algumas opções de arranjos físicos de acelerômetros com os quais pode-se adquirir estes diferentes tipos de dados. Ao se utilizar, por exemplo, três sensores dispostos perpendicularmente entre si e paralelos aos eixos x , y e z , para medições estáticas, pode-se calcular os ângulos de inclinação do corpo ou, em situações dinâmicas, medir as acelerações lineares do corpo. Outra possibilidade de arranjo é utilizar um par de sensores em cada eixo, dispostos igualmente distantes da origem, na direção perpendicular ao eixo analisado. Assim, a média de aceleração medida neste par de sensores corresponderá à aceleração linear e a metade da diferença entre eles à aceleração angular.

O princípio de funcionamento de um acelerômetro, assim como o de alguns outros sensores, pode ser baseado em um sistema massa-mola.

Observando o esquema da figura 2.1 pode-se dizer que este possui duas equações governantes. A primeira (2.1), regida pela Lei de Hooke, diz que a força de restauração da mola, em sua região linear, é proporcional à deformação exercida sobre a mesma. A segunda (2.2) é baseada na Segunda Lei de Newton, mostrando que a força resultante é igual à massa multiplicada pela aceleração da mesma. Igualando-se estas duas equações, encontra-se a (2.3), a qual determina a aceleração instantânea simplesmente pela medição do deslocamento da mola. Assim os elementos essenciais deste sistema são: uma massa e um elemento elástico. Sob a ação de uma aceleração, o movimento da massa causa deformações no elemento elástico. As deformações são convertidas em sinais elétricos mediante transdutores como, por exemplo, strain gauges, piezoelétricos, indutivos, capacitivos e outros.

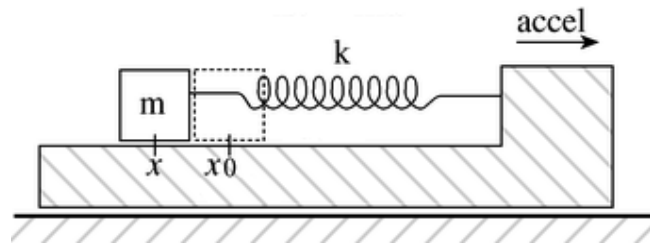


Figura 2.1 – Acelerômetro massa - mola

$$F = k \cdot x \quad (2.1)$$

$$F = m \cdot a \quad (2.2)$$

$$a = \frac{k \cdot x}{m} \quad (2.3)$$

Além do sistema massa-mola, os acelerômetros também podem ser baseados em outros princípios. Pode-se, por exemplo, obter um valor de aceleração medindo o ângulo de deslocamento, em relação ao eixo de atuação da gravidade, de um pêndulo simples dentro de um corpo (figura 2.2a) ou medindo a inclinação do fluido em um compartimento (figura 2.2b).

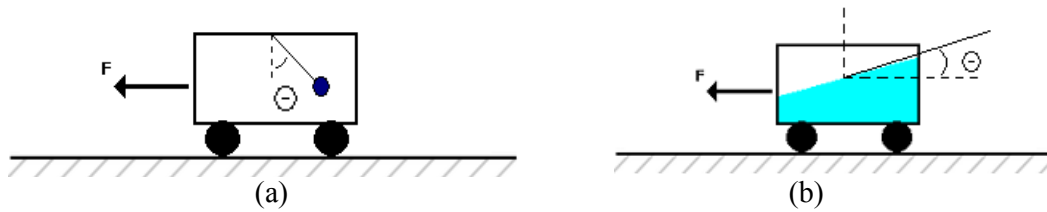


Figura 2.2 – (a)Acelerômetro por pêndulo, (b)Acelerômetro por fluido

Como estes princípios de medição de ângulo baseiam-se na ação da força da gravidade, que atua sempre no eixo vertical, as medições de aceleração em superfícies inclinadas tornam-se trabalhosas. Por esse motivo, o sistema massa-mola é mais utilizado.

Atualmente, com o invento das micromáquinas, pode-se forjar, em silício, sistemas mecânicos complexos e coloca-los dentro de um chip. Este fato representou muito para este tipo de sensor.

Um exemplo disto é a linha de série ADXLxxx, fabricados pela Análoga Devices, que além do próprio sensor inclui também circuitos de condicionamento de sinais (amplificadores, filtros, etc...) em único invólucro, fato que proporciona um sensor de baixo custo e altamente confiável (Weingberg, 1999).

O princípio de funcionamento do CI, responsável por detectar a aceleração, está baseado também em um sistema massa mola, mas com algumas particularidades.

O sistema observado na figura 2.3a é composto de uma massa central, com um grau de liberdade, que está fixada ao chip através de barras que, além de fornecerem sustentação mecânica, trabalham como molas, as quais estão ancoradas ao substrato através de dois pontos de fixação situados nas extremidades. Esta massa possui várias saliências chamadas de “dedos”. Cada dedo se posiciona entre um par de placas, que se comportam como extremidades de capacitores paralelos diferenciais. Também se observa que o sistema possui algumas placas, no total de 12, mais salientes. Estas são chamadas de placas de teste e através delas é possível a aplicação de uma tensão elétrica que gerará um deslocamento conhecido na massa central, testando assim o funcionamento do sistema (Weingberg, 1999).

Pode-se visualizar a ampliação de parte do componente na figura 2.3b, com algumas medidas. Vale ressaltar que estas medidas e a disposição do sistema massa-mola variam muito de acordo com a tecnologia empregada na construção do chip. Por possuir tamanho reduzido, este dispositivo mecânico, é de baixo consumo e pode trabalhar em altas frequências,

possibilitando sua utilização nas mais diversas situações.

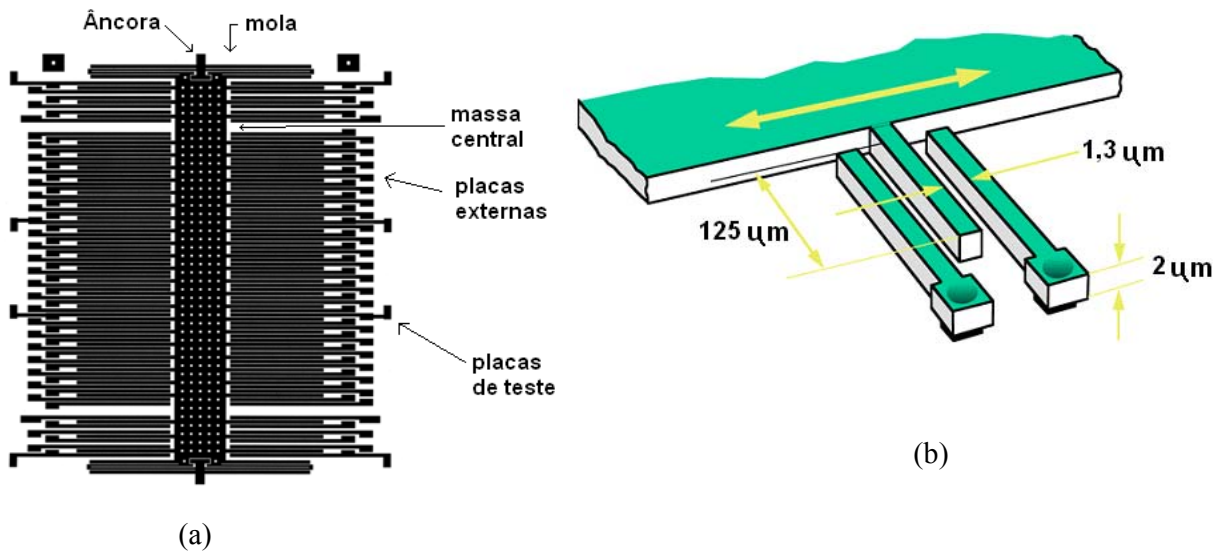


Figura 2.3 – (a) Sistema mecânico interno do acelerômetro, (b) Algumas dimensões internas do acelerômetro. (Weingberg, 1999)

Para medir o deslocamento da massa central são inseridos, nas placas, sinais de excitação, conforme o diagrama esquemático da figura 2.4. Estes sinais, extraídos da massa central, são de onda quadrada, em antifase, e com frequência igual a 100kHz. Quando o chip estiver sem efeito de aceleração no eixo de movimentação da massa central, os dedos estarão posicionados no centro das placas, formando capacitâncias idênticas entre o dedo e cada uma delas e neste caso, o sinal medido na massa central será nulo. Se o chip for submetido a alguma aceleração em seu eixo de movimentação, a massa central se deslocará, alterando os valores dos capacitores diferenciais, não anulando mais o sinal de saída. Este sinal será tratado pelo sistema de condicionamento gerando assim um sinal elétrico proporcional à aceleração.

Neste processo também pode ser utilizada, para excitação das placas, tensão DC ao invés de frequência. Mas, apesar do condicionamento ser mais simples, é também mais susceptível a ruídos.

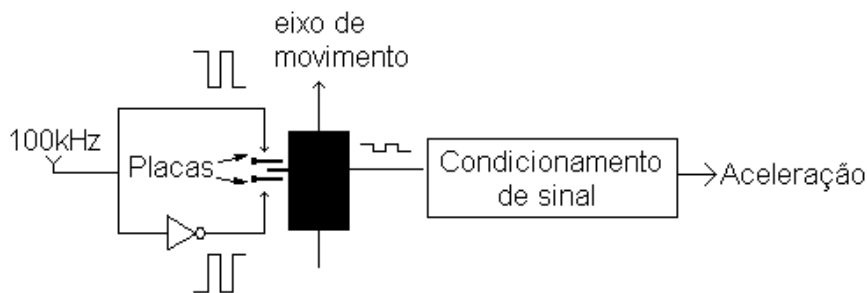


Figura 2.4 – Diagrama interno de um acelerômetro

No mercado, atualmente existem chips que possuem, em um mesmo encapsulamento, este tipo de sensor utilizado para a medição de aceleração em dois eixos, que é o caso do CI ADXL250 da Analog Devices, visualizado na figura 2.5a. Percebe-se, nesta figura, que é utilizada a mesma massa, com dois graus de liberdade, movimentando-se em eixos defasados de 90 graus. Uma ampliação, mostrando o posicionamento das molas, pode ser visualizada na figura 2.5b.

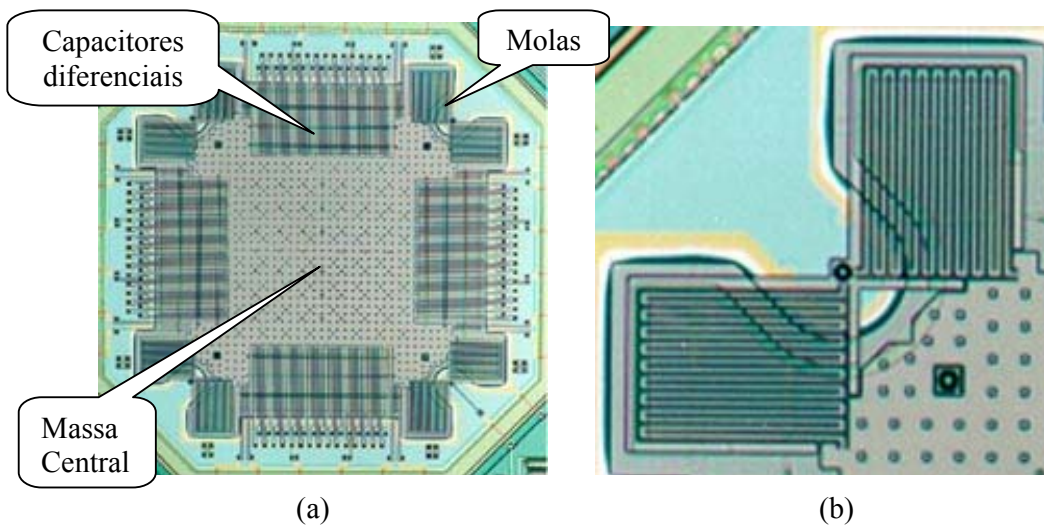


Figura 2.5 – (a)Acelerômetro de dois eixos, (b) Molas do acelerômetro (Weingberg, 1999)

De maneira geral, pequenos erros cometidos na instalação, escolha ou tratamento dos sinais como, por exemplo, erros de alinhamento mecânico ou erros de offset, podem acarretar problemas sérios devidos ao fato dos sinais serem utilizados como entradas de integradores,

para a determinação de velocidades e posições. Assim, alguns fabricantes recomendam o uso de técnicas de correção de posição via GPS em curtos intervalos de tempo, tornando os dados mais confiáveis (Cross Bow Technology Inc., Accelerometer Application Note).

2.2.2 Giroscópios

Dentre os princípios utilizados em giroscópios, para a detecção de velocidade angular, destacam-se a utilização da inércia de um corpo e a comparação de fase de um feixe de luz. O primeiro normalmente utiliza técnicas de microfabricação, composto de uma massa com dois graus de liberdade (x e y). Esta oscila continuamente em movimento linear, por exemplo, na direção do eixo x. Ao rotacionar o sensor, em torno do eixo z, haverá uma força atuante nesta massa na direção do eixo y. Isto ocorre devido à tendência inercial do centro de massa do componente permanecer na mesma direção anterior a rotação, como é mostrado na figura 2.6.

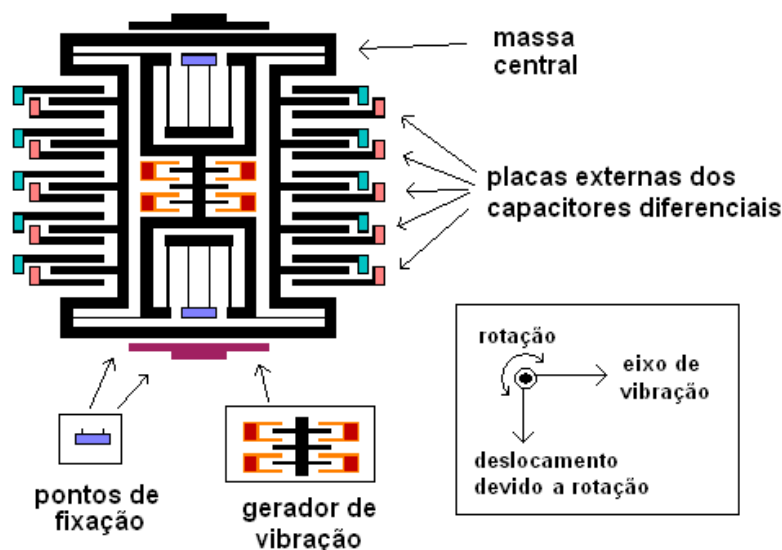


Figura 2.6 – Arranjo construtivo interno de um giroscópio comercial

Em situações práticas, como é o caso de sensores comerciais, são utilizadas princípios construtivos similares ao do acelerômetro descrito no item anterior. Na figura 2.6, pode-se observar a mesma disposição de placas capacitivas, o que fará com que o sensor consiga medir a força gerada devido ao giro. O sensor possui um gerador de vibração que mantém a

massa oscilando na direção de seu eixo de vibração. Ao rotacionar o sensor, surgirá um deslocamento em outra direção (eixo de deslocamento) devido a tendência inercial da massa.

A segunda tecnologia utilizada para giroscópios, de nome FOG (Fiber Optic Gyro), opera usando um anel ótico e um laser para medir taxas de rotação. Baseando-se em um princípio físico, onde a velocidade da luz é constante, um feixe de luz laser é dividido e inserido, em direções opostas, em um anel ótico. Cada sinal, após percorrer todo o anel, será reconstituído em um detector. Considere-se uma rotação do sistema no sentido horário, representada na figura 2.7. Não haverá diferença alguma nos feixes de lasers se os mesmos forem analisados individualmente, mas interferências são geradas ao se recombinar os sinais. Ao rotacionar este anel, percebe-se que o feixe de laser, que foi inserido no sentido anti-horário, percorreu uma distância ligeiramente menor do que o laser que percorreu o sentido horário (Cross Bow Technology Inc., Rate Gyro Application Note).

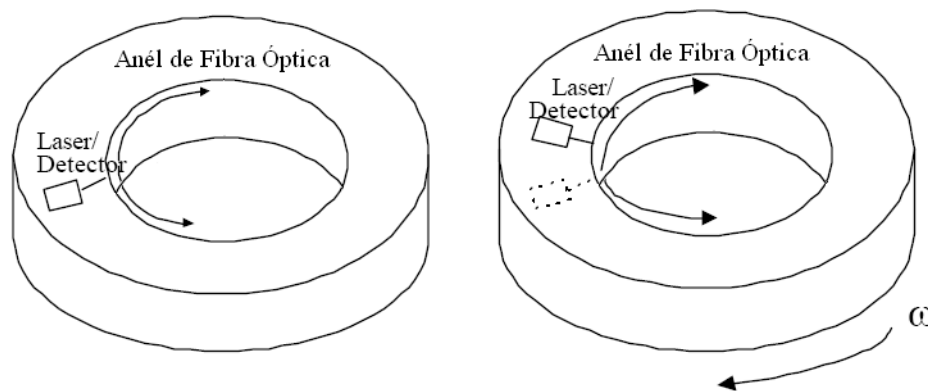


Figura 2.7 – Giroscópio de Fibra óptica

Pode-se então ler, no detector, qualquer valor de luminosidade desde a combinação destrutiva do sinal, onde um sinal anula o outro, até a combinação construtiva do mesmo, o que acarreta em uma luminosidade intensa, dependendo da velocidade de rotação a que o sistema foi exposto.

Este princípio de funcionamento se torna mais interessante que o anterior, pois o sistema não possui peças móveis, além de ter uma alta estabilidade em função do tempo e da temperatura. Confiabilidade, longo MTBF e baixa sensibilidade a variáveis do ambiente constituem-se também em fatores favoráveis à sua utilização (Cross Bow Technology Inc., Rate Gyro Application Note).

2.2.3 Inclinômetros

São sensores responsáveis por medirem ângulos de inclinação de corpos ou superfícies (roll e pitch no caso de veículos subaquáticos). Utilizam como referência o eixo de atuação da aceleração da gravidade. Infelizmente, são muito susceptíveis a ruídos causados por seus movimentos e, portanto, são utilizados na maioria dos casos em situações estáticas (Mangan, Wang e Wu , 2002).

Pode-se medir o ângulo de inclinação de um corpo basicamente de três formas:

- Pêndulo

Através de um pêndulo simples, mede-se o ângulo entre o pêndulo e o eixo perpendicular à superfície, como ilustrado na figura 2.8.

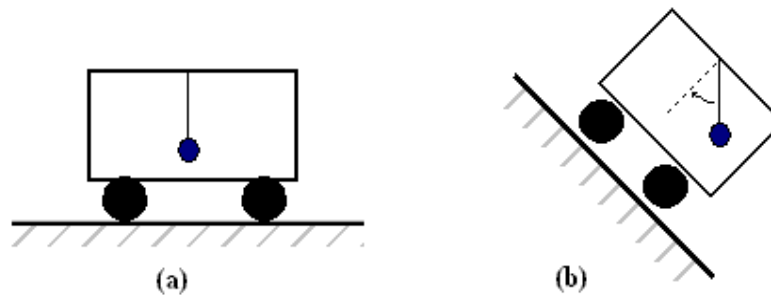


Figura 2.8 – Princípio de medição de inclinação: (a) Corpo na horizontal, (b) Corpo Inclinado.

Comercialmente encontram-se encapsulamentos que possuem internamente sistemas próximos ao da figura 2.9, consistindo em um peso preso ao eixo de um potenciômetro linear de precisão (saída analógica) ou um encoder (saída digital), proporcionando uma medição de 360°.

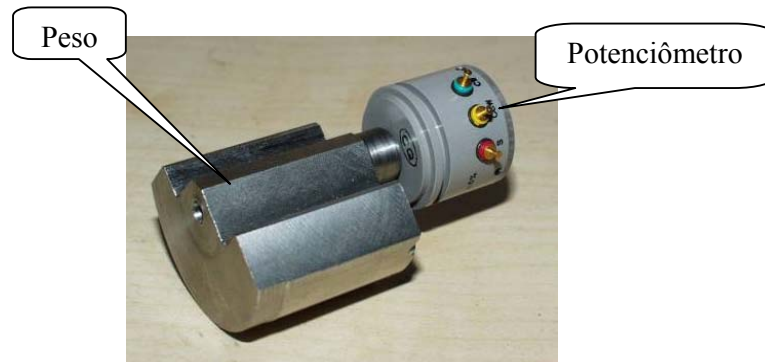


Figura 2.9 – Inclinômetro mecânico (pêndulo e potenciômetro)

- Fluido e bolha de gás

Este sensor opera com uma bolha de gás suspensa em um fluido eletrolítico. A bolha e o fluido estão contidos em uma ampola de vidro, conforme pode-se observar na figura 2.10a (Tiltmeter Basics, 2002).

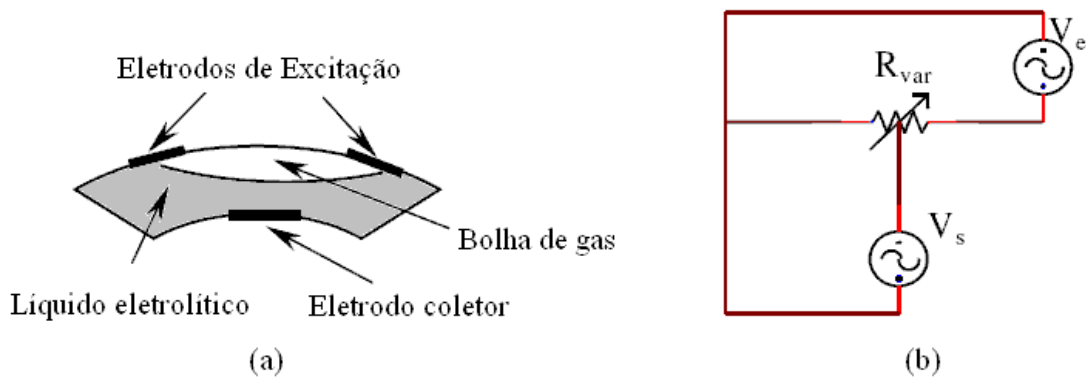


Figura 2.10 – (a) Inclinômetro com fluido e bolha de gás, (b) Circuito equivalente.

Na zona de medição o fluido está em contato com os dois eletrodos de excitação, de modo que uma variação na posição do sensor faz variar a resistência entre cada um dos eletrodos de excitação e o eletrodo coletor. O esquema elétrico simplificado, figura 2.10b, mostra a ampola como se fosse um potenciômetro, no qual é aplicada uma tensão nos eletrodos de excitação (V_e) e é medida uma tensão (V_s) no eletrodo coletor, proporcional à inclinação. Comercialmente, para uma maior precisão, é utilizado um circuito com Ponte de

Wheatstone, pois a variação de resistência é pequena.

Como mencionado, o fluido precisa estar em contato com os dois eletrodos, fato que implica em uma limitação da faixa de medição em torno de 50° positivos ou negativos.

- Acelerômetros

Pode-se utilizar também acelerômetros para a medição de ângulos. Neste caso, mede-se o valor da aceleração paralela a um dos eixos que compõem o plano que possui a direção de interesse para a medição. Se este eixo estiver paralelo à superfície, isto é, horizontal, a aceleração medida será zero. Sofrendo alguma inclinação, este ângulo será medido através da alteração das acelerações (Cross Bow Technology Inc., Accelerometer Application Note).

A inclinação também pode ser obtida adotando-se a medição da aceleração perpendicular ao eixo. Neste caso, para uma inclinação de zero grau, o acelerômetro estará medindo a aceleração igual a 1g.

Como se percebe, os três tipos de sensores citados possuem como forte inconveniente a dependência da aceleração da gravidade. Este fato acarreta elevados erros se o veículo estiver sofrendo alguma aceleração linear. Supondo-se, por exemplo, que no caso do pêndulo, o veículo estivesse sofrendo uma aceleração de 1g, isto é, uma aceleração no plano horizontal de igual magnitude à aceleração da gravidade, o ângulo medido, neste caso, seria igual a 45°. Trata-se de um erro muito grosseiro, devendo-se ao acoplamento natural existente entre a aceleração da gravidade e as acelerações lineares do corpo.

2.2.4 Magnetômetros

São responsáveis por encontrar o rumo (yaw) do corpo em relação à terra. O campo magnético da terra lembra uma simples barra magnética. Este dipolo magnético, figura 2.11a, possui suas linhas de campo partindo do pólo sul geográfico e terminando próximo do pólo norte geográfico. Estes pontos são referidos como pólos magnéticos. As linhas deste campo variam em densidade e direção ao redor do globo terrestre. Ao redor da América do Norte, por exemplo, as linhas entram formando um ângulo de aproximadamente 70° com a superfície terrestre. Este ângulo é chamado de inclinação, e é mostrado na figura 2.11b. A direção e densidade das linhas podem ser representadas pelas suas componentes em 3 eixos

perpendiculares, sendo denominadas H_x , H_y e H_z , correspondentes aos eixos x , y e z respectivamente. As informações de H_x e H_y são suficientes para determinar o rumo do corpo (Honeywell, Application Notes).

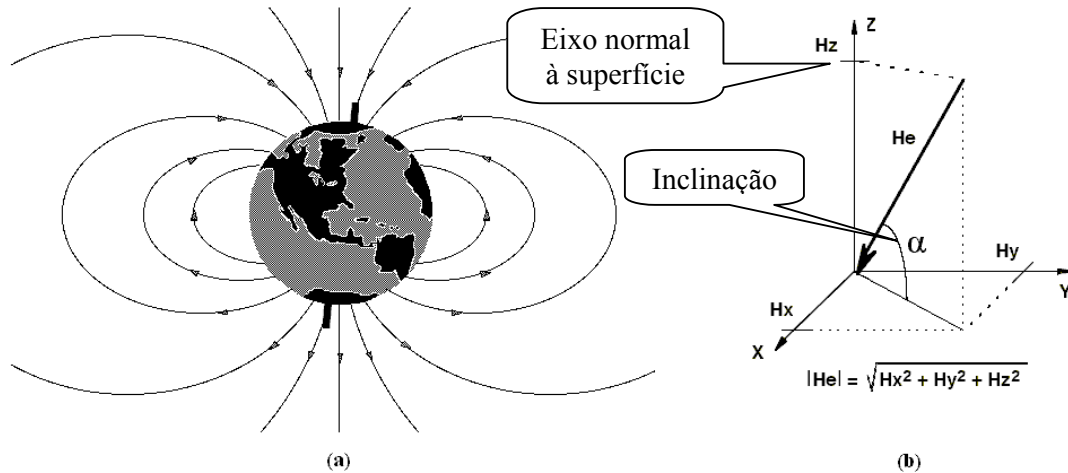


Figura 2.11 – (a) Campo magnético terrestre, (b) Decomposição deste campo

Vale ressaltar que os pólos geográficos são diferentes dos pólos magnéticos. Os pólos geográficos são definidos pelo eixo sob o qual a terra gira enquanto que os pólos magnéticos encontram-se em lugares distintos, onde o campo magnético possui direção vertical em relação à superfície. A discrepância entre os pólos magnéticos e geográficos é aproximadamente $11,5^\circ$. Esta diferença é chamada de declinação e dependerá da posição em que se realiza a medição. Além da declinação, o campo magnético possui algumas anomalias naturais, causadas por grandes depósitos de materiais magnéticos que alteram a direção das linhas. Felizmente isto se encontra mapeado, possibilitando a correção em função da posição no globo terrestre. A figura 2.12 mostra um exemplo de carta de declinação, encontrada no site do Departamento de Defesa Americano. Observa-se que ao posicionar um magnetômetro no estado do Rio Grande do Sul, exatamente apontado para o pólo norte geográfico, este estaria medindo de -20° a -10° , variando de acordo com a posição do instrumento.

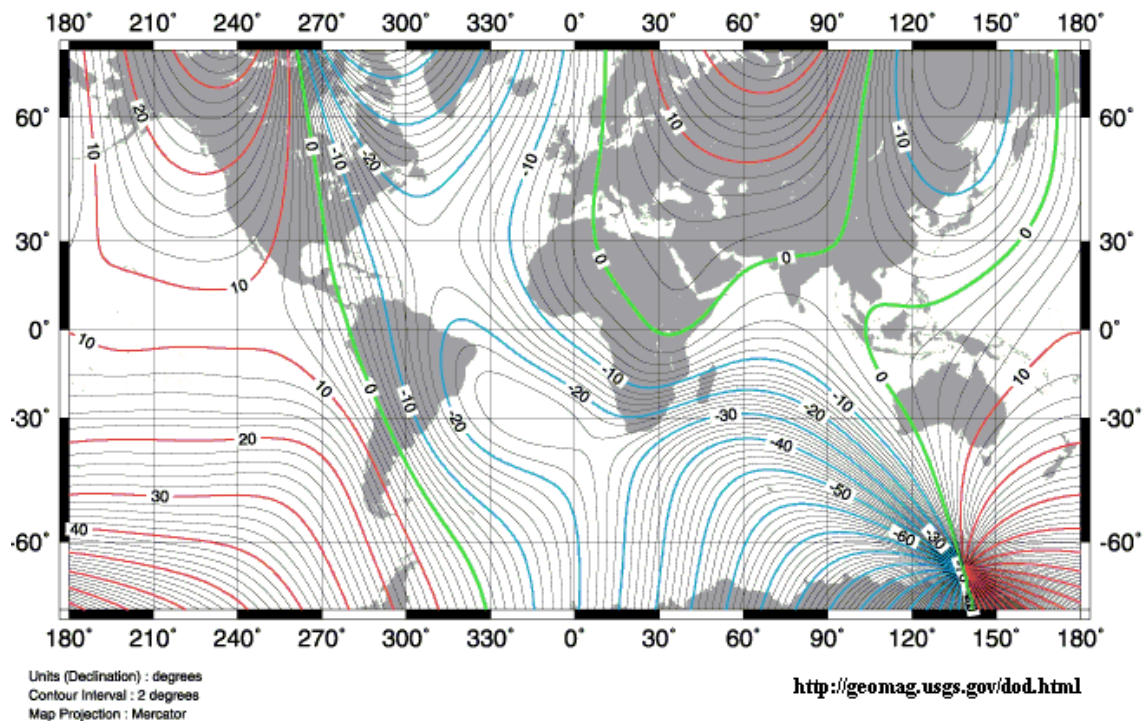
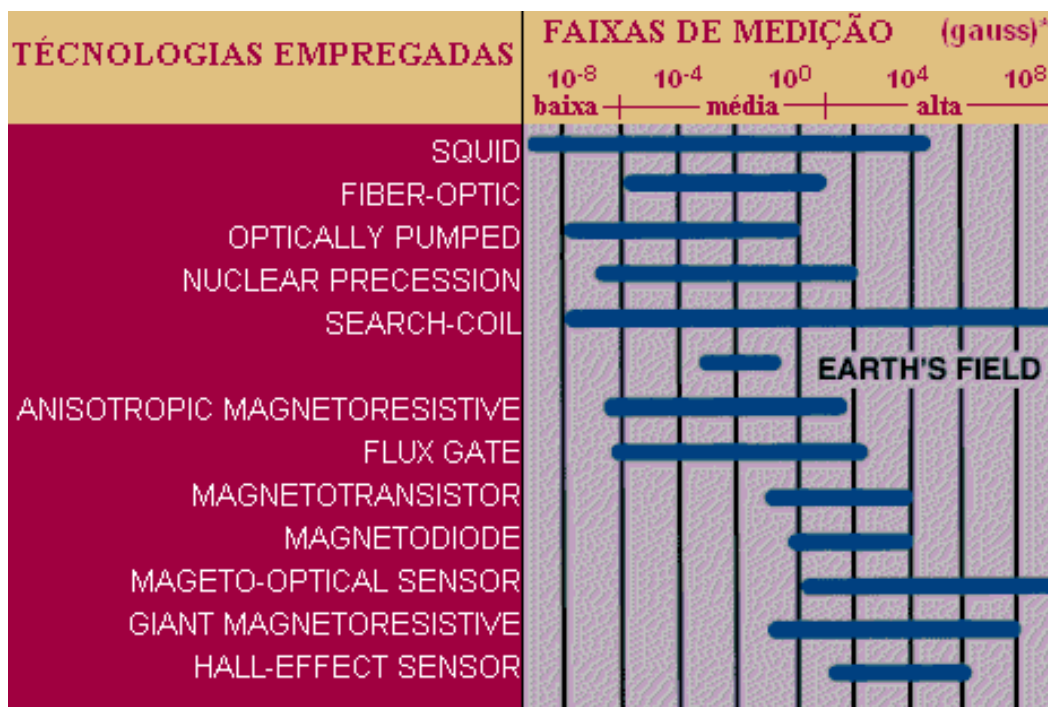


Figura 2.12 – Carta de declinação - Departamento de Defesa Americano

Os sensores magnéticos são utilizados para detecção do campo magnético e, a partir deste, pode-se determinar a variação da direção, rotação de um corpo ou, até mesmo, corrente elétrica. Apesar dos sensores serem de uso difícil, são capazes de medir com precisão e confiabilidade (Caruso e Withanawasam, 1999).

Pode-se classificar a tecnologia empregada para a construção deste tipo de sensor de acordo com a faixa de medição do mesmo (baixa, média ou alta). Neste caso é considerado como baixa a detecção de campos inferiores a 10^{-10} T ($1\mu\text{G}$), como média na faixa de 10^{-10} T à 10^{-3} T (faixa de nosso maior interesse, pois está contido o campo magnético da terra) e como altas os superiores a 10^{-3} T (10G). A tabela 2.1 faz uma comparação entre algumas tecnologias utilizadas e suas faixas de medição (Caruso e Withanawasam, 1999).

Tabela 2.1 – Faixas de medição de tecnologias existentes para magnetômetros



* Note: 1 gauss = 10⁻⁴ tesla = 10⁵ gamma

Sensores que operam na faixa baixa são volumosos, caros e necessitam de cuidados especiais para evitar que o campo da terra não exceda sua faixa de operação. São utilizados em aplicações médicas e equipamentos militares.

Segundo Caruso, Bratland, Smith e Schneider, 1998, o sensor capaz de trabalhar com a maior sensibilidade é o SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*). Desenvolvida por volta de 1962, esta tecnologia proporciona a medição desde alguns femtotesla (10⁻¹⁵ T) até 9 T, o que é essencial para aplicações médicas, pois o campo magnético da mente humana está compreendido na faixa de décimos de femtotesla. Para se fazer uma comparação, o campo magnético da terra situa-se a aproximadamente 50µT (0,5G). O principal problema no uso desta tecnologia, até o momento, é a necessidade de baixas temperaturas, por volta de 4 K (-269,15°C). Porém, já estão em desenvolvimento novas versões para operação em temperaturas mais altas.

Search-Coil, também bastante utilizada, é baseada na lei de faraday de indução que diz que a tensão gerada em uma espira é proporcional à variação do campo magnético. Esta tensão gera uma corrente também proporcional à variação do campo. A sensibilidade deste sensor depende da permeabilidade, da área e do número de espiras. Por detectar variações no

campo magnético, esta tecnologia não pode ser empregada em medições estáticas ou quase estáticas. De maneira geral são baratos e de fácil fabricação e são utilizados em controle de tráfego, lombadas e etc. (Caruso, Bratland, Smith e Schneider, 1998).

Outras tecnologias que operam nesta faixa, como *nuclear precession*, *optically pumped* e *fiber-optic*, são utilizadas na fabricação de sensores de precisão para uso em laboratório e aplicações médicas.

A faixa de sensibilidade de maior interesse para a medição do rumo (guinada ou *yaw*) em veículos subaquáticos é a média, pois responde bem ao campo magnético da terra.

Os sensores baseados na tecnologia *flux-gate* são os mais utilizados para sistemas de navegação, tendo sido inicialmente desenvolvidos por volta de 1928 e posteriormente refinados para uso em submarinos militares. O dispositivo básico, chamado de dispositivo de segunda harmônica, consiste em dois enrolamentos, primário e secundário, em um núcleo ferro-magnético de alta permeabilidade, conforme representado na figura 2.13. A indução entre os dois enrolamentos muda em função de campos magnéticos externos. Para a medição, é inserido um sinal de excitação de 10kHz, causando uma oscilação entre os pontos de saturação nesta mesma frequência (Caruso, Bratland, Smith e Schneider, 1998).

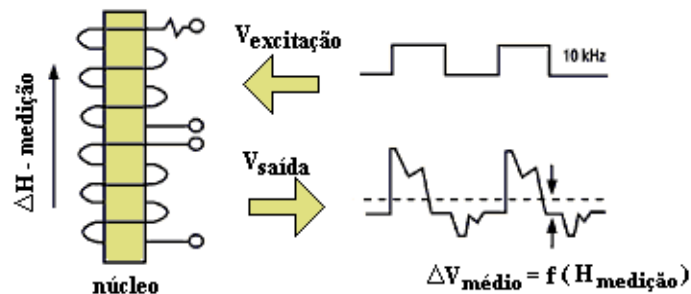


Figura 2.13 –Tecnologia flux-gate

O sinal médio de saída é afetado por campos magnéticos externos. Para ser utilizado, o sinal de saída passa por um condicionamento de sinais, que é composto por um demodulador, com detector sensível à fase, e um filtro passa baixa. Outra maneira de analisar o princípio de funcionamento deste tipo de sensor é medir a facilidade ou dificuldade de saturação do núcleo, que será alterada por mudanças no campo magnético externo.

Com esta tecnologia, pode-se medir por volta de dezenas de microgauss, assim como a direção e magnitude de campos magnéticos estáticos. A máxima frequência de operação deste sensor será de 1kHz, limitada pela frequência de excitação de 10kHz.

A tecnologia mais utilizada para a construção de sensores comerciais atualmente é a que utiliza o AMR (*Anisotropic Magnetoresistive*). O efeito magnetoresistivo em metais ferromagnéticos foi primeiramente observado no ano de 1856. Esta tecnologia teve que esperar mais de cem anos para que pudesse ser produzido um filme capaz de ser utilizado em sensores. O material magnetoresistivo (AMR) pode assumir vários formatos, produzindo desde sensores de navegação para veículos até cabeças de leitura de dispositivos magnéticos de alta densidade. Podem ser usados para medir campos magnéticos estáticos, assim como suas intensidade e direção. O elemento magneto-resistivo é fabricado depositando-se uma fina camada de *nickel-iron* sobre o silício, podendo ser modelado como uma fita resistiva. A propriedade do filme de AMR causa neste uma variação em sua resistência entre 2% e 3%, na presença de um campo magnético. Tipicamente, são colocados quatro elementos AMR em uma configuração de Ponte de Wheatstone (figura 2.14) possibilitando a leitura de magnitude e direção ao longo de um único eixo. A maioria dos sensores possui uma banda passante de 1 a 5MHz, pois a reação do AMR é muito rápida e não é limitada por número de espiras ou frequências de operação. Sua vantagem é que, por ser fabricado em silício, pode-se aglutinar, tanto o sensor quanto circuitos eletrônicos diversos, em um mesmo encapsulamento. Outras Vantagens são: baixo custo; alta sensibilidade; imunidade a ruídos; altamente adaptável (Caruso e Withanawasam, 1999).

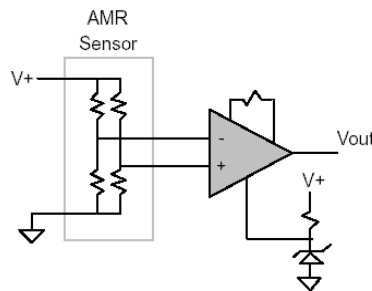


Figura 2.14 – Utilização do sensor AMR

Sensores magnéticos requerem cuidados extra em sua instalação. Uma montagem incorreta pode fazer com que eles sejam incapazes de medir campos magnéticos externos com precisão. Em um sistema de navegação, existe interesse somente em medir o campo da Terra, para o cálculo do rumo, e não os campos gerados internos ao veículo, como os gerados por circuitos eletrônicos, baterias ou motores. Deve-se levar em conta dois pontos para aumentar a exatidão das medidas: os materiais e as distâncias (Cross Bow Technology Inc., Inertial Application Notes).

Sempre que possível, deve-se utilizar materiais não magnéticos próximo aos sensores, pois mesmo pequenos componentes como porcas, parafusos ou arruelas podem interferir nas medições. Um teste prático e fácil pode ser realizado, para a identificação deste tipo de material, somente aproximando o componente a um ímã. Se o componente não for atraído pelo ímã ele não é construído de material magnético e não interferirá nas medições, caso contrário, tenta-se não utilizar o componente.

Em alguns casos, se torna impossível eliminar completamente a utilização de materiais magnéticos próximos ao sensor. A melhor forma de diminuir a interferência, nestes casos, é colocar o componente o mais distante possível do sensor. Vale ressaltar que os campos magnéticos perdem rapidamente sua concentração com a distância. Assim, mesmo um incremento modesto da distância entre os sensores e os componentes magnéticos, trará um grande efeito benéfico à medida fornecida por este sensor. Há ainda, em alguns sensores disponíveis no mercado, uma espécie de ajuste, para descontar interferências de materiais magnéticos fixos ao redor do sensor.

2.2.5 Sensores de Pressão

Existe uma ampla variedade de métodos e instrumentos para medir pressões. Tradicionalmente, a indústria de sensores tem confiado em diafragmas, foles, tubos de Bourdon, entre outros, acoplados a sistemas de conversão mecânicos, pneumáticos e elétricos. A conversão elétrica iniciou com o desenvolvimento de extensômetros elétricos resistivos (os *strain gauges*), notáveis por sua confiabilidade, ampla faixa de medição, mas que inicialmente apresentava um alto custo (Creus, 1998).

Os avanços na tecnologia de semicondutores nos últimos tempos também contribuíram de forma substancial na ampliação da competitividade de sensores baseados em *strain gauges*, ao ponto de que em catálogos mais modernos, esta tecnologia tem substituído, praticamente, os métodos tradicionais, exceto nos casos onde o requisito fundamental é o baixo custo, sem a necessidade da utilização do sinal para controle.

Os sensores de pressão são utilizados para a medição indireta de profundidade, assim como detecção de vazamentos internos de cilindros pressurizados.

Pode-se medir pressão de quatro formas distintas (Creus, 1998):

- *Pressão absoluta*

É a pressão medida em relação ao zero absoluto, isto é, o vácuo perfeito. É utilizada para medições de pressões inferiores à da atmosfera (vácuo) e de altitude.

- *Pressão relativa*

Em alguns casos não nos interessa a pressão absoluta e sim a diferença entre a pressão do sistema e a pressão atmosférica local. Esta diferença será responsável por aplicar forças ao sistema. É utilizada na maioria dos processos industriais, pois seus sensores são mais econômicos e de simples fabricação.

- *Pressão relativa à atmosfera*

Trata-se da medição da pressão também em relação à pressão atmosférica, mas com um valor fixo de 101.3250 kPa. É utilizada em medições onde seja preciso uma referência fixa como, por exemplo, para medições de pressão sanguínea, caldeiras, circuitos de lubrificação a óleo e etc.

- *Pressão diferencial*

Diferença entre pressões medidas em pontos distintos de um sistema, com base em um mesmo referencial.

2.3 SENSORES DE MISSÃO

2.3.1 Sonares

Os sonares são sistemas escolhidos para missões do tipo mapeamento do solo. Utilizam transdutores para transformar pulsos elétricos em ondas sonoras e vice-versa. Em um típico sonar, o transdutor converte pulsos curtos de alta tensão em vibrações mecânicas. Isto cria uma onda sonora que será transmitida através da água, na direção desejada, de acordo com as características de irradiação do transdutor. À medida que esta onda sonora encontra

obstáculos em seu caminho (peixes, pedras, fundo e etc.), parte da energia irradiada é refletida ao transdutor como um eco. Este sinal refletido é recebido, com menor potência, pelo transdutor e convertido em sinais elétricos que serão amplificados e enviados a um processador, figura 2.15. Como a velocidade do som, na água, é aproximadamente 1463m/s (4800ft/s) e varia com alguns fatores que também pode ser medidos, é possível determinar a distância do transdutor ao obstáculo a partir da medição precisa da diferença de tempo entre o pulso transmitido e o recebido (Airmar Technology Corporation, 2000).

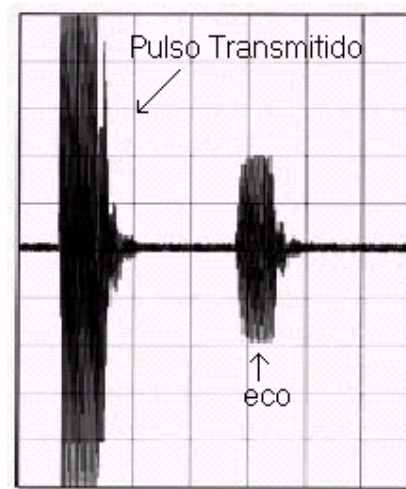


Figura 2.15 – Pulsos transmitido e recebido por um sonar

Para a maioria das aplicações submarinas, transdutores piezoelétricos apresentam a melhor combinação de eficiência, flexibilidade e economia. A descoberta do efeito piezoelétrico aconteceu por volta de 1880 por Jacques e Pierre Curie. Este fenômeno é apresentado por certos materiais que desenvolvem potenciais eletrostáticos quando submetidos a uma pressão e, reciprocamente, deformam-se mecanicamente quando submetidos a um potencial eletrostático.

2.3.2 Sensores de Imagem

Inspeção, detecção de objetos, medição de objetos e várias outras alternativas fazem parte das principais funções deste tipo de sensor.

No mercado, atualmente, existem dois tipos básicos de sensores de imagem: o CCD e o CMOS.

O CCD (*Charge Coupled Device*), consiste de vários elementos individuais que possuem a capacidade de coletar, armazenar e transportar cargas elétricas de um elemento para outro. Estas características, juntamente com a propriedade foto-sensível do silício, formam a imagem coletada pelo sensor. Cada elemento foto-sensível representará um elemento da imagem (*pixel*). Estes sensores podem ser encontrados em linhas ou matrizes. A imagem é enviada através de um amplificador de saída, *pixel* por *pixel*, linha por linha para dispositivos externos ao sensor. Estes sensores têm como característica principal o baixo nível de ruído nas imagens.

Os sensores CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) operam com uma tensão de alimentação menor que os CCDs, reduzindo o consumo. Cada elemento ativo, neste sensor, possui seu próprio amplificador, podendo ser endereçado e lido individualmente. Além do baixo consumo, comparado ao CCD, são geralmente menores e simples, mas possuem qualidade de imagem, resolução, sensibilidade e velocidade menores. Existem dois tipos de sinal de saída para sensores CMOS. Pode-se trabalhar com saída digital, que será interligada a algum dispositivo capaz de ler este formato, ou com saída analógica, tipo NSTC ou PALM, o que facilita o trabalho para sistemas que não necessitam de tratamento digital de sinais.

As características que devem ser levadas em conta para a escolha de um sensor são a velocidade de captura, ou quantas imagens por segundo ele é capaz de adquirir, a sensibilidade do mesmo, ou seja, se ele é capaz de adquirir imagens, com a qualidade desejada, em um ambiente específico, e a resolução da imagem.

2.3.3 Sensores de Temperatura

Existem alguns princípios básicos para a leitura de temperatura, destacando-se dentre eles as termoresistências e os termopares.

Os medidores de temperatura que utilizam a termorresistência são baseados no princípio da variação da resistência elétrica, de alguns metais, em função da temperatura, sendo fabricados com fios de alta pureza de platina, níquel ou de cobre.

Suas principais características são as altas estabilidades mecânica e térmica,

resistência à contaminação, relação de Resistência X Temperatura praticamente linear, desvio com uso e envelhecimento desprezíveis, além do alto sinal elétrico de saída. O sensor de resistência de platina é o modelo de laboratório e o padrão mundial para medidas de temperatura na faixa de -270°C a 962°C . Para a utilização industrial é um sensor de precisão e altas estabilidade e sensibilidade. Um dos mais conhecidos comercialmente é o PT100, o qual apresenta uma resistência ôhmica de 100Ω a 0°C , variável conforme a temperatura (Creus, 1998).

A medição de temperatura através de termopares parte do princípio de que dois condutores metálicos diferentes, X e Y, unidos em uma das suas extremidades, e estas expostas a temperaturas diferentes, gera uma força eletromotriz (F.E.M.) em função da diferença de temperatura em suas extremidades T1 e T2 (Junta de medida e Junta de referência) dos condutores X e Y. Baseado neste princípio determinaram-se experimentalmente as tabelas de correlação, que relaciona a FEM, gerada em função da temperatura, supondo-se a junta de referência a 0°C . A escolha do termopar deve ser feita considerando todas as possíveis variáveis e normas exigidas pelo processo. Os fabricantes fornecem uma ampla bibliografia técnica para auxiliar nesta tarefa.

2.4 SENSORES DE SISTEMA (SENSOR DE CORRENTE)

Entre os sensores de corrente comerciais, destacam-se os sensores que são conhecidos pelos nomes de Transformadores de Corrente (TC) e sensores de Efeito Hall. O primeiro é utilizado em conjunto com amperímetros ou circuitos eletrônicos de controle para medir ou monitorar a corrente elétrica que circula em um condutor, normalmente de sistemas de média ou alta potência. O TC utiliza a propriedade que um transformador elétrico tem de apresentar uma corrente em seu enrolamento secundário proporcional à corrente que circula em seu enrolamento primário. A razão desta proporção é dada pelo número de espiras enroladas sobre o núcleo (Toróid do Brasil, Transformadores de Corrente).

O Sensor de Efeito Hall mede o campo magnético criado por um condutor ao ser percorrido por uma corrente elétrica. Pode-se analisar seu princípio de funcionamento a partir da figura 2.16. Considera-se uma barra metálica, com uma densidade de corrente “Jx” (plano x, y) criada por um campo aplicado “Ex”. Um campo magnético “Bz” (eixo z), aplicado perpendicularmente a “Jx”, criará um campo elétrico transversal “EH” (eixo y)

proporcional à sua amplitude e perpendicular tanto a “ J_x ” quanto a “ E_x ”. Colocando-se um voltímetro nas faces da direção y da barra, será medido “ V_H ” que é proporcional ao campo magnético “ B_z ”. Isto ocorre porque ao se aplicar o campo magnético “ B_z ” ao redor da barra é criada uma força, chamada de Força de Lorentz, nos elétrons que estão percorrendo a barra na direção x e com velocidade “ v_{dx} ”. Esta força faz com que os elétrons sejam empurrados para baixo, criando uma carga negativa em uma extremidade e uma positiva na outra (Kasap, 1997).

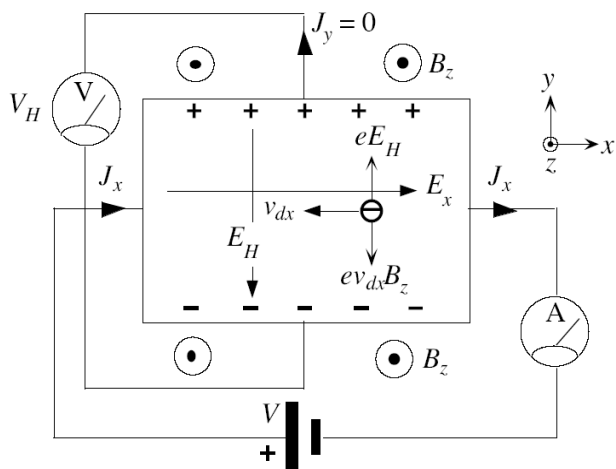


Figura 2.16 – Princípio de funcionamento do sensor de efeito hall

Em situações práticas, esta barra de ferro é chamada de Pastilha de Efeito Hall e é colocada em uma fenda de um núcleo de ferrite (figura 2.17) que envolve o condutor.

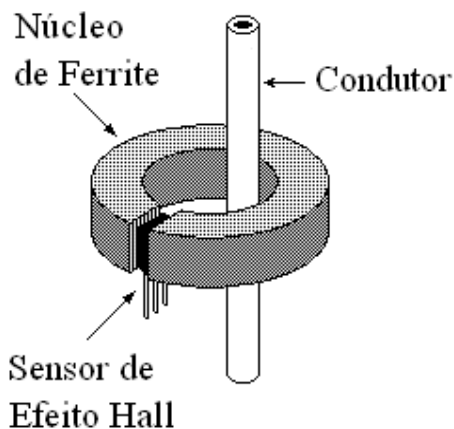


Figura 2.17 – Técnica de utilização do sensor de efeito hall

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A INTEGRAÇÃO DOS SENSORES NO VEÍCULO

Para um bom funcionamento do sistema, neste caso um veículo subaquático, deve-se obter uma integração perfeita entre todos os sensores embarcados no veículo. Além disto, é importante destacar os sensores de navegação pois, a partir dos dados coletados por estes sensores, serão encontrados os valores das variáveis de estado do veículo. Após a leitura destas variáveis, serão aplicadas algumas regras de controle, que fornecerão sinais para os atuadores, de modo a alterar ou manter algumas características como, por exemplo, sua estabilidade, rumo ou profundidade.

As variáveis de estado observam o comportamento dinâmico do veículo e são compostas pelas posições, velocidades lineares, orientação e velocidades angulares do veículo, conforme representado na figura 2.18. Nesta figura vê-se: $[x, y, z]$ – posições nos eixos x , y e z , respectivamente, $[u, v, w]$ – velocidades nos eixos x , y e z , também conhecidas por *surge*, *sway* e *heave* respectivamente, $[\phi, \theta, \psi]$ – ângulos de inclinação do veículo também conhecidos como *roll*, *pitch* e *yaw* respectivamente e $[p, q, r]$ – são as taxas de variações destes ângulos. Em princípio, estas variáveis podem ser observadas a partir da utilização de combinações de sinais provenientes de diversos sensores de navegação.

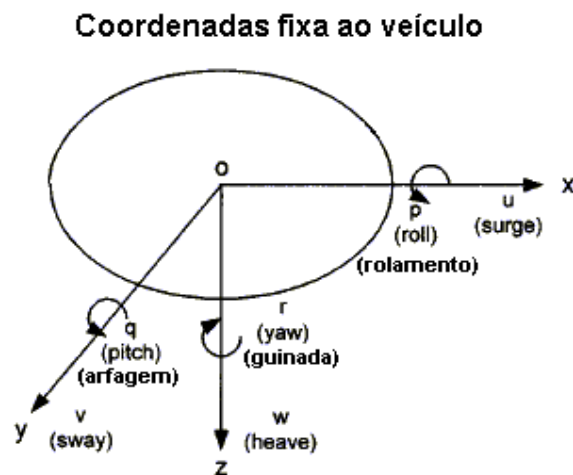


Figura 2.18 – Coordenadas em relação ao veículo

As posições e velocidades lineares são encontradas usando-se o referencial fixo ao veículo, a partir de sucessivas integrações dos sinais das acelerações lineares dos três eixos. Erros inerentes ao processo podem alterar principalmente os dados de posições em relação à Terra (referencial fixo). Portanto, é recomendável, no caso de AUVs, a utilização de correções sucessivas de posição através de GPS.

Os ângulos de orientação e velocidades angulares são encontrados com a utilização de giroscópios ou inclinômetros. A utilização de giroscópios possui como vantagens o fato de se conseguir medir a taxa de variação angular, ou seja, velocidade angular, em 360° e nos três eixos. Desta forma, os três ângulos de orientação são encontrados a partir da integração desta taxa. Uma das desvantagens do uso deste tipo de sensor está no tratamento de seu sinal, pois qualquer pequeno erro em leituras sucessivas pode acarretar, após algum tempo de trajetória, erros grosseiros na orientação do veículo. Os inclinômetros não possuem tal problema. Porém, sofrem erros de medição grosseiros em função das acelerações lineares, além de não serem capazes de medir o rumo (*yaw*). Por isso são preferencialmente utilizados em situações estáticas. Mesmo filtros passa baixa não são capazes de desacoplar completamente a interferência da aceleração em suas medições. Porém, existem outros métodos utilizando Matemática Morfológica, Redes Neurais e Identificação de sistemas que podem amenizar o problema para aplicações dinâmicas (Mangan, Wang e Wu , 2002). Ao utilizar-se somente inclinômetros, é obrigatória a utilização também de magnetômetros ou giroscópios para o cálculo do rumo.

O sistema de navegação ideal, para a medição de posição, orientação e respectivas velocidades, utilizaria tanto acelerômetros e giroscópios quanto inclinômetros, magnetômetros e GPS, sendo que estes três últimos sensores seriam utilizados apenas para a correção inercial de possíveis erros acumulados ao longo do percurso.

Comercialmente encontram-se sensores para a observação das variáveis de estado citadas anteriormente, estando alguns exemplos dispostos na tabela 2.2.

É perceptível que todos utilizam giroscópios e acelerômetros. O 3DM-G possui o sistema mais complexo de todos. Nele já estão contidos, além do sensor, processadores que realizam o tratamento de dados para o cálculo dos ângulos. Sua saída é somente digital e pode-se acessar tanto os valores instantâneos, dos nove sensores, quanto a leitura dos ângulos já calculados.

Pode-se também observar as características de sistemas que utilizam inclinômetros para a medição de ângulos através da tabela 2.3.

Tabela 2.2 – Sistemas para a medição de ângulos e velocidades

Parâmetros\Modelos	ONI-23504 O-Navi, LCC	3DM-G MicroStrain, inc.	IMU400CC Crossbow technology, inc.
Preço (USD)*	499,00	1.195,00	3.995,00
Giroscópios			
Máxima velocidade angular (°/s)	+/- 150	+/- 300	+/- 200
Máxima frequência de operação (Hz)	40	--	25
Não – Linearidade (% FS**)	0,1	0,23	0,3
Resolução (°/s)	--	--	< 0,05
Exatidão	--	--	--
Efeito da aceleração linear (°/s/g)	0,2	--	--
Acelerômetros			
Máxima aceleração (g)	+/- 2	+/- 2	+/- 10
Máxima frequência de operação (Hz)	75	--	50
Resolução (mg)	--	--	< 1,25
Exatidão	--	--	--
Não – Linearidade (% FS**)	0,20%	--	<1%
Magnetômetros			
Máximo campo (G)	Não possui	+/- 1	Não possui
Sensor de temperatura			
	Sim	Sim	Sim
Ambiente			
Faixa de operação	-40 ... +85°C	-40 ... +70	-40 ... +71
Shock NOP (g)***	1000	1000	1000
Shock OP (g)****	500	500	--
Resolução do conversor A/D (bits)			
	--	12	14
Filtro Passa Baixa			
	Sim	Sim	--
Saída			
	Analogica para cada sensor	Matriz, quaternions ou sensores (digital) resolução = 0,1° exatidão = +/- 5°	Analogica ou digital
Dados físicos / elétricos			
Peso (g)	80	40	<640
Tamanho (mm)	38,1 x 31,7 x 15,6	64 x 90 x 25	76 x 95 x 81
Alimentação (V)	4,75 ... 5,25	5,2 ... 12	9 ... 30
Corrente (mA)	39	90	<250
Consumo (W)	0,195	--	<3

-- Dados não fornecidos;

* - O preço não inclui taxas de importação;

** - Full Scale;

*** - máximo choque sem alimentação, circuito desligado;

**** - máximo choque em operação

Tabela 2.3 – Sistemas para a medição de ângulos

Parâmetros\Modelos	TCM2-50 Precision Navigation, inc.			3DM-M MicroStrain, inc.			CXTILT02EC Crossbow technology, inc.	
Preço (USD)*	769,00			595,00			795,00	
Inclinômetros								
Ângulos de medição	yaw	pitch	roll	yaw	pitch	roll	pitch	roll
Máxima inclinação linear (°)	0.. 359,9	±50	±50	±180	±180	±70	+/- 75	
Exatidão (°)	±1,5	±0,4	±0,4	±0,93	±0,33	±1,00	+/- 0,2 a +/- 20°	
Não – Linearidade (%)	0,23 FS			--	--	--	0,3 a 45°	
Resolução sem Filtro (°)	0,1	0,3	0,3	0,30	0,25	0,5	0,32	
Resolução com Filtro (°)	--			< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,032 – 5ª ordem	
Repetibilidade (°)	+/- 0,3			0,07	0,07	0,26	--	
Magnetômetros	Sim			Sim			Não possui	
Exatidão (uT)	+/- 1,0			--			--	
Resolução (uT)	0,01			--			--	
Repetibilidade (uT)	+/- 0,2			--			--	
Range (uT)	+/- 80			--			--	
Acelerômetro (para aceleração linear)	Não			Não			Não	
Compensado (para aceleração linear)	Não			Por filtro digital			Não	
Sensor de temperatura	Sim			Não			Sim	
Ambiente								
Temperatura de operação (°C)	-20 ... 70			-25 ... 70			-40 ...85	
Resolução do conversor A/D (bits)	--			12			12	
Filtro Passa Baixa	--			IIR programável			IIR até ordem 9	
Saída	roll, pitch, yaw, magnetômetros e temperatura.			Três modos: - leitura dos acelerômetros - leitura dos campos magnéticos - ângulos: roll, pitch, yaw			roll, pitch, yaw	
Formato da Saída	Digital: RS232C/NMEA0183 Analógica: 0-5V linear (256 níveis) ou 0-5V quadratura (sen./cos.)			Digital (RS232/RS485)			RS-232	
Taxa de atualização (Hz)	1 ... 30			45			--	
Dados físicos / elétricos								
Tamanho (mm)	--			43,1 x 63,5 x 17,8			10,2 x 5,7 x 3,1	
Alimentação (V)	6 ... 18			5,2 ... 12			8 ... 30	
Corrente (mA)	20			50			60	

¹ – utilizando filtro IIR quinta ordem

* - O preço não inclui taxas de importação;

Além de utilizar sistemas prontos, existe a possibilidade do desenvolvimento de um *hardware* específico para a leitura de sensores. Na tabela 2.4 observam-se alguns sensores que podem ser utilizados para este fim.

Tabela 2.4 – Sensores para a medição de ângulos

Parâmetros\Modelos	ADXRS300 Giroscópio 2 eixos	ADXL311 Acelerômetro 2 eixos	HMC1055 Magnetômetro 3 eixos
Fabricantes	Analog Devices	Analog Devices	Honeywell
Preço (USD)*	33,00**	29,95**	33,34
Máxima medição	300 °/s	+/- 2 g	+/-6 Gauss
Máxima frequência de operação	40 Hz	6 KHz	25 Hz
Não – Linearidade (% FS)	0,1	0,2	1
Não-Linearidade X Temperatura	--	2mg/°C	--
Sensibilidade (com tensão de alimentação 5V)	5 mV/ °/s	167 mV/g	5 mV/gauss
Resolução	--	--	120µ Gauss
Sensor de temperatura	Sim	Não	Não
Temperatura de operação (°C)	-40 ... 85	0 ... 70	-40 ... 125
Autoteste	Sim	Sim	Sim
Filtro interno configurável	Sim	Sim (de 10Hz a 5KHz)	Não
Tensão de operação (V)	4,75 ... 5,25	2,7 ... 5,25	1,8 ... 20
Corrente de operação (mA)	6	1	4

* - O preço não inclui taxas de importação

** - e são para a compra de no mínimo 100 unidades

Embora o baixo custo destes componentes tornem sua utilização muito atrativa, encontram-se algumas dificuldades para o desenvolvimento de um *hardware* específico de leitura. Entre estas, destacam-se a não linearidade em função da temperatura, que deve ser corrigida para uma leitura precisa, o desenvolvimento da etapa externa de autoteste, que será inicializado a cada vez que o sistema for ligado, verificando o correto funcionamento do mesmo, o desenvolvimento de filtros específicos para amenizar interferências, além do posicionamento preciso dos componentes, fatos que podem acarretar erros de leitura. Outras desvantagens em desenvolver este tipo de sistema seriam o longo tempo de desenvolvimento e a necessidade de testes de bancadas para aferir com precisão as características do mesmo.

Recomenda-se, visando economia financeira e também de tempo, a utilização do sensor ONI-23504, pelo seu baixo custo e compatibilidade de suas características com aquisição de dados de dinâmicas lentas. Para ampliar a confiabilidade do sistema seria interessante, mas não imprescindível, a utilização de outros sensores em paralelo. A principal preocupação na utilização deste sistema seria o fato de não possuir inclinômetros para a correção de possíveis erros na integração dos sinais provenientes dos giroscópios. Para isto utilizam-se os acelerômetros como inclinômetros, em situações de repouso. Isto pode ser feito comparando a soma vetorial das acelerações, nos eixos X, Y e Z com a aceleração da gravidade. Quando estes valores forem próximos, significa que somente estará atuando no

sistema a aceleração da gravidade. Desta forma, a partir dos valores de suas componentes pode-se conhecer, com precisão, os ângulos de inclinação do veículo comparando-os com os ângulos calculados pelos sinais dos giroscópios.

Para economizar tempo, sem se preocupar com custo financeiro da etapa de sensoriamento, pode-se utilizar o 3DM-G. Por possuir saídas digitais, a leitura é realizada diretamente por processadores, evitando projeto de conversores A/D e economizando processamento para o cálculo dos ângulos. Neste caso, necessita-se ainda calcular as velocidades e posições do veículo.

Outros equipamentos que podem auxiliar na localização exata do veículo e aquisição de dados, em conjunto com os já mencionados, são o sensor de pressão, para o cálculo de profundidade e sensores de imagens.

Como sensores de imagem, pode-se utilizar qualquer câmera de segurança, encontradas em casas de eletrônicas da região, a um custo aproximado de R\$150,00.

Para o sensor de pressão, existem algumas alternativas. Um exemplo destas é mostrado na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Sensor de pressão

Parâmetros\Modelos	PPTR0500a Honeywell
Preço (USD)*	890,00
Faixa de medição (MPa)	3,44
Máxima profundidade (m)	333,66
Resolução (% FS)	0,0011
Exatidão (% FS)	0,2
Temperatura de operação (°C)	-40 ... 85
Saída	Analógica/Digital (RS-232 / RS-485)
Tensão de operação (V)	6 ... 30
Corrente de operação (mA)	19 ... 27
Máxima pressão sem danos (MPa)	10,32
Máxima profundidade sem danos (m)	1000,98

* - O preço não inclui taxas de importação

Com o uso dos sensores mencionados e suas combinações, pode-se controlar o veículo, dependendo do posicionamento de seus atuadores, nos seus 6 graus de liberdade. Porém, a efetuação do controle não pode ser realizada sem a imprescindível ação dos atuadores, os quais constituirão o alvo do estudo no próximo capítulo.

3. ESTUDO SOBRE ATUADORES

3.1 INTRODUÇÃO

No Capítulo 2 fez-se um estudo sobre os diferentes tipos de sensores utilizados em veículos subaquáticos. O objetivo do presente capítulo é apresentar um estudo semelhante ao desenvolvido no capítulo anterior, mas voltado aos diferentes tipos de atuadores utilizados em ROVs e AUVs.

Os atuadores são dispositivos capazes de transformar sinais elétricos em trabalho mecânico. Assim como para os sensores, os atuadores podem ser classificados como atuadores de navegação ou missão.

- Atuadores de navegação

Os atuadores de navegação são responsáveis pela movimentação do veículo. Estes dispositivos convertem sinais elétricos em forças e momentos que serão aplicados ao mesmo. Sua escolha deve ser realizada com cautela de modo a fazer com que o mesmo atenda aos requisitos de projeto relativos à velocidade e ao tempo de manobra do veículo.

- Atuadores de missão

Sua escolha depende da missão e do objetivo de cada veículo. Podem ser citados como exemplos de atuadores de missão, manipuladores, escovas para limpeza, módulos de escavação entre outros.

3.2 ATUADORES DE NAVEGAÇÃO

Atualmente existem algumas alternativas de atuadores de navegação pouco utilizadas. Podem ser citados como exemplo destes casos os atuadores cujo princípio de geração do empuxo é a saída de jato de água, ou ainda, atuadores cujo princípio baseia-se no movimento de seu próprio corpo contendo flexibilidade (semelhante a um peixe). Os atuadores mais encontrados em veículos comerciais são os propulsores do tipo motor com hélice e os atuadores do tipo lemes, sendo que, em alguns casos, são também utilizadas variações de lastro para o deslocamento vertical do veículo.

3.2.1 Propulsores

Os propulsores são formados por um conjunto hélice-motor, sendo responsáveis por aplicar forças e torques ao veículo.

Existem comercialmente hélices de vários formatos. Os fabricantes desenvolvem cada vez mais suas hélices de modo a ampliar a eficiência dos mesmos. Na maioria dos propulsores existentes, os fabricantes fornecem modelos específicos nos quais já se encontram a associação hélice-motor, não ficando a escolha da hélice por conta do consumidor.

A escolha de propulsores deve levar em conta sua profundidade máxima de operação, empuxo máximo, potência consumida, tamanho e tipo de motor a ser utilizado. A escolha do tipo de motor é muito importante, pois a partir deste defini-se também toda a eletrônica embarcada.

Quanto aos motores, utilizam-se hidráulicos, elétricos ou a combustão. Na maioria dos veículos estudados observou-se a utilização de motores DC sem escovas. Este fato deve-se às suas boas características, conforme será explicado posteriormente.

A seguir, descrevem-se brevemente, as características de alguns tipos de motores utilizados em propulsores.

- Motores CC

Originalmente, a energia disponível para uso industrial era apenas CC e deste modo, os motores CC eram intensivamente utilizados. Com o aparecimento de motores CA e a disseminação do uso de alimentação trifásica, esta tendência se inverteu, sendo hoje o motor de indução o de uso mais comum. Entretanto, um número elevado de motores CC é, ainda hoje, construído em função de suas características, apropriadas para muitos acionamentos de velocidade variável (Almeida, 1986).

Entre as vantagens, com relação a motores de indução, estão o controle preciso e contínuo da velocidade para uma ampla faixa de variação, maior simplicidade e menor custo envolvido no projeto dos seus sistemas de controle.

Em um motor CC, o torque é gerado a partir da interação entre o campo magnético variável do rotor, com o campo magnético fixo do estator (ou armadura). O campo é dito variável, pois seu sentido é alterado, em relação ao próprio rotor. Isto é realizado a partir do comutador, dispositivo este que é fixo ao rotor e é responsável por energizar sequencialmente as bobinas do mesmo, fazendo-o girar.

Esta comutação ocorre continuamente enquanto o rotor estiver girando, sendo realizada com a ajuda de escovas fixas à carcaça, as quais ficam permanentemente em contato com o comutador (figura 3.1). Esta comutação gera ruído, diminui a vida útil do motor e limita sua velocidade máxima.

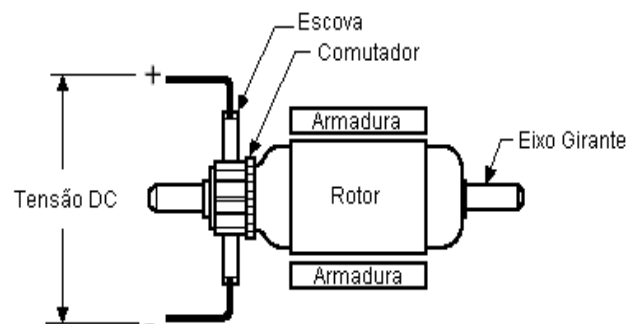


Figura 3.1 – Motor CC

O controle deste tipo de motor é realizado através da variação de sua tensão de alimentação. Atualmente uma técnica muito utilizada para este tipo de controle é a modulação tipo PWM (modulação por largura de pulso).

- Motores de indução

Os motores de indução trabalham com alimentação CA e têm como vantagem principal em relação ao motor CC, o fato de não possuírem escovas, aumentando assim a sua vida útil (Almeida, 1986).

O estator é alimentado por um sistema trifásico de tensões, o que produz um campo girante. A velocidade deste campo girante, também chamada de velocidade síncrona, é diretamente proporcional à frequência das correntes do estator e inversamente proporcional à quantidade de pólos do mesmo.

O enrolamento do rotor pode ser de dois tipos: bobinado ou em gaiola. Nos motores a rotor bobinado, o enrolamento é semelhante ao do estator e possui o mesmo número de pólos. O acesso aos terminais deste enrolamento é feito através de anéis deslizantes. Nos motores de rotor em gaiola, o enrolamento é constituído de barras de material condutor (geralmente alumínio fundido), distribuídas ao longo do rotor e curto-circuitadas nas extremidades.

O campo girante produzido pelo estator irá induzir o aparecimento de correntes circulando pelo enrolamento do rotor. Estas correntes criam um campo girante, cuja tendência é a de se alinhar com o campo girante produzido pelo estator. Isto faz com que o rotor tenda a atingir a velocidade síncrona.

Normalmente, a velocidade de um motor de indução é pouco menor que a velocidade síncrona. Esta diferença é chamada escorregamento, sendo expressa em termos percentuais. Nota-se que, se o rotor girar em sincronismo, isto é, na mesma velocidade do campo magnético girante do estator, não haverá tensão induzida (já que os condutores do rotor não cortam as linhas de fluxo do campo girante). Deste modo, mesmo sem carga acoplada ao eixo do rotor, a velocidade é menor do que a velocidade síncrona.

A melhor forma de controle de velocidade deste tipo de motor é a utilização da variação de sua frequência. Existem no mercado, atualmente, dispositivos chamados de inversores de frequência para realizar este tipo de controle. Mas estes equipamentos ainda são caros se comparados às técnicas de controle de motores CC.

- Motores BLDC (Brushless Direct Current)

Aliando as vantagens dos motores já citados, foram desenvolvidos os motores BLDC (*Brushless Direct Current*). São usados em várias aplicações como, por exemplo, nas indústrias de automóveis, aeroespacial, automação industrial, instrumentação e etc...

Este tipo de motor não possui escovas para comutação, sendo esta tarefa realizada eletronicamente. Assim, possuem muitas vantagens em relação a motores CC e de Indução. Algumas delas são (Yedamale, 2003):

- Melhor característica torque versus velocidade;
- Alta eficiência;
- Longa vida útil;
- Operação sem ruído;
- Altas taxas de velocidades.

Além destas vantagens, a razão entre o torque desenvolvido e o tamanho do motor (encobrimento) é maior, tornando-o útil para aplicações onde espaço e peso são fatores críticos. Este fato explica a sua grande aplicação em ROVs e AUVs de pequeno e médio porte.

O BLDC é um tipo de motor síncrono. Isto significa que o campo gerado pelo estator e o campo do rotor rotacionam na mesma frequência. Eles não possuem o efeito de escorregamento existente em motores de indução.

Estes motores podem ter configuração de uma a três fases, que correspondem ao número de bobinas em seu estator. Os motores de três fases são largamente utilizados e serão detalhados a seguir (Yedamale, 2003).

O estator de um BLDC é composto de laminas de aço acomodadas internamente lado a lado, com bobinas enroladas entre os espaços formados por elas conforme é mostrado na figura 3.2.

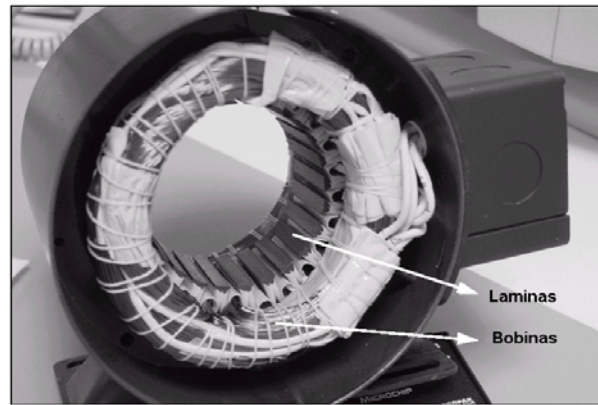


Figura 3.2 – Estator do motor BLDC

Tradicionalmente o estator é semelhante ao de um motor de indução. Contudo, as bobinas são dispostas de maneira diferente. A maioria dos BLDC possui três bobinas conectadas em estrela. Cada bobina é formada de inúmeras espiras interconectadas. Estas bobinas são distribuídas pelo estator para formar um número par de pólos.

O rotor deste tipo de motor é feito de um material magnético permanente e pode variar de dois a oito pares de pólos norte e Sul posicionados alternadamente. Este material magnético é escolhido baseado na densidade do campo magnético requerida no rotor. O ferrite é tradicionalmente utilizado mas, com o avanço da tecnologia, novas ligas estão ganhando popularidade. Estas trazem como principal vantagem, um acréscimo na sua densidade magnética por volume, diminuindo assim o tamanho do motor e mantendo o torque (Yedamale, 2003).

Ao contrário dos motores CC com escovas, a comutação de motores BLDC é eletronicamente controlada. Para rotacionar o motor, as bobinas do estator devem ser energizadas em seqüência, sendo importante para isto conhecer a posição do rotor. Esta posição é observada através de sensores de efeito hall colocados no estator. A exata seqüência de comutação pode ser determinada colocando, na maioria das vezes, três sensores de efeito hall, que fornecerão sinais altos e baixos, indicando que os pólos norte e sul do rotor estão passando próximos aos sensores (figura 3.3).

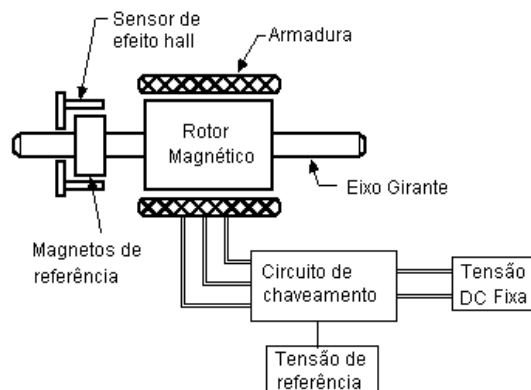


Figura 3.3 – Motor BLDC

O motor opera da seguinte forma: cada comutação possui uma bobina energizada positivamente, outra energizada negativamente e a terceira sem energia. O torque é produzido pela interação entre o campo magnético gerado pelo estator e o campo magnético permanente do rotor.

Alguns propulsores analisados possuem internamente circuitos de chaveamento que realizam todo o controle de velocidade proporcional a uma tensão de referência. Na figura 3.4 observam-se as curvas de resposta do propulsor modelo SPE-75, fabricado pela Sub-atlantic Ltd. (www.sub-atlantic.co.uk), que utiliza motor BLDC. Estas curvas relacionam a força produzida e a tensão de controle, podendo-se observar, nesta situação, a corrente consumida.

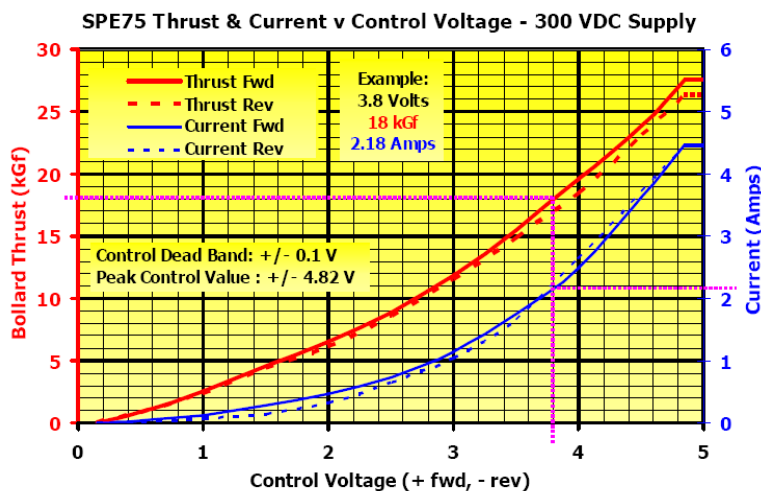


Figura 3.4 – Curva de resposta do Propulsor SPE-75

- Motores Hidráulicos

Os motores hidráulicos têm, como função básica, transformar a energia hidráulica em energia mecânica, sob a forma de torque e rotação. Construtivamente, o motor assemelha-se a uma bomba hidráulica, possuindo, porém, uma função inversa à da bomba.

Assim como as bombas (e cilindros) os motores podem ser unidirecionais ou bidirecionais (girar em um ou dois sentidos) e de vazão fixa ou variável, conforme possibilidade de alteração de seu deslocamento.

Os de vazão fixa, mais empregados, são: de engrenagens, de palhetas e de pistões (radiais ou axiais). Os construídos para ajuste no deslocamento são: palhetas e de pistões (radiais ou axiais).

Como ocorre com as bombas, o motor deve possuir uma linha de dreno utilizada para fazer a lubrificação das partes com movimento relativo. Procura-se minimizar a contra-pressão na tomada de saída do motor, o que poderá reduzir sua capacidade de vencer um determinado torque.

Durante muito tempo o óleo mineral foi o fluido utilizado pelos sistemas hidráulicos. Porém, hoje em dia, em função das considerações de segurança e legislações governamentais, estão sendo empregados fluidos hidráulicos resistentes ao fogo.

A seguir explica-se o princípio de funcionamento dos motores mais utilizados.

- Motor de engrenagens

Este motor é constituído de um par de engrenagens acopladas. As duas engrenagens têm o mesmo número de dentes e o mesmo módulo. Uma engrenagem é motriz e a outra é a conduzida, figura 3.5.

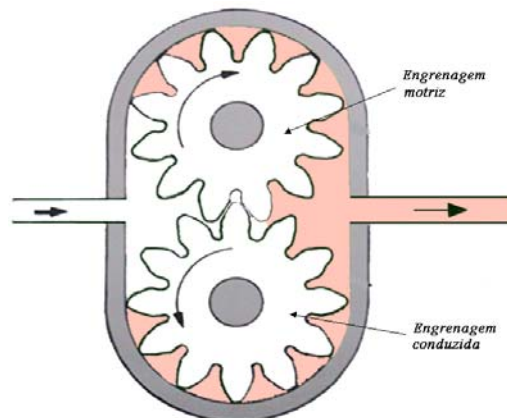


Figura 3.5 – Motor hidráulico de engrenagens

As duas engrenagens são colocadas dentro de uma carcaça, que as envolve com precisão verificando-se uma vedação. Dentro desta carcaça observam-se duas câmaras, que se comunicam com a tubulação externa.

Durante a rotação as duas engrenagens giram em sentido contrário, formando assim uma diferença de pressão entre as câmaras. O fluido contido neste reservatório é empurrado por esta diferença de pressão, preenchendo o volume entre a superfície dos dentes e a carcaça, sendo conduzido à câmara de descarga, gerando torque. Nesta câmara, ao ocorrer o engrenamento dos dentes, existe uma redução de volume passando o fluido a ser expulso pela tubulação de descarga. O deslocamento das bombas de engrenagens é fixo (constante), não podendo variar durante a operação

Na figura 3.6, retirada do catalogo de um motor/bomba da Série PL Factor fabricado pela PARKER, pode-se observar o uso engrenagens, conforme comentado.

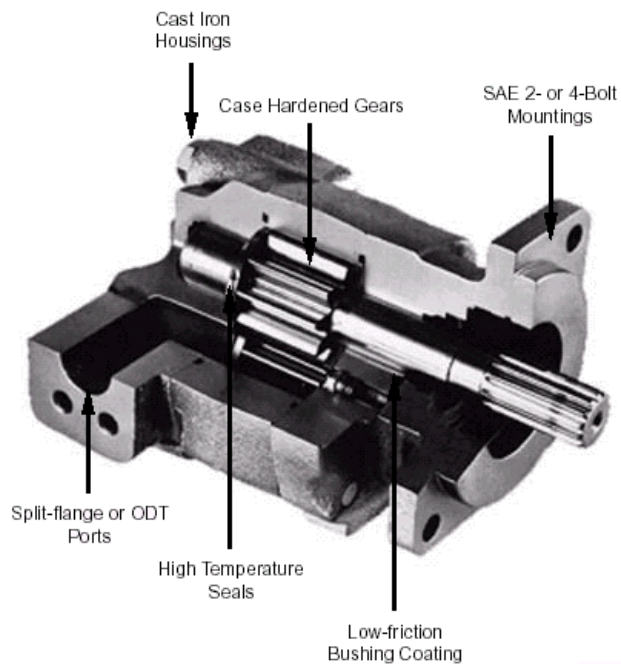


Figura 3.6 – Motor hidráulico de engrenagens, Série PL Factor

- Motor de palhetas

Um motor de palhetas é constituído por um rotor que gira ao redor de uma carcaça internamente cilíndrica. O rotor tem um certo número de ranhuras dentro das quais são colocadas, com um ajuste leve, as palhetas conforme mostra a figura 3.7.

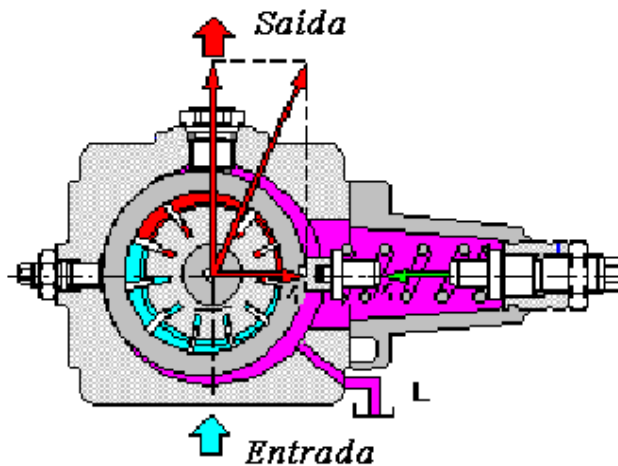


Figura 3.7 – Motor hidráulico de palhetas

O rotor é montado com uma excentricidade com relação ao centro da carcaça. Durante a rotação por efeito da força centrífuga e do pequeno atrito, as palhetas são mantidas em contato com a superfície interna do corpo da bomba.

O espaço compreendido entre o rotor, o corpo do motor e as palhetas preenchem-se com o fluido do reservatório. Da mesma forma como ocorre com o motor de engrenagens, é gerada uma diferença de pressão que empurra o óleo do reservatório para dentro dessa câmara. Por outro lado, ao haver uma câmara onde ocorre uma redução de volume, o fluido é expulso pelo motor.

Os motores de palhetas simples (muitas vezes chamados de desbalanceados), permitem uma variação na vazão (dentro de certos limites) para rotação constante. Para efetuar-se essa variação na vazão, faz-se a alteração na excentricidade. A vazão nula corresponde à excentricidade nula, ou seja, quando o centro do rotor coincide com o centro da carcaça. A vazão assume seu valor máximo, quando a excentricidade é máxima: o rotor está tangente à carcaça.

O ajuste da vazão é feito através de dispositivo com parafuso e mola de compressão que "sente" o valor da pressão na câmara de descarga, modificando o valor da excentricidade automaticamente.

Os chamados motores de palhetas balanceadas têm a carcaça interna na forma oval. Essa forma construtiva permite que a pressão não seja unilateral, onde duas forças hidráulicas de mesma intensidade, mesma direção e sentidos contrários não agem sobre o mancal do rotor. Os motores balanceadas não podem ter seu deslocamento variável. Porém, suportam

valores mais altos de pressão.

- *Motores de pistões axiais*

Podem ser do tipo eixo inclinado, conforme a figura 3.8a, ou disco inclinado conforme a figura 3.8b.

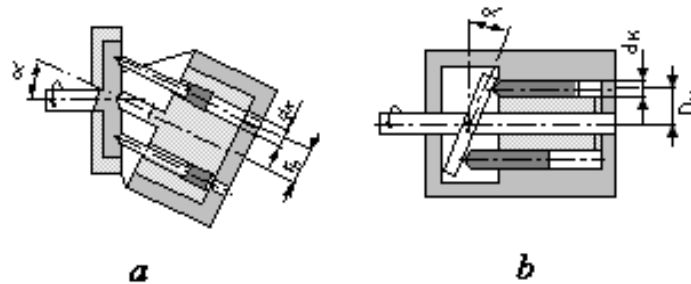


Figura 3.8 – Motor hidráulico de pistões axiais:(a) tipo eixo inclinado, (b) tipo disco inclinado.

O motor do tipo disco inclinado é constituído por um corpo rotativo contendo os cilindros com seus êmbolos. O corpo rotativo forma uma estrutura única com o eixo, que está ligado ao rotor. Neste existe um anel fixo contendo rasgos, os quais comunicam-se com as tubulações de descarga e pressão, respectivamente.

Os pistões estão unidos a uma placa solidária ao disco inclinado, podendo (os pistões) movimentarem-se na direção de seu próprio eixo.

Cada pistão é preenchido com fluido quando passa por um dos rasgos (volume interno crescente), e esvazia-se quando passa em frente ao rasgo oposto (volume interno decrescente). Pode-se observar melhor, na figura 3.9, algumas posição dos pistões.

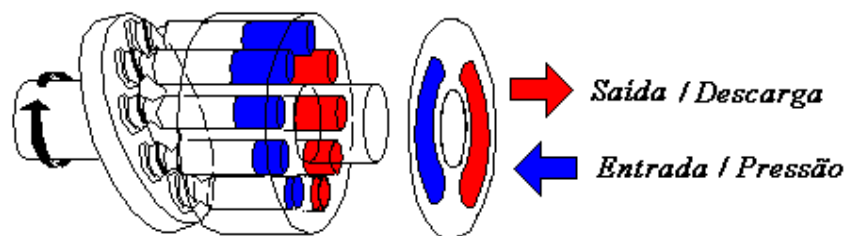


Figura 3.9 – Funcionamento do motor hidráulico de pistões axiais

O princípio de funcionamento do motor com eixo inclinado é semelhante ao com disco inclinado e, portanto, não será detalhado neste trabalho.

Uma vez que a vazão do motor é dependente do curso do cilindro, esse pode assumir diferentes valores conforme a variação do ângulo de inclinação do prato por onde deslizam os

pistões. Em geral, esse ângulo de inclinação não excede a 30° e, quanto maior o ângulo de inclinação, maior a vazão. Um ângulo de inclinação de 0° significa vazão nula. Em alguns tipos de sistemas hidráulicos esse ângulo pode assumir um valor negativo, o que significa uma inversão no sentido de escoamento do fluido.

Deve-se lembrar que os motores hidráulicos utilizados para rotacionar os hélices, são movidos por bombas hidráulicas e estas, por sua vez, por motores elétricos, no caso de ROVs. Esta dupla conversão causa perdas desnecessárias de energia que não ocorre quando os motores elétricos são utilizados diretamente para rotacionar os hélices.

Há propulsores, como os citados em “The quest Wrov” (Schilling Robotics, 2003), que utilizam motores BLDC, os quais, conforme o fabricante, são 40% mais eficientes se comparados a propulsores com motores hidráulicos. Este fato possibilita, além de economia de potência, uma diminuição da espessura do cabo umbilical, diminuindo assim o arrasto gerado no mesmo.

Quanto ao posicionamento dos propulsores em relação ao casco do veículo, é importante lembrar que o “Subcommittee on Remotely Operated Vehicles” recomenda que a fixação dos propulsores deve ser feita externamente ao compartimento principal, no qual será armazenada a eletrônica embarcada. O objetivo desta recomendação é reduzir problemas de vedação (Barros e Soares, 2002).

Além dos propulsores tradicionais, existe a possibilidade de se utilizar propulsores de lamina flexíveis. O Nektors, por exemplo, desenvolvido pela Nekton Research LCC (<http://www.nektonresearch.com>), possui o formato de uma lamina acoplada a um motor, conforme visto na figura 3.10. Este motor trabalha oscilando ao invés de girar. O fabricante afirma que, comparado a hélices tradicionais de mesma área de superfície, os propulsores de lamina flexíveis são capazes de gerar até cinco vezes mais força em um terço do tempo. Outra vantagem é a possibilidade de controlar o veículo em seis graus de liberdade com apenas quatro propulsores.



Figura 3.10 – Nektors – Propulsor desenvolvido pela Nekton Research, LCC

Observa-se, na figura 3.11, o desenho de um veículo desenvolvido pela Duke&NC State University, de nome Gamera, que utiliza 4 propulsores de laminas flexíveis, permitindo um controle de seis graus de liberdade.

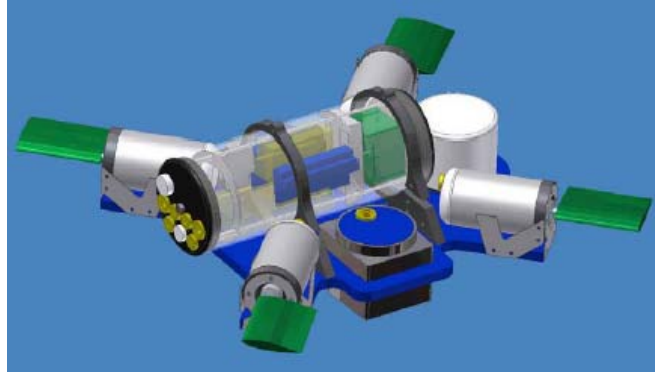


Figura 3.11 – Gamera – Duke&NC State University

3.2.2 Esteiras

As esteiras são utilizadas em alguns ROVs ou AUVs com tarefas especiais como, por exemplo, passagem de cabos, dutos ou trabalhos que exijam fixação no solo. Este veículo tem a capacidade tanto de flutuar, como um ROV ou AUV tradicional, quanto de trafegar como um carro no fundo do mar (figura 3.12).



Figura 3.12 – Triton T500 – Perry Slingsby Systems

3.2.3 Lastro variável

A variação de lastro permite o movimento do veículo no eixo z sem a utilização de propulsores, simplesmente alterando o empuxo do veículo. A principal vantagem em sua utilização está na economia de energia, pois não é preciso manter os propulsores ligados para submergir a grandes profundidades. Além disto, veículos que possuam sistema de lastro variável, têm sua capacidade de carga ampliada, pois este excesso de peso é compensado.

3.2.4 Lemes

O recurso de lemes, juntamente com propulsores, é também bastante utilizado. Pode-se dispensar o uso de propulsores para a efetuação de rotações sobre os eixos z e y, obtendo-se, como principal vantagem, a economia. Por outro lado, tem-se a limitação de certos movimentos, imprescindíveis para a operação de veículos de inspeção.

Na figura 3.13 pode-se observar o desenho do Cal Poly (Monteen, Warner e Ryle 2000). Este veículo, desenvolvido pela Califórnia Polytechnic State University, é um AUV e possui o controle de arfagem e de guinada realizados por lemes. Isto impossibilita o movimento puramente lateral ou vertical do veículo, mas, por outro lado, reduz o número de propulsores.

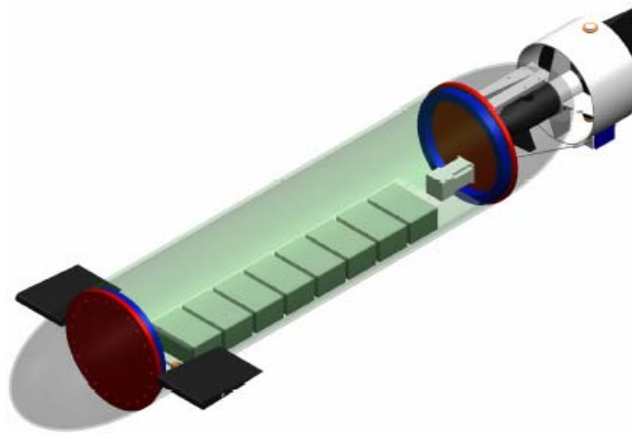


Figura 3.13 – Veículo Cal Poly – California Polytechnic State University

3.3 PROPULSORES COMERCIAIS

Na seção anterior foi dada ênfase ao detalhamento sobre os princípios físicos dos atuadores utilizados em veículos subaquáticos em geral, incluindo características elétricas e magnéticas. A presente seção é, de certa forma, complementar à anterior. Seu conteúdo pode auxiliar ao projeto de ROVs e AUVs, uma vez que são discutidos detalhes sobre os principais atuadores comerciais existentes atualmente no mercado.

- Seaeye – SM4

O SM4, figura 3.14, fabricado pela Seaeye Marine Limited (www.seaeye.com), é um propulsor que utiliza motor BLDC e, de acordo com o fabricante, apresenta como vantagens os seguintes aspectos:

- Controle de velocidade com realimentação, para uma resposta precisa aos comandos;
- Contém o acionamento eletrônico e o motor em um mesmo encapsulamento;
- Contém detector de falha e circuito de reset;
- Os circuitos eletrônicos são protegidos contra subtensão;
- Apresenta compensação integral de pressão para grandes profundidades

Sua tensão e corrente nominais de alimentação são 250Vdc e 4,5A respectivamente. Pode trabalhar em profundidades de até 2500m. Pesa 3,7kg no ar e 2,2kg na água. Este propulsor consegue gerar um empuxo de até 25kgf, operando com 250Vdc, 4,5A a 2000RPM.

O controle de velocidade é de responsabilidade dos circuitos eletrônicos internos ao encapsulamento de motor. O controle externo da velocidade é feito por um sinal analógico, de baixa potência de 24Vdc / 200mA, onde a polaridade significa o sentido de rotação.

Além da alimentação requerida para o seu funcionamento (250Vdc), o propulsor requer outra alimentação de 24Vdc, provavelmente utilizada para os circuitos de controle e chaveamento do motor. Assim, sua conexão externa é composta por sete condutores, sendo eles:

- 2 condutores 250Vdc – Alta potência;
- 2 condutores 24Vdc – Alta potência (corrente não informada);

- 1 condutor para o sinal de velocidade;
- 1 condutor para terra.

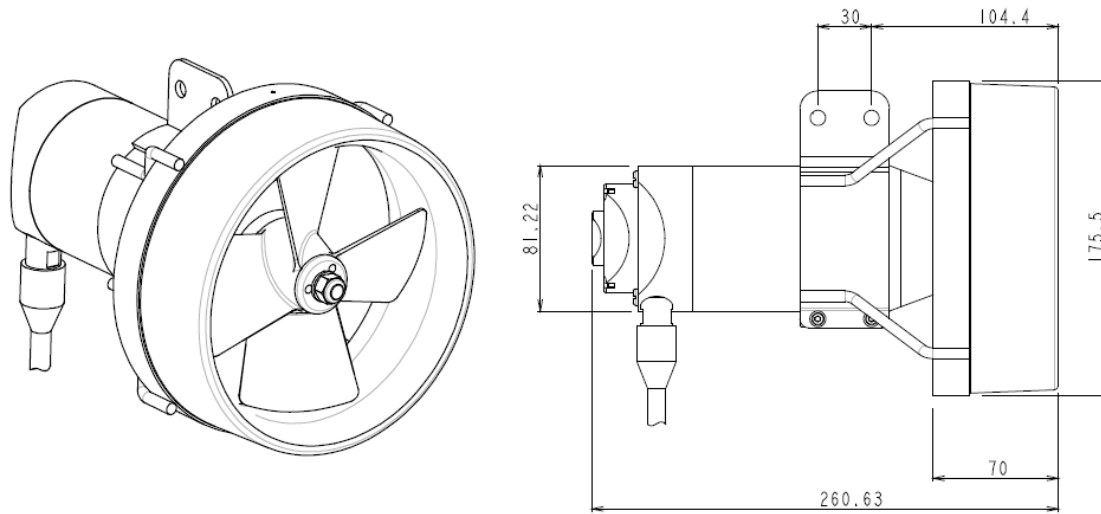


Figura 3.14 – Propulsor SM4-M – Seeye, dimensões em mm
(www.Seaeye.com)

- SeaBotix – SBT150

O SBT150, figura 3.15, fabricado pela Seabotix, Inc (www.seabotix.com), é utilizado como propulsor de seu ROV de pequeno porte, mas também é vendido separadamente.



Figura 3.15 – Propulsor SBT150 – Seabotix, Inc.

Pode chegar a um empuxo de 2,4kgf por elemento, podendo operar em profundidades de até 150m. Embora gere um empuxo pequeno, este modelo pode ser utilizado, no caso de ROVs de maior porte, como propulsores laterais ou verticais, ou seja, direções onde não se pretende imprimir grandes velocidades ao veículo.

Seu peso é pequeno, 700g no ar ou 400g na água, fato que o torna de uso interessante em aplicações onde o fator peso é crucial. Sua tensão e corrente de operação são 19Vdc e 4,5A, respectivamente. Sua principal desvantagem consiste no fato de não possuir controle interno de velocidade.

- NorthShore Propulsion Inc. - SEE050

O propulsor SEE050, fabricado pela NorthShore Propulsion Inc. (www.northshorepropulsion.us.com), possui etapa de controle interno ao motor com a possibilidade de conexão externa digital, comunicando, através de RS485, diretamente com o processador embarcado ou com o sistema de controle na superfície.

Este propulsor trabalha em até 750m de profundidade em seu modo standard, mas, de acordo com o fabricante, pode-se ampliar esta profundidade para 1500, 3000 ou “*full ocean depth*” o que significa que ele está preparado para trabalhar nas maiores profundidades encontradas no ambiente marinho. Seu peso é de 2,5kg no ar e 1,95kg na água. Ele desenvolve um empuxo de 10.1kgf e deve ser alimentado com tensão e corrente nominal de 150Vdc e 3A, respectivamente.

Observa-se, na figura 3.16, que o formato deste atuador é diferenciado, com relação aos demais, em razão do mesmo ser fixado ao veículo a partir do seu invólucro externo e não a partir do encobrimento do motor. Isto facilita seu acoplamento ao casco do veículo para os propulsores verticais e laterais.



Figura 3.16 – Propulsor SEE050 – NorthShore Propulsion Inc..

- Tecnadyne – 250

O modelo 250, figura 3.17, fabricado pela Tecnadyne (www.tecnadyne.com), gera um empuxo de 5,4kgf, utilizando tensão e correntes nominais de 150Vdc e 1,9A, respectivamente.

Possui controle de velocidade variável de acordo com um sinal analógico de comando de 5Vdc, reversível conforme o sentido de rotação. Isto significa que todo controle do motor BLDC encontra-se juntamente com o mesmo. Este modelo pode operar em profundidades superiores a 1500m (trabalhando submerso em óleo), e seu peso é 900g no ar e 700g na água.

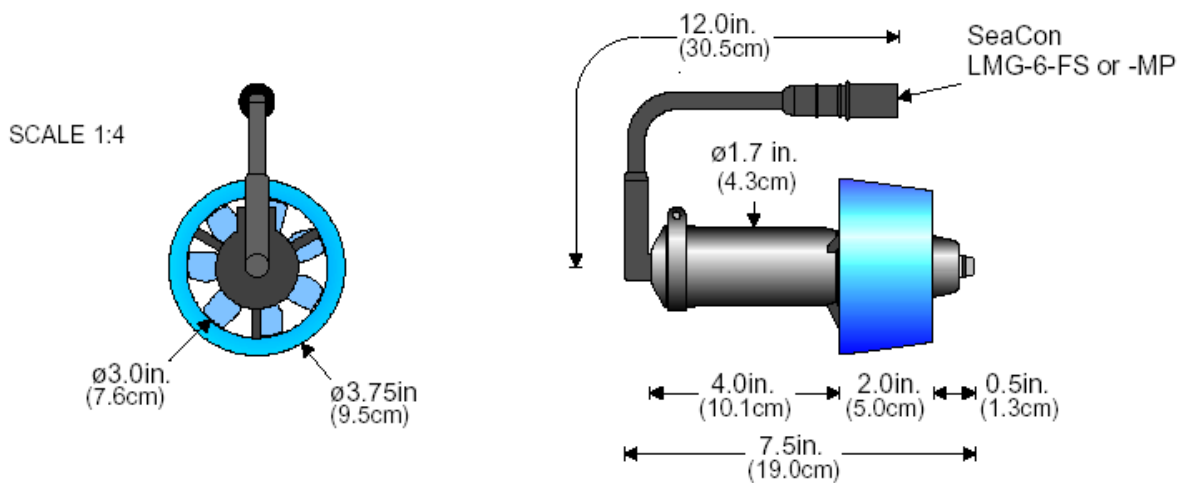


Figura 3.17 – Propulsor 250 – NorthShore Propulsion Inc..

- Sub-Atlantic – SPE-75

O SPE-75, conforme observa-se na figura 3.18, fabricado pela Sub-atlantic Ltd. (www.sub-atlantic.co.uk), que utiliza motor BLDC, pode gerar um empuxo de até 30kgf trabalhando com 320Vdc e 4.7A.

Pode operar em profundidades de até 300m ou até 3000m quando trabalhando imerso em óleo. Possui um diafragma entre o rotor e o estator, criando dois volumes isolados e selados. Assim mesmo se, por algum motivo, entre água pelo eixo do rotor, o estator e a parte eletrônica não sofrerão curto circuito. Seu peso é de 3,3kg no ar e 2kg na água.

Para seu funcionamento, além da tensão de alimentação de 320Vdc, o SPE-75 também necessita de 12Vdc e um sinal de controle analógico de 5Vdc, reversível dependendo do

sentido de rotação.



Figura 3.18 – Propulsor SPE-75 – Sub-Atlantic.

3.4 ATUADORES DE MISSÃO

3.4.1 Manipuladores

As características dos manipuladores são dependentes da aplicação concreta em que o veículo é utilizado. Assim, encontram-se manipuladores simples, com apenas um grau de liberdade, como por exemplo, a extensão (figura 3.19a), para recolher amostras ou para fixação do veículo a uma estrutura, encontrando-se ainda manipuladores com até seis graus de liberdade, os quais, por teleoperação, realizam operações mais complexas, de coleta ou montagem de materiais. Observa-se, na figura 3.19b, um manipulador com 6 DOF, modelo TA40, fabricado por Perry Slingsby Systems, e na figura 3.19c seu respectivo sistema de teleoperação. Este constitui-se em uma miniatura do manipulador, composta por servo-válvulas e *resolvers*, sendo a partir deste sistema que se controla todos os movimentos do manipulador que é acoplado ao veículo.

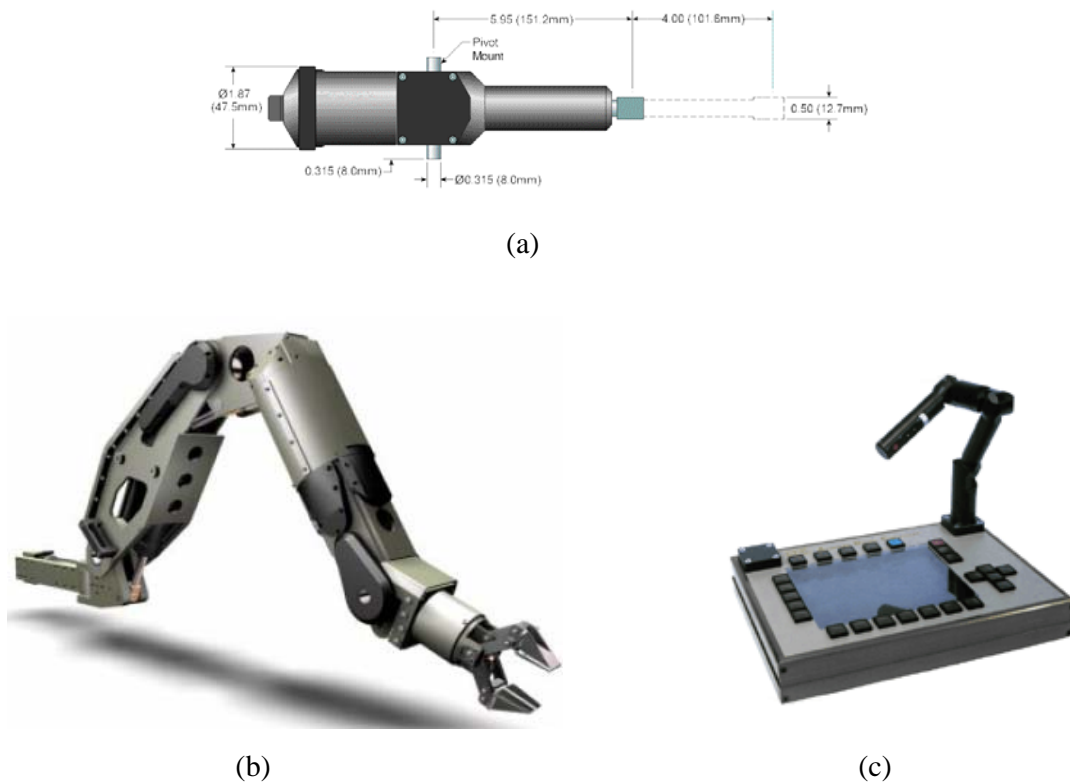


Figura 3.19 – Manipuladores:(a) com um DOF, (b) com seis DOF, (c) dispositivo de teleoperação. (www.perryslinsbysystems.com)

É comum, principalmente em ROVs utilizados para trabalhos em plataformas petrolíferas *off shore*, o uso de dois manipuladores, tendo um deles o objetivo de se fixar à estrutura, dando mais estabilidade ao veículo durante a realização da tarefa.

3.4.2 Escovas para limpeza

A escovas para limpeza são utilizadas para remover crostas depositadas ao longo do tempo na superfície a ser observada. São encontradas no mercado em diversos tamanhos. Na figura 3.20 observa-se uma escova para limpezas pontuais produzida por Seaeeye Marine Limited (www.seaeeye.com).



Figura 3.20 – Escova para ROV

3.4.3 Trincheirador

Observa-se, na figura 3.12, um par de barras paralelas situadas abaixo do nível das esteiras. Estas barras são responsáveis por abrir trincheiras no solo, viabilizando a fixação de cabos ou dutos no subsolo, através de jatos de água de alta pressão. O sistema é retrátil, permitindo ao veículo plena mobilidade.

3.4.4 Módulos de escavação

Módulos de escavação são utilizados em ROVs de grande porte. Eles têm a função de preparar o terreno com a remoção de areia ou escombros, ou até mesmo pequenas escavações. Observa-se, na figura 3.21, o módulo da Série SEM, fabricado por NorthShore Propulsion Inc., fixado na parte frontal do ROV.



Figura 3.21 – Modulo de escavação NorthshorePropulsion

3.5 PROPULSORES COMERCIAIS VIÁVEIS AO PROJETO DO VEÍCULO

A tabela 3.1 lista as características de alguns atuadores, com motores BLDC, encontrados no mercado. Descarta-se, neste trabalho, a utilização de motores juntamente com hélices avulsos, pois apesar de baixo custo, fornecem uma confiabilidade duvidosa devido a blindagem dos motores.

Tabela 3.1 – Propulsores comerciais

Fabricantes	Seaeeye	SeaBotix	NorthShore Propulsion Inc.	Tecnadyne	Sub-Atlantic
Modelo	SM 4	SBT150	SEE050	250	SPE-75
Tensão (Vdc)	250	19	150	150	300
Corrente (A)	4,5	4,5	3	1,9	4,7
Força (kgf)	25 250Vdc/4.5A 2000RPM	2,4	10,1	5,4	30
Peso no ar (kg)	3,7	0,7	2,5	0,9	3,3

Fabricantes	Seaeye	SeaBotix	NorthShore Propulsion Inc.	Tecnadyne	Sub-Atlantic
Peso na água do mar (kg)	2,2	-	1,95	0,7	2
Profundidade máxima (m)	2500	150	750	1500-óleo	300-ar 3000-óleo
Dimensões (mm)(\emptyset Motor/ \emptyset Hélice/Comprimento)	81,3 173 260	-- 95 173		43 76 190	
Possui controle	Sim - Interno	Não	Sim - externo	Sim - Interno	Sim - Interno
Sinal de controle externo	24 VDC 200mA reversível para controle de direção	--		± 5 VDC	± 5 VDC
Condutores	2 – 250Vdc Power 2 – 24Vdc Power 1 – Sinal de Controle 1 – Terra	2 – 19 VDC		2 – 150Vdc Power 2 – Sinal de controle (5Vdc)	2 – 320Vdc Power 2 – 12Vdc Power 1 – Sinal de Controle 1 – Terra
Preços (US\$)		495,00		2.397,00	

A escolha do modelo apropriado deve ser feita após a realização do projeto estrutural, pois, nesta fase, já se poderia dispor de informações sobre a massa, os momentos de inercia, bem como alguma idéia sobre os esforços de arrasto e sustentação. Este conhecimento prévio inicial, mesmo contendo alguma imprecisão, é de grande importância para o dimensionamento dos atuadores, uma vez que seriam conhecidas as necessidades em termos de força e torque que o veículo deverá ter a fim de que o mesmo satisfaça aos requisitos de projeto. Porém, são muitas as opções de projeto estrutural e, evidentemente, esta fase é a mais delicada na construção de um ROV ou AUV. Uma escolha errada para o tipo de estrutura significará dificuldades extras na satisfação dos requisitos de projeto. Na tentativa de ajudar futuros projetos estruturais, apresentam-se, no próximo capítulo, diversas fotos e explicações sobre diferentes tipos de veículos, construídos industrialmente ou a partir de projetos acadêmicos.

4. ESTUDO SOBRE VEÍCULOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, descrevem-se algumas características de diferentes ROVs e AUVs já construídos. O principal objetivo é fazer com que o conteúdo do presente capítulo seja útil ao projeto do ROV, o qual será mostrado nos próximos capítulos.

Os veículos estão separados em duas categorias principais. A primeira contém veículos de inspeção comercial existentes à venda no mercado com objetivos profissionais ou utilizados simplesmente para recreação. A segunda categoria descreve alguns veículos experimentais, construídos por universidades, cujos objetivos incluem a participação em competições ou a realização de experiências científicas.

4.2 VEÍCULOS DE INSPEÇÃO COMERCIAIS

O conhecimento prévio de algumas características destes veículos é interessante uma vez que, a partir deste, podem ser analisadas suas estruturas e ainda, verificado o funcionamento das tecnologias utilizadas. A seguir são realizadas breves descrições de alguns veículos de inspeção comerciais.

4.2.1 LBV300S FO

O LBV300SFO, figura 4.1, fabricado pela Seabotix (www.seabotix.com), é um veículo de pequeno porte. Originou-se da linha LBV150 projetada para trabalhar em até 150m, que, a partir de algumas modificações, passou a trabalhar em profundidades de até 300m. A tabela 4.1 contém um resumo de suas características técnicas.



Figura 4.1 – Veículo LBV300S FO

Tabela 4.1 – Características do Veículo LBV 300S FO

Item	Especificação
Profundidade máxima	300m
Dimensões	Comprimento: 533mm Largura: 330mm Altura: 269mm
Peso (no ar)	13kg
Velocidade máxima	3 Knots (1,54m/s)
Propulsores	2 – Longitudinais 1 – Vertical 1 – Lateral
Forças de propulsão	Longitudinais: 6,5kgf Vertical: 3kgf Lateral: 2kgf - Profundidade
Sensores	- Rumo - Áudio - Temperatura
Câmera	2 câmeras: - Colorida 570 linhas / 0,3 lux - Preto e Branca, 430 linhas / 0,03 lux Com inclinação controlável de 180° cada
Iluminação	50W com intensidade variável
Opcionais	- câmeras diversas - Braço fixo com pinças, com a possibilidade em a transformar em ferramenta de corte - Luzes adicionais - Sonar - Sistema de rastreamento com GPS

O sistema de propulsão, como se observa na tabela 4.1, é composto por quatro propulsores (com motores BLDC): dois traseiros, um vertical e um lateral, fazendo com que o veículo desenvolva uma velocidade de até 3 Knots (1,54m/s), em pequenas profundidades.

Analisando-se o posicionamento dos propulsores, figura 4.2 (a), (b) e (c), pode-se dizer que o veículo é capaz de ser controlado em até quatro graus de liberdade, sendo eles: avanço (*surge*), avanço lateral (*sway*), profundidade (*heave*) e guinada (*yaw*). Os movimentos *surge* e *yaw* são controlados principalmente pelos propulsores traseiros, *sway* pelo propulsor lateral e *heave* pelo propulsor vertical.

O sistema de visão é composto por duas câmeras: uma colorida e outra em preto e branco, tendo, esta última, a vantagem de filmar em ambientes de até 0,03 lux. Estas câmeras são auxiliadas por uma lâmpada halógena de 50W com intensidade variável.

Quanto ao chassi deste veículo, fica difícil realizar alguma análise, pois ele é coberto por carenagens plásticas. Isto faz com que o mesmo não seja de fácil construção, além de dificultar o cálculo dos seus coeficientes de arrasto e sustentação.

Observa-se a utilização, muito comum em ROVs, de uma armação tubular ao redor do veículo, provavelmente para a proteção contra choques mecânicos, mas pode ser utilizado também para fixação de flutuadores ou outros atuadores.

Este veículo encontra-se a venda, no próprio site do fabricante, ao preço de U\$29.000,00, em sua versão de 300 metros de profundidade.



Figura 4.2 – Série LBV - (a) Vista frontal, (b) Vista traseira e (c) Vista lateral

4.2.2 Phantom HD2

Desenvolvido pela Deep Ocean Engineering (www.deeptune.com), o Phantom HD2 (figura 4.3) é um veículo de tarefas leves, podendo trabalhar em até 300 m de profundidade. Suas características principais estão listadas na tabela 4.2.



Figura 4.3 – Veículo Phantom HD2

Tabela 4.2 – Características do veículo Phantom HD2

Item	Especificação
Profundidade máxima	300m
Dimensões	Comprimento: 1400mm Largura: 686mm Altura: 673mm
Peso (no ar)	91kg
Velocidade máxima	-
Propulsores	2 – Longitudinais 1 – Vertical 1 – Lateral com hélices duplas
Forças de propulsão	Longitudinais: 45kgf Vertical: 7kgf Lateral: 7kgf
Sensores	- Profundidade - Rumo - Áudio - Pressão Interna
câmera	Câmera colorida DOE 10:1, com zoom óptico, 450 linhas de resolução Com inclinação controlável de 90°

Item	Especificação
Iluminação	2 lâmpadas de 250W com 3 níveis de intensidade
Opcionais	<ul style="list-style-type: none"> - Sonar - Luzes e Câmeras adicionais - Sistema de rastreamento - Sistema de ampliação de carga: + 3kg de carga - Sensores diversos

Sua construção é aparentemente simples. O corpo do veículo é constituído por um flutuador, que provavelmente também é utilizado para acomodar a eletrônica embarcada do veículo, o qual também é envolvido por armação tubular de aço inox, aumentando assim a sua resistência a choques mecânicos. O flutuador é fixado à armação através de fitas, possibilitando o uso de um mesmo veículo em diferentes missões, dependendo da armação e dos equipamentos presos a ela. Além disto, é possível também acoplar flutuadores adicionais (figura 4.4) à armação, possibilitando uma ampliação em sua capacidade de carga.

O corpo do veículo possui uma saliência inferior, na qual pode-se observar um cilindro. Este é responsável somente pela fixação do propulsor vertical, e também pode contribuir para baixar o centro de massa, aumentando as forças restauradoras, já que o veículo não possui propulsores para controlar os movimentos de rolamento (*roll*) e arfagem (*pitch*).

Pode-se observar que o propulsor lateral é do tipo duplo. Isto se deve ao fato de que propulsores de um único hélice, normalmente, apresentam uma pequena queda de empuxo quando operam em sentido reverso. Esta queda pode ser compensada por sistemas de controle, quando necessário, ou pela utilização deste tipo de propulsor.



Figura 4.4 – Phantom HD2 com flutuadores adicionais
(www.deepocean.com)

4.2.3 Falcon

O Falcon, fabricado pela Seaeye Marine Ltd. (figura 4.5), é um veículo projetado para trabalhar a uma profundidade de até 300 m.



Figura 4.5 – Veículo Falcon
(www.seaeye.com)

Seu chassi é de polipropileno, o que diminui o peso e aumenta a resistência contra a corrosão, sem interferir drasticamente em sua resistência mecânica.

O grande diferencial deste veículo, em relação aos já citados, está na configuração vetorial de seus propulsores horizontais. Esta configuração é utilizada por muitos veículos para aumentar a eficiência do sistema. Como exemplo, pode-se comparar duas situações, em que, utilizando-se os mesmos propulsores, consegue-se um aumento significativo em termos de empuxo, nos sentidos longitudinal, lateral e giro, ao utilizar-se esta configuração vetorial.

Na primeira situação, figura 4.6 (a), têm-se dois propulsores, situados na parte traseira do veículo, responsáveis por aplicar força no sentido longitudinal com intensidade máxima de $F_x = 2F_p$. Os propulsores restantes aplicam forças laterais com intensidade máxima de $F_y = 2F_p$.

Na segunda situação, figura 4.6 (b), as forças laterais e longitudinais são definidas pela soma das componentes, de cada propulsor, nas direções lateral e longitudinal. Supõe-se que o ângulo formado pelo eixo de atuação das forças dos atuadores com o eixo longitudinal seja ξ . Assim, as componentes longitudinal e lateral são definidas por $F_x = 4 \cdot F_p \cdot \cos(\xi)$ e

$F_y = 4 \cdot F_p \cdot \text{sen}(\xi)$. Ao considerar-se $\xi=45^\circ$, as forças ficam definidas por $F_x = 2,82 \cdot F_p$ e $F_y = 2,82 \cdot F_p$.

Conclui-se que, ao se utilizar a configuração vetorial com $\xi=45^\circ$, haverá um aumento no empuxo em torno de 41,4%, nos eixos principais de movimentação do veículo. Vale lembrar que, para simplificar, foi levado em conta que os propulsores geram forças iguais independentes de seu sentido de rotação, simplificação esta que não está longe da realidade em alguns modelos de propulsores.

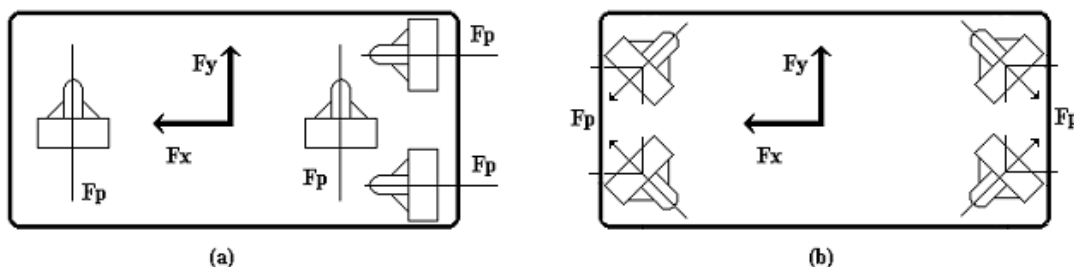


Figura 4.6 – Configurações dos propulsores

Pode-se visualizar as características gerais do veículo na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características do Veículo Falcon

Item	Especificação
Profundidade máxima	300m
Dimensões	Comprimento: 1000mm Largura: 600mm Altura: 500mm
Peso (no ar)	50 kg
Velocidade máxima	3 knots (1,54m/s)
Propulsores	4 – Horizontais "Vectored" 1 – Vertical
Forças de propulsão	Longitudinais: 50kgf Vertical: 28kgf Lateral: 13kgf
Sensores	- Profundidade - Giroscópio - Rumo
Câmera	Câmera 480 linhas de resolução, 0,2 lux Com inclinação controlável de 180°
Iluminação	2 lâmpadas de 75W com intensidade variáveis
Opcionais	- Sonar - Câmera adicional - Sistema de rastreamento - Manipulador de 1 grau de liberdade

4.2.4 xBOT

O xBOT, figura 4.7, fabricado pela Phoenix International (www.phnx-international.com), é pequeno e opera em grandes profundidades (até 7000m).



Figura 4.7 – Veículo xBOT

Este veículo destaca-se por possuir, apesar do seu tamanho, baterias internas, possibilitando uma autonomia de operação de até 10h. Assim, o cabo umbilical é utilizado somente para comunicação de dados. Além disto, o veículo possui um sistema de iluminação baseado em *leds* (brancos e azuis), o que, conforme o fabricante, amplia sua eficiência e fornece um espectro mais favorável a filmagens subaquáticas.

Outros fatores que também chamam a atenção são a utilização de somente três propulsores, o que torna atrativo no aspecto econômico, e a utilização de lastro variável, provavelmente para diminuir o consumo de energia para atingir grandes profundidades. A tabela 4.4 contém algumas de suas características.

Tabela 4.4 – Características do veículo xBOT

Item	Especificação
Profundidade máxima	7000 m
Dimensões	Comprimento: 400mm Largura: 330mm Altura: 305mm
Peso (no ar)	27kg
Velocidade máxima	1 knots (0,51m/s)

Item	Especificação
Propulsores	2 – Axial 1 – Vertical Sistema de lastro variável, controlado pela superfície
Bateria	770 Wh Lithium(24 Volts)
Sensores	-
Câmera	Câmera 560 linhas de resolução, colorida, 0,3 lux Com inclinação controlável de 70°
Iluminação	2 matrizes de 500 leds cada
Opcionais	- 3 canais digitais de entrada ou saída - 2 canais de entrada de 10bits - 1 saída de potência 24V, 24W

4.2.5 HYBALL

Fabricado por Hydrovision Limited (www.hydrovis.demon.co.uk/products.htm), figura 4.8, este veículo pode operar a uma profundidade de 300m.



Figura 4.8 – Veículo HYBALL

O veículo possui quatro propulsores, sendo dois situados na parte traseira (controlam o *surge* e o *yaw*). Os outros, posicionados radialmente e situados na parte superior do veículo, controlam o *sway* e o *heave*.

Dentre alguns fatores interessantes do veículo destaca-se o formato de seu corpo, o qual possibilita uma rotação de 360° em cada uma de suas câmeras. As características específicas deste veículo podem ser observadas na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Características do Veículo HYBALL

Item	Especificação
Profundidade máxima	300m
Dimensões	Comprimento: 535mm Largura: 650mm Altura: 565mm
Peso (no ar)	42kg
Velocidade máxima	2.5 knots (1,28m/s)
Propulsores	2 – Traseiros 2 – Radiais
Motores	Motores com escovas que devem ser trocadas a cada 500h
Sensores	Profundidade Giroscópio Rumo Pressão interna
Câmera	Até 3 câmeras, 2 móveis + 1 Fixa Com inclinação controlável de 360°
Iluminação	- Frontal fixa de 100W - Móvel de 150W Ambas com intensidade variável
Opcionais	- versão offshore, com propulsores mais robustos e maior potência.

4.2.6 Nova Ray

Este veículo, figura 4.9, fabricado por Nova Ray Inc (www.novaray.com), o qual opera em profundidades de até 300m, impressiona pelo seu desenho arrojado.



Figura 4.9 – Veículo Nova Ray

De acordo com o fabricante, ele é de fácil operação mesmo em ambientes de alta corrente. Suas asas arqueadas permitem que o veículo seja rebocado, no modo UTV (*Underwater Towed Vehicle*), com velocidades de até 4m/s. Com a utilização de propulsores, em modo ROV, o veículo pode atingir velocidades de até 2m/s.

Possui dois centros de gravidade, que podem ser trocados conforme as condições do ambiente, aumentando ou diminuindo seus torques restauradores. Além disto, o veículo incorpora a funcionalidade de autopiloto, na qual o operador pode ser ajudado pelo sistema do veículo de três formas: rumo fixo, asas niveladas e profundidade constante, sendo controladas pelo sistema contido no veículo.

É movido por dois propulsores, localizados nas laterais do veículo. Seu controle é realizado através de dois lemes horizontais e um leme vertical. Comparado aos outros veículos, ele possui como desvantagem o fato de não conseguir um movimento puramente vertical, o que seria uma característica interessante em um veículo de inspeção.

Algumas de suas características técnicas podem ser observadas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Características do Veículo Nova Ray

Item	Especificação
Profundidade máxima	300m
Dimensões	Comprimento: 990mm Largura: 1193mm Altura: 394mm
Peso (no ar)	25kg
Velocidade máxima	4,5 knots (2,31m/s)
Propulsores	2 – laterais
Sensores	Profundidade Giroscópio Rumo Temperatura Inclinação (pitch e roll)
Câmera	Câmera colorida CCD de alta resolução 768(H) x 494(V) Pixels Com inclinação controlável de 45°
Iluminação	- Frontal fixa de 150W
Opcionais	- A câmera pode ser substituída por um Sonar

4.3 VEÍCULOS EXPERIMENTAIS

O conhecimento prévio deste tipo de veículo também é importante, pois relata

tendências futuras e testes de dispositivos novos no mercado.

4.3.1 ORCA

O ORCA, figura 4.10, é um AUV construído pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), com o objetivo de participar da Competição Anual de Veículos Autônomos, organizada pelo AUVSI (*Association for Unmanned Vehicle Systems International*).

O ORCA encontra-se em sua sexta edição, e até sua quarta edição, manteve a mesma estrutura básica, comentada a seguir.

O veículo possui, como plataforma de controle, um computador baseado em um processador Pentium, rodando o sistema operacional Linux. É composto de quatro propulsores, dois, situados nas laterais, responsáveis pelo seu avanço e rotação, e dois verticais, que mantêm o veículo em determinada profundidade, pois ele possui empuxo positivo de aproximadamente 2%, o que faz com que o veículo se desloque em direção à superfície quando tem seus propulsores desligados.

A profundidade máxima atingida por ele não é comentada devido ao fato do projeto ter como objetivo somente participar da competição, que utiliza um lago de 3 metros de profundidade máxima.



Figura 4.10 – Veículo Orca-II

Para efeito de simulação, seu formato permite uma boa aproximação de seus coeficientes de arrasto e sustentação. Abaixo, na tabela 4.7, pode-se observar algumas de suas características.

Tabela 4.7 – Características do Veículo Orca-2

Item	Especificação
Profundidade máxima	-
Dimensões	Comprimento: 1524mm Largura: 813mm Altura: - mm
Peso (no ar)	50 kg
Velocidade máxima	3,5 knots (1,8m/s)
Propulsores	2 – Laterais 2 – Vertical
Bateria	420 Wh
Sensores	- Temperatura - Pressão - Corrente nos motores - Tensão das baterias - Giroscópio - Acelerômetro - Sonar - Profundidade
Câmera	1 Câmera colorida

4.3.2 JHUROV

O JHUROV (Johns Hopkins University *Remotely Operated underwater robotic Vehicle*), figura 4.11, foi construído pela Johns Hopkins University, com o propósito de ser uma plataforma experimental para pesquisas na área de robôs subaquáticos.



Figura 4.11 – Veículo JHUROV

Com uma construção simples, ele é constituído de uma armação de tubos de alumínio, na qual estão fixados os 6 atuadores, sensores e, em sua parte inferior, dois cilindros pressurizados. Estes, construídos em uma liga de alumínio, são capazes de trabalhar em profundidades de até 1000 m e acomoda toda eletrônica embarcada do veículo, tanto na etapa de controle dos motores quanto na leitura e conversão dos sinais dos sensores.

Aparentemente, os coeficientes de arrasto e sustentação são de difícil aproximação devido ao formato final do veículo, dados estes que provavelmente só poderão ser levantados em tanques de teste.

Observa-se, através da posição dos atuadores, que o veículo pode ser controlado em 5 graus de liberdade, não sendo possível somente o controle do roll.

Tabela 4.8 – Características do Veículo JHUROV

Item	Especificação
Profundidade máxima	-
Dimensões	Comprimento: 1500mm Largura: 1000mm Altura: 600mm
Peso (no ar)/(água)	200 kg / 2,5kg
Velocidade máxima	-
Propulsores	2 – Laterais 2 – Vertical
Bateria	
Sensores	- Pressão - Giroscópio - Rumo
Câmera	1 Câmera colorida
Iluminação	2 x 100W

4.3.3 Gamera

Construído pela Duke University e NC State University (<http://www.duke.edu/web/robotics/html/auv.htm>), o Gamera, figura 4.12, é um AUV concebido para participar de competições.

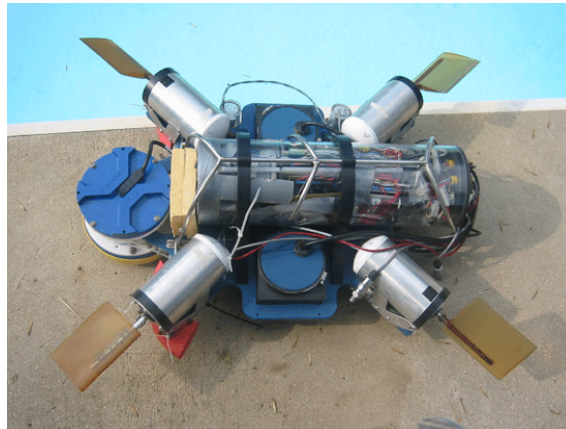


Figura 4.12 – Veículo Gamera

O que mais chama atenção é o fato do veículo utilizar um novo modelo de propulsor. Este novo propulsor não possui partes girantes como os hélices dos atuadores convencionais, e sim pás oscilantes. Assim, como os propulsores são capazes de gerar forças nos 360° perpendiculares ao seu eixo, pode-se controlar os seis graus de liberdade, apenas com quatro propulsores.

Seu chassi é composto de uma base (figura 4.13) na qual são fixados os propulsores, sensores e um cilindro pressurizado que contém a eletrônica embarcada.

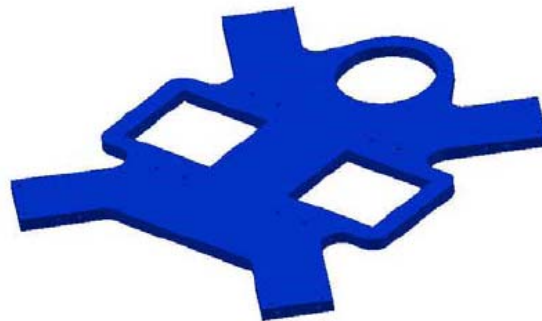


Figura 4.13 – Chassi do Gamera

O veículo utiliza como sistema operacional o Linux Slackware 7.0 , sendo orientado através dos sensores de rumo, inclinação, profundidade contidos em um sensor DVL (*Doppler Velocity Log*).

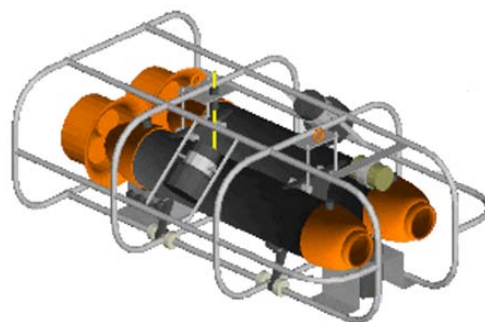
4.3.4 RAUVER

O RAUVER, figura 4.14a, foi projetado pelo Laboratório de Sistemas Oceânicos da Heriot Watt University com objetivo de pesquisa. Seus compartimentos são capazes de suportar a carga de equipamento e baterias para trabalhar tanto no modo ROV quanto no modo AUV.

Sua estrutura é composta de dois cilindros pressurizados, envolvidos por uma armação tubular onde se pode fixar sensores, atuadores externos, flutuadores e etc... Na parte traseira dos cilindros encontram-se os propulsores que controlam seu avanço e giro. À frente dos cilindros estão situadas lâmpadas de 70W cada. Preso em sua armação, figura 4.14b, encontram-se dois atuadores, de menor porte, que geram forças laterais e verticais.



(a)



(b)

Figura 4.14 – RAUVER: (a) veículo, (b) propulsores adicionais.

Observa-se na tabela 4.8 alguns dados técnicos.

Tabela 4.9 – Características do Veículo RAUVER

Item	Especificação
Profundidade máxima	70m
Dimensões	Comprimento: 2000mm Largura: 800mm Altura: - mm
Peso (no ar)	120 kg
Velocidade máxima	3 knots (1,54m/s)
Propulsores	2 – Traseiros 2 – Vertical
Forças de propulsão	Longitudinais: 10kgf cada Propulsores externos: 13kgf cada

Item	Especificação
Sensores	- Detector de água, em cada cilindro - Temperatura interna - Rumo - Profundidade - Sonar - DVL
Câmera	1 Câmera de segurança colorida, 3 lux
Iluminação	2 x 70W

Diversos outros veículos foram pesquisados, construídos principalmente por Universidades ou centros de pesquisa (Aoki, Murashima, Tsukioka, Nakajyoh e Ida, 1999, Chardard e Copros, 2002, Koh, Lau, Low, Seet, Swei e Cheng, 2002, Liddle, 1986, Newman e Stakes, 1994). Porém, estes veículos são normalmente de grande porte, com aplicações específicas e não serão explorados neste trabalho.

5. PROJETO ROVFURG-I

5.1.REQUISITOS DE PROJETO

O Projeto ROVFURG-I, desenvolvido no presente trabalho, tem como objetivo principal o projeto e a construção de um protótipo de veículo subaquático de operação remota, autônomos ou semi-autônomos, utilizando ao máximo tecnologia nacional. Para isto, torna-se necessário o estudo e a construção de um protótipo funcional, neste caso, de um veículo de inspeção, com o objetivo de avaliar e suplantar os principais desafios que naturalmente surgirão em projetos futuros.

O projeto e a construção do protótipo de veículo subaquático objeto da presente dissertação devem, portanto, ser balizados em requisitos visando a futura construção de um veículo para aplicações reais no ambiente subaquático. Entre as características necessárias destacam-se, principalmente, o baixo custo de produção, a facilidade de construção mecânica e o uso, sempre que possível, de tecnologia nacional. Estes requisitos são fundamentais para a conclusão do projeto, pois além de permitirem a utilização de mão de obra local, seus custos estariam dentro do orçamento possível de pequenos laboratórios ou centros de pesquisa.

Além das características citadas, o veículo também deve possuir controle em quatro graus de liberdade, sendo eles: avanço, guinada ou rumo, rolamento e profundidade. O controle destes quatro graus de liberdade dará a mobilidade básica para um veículo de inspeção. Os dois graus de liberdade restantes devem ser controlados passivamente a partir do distanciamento entre os centros de empuxo e o de massa, conforme será explicado posteriormente.

Quanto à profundidade, não será exigido que o veículo alcance profundidades maiores que 5m, uma vez que se trata de um protótipo de teste para ser utilizado como orientação em trabalhos futuros. Isto significa dizer que o protótipo construído será testado somente em piscinas. Outra característica importante é que a flutuabilidade do veículo deve ser neutra, possibilitando assim que pequenos empuxos aplicados por atuadores verticais consigam movimentá-lo mais facilmente.

Em síntese, baseando-se nas características que o veículo deve possuir, são impostas as seguintes especificações de projeto:

- O veículo deve ter funcionalidade específica para tarefas de inspeção no ambiente subaquático;
- O protótipo deve ter a real possibilidade de ser replicado em dimensões maiores;
- São exigidas facilidade de construção, montagem e manutenção;
- Controle ativo em apenas quatro graus de liberdade;
- Controle passivo em dois graus de liberdade (arfagem e rolamento);
- Esforço para utilizar o maior índice de nacionalização possível para os componentes;
- Baixo custo.

A seguir são analisadas algumas propostas de configurações possíveis para o veículo a ser construído. A configuração escolhida será aquela que atender melhor aos requisitos especificados anteriormente.

5.2.CONFIGURAÇÃO CONSTRUTIVA CONCEBIDA - ROVFURG-I

Inicialmente foram consideradas duas possibilidades de configuração, chamadas no presente trabalho de Rov1 e Rov2. A primeira (figura 5.1) tem sua construção baseada em uma estrutura de chassi aberta (open frame). Ela possui seus flutuadores na parte superior. Os atuadores são distribuídos conforme a necessidade e a eletrônica embarcada situa-se em um compartimento isolado. Como vantagens, este modelo apresenta a facilidade de ampliação futura como, por exemplo, a troca de seus atuadores, flutuadores e eletrônica embarcada, de modo a alterar ou ampliar suas aplicações. Outra vantagem interessante é o fator construtivo: o chassi pode ser construído em alumínio, fato que traria resistência mecânica ao conjunto e, ao mesmo tempo, redução de peso se comparado com outros materiais.

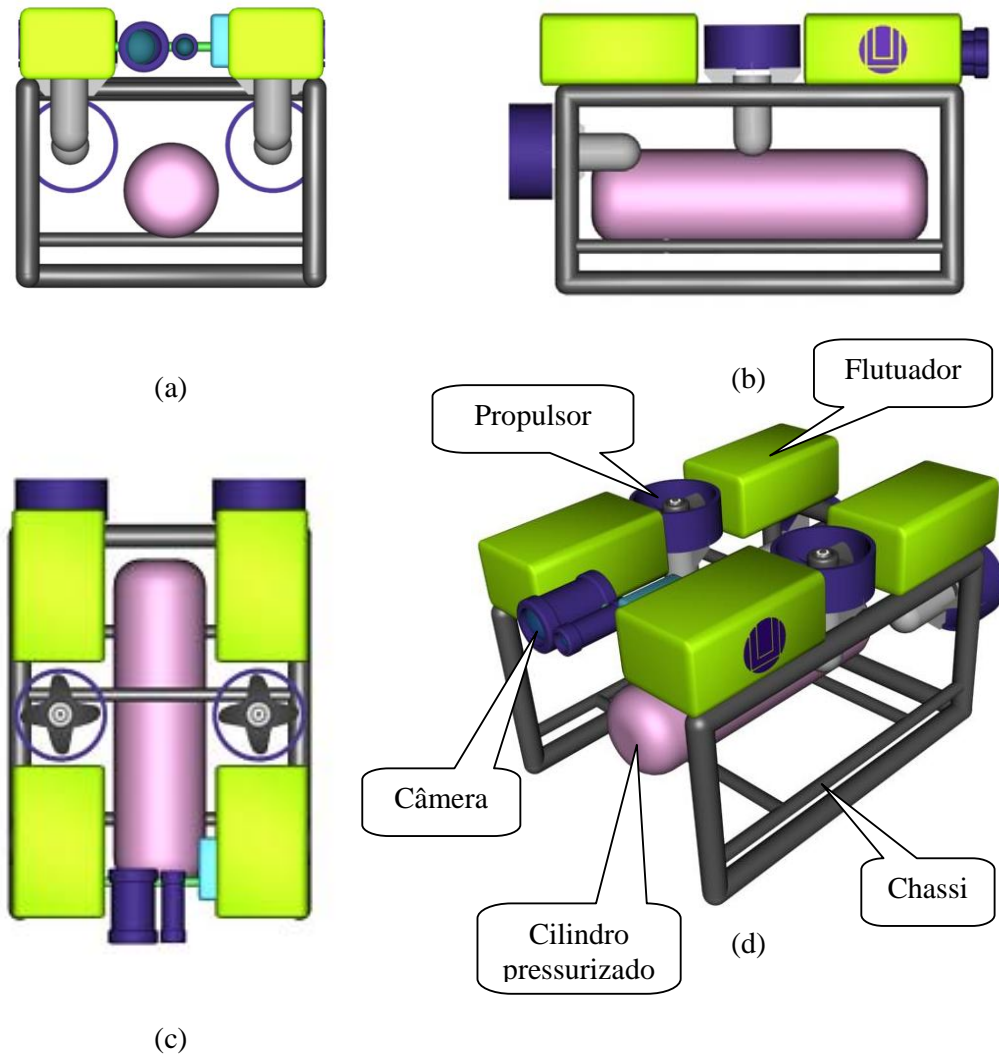


Figura 5.1 – ROV1 – (a) Vistas frontal, (b) lateral, (c)Superior e (d) perspectiva.

Neste veículo, o chassi também é utilizado como proteção dos componentes, garantindo assim uma maior segurança relativa a problemas com colisões contra obstáculos no ambiente subaquático.

O ROV1 possui quatro atuadores: dois traseiros, utilizados para a propulsão horizontal e para efetuar movimentos de guinada e dois superiores, para a propulsão vertical e o controle em rolamento. Note-se que somente o distanciamento entre os centros de empuxo e massa garantiria o controle passivo de rolamento. Os atuadores verticais seriam utilizados também

para ampliar a estabilidade, ou seja, manter o rolamento o mais suave possível de modo a melhorar a qualidade de filmagens subaquáticas.

Como desvantagem pode-se citar a dificuldade na determinação de parâmetros do modelo dinâmico, como por exemplo, o coeficiente de arrasto. Isto se deve ao fato da sua estrutura ser composta de diversos itens externos.

O ROV2 (figura 5.2), tem sua construção baseada em um cilindro que serviria também como flutuador, sendo ainda o único local para acomodar a eletrônica embarcada. Os atuadores estão fixados na parte externa deste cilindro, sendo dois traseiros que controlarão os movimentos horizontais e um vertical para controlar a profundidade. Nota-se que este veículo não controla os quatro graus de liberdade, mas foi considerado devido à sua forma diferenciada, apesar de não obedecer a um dos requisitos básicos. As principais vantagens deste modelo são a dinâmica favorável (baixo arrasto devido ao seu formato), e o tamanho reduzido. Como desvantagens pode-se citar a dificuldade em alterar o projeto ou expandi-lo, além de dificuldades extras relativas a aspectos construtivos.

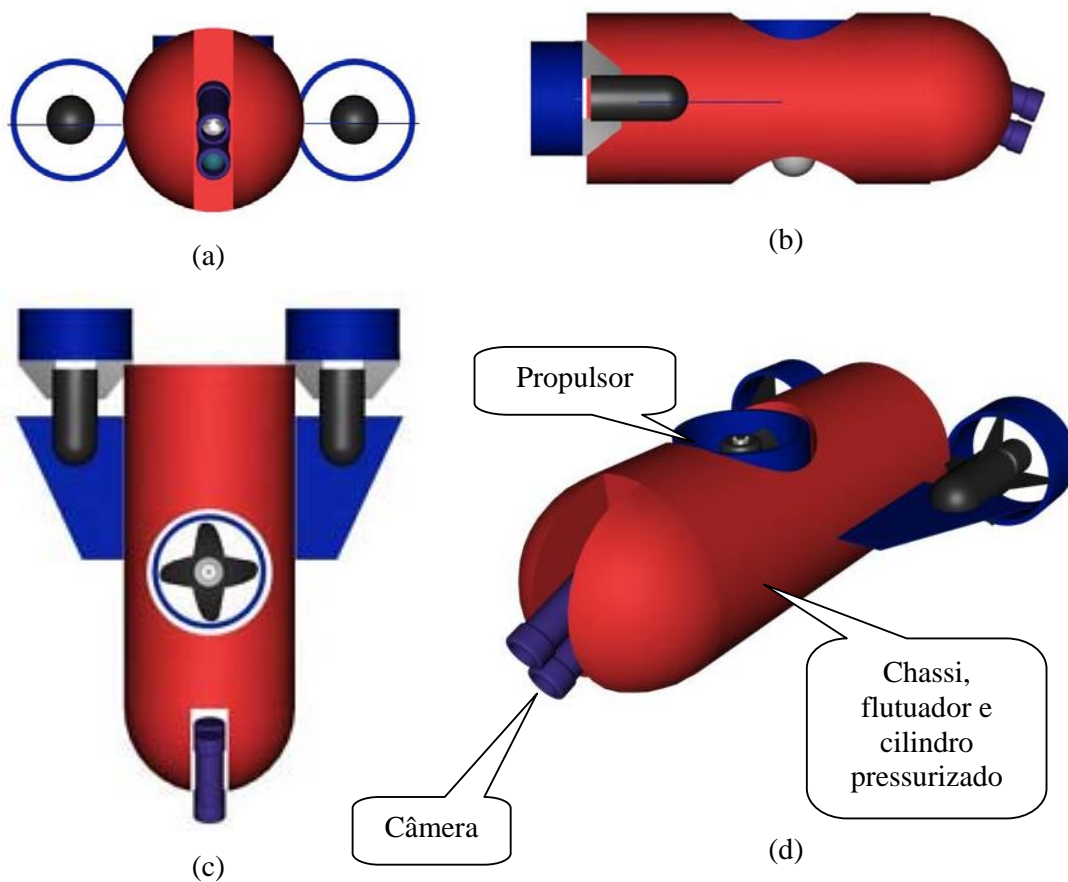


Figura 5.2 – ROV2 – (a) Vistas frontal, (b) lateral, (c) Superior e (d) perspectiva.

Como ambos os veículos citados possuem vantagens e desvantagens, decidiu-se pela construção de um modelo híbrido, com o objetivo de unir as características favoráveis dos dois modelos. Este veículo, aqui chamado de ROVFURG-I (figura 5.3), possui a versatilidade de alterações ou montagens diversas em novos projetos e dimensões reduzidas. Ele é composto de um cilindro, que tem a finalidade de acomodar a eletrônica embarcada e contribuir para a flutuabilidade do veículo. Ao redor dele estará fixado um chassi que terá como finalidade, a fixação de diversos tipos de atuadores e, ao mesmo tempo, contribuirá para a proteção dos mesmos. Além disso, o veículo possui dois flutuadores em sua parte superior e pesos distribuídos conforme a necessidade em sua parte inferior. Esta distribuição de pesos e flutuadores tem como objetivo aumentar a distância entre os centros de empuxo e massa, ampliando assim os torques restauradores.

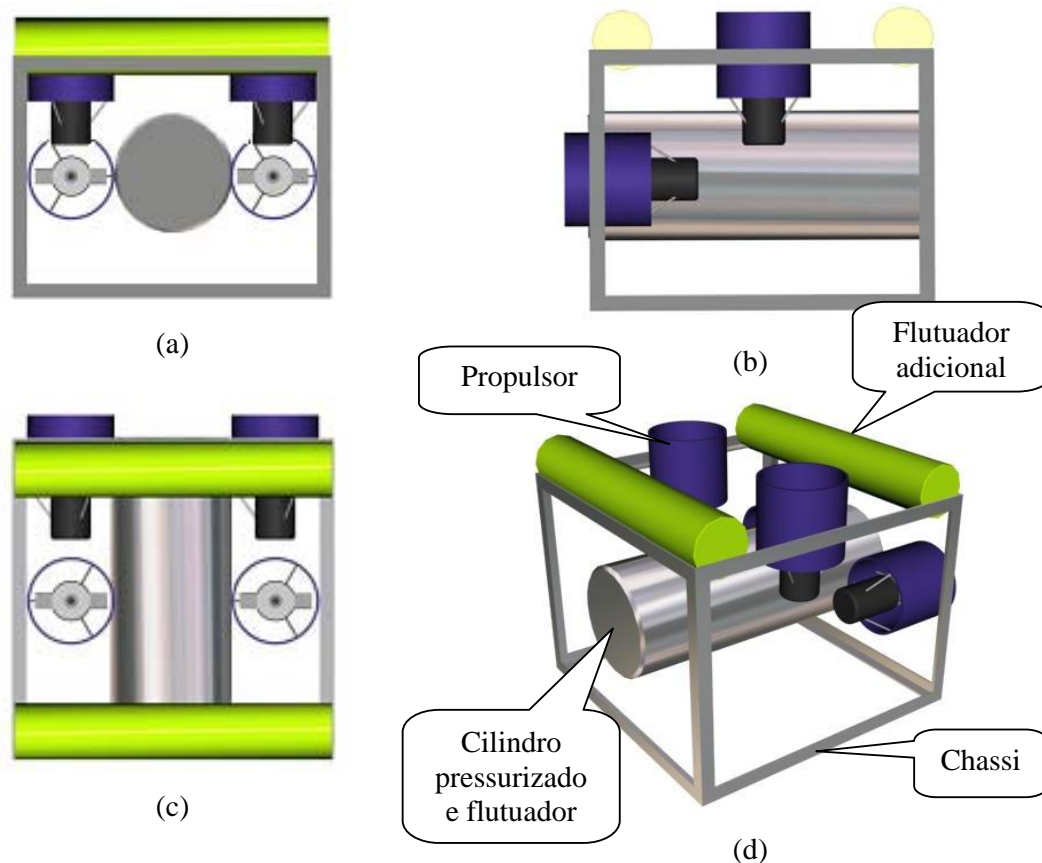


Figura 5.3 – ROVFURG-I – (a) Vistas frontal, (b) lateral, (c)Superior e (d) perspectiva.

Como sistema de propulsão, o ROVFURG-I, possui quatro atuadores, similares ao ROV1 citado anteriormente. O sistema de visão poderá ser acoplado em sua parte frontal em trabalhos futuros. O ROVFURG-I obedece a todos os requisitos de projeto citados anteriormente sendo, portanto, a configuração escolhida para o projeto e a construção.

5.3.PROJETO DE ELEMENTOS BÁSICOS DA CONFIGURAÇÃO CONSTRUTIVA CONCEBIDA

5.3.1 Propulsores

O mercado internacional fornece uma vasta linha de propulsores, conforme citado no capítulo 3. Estes possuem custos elevados e ainda, altas taxas de importação. Um dos objetivos do primeiro protótipo é a construção de um veículo de baixo custo, mas que possibilite a realização de experimentos em malha aberta para a identificação do modelo dinâmico. Optou-se pelo desenvolvimento de atuadores convencionais de corrente contínua. Após algum tempo de pesquisa, decidiu-se pelo uso de um motor que é utilizado na indústria automobilística, cuja foto pode ser vista na figura 5.4. Trata-se de um motor utilizado como bomba d'água em limpadores de pára-brisas. Este motor é vendido atualmente a um custo de R\$18,00, o que o torna viável a qualquer projeto.



Figura 5.4 – Motor utilizado nos propulsores

Além do motor, é necessário também uma hélice para a construção de um propulsor. Várias hélices foram selecionadas como possíveis candidatas. Porém todas foram

originalmente projetadas para fluidos menos viscosos (ar). A consequência principal é a inclinação excessiva nas pás, fato que aumenta o torque necessário para movê-las no meio aquático. Além disto, continham um número ímpar das pás, impossibilitando a retirada de algumas quando necessário por provocar desbalanceamento do conjunto. Após uma série de tentativas conseguiu-se, finalmente, uma hélice utilizada na refrigeração de motores. Esta hélice encontrada possui originalmente seis pás, fato que possibilitou a realização de testes com duas, três e seis pás, conforme desenhos ilustrados na figura 5.5.

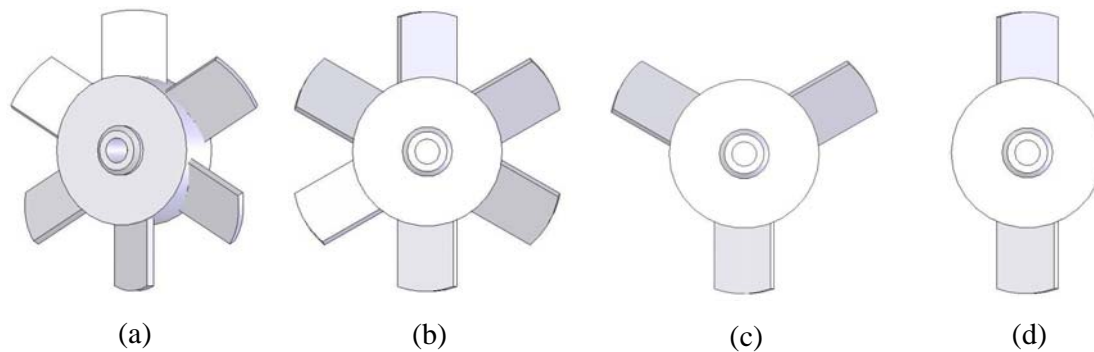
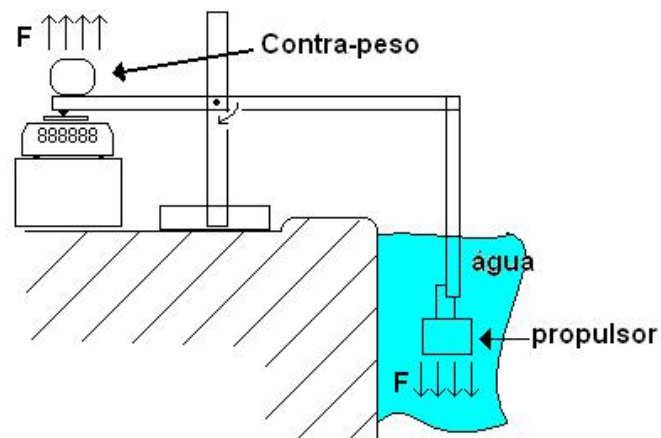


Figura 5.5 – Hélices testadas, com seis (a e b), três (c) e duas (d) pás.

Com o objetivo de direcionar o fluxo do fluido impulsionado pelas hélices, foi colocado um tubo de PVC de 75mm de diâmetro e 70mm de comprimento, de forma que a hélice é posicionada na metade do comprimento do cilindro. Este cilindro permite o direcionamento do fluxo nos dois sentidos de rotação da hélice.

Uma vez construídos os atuadores, o passo seguinte seria a calibração dos mesmos com relação aos parâmetros relacionando corrente (A) e Empuxo (N). Para tanto, foi projetada e construída uma estrutura mecânica em alumínio, cujo desenho, em corte vertical, pode ser visto na figura 5.6.(a). A figura 5.6(b) mostra uma foto obtida durante a realização dos experimentos.



(a)



(b)

Figura 5.6 – (a) Diagrama do experimento, (b) foto no local dos ensaios.

Uma sapata, apoiada no solo, dá sustentação à estrutura. Uma haste horizontal é presa nesta sapata a partir de um pino, deixando a haste com apenas um grau de liberdade. Numa das extremidades desta está preso o propulsor, enquanto que na outra extremidade adaptou-se uma balança digital. Acima da balança, um contra-peso mantém o sistema em equilíbrio. Como a distância entre o lado de apoio do propulsor e o pino (local da articulação) é diferente

da distância da balança a este mesmo pino, utiliza-se o equilíbrio entre os momentos (Nm) para se determinar o empuxo a partir da leitura da balança em regime estacionário, conforme detalhado a seguir.

Para as medidas, primeiramente deixa-se o sistema em repouso e com o propulsor desligado. Logo após, zera-se a balança e a partir deste momento liga-se o atuador controlando sua corrente. Para cada valor de corrente (constante) tem-se o peso registrado na balança, calculando-se então, pelo equilíbrio estático entre os momentos, o respectivo empuxo. Utilizaram-se diversos valores de correntes constantes aplicados ao atuador, gerando-se assim um gráfico relacionando o empuxo e a corrente. Estes experimentos foram repetidos para as diferentes hélices, com duas, três e seis pás, e nos dois sentidos de rotação. A hélice com seis pás apresentou o pior rendimento, tendo sido, portanto, descartada a sua utilização. Ao todo, cinco atuadores foram montados e testados sob as mesmas condições.

A figura 5.7 mostra as curvas empuxo versus corrente para um dos atuadores, nos casos de duas e seis pás, e nos dois sentidos de rotação. Este gráfico põe em evidência a melhor e a pior alternativa, ou seja, os hélices com duas e os com seis pás, respectivamente.

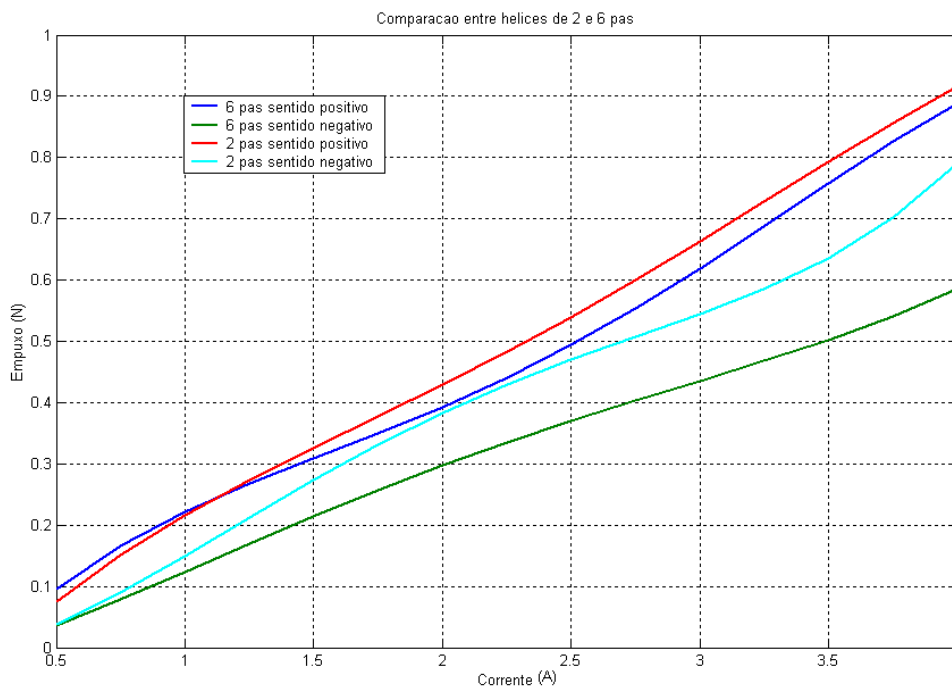


Figura 5.7 – Comparação entre os hélices com duas e seis pás

Além disto, observa-se que o sentido positivo de rotação gera mais empuxo do que o sentido negativo, tendo-se adotado o sentido horário como o positivo. Após a realização

destes primeiros experimentos, conclui-se que o pior rendimento, conforme já mencionado, foi o da hélice de seis pás, enquanto que o melhor rendimento foi obtido com apenas duas pás formadoras da hélice.

Adotaram-se, portanto, duas pás para formarem as hélices de todos os atuadores. Os cinco atuadores foram então montados com o mesmo tipo de motor e hélice. Passou-se, então, à fase de realização de experimentos com todos os atuadores. Para cada atuador, seis curvas corrente versus empuxo foram obtidas, tendo-se adotado os valores médios de empuxo. A repetibilidade foi considerada boa, tendo-se conseguido variações inferiores a 6% em torno da média. As figuras 5.8 e 5.9 mostram os resultados obtidos com os cinco motores, nos dois sentidos de rotação. Além da repetibilidade, percebe-se que, realmente, as curvas apresentaram um comportamento quase linear do empuxo com relação à corrente.

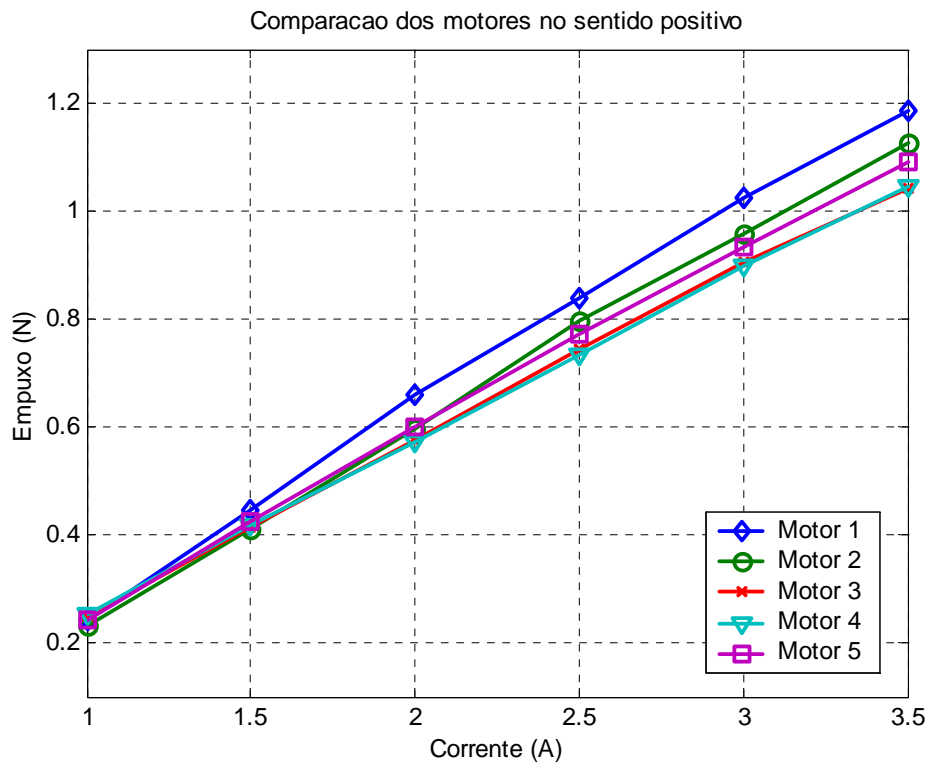


Figura 5.8 – Curvas de resposta dos propulsores no sentido positivo

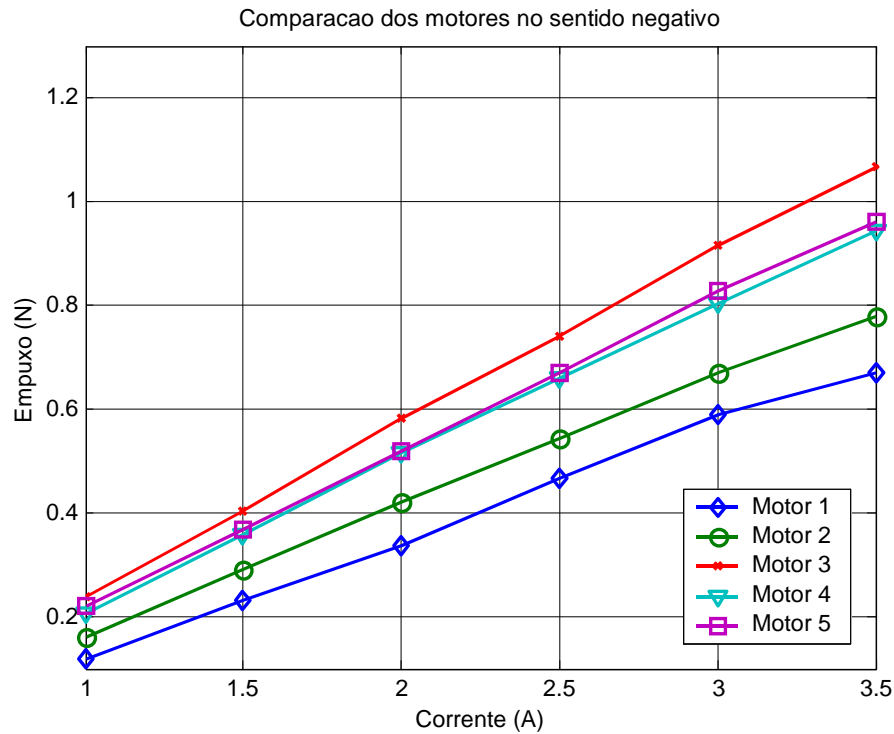


Figura 5.9 – Curvas de resposta dos propulsores no sentido negativo

5.3.2 Cilindro

Foi projetado e construído um cilindro para, além de servir como flutuador, acomodar a eletrônica embarcada do ROVFURG-I. O desenho detalhado deste cilindro pode ser visto na figura 5.10. Sua constituição é em alumínio, sendo que o seu formato e dimensões foram projetados para garantir resistência mecânica suficiente a fim de permitir que o mesmo atinja uma profundidade de até 200m. Conforme pode ser visto, o cilindro possui alguns dutos em sua parte inferior, os quais se destinam à passagem de cabos. Embora a melhor solução seja a utilização de conectores especiais (produtos comerciais), os dutos foram a opção escolhida, no caso do presente protótipo, principalmente pela redução de custos que os mesmos proporcionaram.

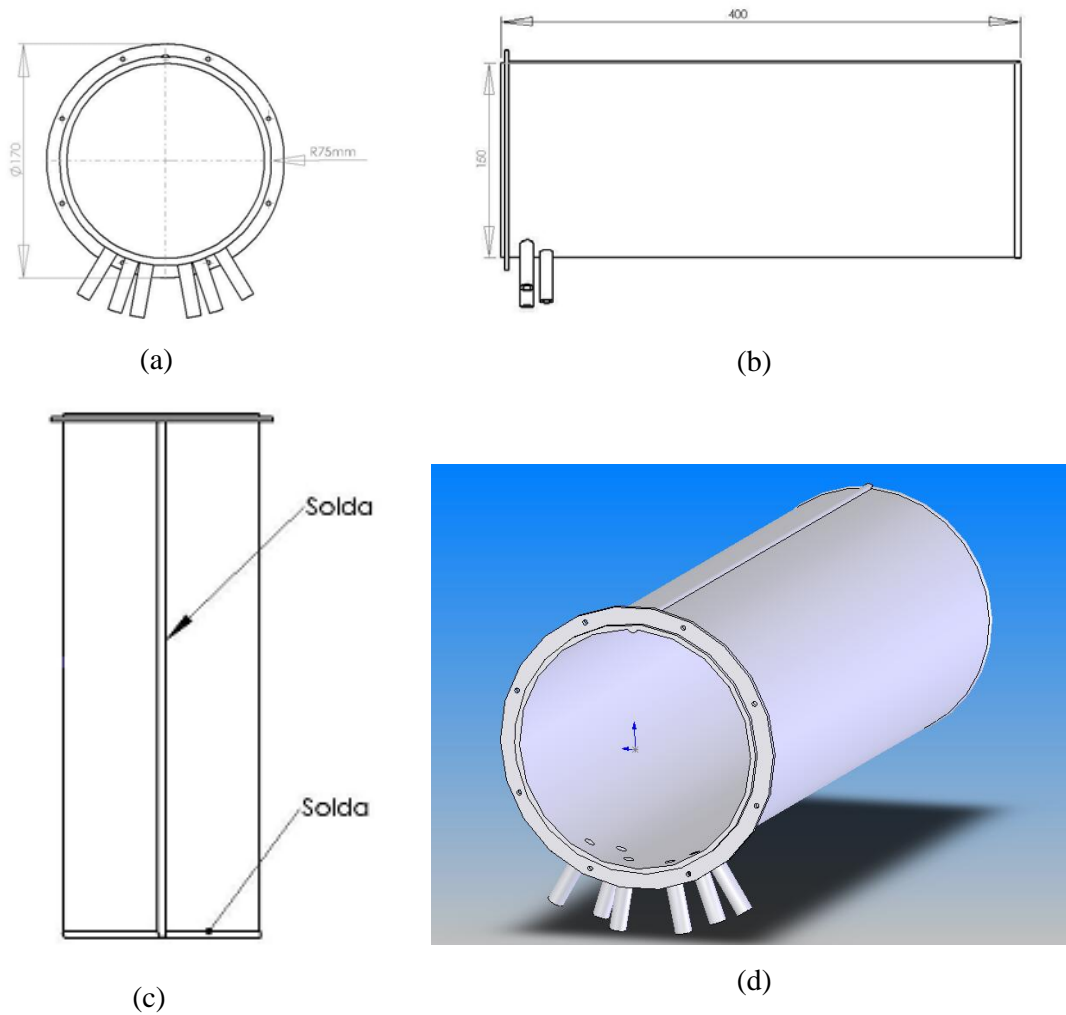


Figura 5.10 – ROVFURG-I – Cilindro – (a) Vistas frontal, (b) lateral, (c) superior e (d) perspectiva.

Uma tampa foi soldada à parte traseira do cilindro, enquanto que na parte dianteira outra tampa é fixa a partir de parafusos. Esta última possui uma estrutura de vedação baseada em um encaixe sob pressão em dois milímetros de profundidade, além de possuir uma outra vedação mais externa consistindo de uma borracha prensada entre os parafusos e o flange de fixação no cilindro.

5.3.3 Chassi

Conforme a escolha feita na seção 5.2, a opção foi a utilização de uma estrutura aberta para o protótipo ROVFURG-I. O projeto do chassi para uma estrutura aberta é mais simples, embora exija um cuidado especial, pois é nele que serão acoplados todos os componentes do veículo. Deve-se, portanto, garantir simetria e ainda, um arrasto mínimo, permitindo otimizar o desempenho com os empuxos disponíveis dos atuadores.

O projeto foi realizado utilizando-se chapas dobradas de alumínio com três milímetros de espessura, tendo-se utilizado processos de solda em todas as ligações entre as chapas. Este processo garante uma ótima rigidez a toda a estrutura. A figura 5.11 mostra as vistas parciais do chassi, bem como uma perspectiva do mesmo. Foram previstos suportes de sustentação para o cilindro e para os atuadores. Pode-se perceber que existem prolongamentos feitos com barras em alumínio, cujo único objetivo é dar proteção aos atuadores contra impactos externos.

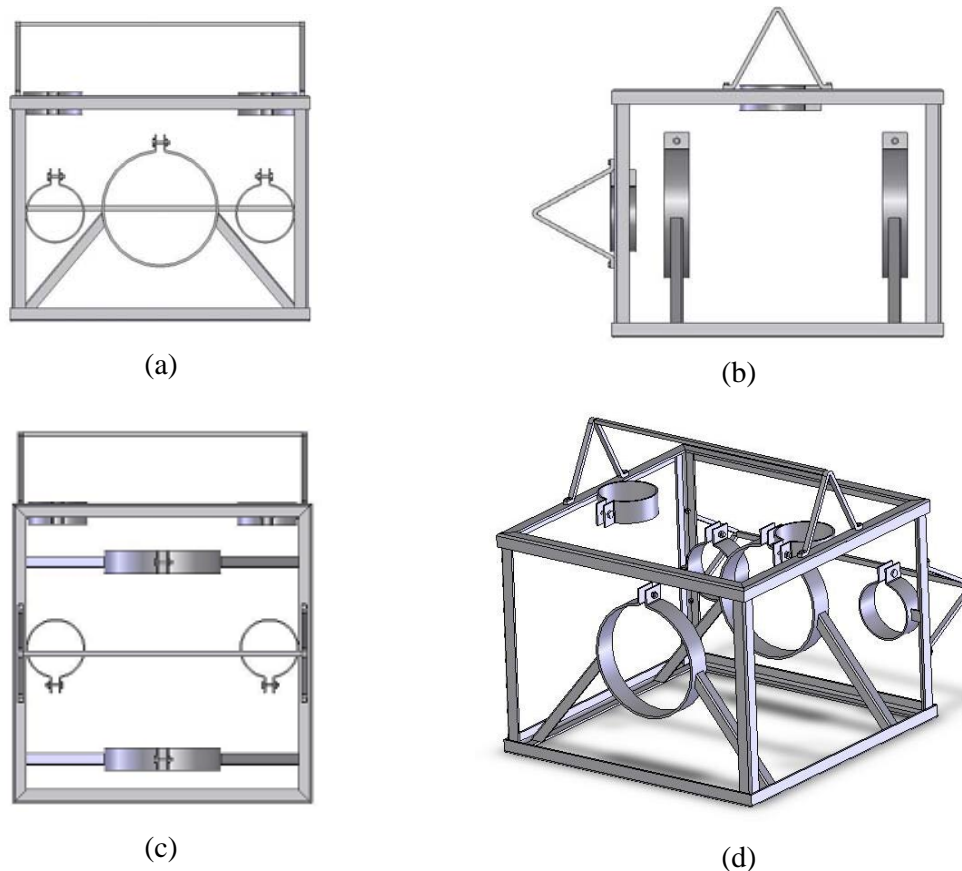


Figura 5.11 – ROVFURG-I - Chassi – (a) Vistas frontal, (b) lateral, (c) superior e (d) perspectiva.

5.3.4 O Projeto Estrutural

O veículo foi modelado completamente em ambiente computacional. Cada componente do veículo foi cuidadosamente modelado para compor a figura 5.12. Este modelo foi criado com o objetivo de calcular alguns parâmetros como centro de massa e eixos principais de inércia, diminuindo o tempo gasto para estes cálculos.

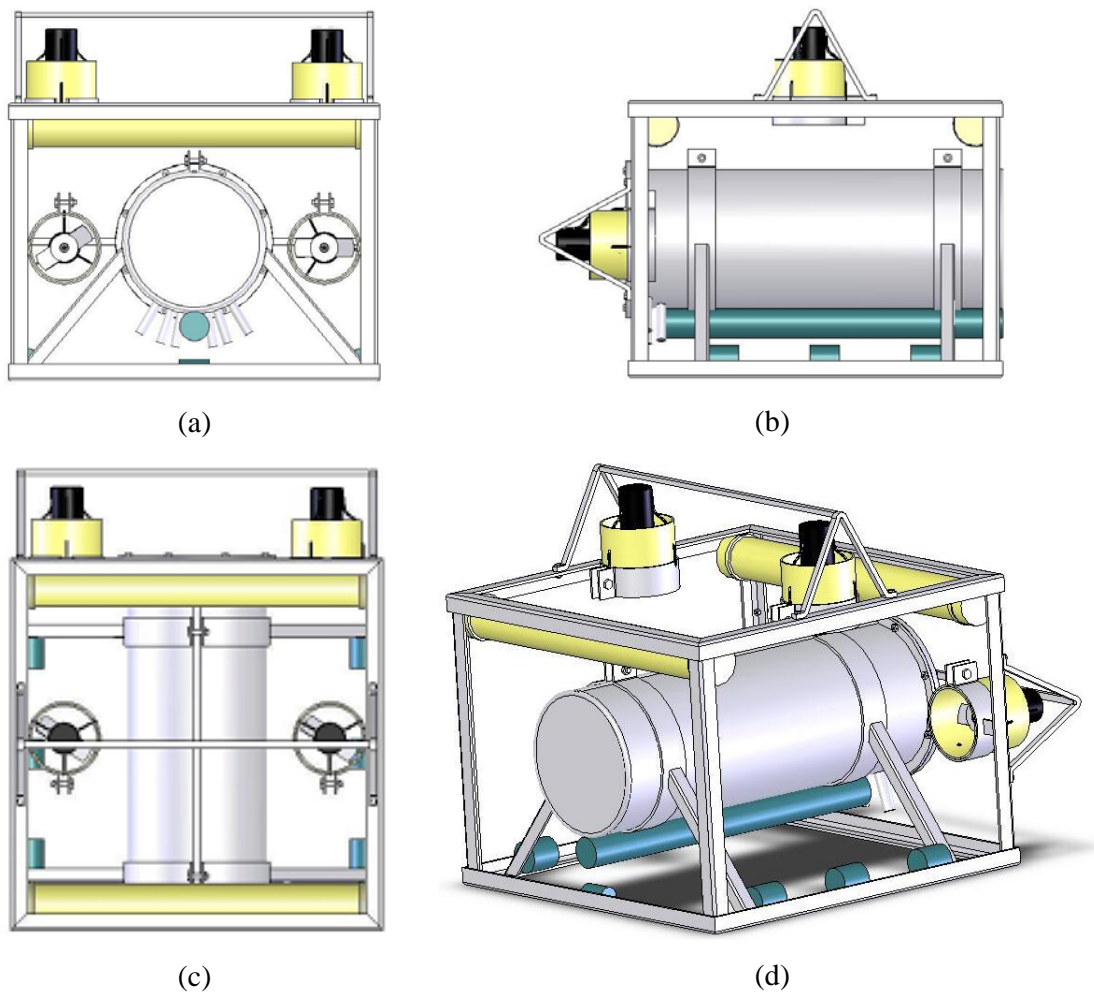


Figura 5.12 – ROVFURG-I – Projeto – (a) Vistas frontal, (b) lateral, (c) superior e (d) perspectiva.

Após a modelagem, foi possível extrair os seguintes parâmetros físicos do veículo:

Propriedades do veículo

$m = 9,81\text{kg}$

Centro de massa: (m)

$X_g = 0,200$

$Y_g = 0,191$

$Z_g = 0,175$

Principais eixos de inércia e momentos de inércia, com referência ao centro de massa: ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

$I_x = 0,199 \cdot (0.000, 0.994, 0.104),$

$I_y = 0,261 \cdot (-1.000, 0.001, -0.002),$

$I_z = 0,289 \cdot (-0.002, -0.104, 0.994),$

Todos os parâmetros foram obtidos com base no sistema de referência mostrado na figura 5.13.

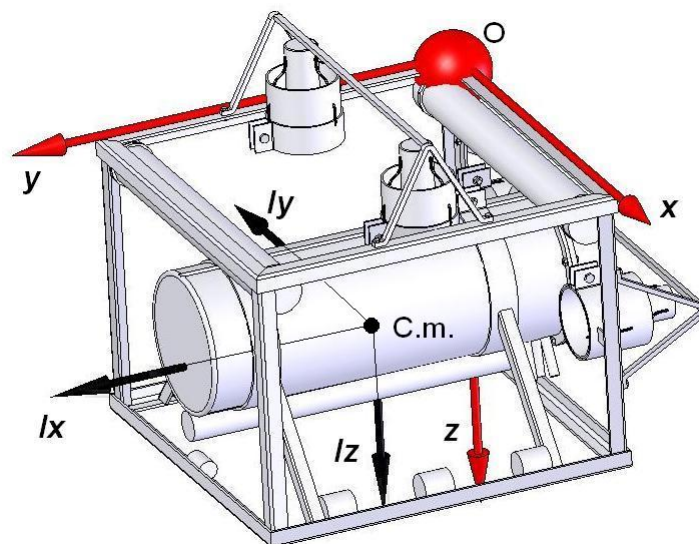


Figura 5.13 – ROVFURG I – Sistema de referência

Os parâmetros físicos foram calculados a partir de cálculos programados no MATLAB. A utilização de ambiente computacional é importante na medida em que pequenas modificações que se façam necessárias são introduzidas com facilidade no mesmo, tendo-se acesso, de forma rápida e eficiente, aos parâmetros físicos, fundamentais à obtenção do modelo dinâmico. Na figura 5.14, pode-se observar uma foto do veículo construído.



Figura 5.14 – Foto do ROVFURG-I.

5.4 ELETRÔNICA EMBARCADA

Tem-se o objetivo de controlar o veículo, ou seja, adquirir, *on-line*, sinais dos sensores, processá-los e, como resultado deste processamento, enviar os sinais de corrente aos atuadores para gerar os empuxos necessários ao controle do veículo. Portanto, fica evidente a necessidade de se construir um sistema eletrônico e de potência para efetuar este controle, sistema este que deve executar três funções básicas: comunicação, controle dos atuadores e sensoriamento. Estas funções e seus respectivos projetos são descritas a seguir.

5.4.1 Comunicação

A figura 5.15 ilustra, de forma sucinta, a estrutura funcional do veículo, inclusive a parte relativa à comunicação. De modo a interligar o veículo com a superfície, foi desenvolvido um *hardware* no qual é usado um microcontrolador PIC16F877, fabricado pela Microchip (www.microchip.com), que controla, a partir de sua interface serial, a comunicação envolvendo a troca de sinais entre o microcomputador, no qual está a lei de controle, sensores e atuadores. A escolha deste microcontrolador foi feita em razão do mesmo atender às especificações de projeto (precisão, velocidade de processamento e tempo de discretização), bem como à sua fácil utilização e ao seu baixo custo. A comunicação se dá a uma velocidade de 9600bps, utilizando o protocolo padrão RS232, que é reconhecido automaticamente pelo PIC e também pelo PC, que estará na superfície. Para conectar fisicamente estes, é necessária a utilização do C.I. Max232, responsável pela adequação dos sinais entre ambos.

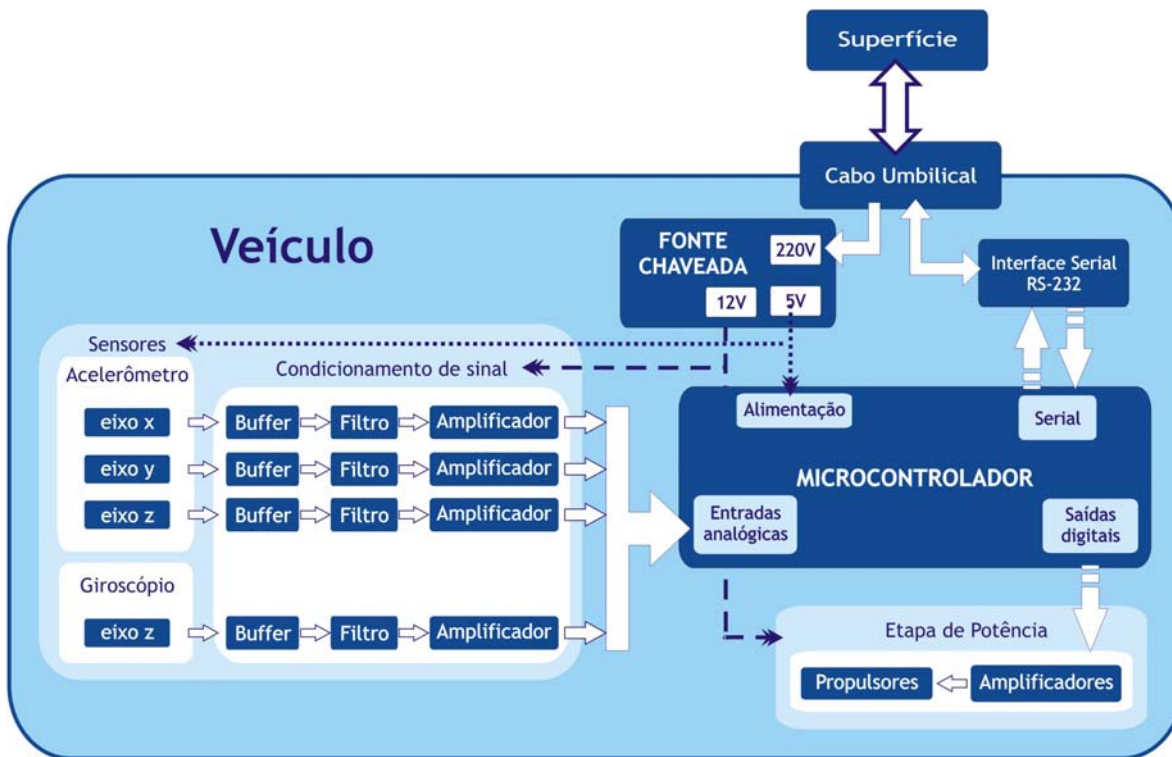


Figura 5.15 – Estrutura funcional do veículo.

Na superfície, um PC rodando um software construído em Turbo C, recebe e envia informações importantes ao veículo. Pode-se observar, na figura 5.16, o desenho esquemático do circuito utilizado para a comunicação com a superfície.

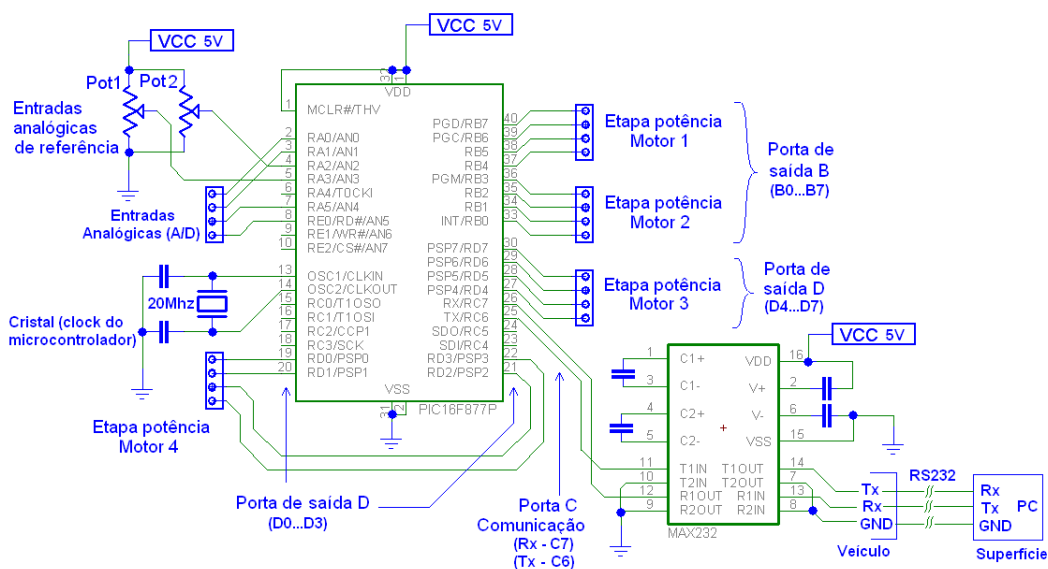


Figura 5.16 – ROVFURG I – Circuito para comunicação com a superfície

A velocidade da comunicação permite trabalhar com a leitura de todos os sensores a bordo (quatro sensores) em intervalos de tempo de 20ms, o qual é suficientemente pequeno considerando-se a velocidade de dinâmica do veículo projetado.

O cabo que fará a conexão possui três vias e é blindado para evitar ruídos, sendo encontrado facilmente em casas de eletrônica, pois não é de uso específico em veículos subaquáticos.

O microcontrolador é utilizado tanto para a comunicação quanto para o controle dos motores e a leitura dos sensores. As portas de saída “B” e “D” estão ligadas diretamente ao circuito de potência para controle dos quatro atuadores. Na porta “A” estão ligados os circuitos de condicionamento dos sinais provenientes dos acelerômetros e do giroscópio. Dois bits da porta “C” estão sendo utilizados para a comunicação. Nas entradas analógicas “AN2” e “AN3”, estão ligados o potenciômetro, cujo objetivo é fornecer ao microcontrolador as tensões de referências máxima e mínima para a digitalização das outras entradas. Esta digitalização é realizada com a resolução máxima deste componente, que é de 10 bits. Isto significa que o microcontrolador discretiza em 1024 pontos os sinais que estão compreendidos entre as referências máxima e mínima das entradas analógicas.

5.4.2 Controle dos Atuadores

Não fazia parte dos objetivos do presente trabalho a realização de experimentos em malha fechada, mas apenas em malha aberta, com a principal finalidade de, a posteriori, confrontar simulações e experimentos, a fim de possibilitar a identificação de parâmetros e o refinamento do modelo dinâmico do veículo. Portanto, projetou-se um circuito de controle dos atuadores com apenas três níveis de velocidade de rotação para as hélices. A possibilidade de se controlar cada um dos quatro atuadores com três diferentes velocidades gera múltiplas opções de experimentos em malha aberta, necessários aos objetivos propostos.

As saídas digitais do micro controlador são ligadas diretamente no circuito da figura 5.17, de modo que ele escolha o sentido de rotação e a corrente de cada atuador. A inversão do sentido dos atuadores ocorre através do chaveamento de relés, controlado pelo bit mais significativo (bit2) dos três bits que são utilizados para cada atuador. Os outros dois bits

selecionam a corrente, a qual pode assumir os valores de 0, 1, 2 e 3 A, conseguidas a partir das respectivas combinações 00,01,10 e 11.

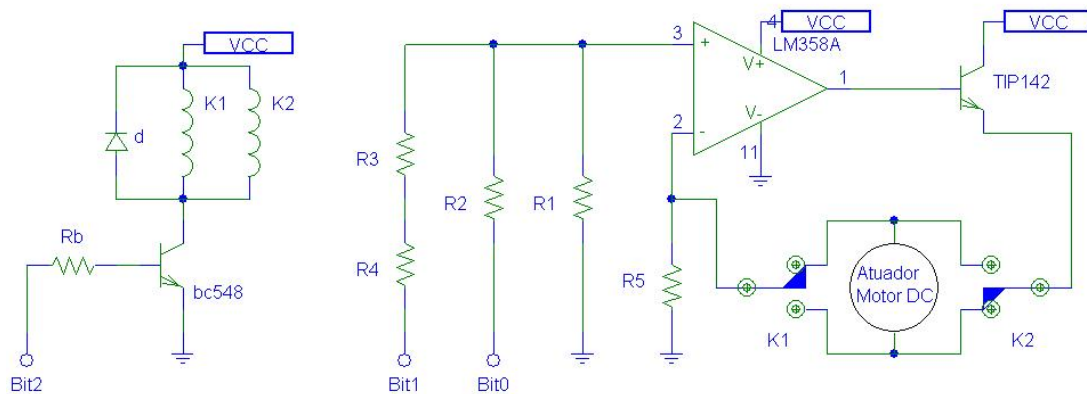


Figura 5.17 – ROVFURG I – Circuito para controle dos atuadores

Para a conversão dos bits para a corrente, foi utilizada uma rede resistiva que converte as saídas digitais em tensões de 0, 1, 2 e 3 Volts. A partir deste ponto, foi utilizado um circuito de conversão de tensão em corrente, que utiliza um amplificador operacional (LM358) como um dispositivo de controle ligado a um transistor de potência (Tip142), o qual consegue fornecer a corrente necessária para o circuito.

5.4.3 Sensoriamento

O sensoriamento é um dos principais componentes do veículo, pois é a partir deste que se observa o seu comportamento dinâmico. O sistema de sensoriamento, também conhecido como IMU (*Inertial Measure Unit*), situa-se a bordo do veículo e tem como objetivo realizar a leitura de variáveis como, por exemplo, a aceleração. Estes dados serão posteriormente enviados à superfície. A compra de uma unidade de medição inercial é descartada devido ao seu alto custo. Para resolver este problema, desenvolveu-se uma etapa de sensoriamento simples que fará a leitura de algumas variáveis consideradas mais importantes.

O primeiro passo, para o desenvolvimento desta etapa, foi a escolha dos sensores a serem utilizados. Os sinais necessários para análises e controles futuros são as acelerações nos três eixos e o giro em relação à horizontal (guinada).

Para a medição de aceleração, foram escolhidos acelerômetros do tipo ADXL203, fabricados pela Analog Devices (www.analog.com). Este acelerômetro possui dois eixos de medição e, portanto, somente dois deles são necessários para a medição nos três eixos. O ADXL203 foi selecionado devido à sua alta resolução (1mg, a maior resolução encontrada no mercado) e seu baixo custo.

A medição do giro do veículo foi conseguida a partir da aquisição de um sensor (giroscópio), também fabricado pela Analog Devices, que mede velocidade angular sobre o eixo Z (velocidade de guinada). Assim, pode-se descobrir a orientação atual do veículo em relação à orientação inicial, dado interessante para o controle. Além disto, estes componentes podem ser utilizados tanto para este veículo quanto para outros ROVs ou AUVs futuros.

Após a escolha dos sensores, foi necessária a construção de uma etapa para o condicionamento do sinal, de modo a adaptar os sinais de saída dos sensores às entradas analógicas do micro controlador. Isto foi realizado a partir da utilização de amplificadores operacionais.

Primeiramente, como o sinal do acelerômetro possui uma corrente muito baixa, utilizou-se um buffer, isto é, um circuito que fornece em sua saída a mesma tensão de entrada, mas com maior corrente, possibilitando a utilização deste sinal em outros circuitos.

Posteriormente, para reduzir ruídos, foi utilizado um filtro Butterworth RC ativo, configurado para passa-baixa, cujo circuito esquemático pode ser observado na figura 5.18 (VALKENBURG, 1986).

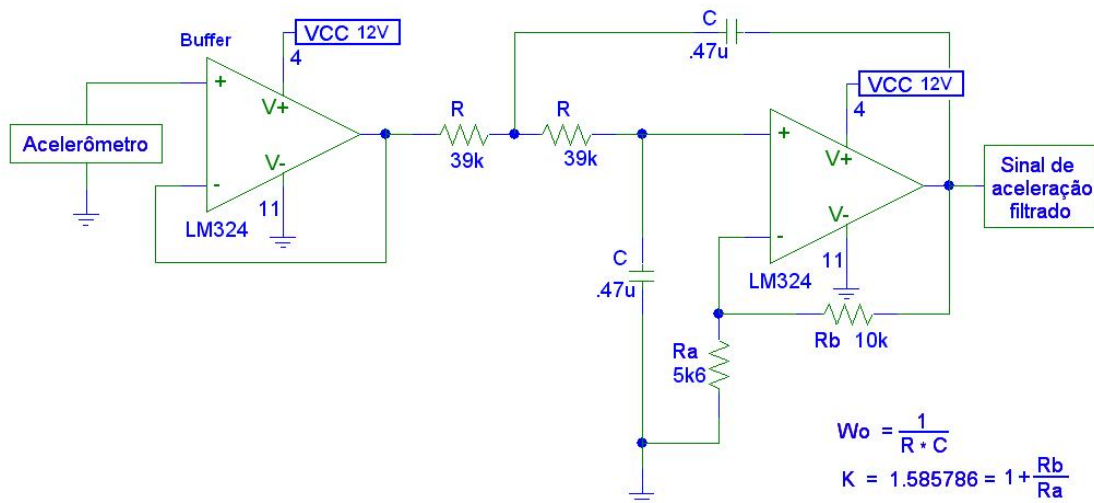


Figura 5.18 – ROVFURG I – Filtro para o sinal dos acelerômetros

A próxima etapa consiste em um arranjo que fornece ao mesmo tempo um controle de ganho e um ajuste de *offset*, cujo circuito é mostrado na figura 5.19. Assim, o nível de tensão de saída depende da posição do potenciômetro (Pot1) e da tensão de referência negativa V-.

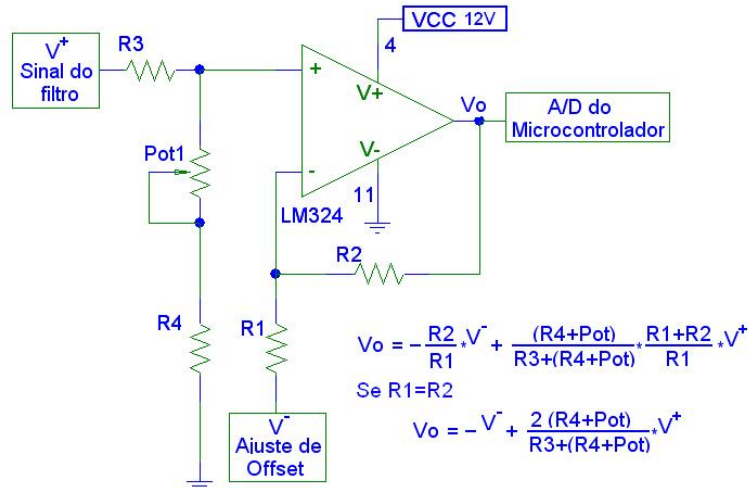


Figura 5.19 – ROVFURG I – Circuito de amplificação

Com todo o sistema interligado é possível obter, no micro que ficará na superfície, os sinais dos sensores com uma resolução de 10bits e em intervalos de tempo de 20ms e ainda, comandar os atuadores em três níveis de corrente cada. A figura 5.20 mostra o sistema completo.

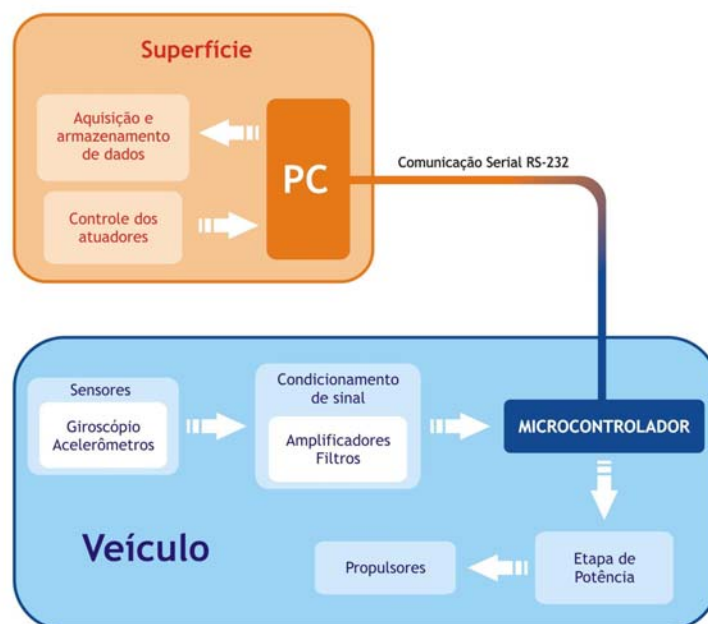


Figura 5.20 – ROVFURG I – Sistema completo

Um teste simples foi realizado e pode ser observado na figura 5.21. O objetivo foi verificar se havia ou não alguma interferência eletrônica dos motores provocando ruídos nos sinais dos sensores. Inicialmente o veículo foi fixado no interior da piscina, de forma que não havia a possibilidade de movimentos. Os sinais dos acelerômetros e girômetro começaram a ser medidos e, posteriormente, os motores foram ligados. Estes sinais foram mostrados na figura 5.21 ainda em unidades de máquina, pois somente no próximo capítulo é que serão identificadas as constantes de conversão entre unidades de máquina e as respectivas unidades físicas dos sensores. Existem duas retas tracejadas indicadoras dos instantes nos quais os motores foram ligados e desligados. Pode-se observar que não há mudanças significativas nos padrões dos sinais antes e após a ativação dos motores, ou seja, os ruídos observados são oriundos dos próprios sensores e não induzidos eletronicamente pelos motores.

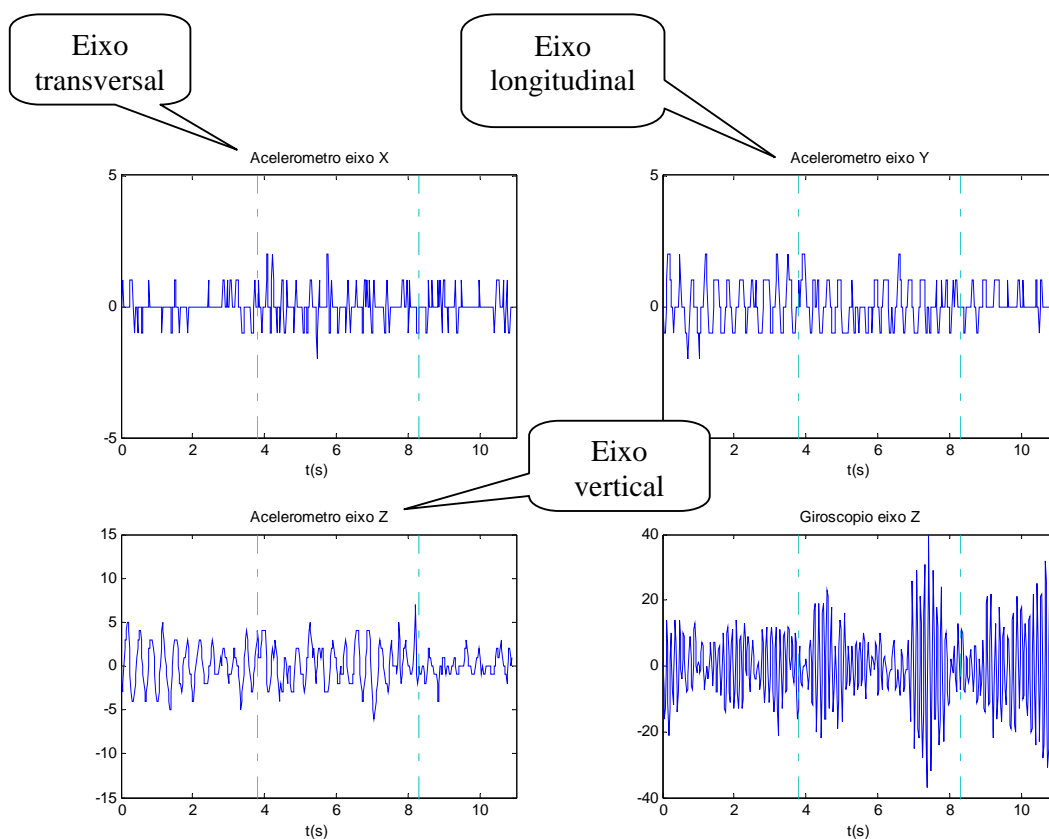


Figura 5.21 – ROVFURG I – Teste de interferência

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Os sensores destinam-se a medir grandezas físicas sobre um determinado sistema e são fundamentais para a implementação de leis de controle em malha fechada. Entretanto, estas grandezas físicas são medidas originalmente em unidades de máquina, consistindo normalmente em sinais de tensão ou corrente. Antes de utilizá-los em algum experimento (planta física), torna-se necessário então realizar a calibração dos sensores, a fim de se determinar as formas de conversão entre as unidades de máquina e unidades físicas. Esta seção destina-se a apresentar os formalismos e a estrutura de testes para a calibração dos sensores presentes no ROVFURG-I.

6.1.1 Acelerômetros

Os acelerômetros utilizados para a aquisição de dados do veículo foram escolhidos principalmente por trabalharem com os menores sinais de aceleração dentre os modelos de acelerômetros encontrados. Porém, os ADXL203, apresentaram respostas inesperadas. Apenas nos casos de acelerações muito pequenas, ao invés de fornecerem, em sua saída, sinais de tensão proporcionais às suas acelerações, fornecem sinais proporcionais às velocidades do veículo. Até o momento, não foi encontrada uma razão concreta para a alteração dos sinais de saída. Este erro pode ocorrer devido a aspectos construtivos do componente ou devido à sua eletrônica interna, que é composta de demoduladores, moduladores e alguns filtros. Porém, conforme dito anteriormente, observou-se que este fato ocorre somente para acelerações pequenas, o que é o caso deste veículo.

Para solucionar este problema, seria necessária a construção de propulsores mais potentes, capazes de impulsionar o veículo a maiores acelerações, ou a aquisição de sistemas de medição de aceleração mais sensíveis, o que seria inviável em razão dos custos envolvidos.

Assim, decidiu-se investigar melhor este sinal proveniente dos acelerômetros, a fim de vislumbrar a possibilidade de utilizá-lo como velocidade nos casos de pequenas acelerações do veículo.

Realizou-se uma bateria de resultados experimentais a fim de se proceder a uma análise mais detalhada sobre os sinais provenientes dos acelerômetros. A seguir são mostrados e comentados seis resultados, obtidos sob as mesmas condições.

A figura 6.1 mostra um destes resultados. O ROVFURG-I foi colocado na piscina, tendo-se mantido os motores desligados. A aquisição dos sinais dos acelerômetros foi iniciada ainda com os motores desligados. A primeira reta tracejada vertical indica o instante no qual os dois motores atuantes no plano horizontal foram ligados. O veículo passou a se movimentar numa linha reta, e totalmente submerso. Marcadores na lateral da piscina indicavam o espaço percorrido na direção frontal do movimento (eixo Y do referencial do corpo, coincidente, neste caso, com a direção inercial). A segunda reta tracejada vertical vista nas respostas da figura 6.1 indica o instante no qual os motores foram desligados, coincidente à distância percorrida de 1m.

Os sinais em unidade de máquina (um) colhidos do acelerômetro em cada um dos seis experimentos foram integrados no tempo. Os valores obtidos com a integração destes sinais entre os dois instantes (início e término do acionamento dos motores) são proporcionais às distâncias percorridas pelo veículo, equivalente a 1m. As constantes de proporcionalidade são conversoras de unidades de máquina (um) para unidades físicas (m/s), as quais podem ser vistas na Tabela 1. Os gráficos da figura 6.1 já estão em unidades físicas. É perceptível que o transitório da resposta ao degrau de 3A em cada motor é de aproximadamente 7s. Após este tempo, a velocidade se estabiliza em aproximadamente 0,1m/s.

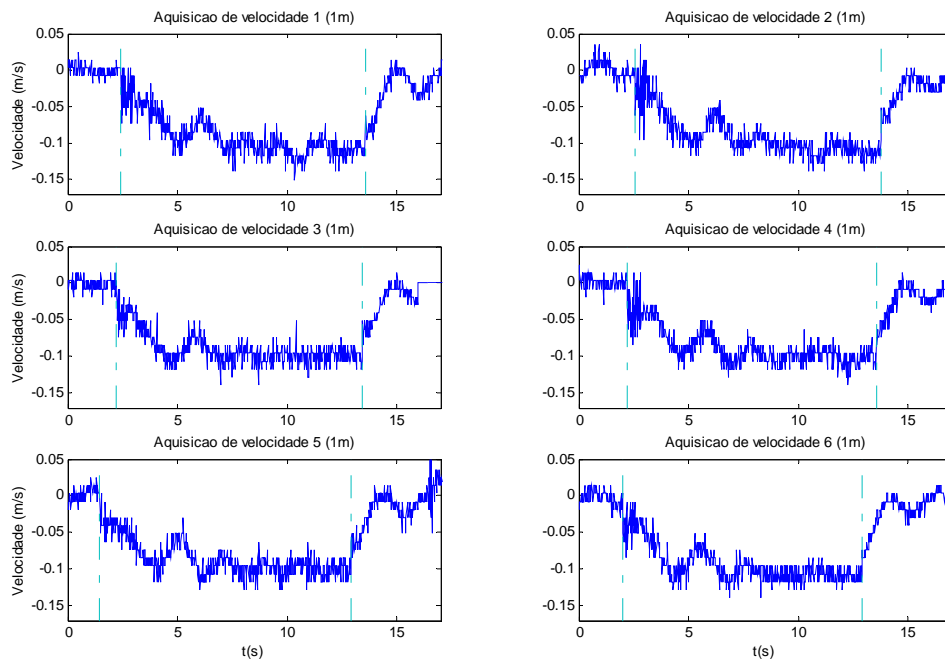


Figura 6.1 – Sinais obtidos do acelerômetro (direção X do referencial do corpo).

Tabela 6.1 Constantes de conversão para unidades físicas obtidas dos sinais dos acelerômetros.

Experimento	Constante de Conversão (m/s / um)
1	$1,11 \cdot 10^{-2}$
2	$1,12 \cdot 10^{-2}$
3	$1,12 \cdot 10^{-2}$
4	$1,14 \cdot 10^{-2}$
5	$1,14 \cdot 10^{-2}$
6	$1,10 \cdot 10^{-2}$
Valor médio	$1,12 \cdot 10^{-2}$

Certamente, um único experimento não deveria servir como base para a calibração física do sensor, pois a constante de conversão pode estar contaminada com um erro significativo. Esta é a razão da realização de uma bateria de seis experimentos idênticos, identificando-se a constante de conversão física de cada um deles, tendo-se obtido o valor médio destas para compor a constante de conversão final adotada para este sensor.

É perceptível, nos gráficos da figura 6.1, um ruído que aparenta ser de alta frequência e com as mesmas características, não importando se os motores estão ligados ou não, ou seja, os motores dos atuadores não induzem ou alteram a natureza do ruído. A figura 6.2 contém a transformada discreta de Fourier (gráfico inferior) obtida de uma janela do sinal temporal, compreendida entre os segundos oito e doze da aquisição de velocidade 6 (foi retirado o valor médio do sinal), na figura 6.1. Não existe uma frequência dominante do ruído, implicando numa aproximação do mesmo com um ruído branco, sendo que sua amplitude não é muito significativa. Este ruído branco repete-se nos outros sensores de aceleração (eixos vertical e transversal).

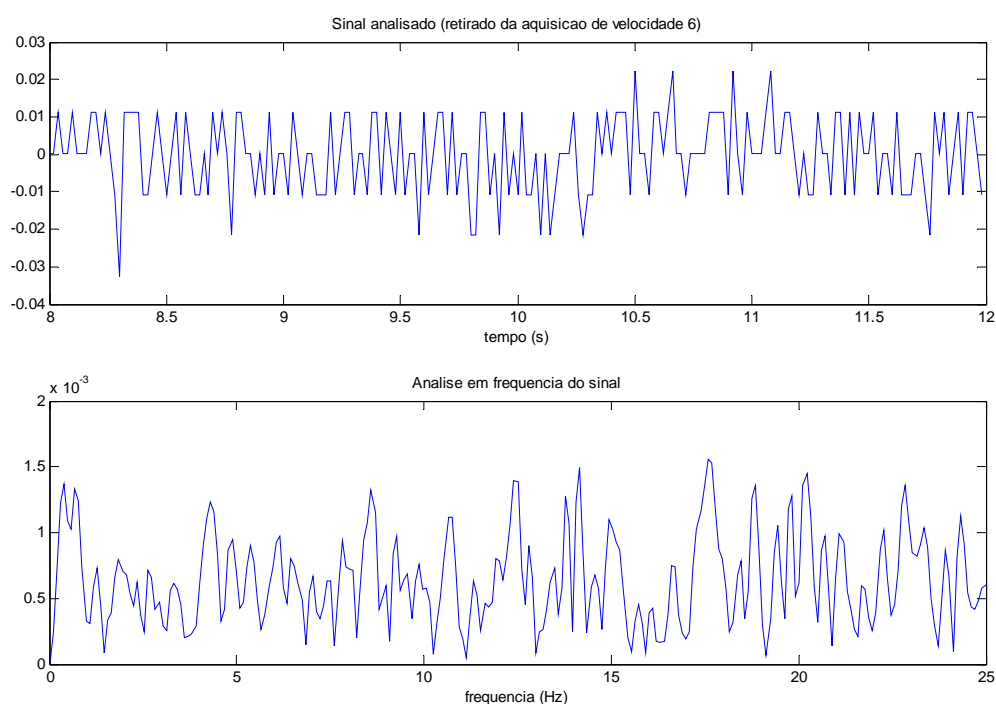


Figura 6.2 – FFT do ruído proveniente do acelerômetro.

A figura 6.3 mostra a integração dos sinais vistos na figura 6.1, gerando assim as curvas de posição na direção inercial frontal ao veículo. A exemplo das curvas de velocidade, as retas tracejadas verticais informam os instantes de início e término da ativação dos atuadores. Percebe-se que o veículo andou para frente uma distância bem aproximada de $1m$ em cada um dos experimentos, mas num tempo ligeiramente diferente.

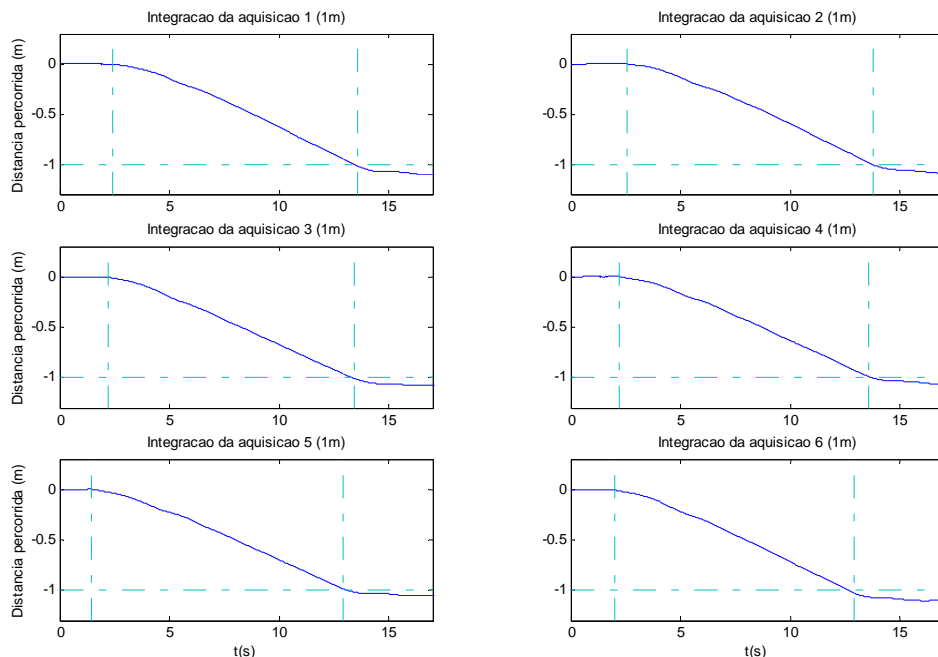


Figura 6.3 – Posições obtidas da integração dos sinais do acelerômetro.

A figura 6.4 mostra todas as posições em um único gráfico. Nota-se que a inclinação dos gráficos é praticamente a mesma, indicando que as velocidades médias atingidas em regime estacionário são muito próximas nos seis experimentos, tendo sido de aproximadamente 0.12 m/s .

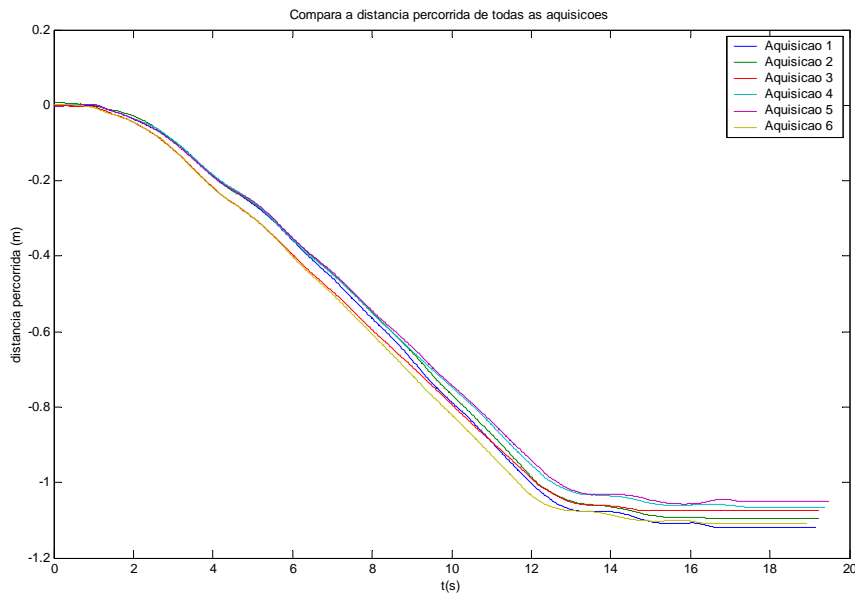


Figura 6.4 – Sobreposição dos sinais de posição.

A velocidade média atingida em regime estacionário com os dois motores traseiros ligados com 3A em cada um é realmente pequena. O empuxo total não foi suficiente para imprimir uma aceleração mensurável pelo sensor, que funcionou como um medidor de velocidade. Além do inconveniente dos acelerômetros utilizados não medirem acelerações destes níveis, deve-se tomar cuidado com a influência da aceleração da gravidade uma vez que o sensor capta as componentes desta aceleração nas direções X e Y do referencial do corpo, quando o veículo sofre alguma rotação em arfagem ou rolamento. Uma maneira de corrigir este problema é com a utilização de sensores de inclinação, ou seja, ao se detectar uma inclinação do veículo, ter-se-ia condição de medir a componente de aceleração gravitacional que o acelerômetro captaria, descontando-se esta medida do valor que o acelerômetro indicaria como sendo aceleração no plano horizontal. Porém, o sensor de inclinação deve ser preciso o suficiente para detectar variações muito pequenas, na ordem de décimos de graus.

6.1.2 Giroscópio

O procedimento adotado para calibrar o giroscópio foi semelhante ao utilizado no caso dos acelerômetros. Neste caso, doze experimentos foram realizados, ligando-se um dos atuadores horizontais com 3A e o outro horizontal com -3A, de forma a fazer com que o veículo se anime com uma rotação em torno do eixo Z (guinada), a qual pode ser negativa ou positiva, bastando para isso inverter os sinais das correntes nos atuadores. Em cada experimento, integrou-se o sinal do giroscópio, ainda em unidades de máquina. O resultado da integração (posição angular final) é proporcional ao valor 360° (rotação imposta nos experimentos), chegando-se, portanto, à constante de proporcionalidade de conversão para unidades físicas. A figura 6.5 mostra os sinais medidos no giroscópio equivalentes a seis experimentos, já em unidades físicas de velocidade. Novamente, como as condições da água não são as mesmas, existem diferenças entre um experimento e outro, importando, porém, o fato de, em todos os casos, o giro no veículo ser de 360° . Este efeito pode ser visualizado também no tempo gasto para perfazer um giro de 360° , o qual é ligeiramente diferente em cada um dos experimentos. Diferentes condições de arrasto lateral são impostas nos diferentes experimentos, modificando assim a velocidade de rotação.

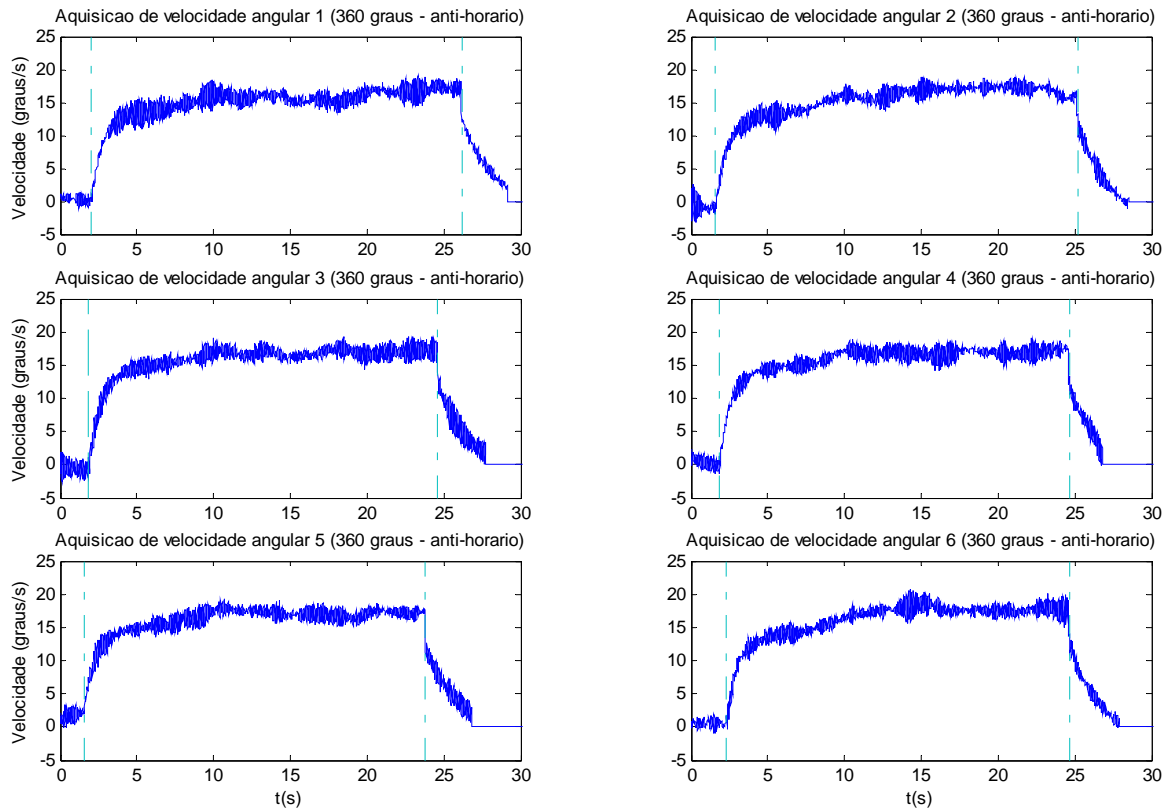


Figura 6.5 – Aquisição do giroscópio, sentido positivo.

A análise da figura 6.5 permite, de imediato, identificar visualmente a presença de um ruído de alta frequência. Uma janela do sinal relativa ao intervalo de tempo de dez a vinte segundos do gráfico (aquisição 4, 360°) pode ser vista no gráfico superior da figura 6.6, estando logo abaixo a sua correspondente transformada de Fourier. Verificou-se que o ruído tem frequência de 8Hz. Apesar de ser observado um ruído, este não causa problema na geração do sinal de velocidade angular, e muito menos no da posição angular obtida a partir da integração desta velocidade.

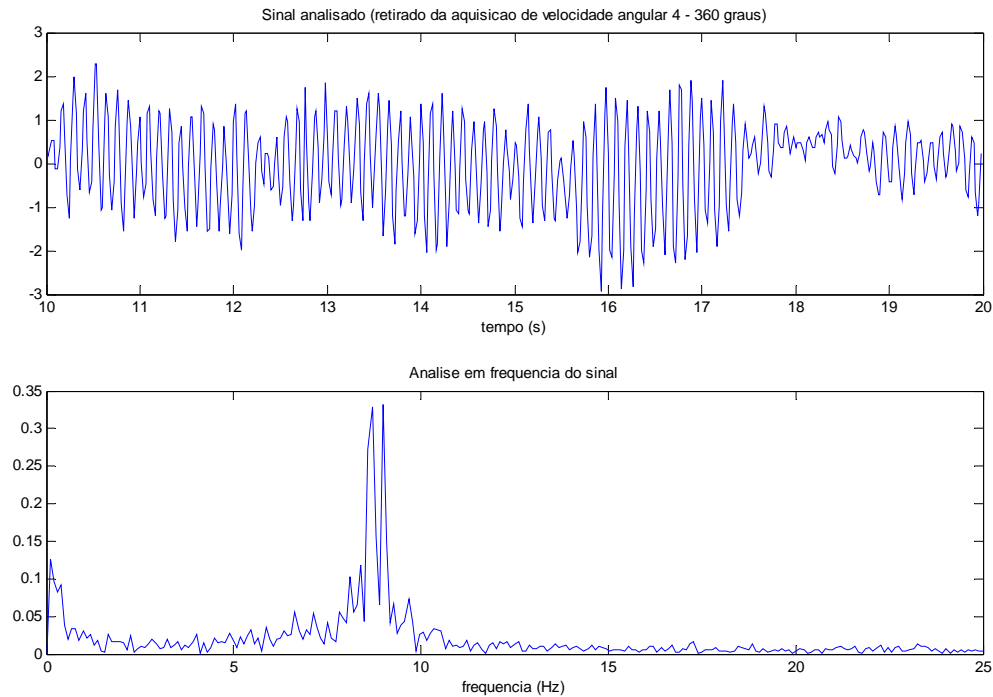


Figura 6.6 – Análise do ruído do sinal do giroscópio.

A figura 6.7 mostra a integração dos sinais de velocidade angular oriundos do giroscópio (figura 6.5). As retas verticais tracejadas indicam os tempos inicial e final de acionamento dos motores. A figura 6.8 mostra a sobreposição de todos os gráficos de posição angular. É perceptível que a velocidade angular, correspondente à inclinação das curvas de posição, é aproximadamente a mesma, significando principalmente que os torques motores têm, de fato, uma boa repetibilidade, pois conseguem imprimir velocidades semelhantes para os mesmos valores de corrente nos diferentes experimentos.

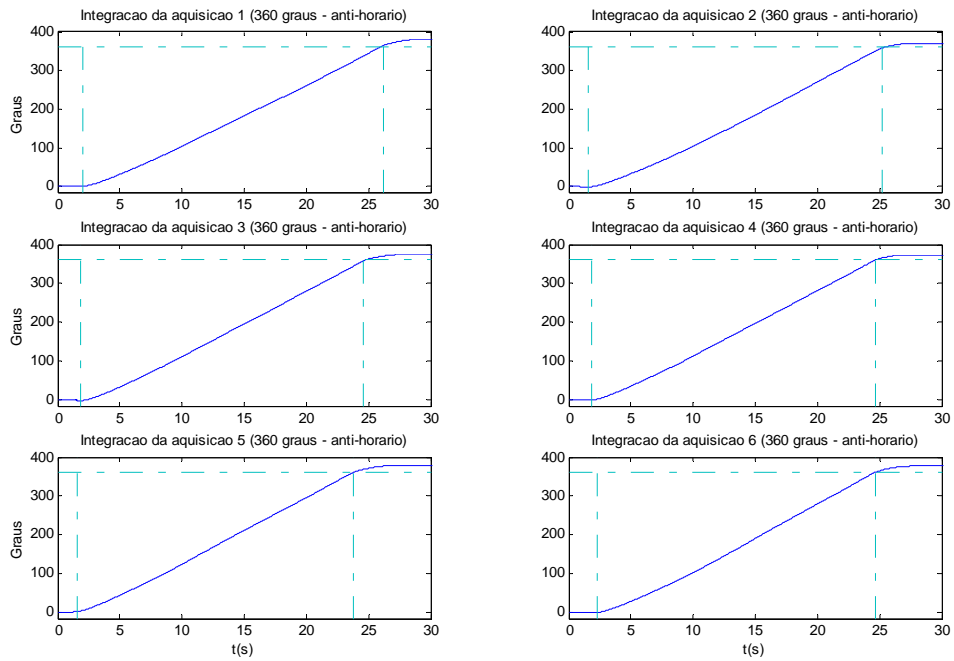


Figura 6.7 – Posições angulares obtidas de integrações dos sinais do giroscópio.

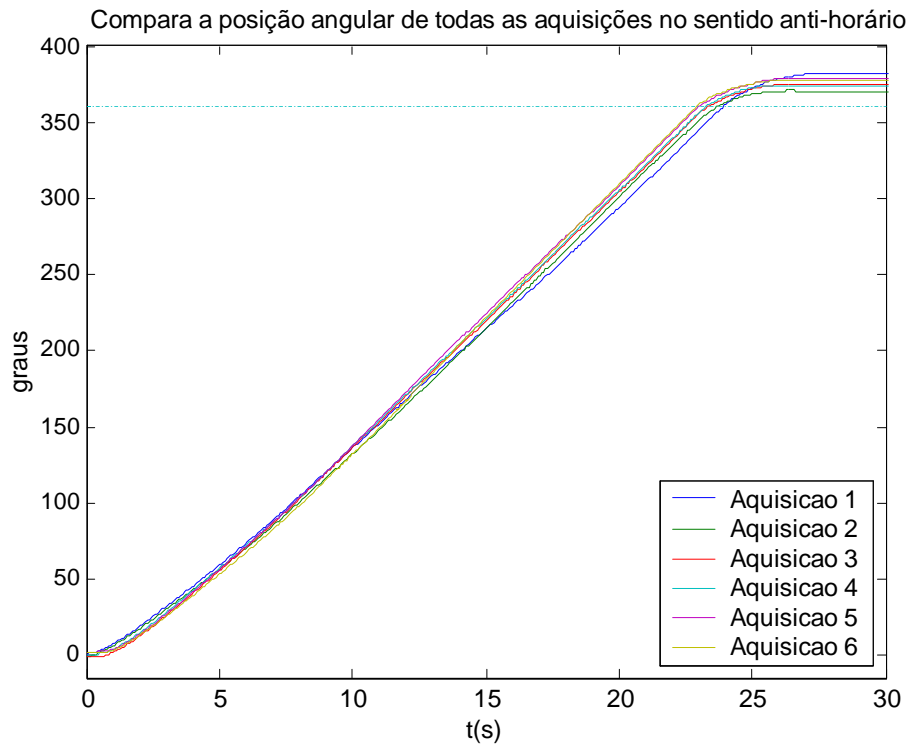


Figura 6.8 – Sobreposição das curvas de posição angular obtidas com o giroscópio.

Uma mesma seqüência de experimentos foi repetida com o veículo girando no sentido negativo. O objetivo destes experimentos é verificar se há ou não diferenças na constante de conversão para unidades físicas nas medições realizadas nos dois sentidos de rotação do veículo. Após os seis experimentos, a constante de conversão foi identificada, estando os gráficos de velocidade angular na figura 6.9. A figura 6.10 mostra as respectivas posições, obtidas a partir da integração dos sinais de velocidade, enquanto que a 6.11 mostra estas posições sobrepostas em um único gráfico. Percebe-se que o tempo de resposta é de aproximadamente cinco segundos, isto é, o veículo sai do repouso e atinge uma velocidade constante (regime estacionário) neste tempo. Este tempo de resposta é aproximadamente o mesmo nos dois sentidos de rotação.

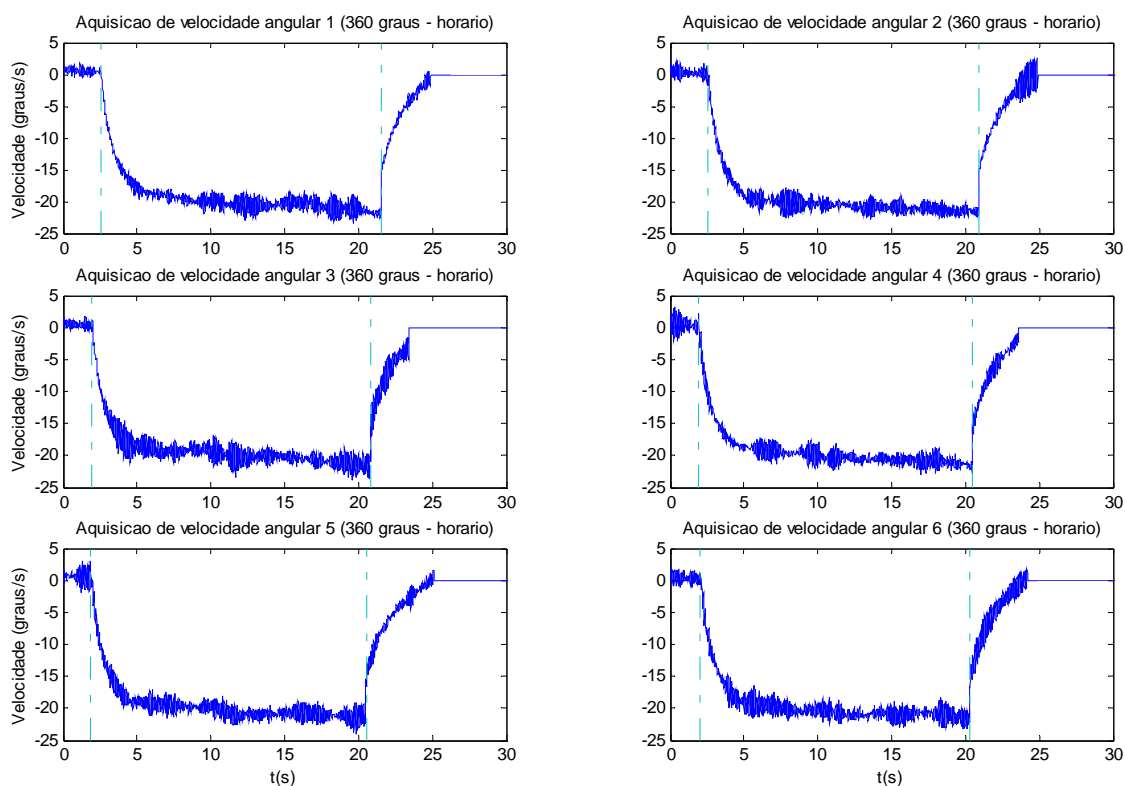


Figura 6.9 – Aquisição do giroscópio, sentido negativo.

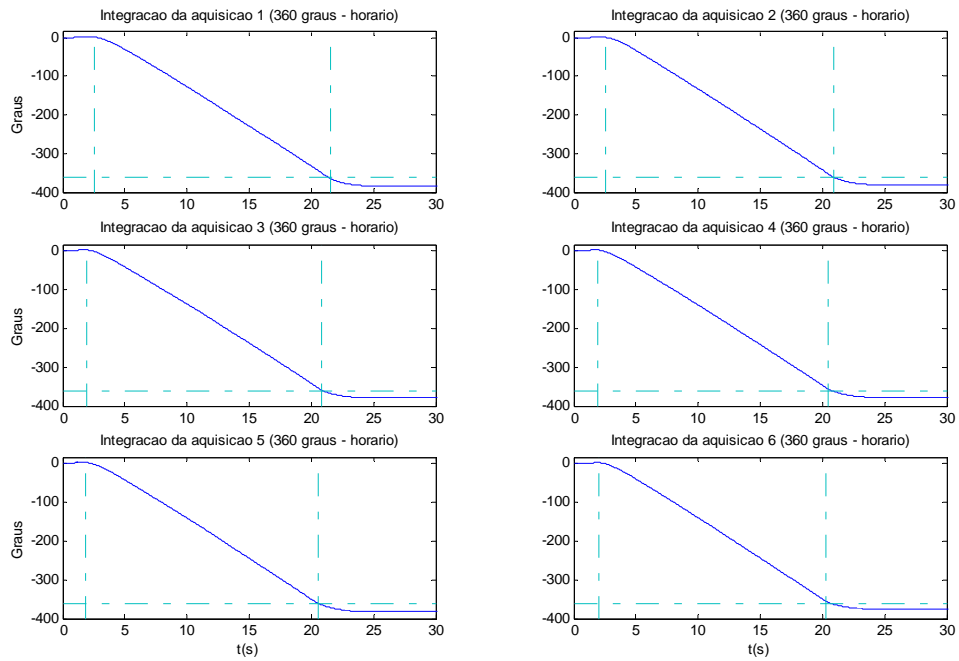


Figura 6.10 – Posições angulares obtidas de integrações dos sinais do giroscópio (sentido negativo).

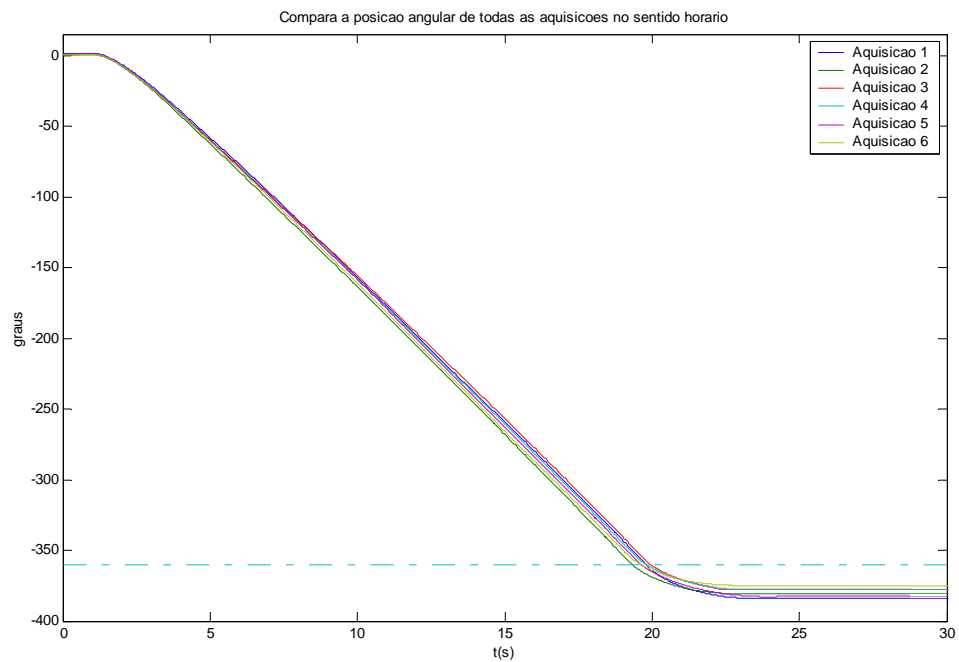


Figura 6.11 – Sobreposição das curvas de posição angular obtidas com o giroscópio (sentido negativo).

A Tabela 6.2 apresenta as constantes de conversão de unidades de máquina para unidades físicas do giroscópio. Percebe-se que não existem diferenças significativas na medição com o giroscópio nos dois sentidos de rotação, de forma que se assume, como constante de conversão, o valor médio final apresentado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Constantes de conversão obtidas dos experimentos

Experimento	Constante de conversão (sentido positivo)	Constante de conversão (sentido negativo)	Valor médio
1	$5,75 \cdot 10^{-2}$	$5,78 \cdot 10^{-2}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$
2	$5,85 \cdot 10^{-2}$	$5,88 \cdot 10^{-2}$	$5,87 \cdot 10^{-2}$
3	$5,83 \cdot 10^{-2}$	$5,92 \cdot 10^{-2}$	$5,88 \cdot 10^{-2}$
4	$5,81 \cdot 10^{-2}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	$5,89 \cdot 10^{-2}$
5	$5,80 \cdot 10^{-2}$	$5,90 \cdot 10^{-2}$	$5,85 \cdot 10^{-2}$
6	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$5,98 \cdot 10^{-2}$	$5,89 \cdot 10^{-2}$
Valor médio final	$5,81 \cdot 10^{-2}$	$5,90 \cdot 10^{-2}$	$5,85 \cdot 10^{-2}$

6.2 RESPOSTAS EM MALHA ABERTA

Após a calibração dos sensores do veículo, foram realizados alguns testes em malha aberta, os quais permitirão, em trabalhos futuros, que sejam validados trabalhos sobre o desenvolvimento de modelos dinâmicos para o veículo.

6.2.1 Torques restauradores

Os torques restauradores resultam do distanciamento entre os centros de empuxo e gravidade. Estes torques são responsáveis pela manutenção do veículo na posição horizontal, atuando como um controle passivo. Para alterar estes torques é preciso modificar as

características físicas do veículo como o empuxo, a posição do centro de empuxo, a massa e a posição do centro de massa.

Na figura 6.12 observa-se este controle passivo em ação. Os gráficos contidos nesta figura são resultantes da integração das medidas dos acelerômetros obtidas em dois experimentos distintos, ou seja, o veículo é posto inicialmente com um determinado ângulo de arfagem positivo, sendo em seguida solto do repouso. Um novo experimento é feito, com o ângulo de pitch inicial negativo. As respostas temporais podem ser vistas nos dois gráficos superiores da figura 6.12. Experimentos semelhantes foram realizados, desta feita para a verificação da resposta temporal do ângulo de rolamento (gráficos inferiores da figura 6.12). Percebe-se que os torques restauradores estão imprimindo tempos de resposta semelhantes, tanto para arfagem quanto para rolamento, ou seja, o controle passivo está estabilizando a dinâmica em aproximadamente seis segundos. Poder-se-ia visualizar a dinâmica de restauração como sendo de segunda ordem, com uma razão de amortecimento de 0.43 e frequência natural não amortecida de 2.85 rad/s, dinâmica esta válida tanto para o movimento angular de arfagem quanto para o de rolamento.

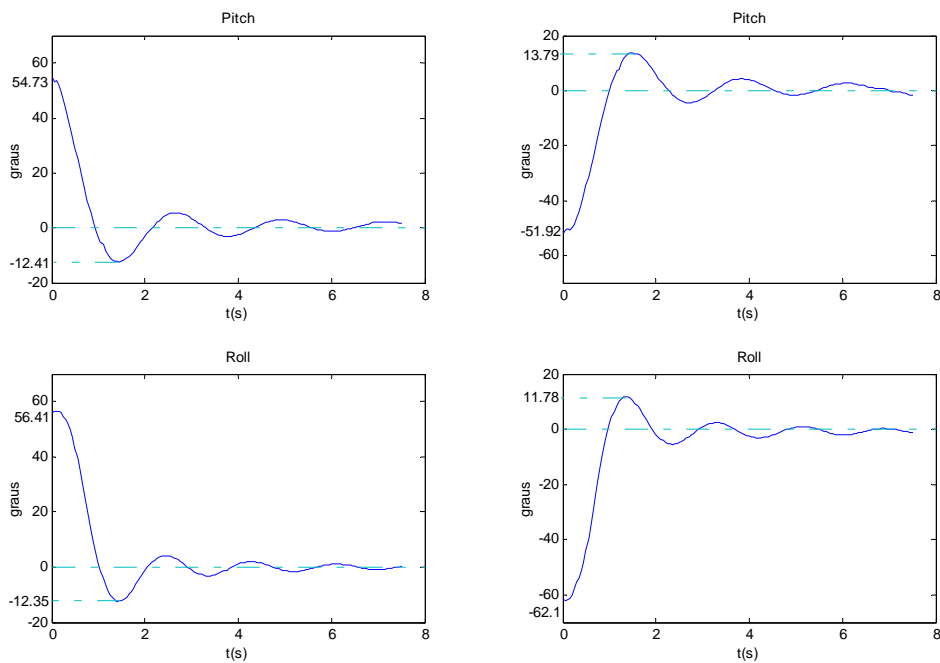


Figura 6.12 – Respostas temporais evidenciando atuações dos torques restauradores.

6.2.2 Trajetórias livres

Os resultados experimentais descritos na presente seção destinaram-se a por em evidência o comportamento do veículo durante trajetórias livres em malha aberta. Os motores de empuxo horizontal foram ligados, um com 3A e outro com 2A, de forma a provocar uma deriva acentuada em guinada, ou seja, rotação sobre o eixo Z inercial, enquanto o veículo avança no sentido Y do referencial do corpo. Os motores de empuxo vertical foram ligados com 1A cada, corrente suficiente para mergulhar lentamente o veículo durante o deslocamento horizontal. A figura 6.13 mostra o primeiro destes resultados. No gráfico superior está o ângulo de guinada, significando uma rotação em torno do eixo Z inercial, variável obtida a partir da integração do sinal do giroscópio. No gráfico inferior está a posição linear na direção Y do referencial do corpo, correspondente à direção do eixo longitudinal perpendicular à região frontal do veículo, variável correspondente à integração do sinal do acelerômetro. Experimentos semelhantes foram repetidos por mais três vezes, estando os resultados nas figuras 6.14, 6.15 e 6.16. De uma forma geral, a deriva em guinada foi semelhante, guardando, evidentemente, a noção de que, em se tratando de malha aberta e ainda, considerando diferentes condições de agitação da água nos diferentes experimentos (não é possível controlar perfeitamente as condições iniciais nem as perturbações externas de cada experimento), existirão sempre diferenças nas variáveis observadas entre um experimento e outro.

A figura 6.17 mostra as trajetórias inerciais no plano horizontal para os quatro experimentos. Estas trajetórias foram obtidas combinando-se informações do giroscópio e dos acelerômetros, sem, no entanto, aplicar nenhuma técnica de correção ou filtragem. Nestes gráficos os movimentos de deriva são mais visíveis, mas já eram esperados uma vez que foram induzidos em razão da diferença nas correntes dos motores horizontais.

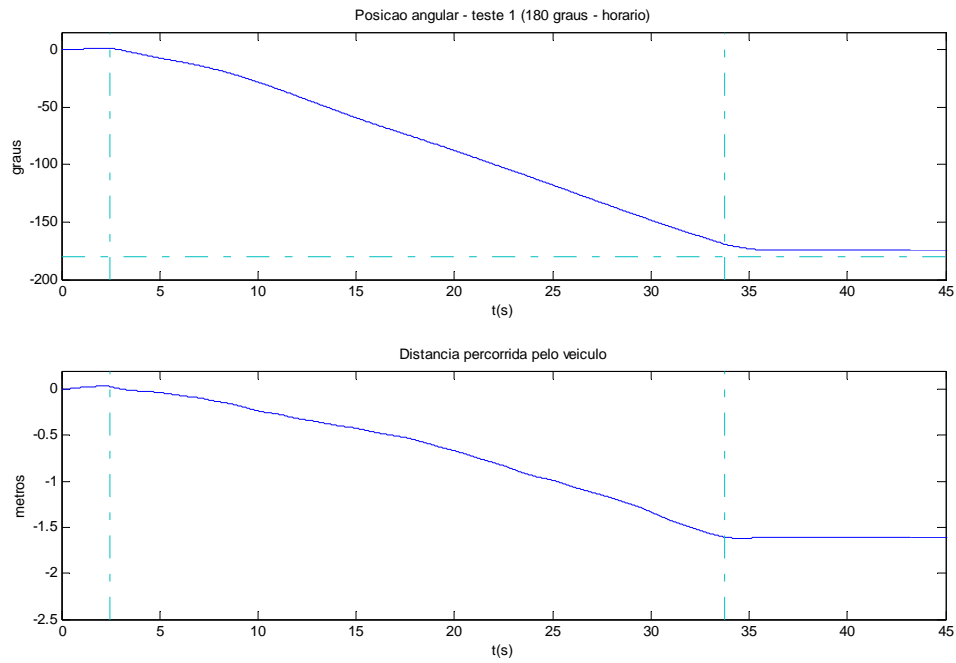


Figura 6.13 – Posição angular de guinada (inercial, gráfico superior) e posição na direção X (referencial do corpo).

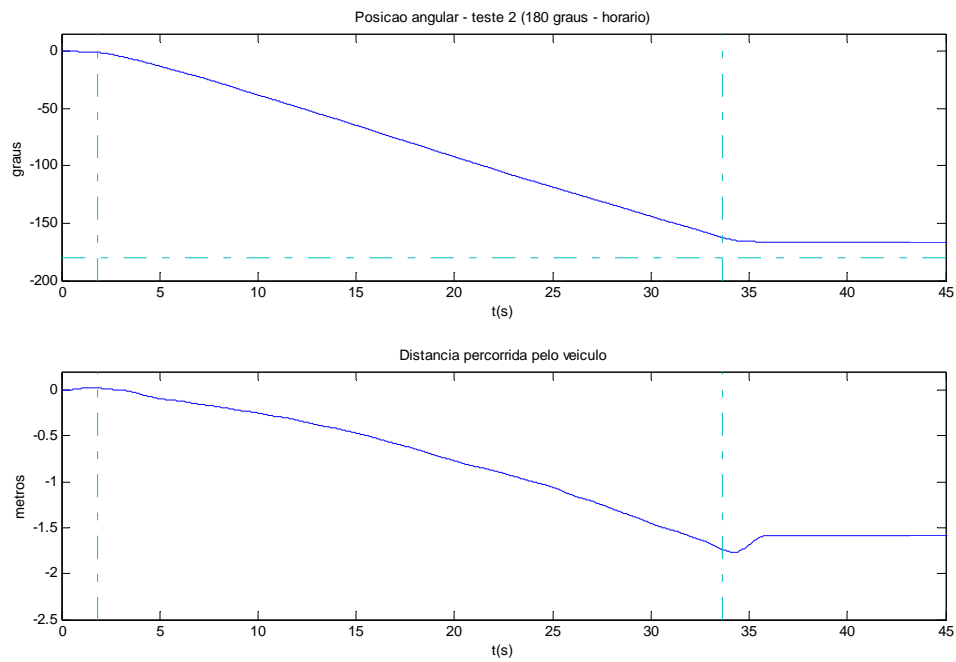


Figura 6.14 – Posição angular de guinada e posição na direção X (experimento 2).

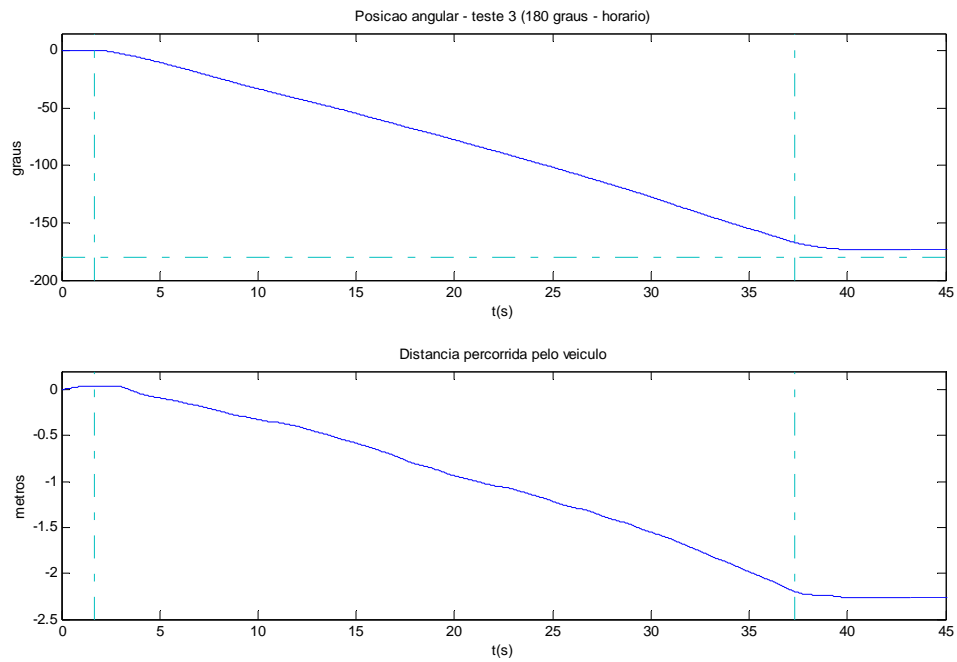


Figura 6.15 – Posição angular de guinada e posição na direção X (experimento 3).

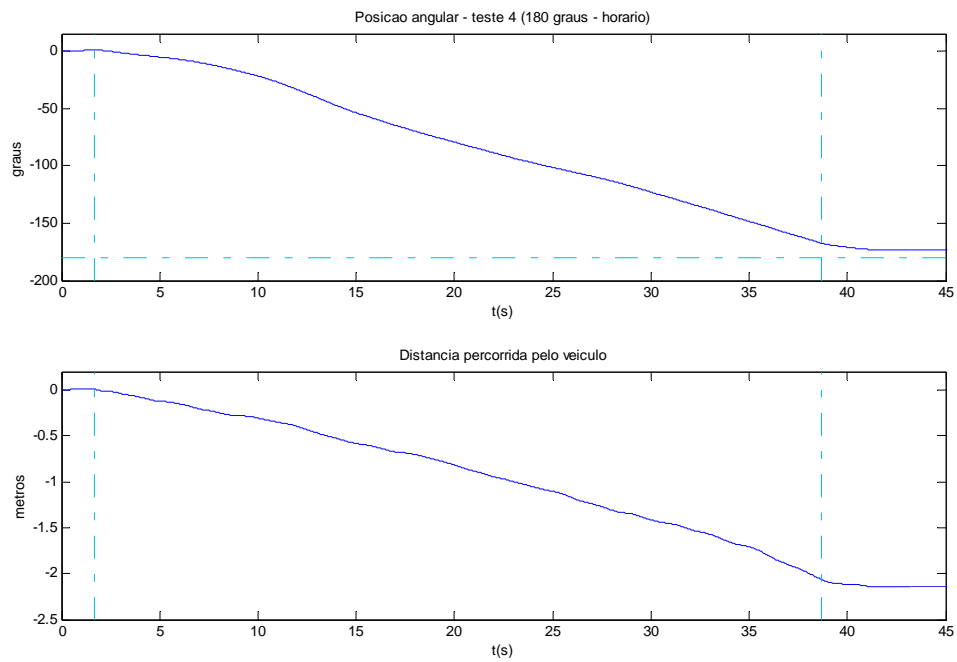


Figura 6.16 – Posição angular de guinada e posição na direção X (experimento 4).

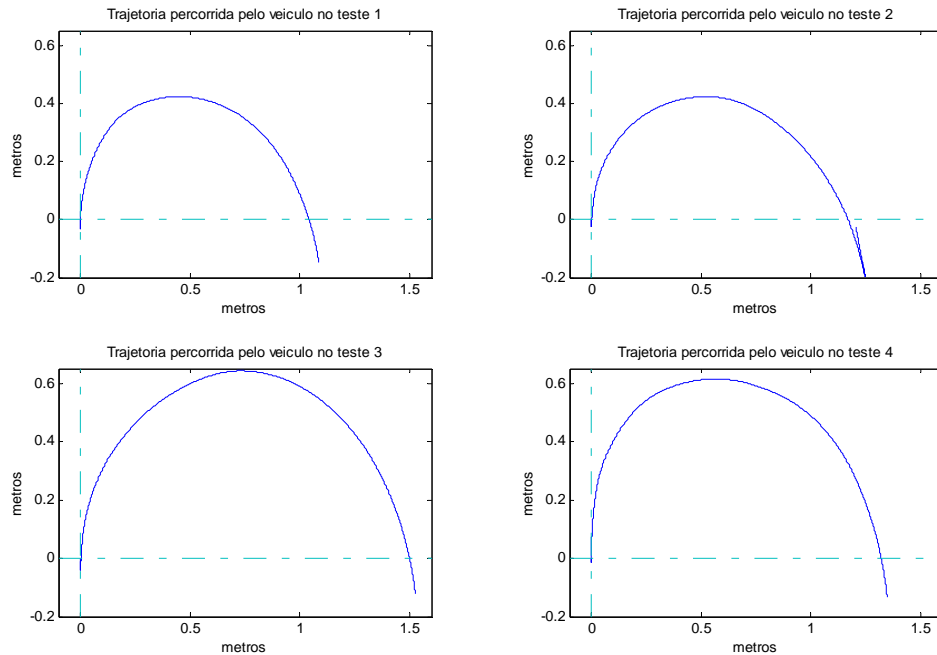


Figura 6.17 – Curvas inerciais no plano horizontal.

Como considerações finais sobre os experimentos, pode-se ressaltar que, em sendo malha aberta, o objetivo não é, evidentemente, fazer o veículo seguir alguma trajetória inercial. Este tipo de controle será feito em malha fechada, como parte da continuação das pesquisas experimentais iniciadas na presente dissertação. Entretanto, os resultados em malha aberta servem para averiguar o comportamento dinâmico, se corresponde ou não ao esperado e ainda, servem para avaliar se a leitura dos sensores está realmente coerente com a realidade física acontecida nos experimentos. Apesar das diferenças consideráveis nas trajetórias percorridas pelo veículo, como se pode observar nas figuras apresentadas anteriormente, constatou-se que as leituras dos sensores representam o comportamento aproximado do mesmo, pois descrevem aproximadamente o que ocorreu fisicamente no ambiente de testes.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho, realizou-se inicialmente um estudo sobre os diversos tipos de sensores e atuadores existentes, descrevendo-se seus princípios de funcionamento, fabricantes e as vantagens e desvantagens em utilizá-los. Logo após, foi realizada uma pesquisa sobre os principais ROVs e AUVs encontrados nos dias atuais, tanto comercialmente quanto os desenvolvidos por instituições de ensino. Observou-se que, apesar do grande número de veículos existentes internacionalmente, o Brasil ainda não possui desenvolvimento próprio destes veículos em escala comercial, mas está começando a desenvolver este tipo de tecnologia nas universidades.

Posteriormente, foi apresentada uma proposta de desenvolvimento de um ROV de baixo custo, no qual se utilizou o máximo número possível de componentes nacionais. Antes de desenvolvê-lo, houve uma etapa de estudo para a escolha da configuração construtiva, tendo-se avaliado três diferentes tipos. A opção foi a utilização de uma arquitetura aberta, tendo a mesma satisfeito aos principais critérios norteadores da escolha, ressaltando-se a facilidade de construção, o controle passivo em dois graus de liberdade e o baixo custo. Faz parte do seu chassi um cilindro pressurizado, utilizado para acomodar a eletrônica embarcada. A fixação dos atuadores foi projetada de forma a contemplar requisitos de simetria e segurança, havendo uma estrutura protengendo-os contra choques acidentais. O chassi foi construído em alumínio, tendo-se escolhido este material devido aos baixos peso e custo de produção.

Dois tipos de sensores são utilizados no veículo: giroscópio e acelerômetros. Nos acelerômetros, produzidos pela Analog Devices, não se verificou a resolução que o fabricante afirma, equivalente a $1mg$, afirmação esta que motivou a escolha do componente. Além disto, a utilização deste tipo de componente é dificultada devido ao seu encapsulamento, que requer técnicas de soldagem avançadas. A utilização do giroscópio foi realizada sem dificuldades, tendo o mesmo fornecido os dados esperados nos experimentos realizados.

Os atuadores foram desenvolvidos a partir de adaptações de motores utilizados na indústria automobilística, com hélices utilizados em eletrodomésticos, tudo isto com o objetivo de reduzir custos. Porém, os motores, por possuírem um baixo torque, não

imprimiram ao veículo velocidades superiores a 0.17m/s. Este é, necessariamente, um aspecto que precisa ser melhorado na continuação deste trabalho.

Projetou-se um dispositivo mecânico para medir a relação corrente empuxo dos atuadores, dispositivo este que se mostrou eficiente. Diversos experimentos foram realizados, tendo-se observado um caráter linear na relação entre corrente e empuxo dos atuadores.

Cuidados foram tomados quanto ao peso final do veículo, que deveria ser ligeiramente menor do que o empuxo, com o objetivo de fazer submergir o mesmo em situações de falha. Além disto, os centros de empuxo e de massa foram calculados de modo a ficarem distanciados, fator fundamental para o surgimento de torques restauradores.

Foram determinados diversos parâmetros relacionados à massa e à matriz de inércia do veículo, parâmetros estes importantes para a determinação do modelo dinâmico do veículo.

Foi construída uma eletrônica embarcada, responsável pela aquisição dos sinais dos sensores e o envio dos mesmos, via cabo, a um microcomputador na superfície. Esta eletrônica possui ainda a função de comandar o acionamento dos atuadores, conforme mencionado no capítulo 5.

Os resultados experimentais em malha aberta tiveram dois propósitos básicos: identificar as constantes de conversão dos sinais dos sensores; verificar o desempenho e a estabilidade do veículo. Em ambos os casos, os resultados mostraram-se satisfatórios, além de serem fundamentais para futuros testes de validação do modelo dinâmico que será desenvolvido.

Ainda que se tenha conseguido resultados compatíveis com os objetivos do trabalho, identifica-se a necessidade de investimento intelectual e financeiro em diversos campos da área de robótica subaquática. Estas necessidades são citadas neste trabalho como oportunidades de futuras pesquisas neste campo. Assim, sugere-se que os seguintes estudos sejam realizados como continuação ao presente trabalho:

- projetar propulsores para médias (até 150m) e grandes (acima de 150m) profundidades, pois os existentes possuem alto custo e são importados;
- projetar e desenvolver módulos de sensoriamento embarcado, para serem utilizados em qualquer planta na qual se deseja observar. São as chamadas IMU (*Inertial Measure Unit* – unidade de medição inercial) que podem ser utilizadas tanto em robótica subaquática quanto em aviões, carros e outros dispositivos móveis, de modo a fornecer as observações e variáveis de estado, necessárias para o controle em malha fechada destes sistemas;

- desenvolver o modelo dinâmico do veículo;
- desenvolver e aplicar técnicas de controle, que possam ser utilizadas para ampliar a estabilidade do mesmo em aplicações como filmagens subaquáticas, por exemplo;
- desenvolver estudos sobre novos materiais para a utilização em estruturas subaquáticas, de menor custo e maior resistência ao ambiente marinho.

Acredita-se que o presente trabalho, por possuir um estudo abrangente sobre os principais componentes de veículos subaquáticos e construir um protótipo, tenha contribuído para pesquisas futuras na área de robótica subaquática, mostrando, principalmente, que é possível a construção de veículos subaquáticos não tripulados a um baixo custo quando comparados aos equivalentes importados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, J. L. A. Eletrônica de Potência, ÉRICA, 1986, 297p.
- [2] AIRMAR TECHNOLOGY CORPORATION, Piezoelectric Transducer Design for Marine Use, 2000, Sensor Design Fundamentals, #17-1205
- [3] AOKI T., MURASHIMA T. TSUKIOKA S., NAKAJYOH H., IDA M. Development of Deep Sea Free Swimming ROV “UROV7K”. IEEE, Oceans ‘99 MTS, v.3, p.1307-1311, September, 1999.
- [4] BARROS, E. A., SOARES, F. J. A. Desenvolvimento de um Robô Submarino de Baixo Custo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XIV, 2002, Natal-RN. p. 2121-2126.
- [5] CARUSO, M., BRATLAND, T., SMITH C. H. SCHNEIDER. A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Sensors Magazine, Dezembro de 1998.
(<http://www.sensormag.com/articles/1298/mag1298/main.shtml>).
- [6] CARUSO, M., WITHANAWASAM, L. S. Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors, Honeywell, 1999, Technical Articles.
(<http://www.ssec.honeywell.com>).
- [7] CHARDARD Y., COPROS T. SWIMMER:Final Sea Demonstration of this Innovative Hybrid AUV/ROV Sytem. IEEE, International Symposium on Underwater Technology, 2002., p.17-23.
- [8] CORREIA, L. Tecnologia e Aplicações de Veículos Subaquáticos: relação com a fileira das pescas, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia Departamento de Informática, Projeto MARHE, 1999.
(<http://www2.uninova.pt/MARHE/V0CS4ILM.htm>)

- [9] CROSS BOW TECHNOLOGY INC., Compassing Using Magnetic Sensors, Inertial Application. Notes (http://www.xbow.com/Support/mag_appnote.htm)
- [10] CROSS BOW TECHNOLOGY INC., Introduction to Accelerometer Applications, Accelerometer Application Note (http://www.xbow.com/Support/accel_appnote.htm)
- [11] CROSS BOW TECHNOLOGY INC. Theory of Operation of Angular Rate Sensors. Rate Gyro Application Note (<http://www.xbow.com>).
- [12] CREUS, A. Instrumentacion Industrial, MARCOMBO S.A, 1998. 768 p. ISBN 8-42-671132-4.
- [13] CUNHA, J. P. V. S. Projeto e Estudo de Simulação de um Sistema de Controle a Estrutura Variável de um Veículo Submarino de Operação Remota. Rio de Janeiro, 1992. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [14] DOMINGUEZ, R. B. Simulação e Controle de um Veículo Submarino de Operação Remota. Rio de Janeiro, 1989. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [15] D'SOUZA, A. F., GARG, V. K. Advanced Dynamics: Modeling and Analysis. Englewood: Prentice-Hall, 1984. 358 p. ISBN 0-13-011312-3.
- [16] FOSSEN, T. I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 480 p. ISBN 0-471-94113-1.
- [17] HONEYWELL, Compass Heading Using Magnetometers, Application Notes, 1995, AN-203 (<http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets.html>)
- [18] KASAP, S. O., Electrical Engineering Materials and Devices. Irwin-McGraw-Hill, 1997. 690 p. ISBN 0-256-16173-9.

- [19] KOH. T. H., LAU W. S., LOW E., SEET G., SWEI S. CHENG P., A Study of the Control of an Underactuated Underwater Robotic. In: Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002, p. 2049-2054.
- [20] LIDDLE, D. Trojan: Remotely Operated Vehicle. **IEEE, Journal of Oceanic Engineering**, v.11, n.3, p.364-372, July, 1986.
- [21] MANGAN, S., WANG, J., WU, Q. H. Measurement of the road gradient using an inclinometer mounted on a moving vehicle. In: International Symposium on Computer Aided Control System Design Proceedings, 2002, Scotland – U.K.
- [22] MONTEEN B., WARNER P., RYLE J. Cal Poly Autonomous Underwater Vehicle., AUVSI (Association for Unmanned vehicle systems international – <http://www.auvsi.org>) Journal Paper, June 2000.
- [23] NEWMAN J. B., STAKES D. Tiburon: Development of an ROV for Ocean Science Research. IEEE, Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, v.2, p.483-488, September, 1994.
- [24] SCHILLING ROBOTICS. The QUEST WROV, A Next-Generation Electric Work-Class ROV, Remote Systems Products M-0100, 2003. (www.schilling.com)
- [25] SMALLWOOD D., BACHMAYER R., WHITCOMB L. A New Remotely Operated Underwater Vehicle for Dynamics and Control Research. In: International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, 11, 1999, Durham - NH.
- [26] TAVARES, A. M. Um Estudo Sobre Modelagem e o Controle de Veículos Subaquáticos Não Tripulados. Rio Grande, 2003. 218 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- [27] TILT METER BASICS, Applied Geomechanics, Application Note, 2002 (<http://www.geomechanics.com/support/tmbasics.htm>).

- [28] TRANSTRONICS, Pressure Transducer Basics (<http://xtronics.com/reference/xprimer.htm>)

- [29] TORÓID DO BRASIL, Transformadores de Corrente, Catalogo de Produtos. (<http://www.toroid.com.br>)

- [30] VALKENBURG, M. E. V. Analog Filter Design. HRW, 1982. 624 p. ISBN 0-19-510734-9.

- [31] WEINGBERG, H., Dual Axis, Low g, Full Integrated Accelerometers, **Analog Dialogue**, U.S.A., Volume 33, p. 23-24, 1999.

- [32] YEDAMALE, P. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc., 2003, Application Note AN885

- [33] YUH, J. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, Int'l J. of Autonomous Robots, 2000.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)