

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

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

MÁRIO LOBO CENTENO

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

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Sílvia Silva da Costa Botelho

Rio Grande, setembro de 2007.

Este trabalho é dedicado  
à minha esposa Maria Cristina Centeno.

## **AGRADECIMENTOS**

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

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Sílvia Silva da Costa Botelho pela co-orientação.

Aos professores do curso de Engenharia Oceânica pelos conhecimentos transmitidos.

À Nilza da Comcur de Engenharia Oceânica pelo apoio e amizade.

Aos colegas de mestrado pela amizade e companheirismo.

Ao Maurício, pelo incentivo e sugestões.

Ao Paulo, Ismael, Cláudio, Daniel e Tomás pelo apoio e amizade.

Aos colegas do CEFET RS, por terem permitido a realização deste sonho.

Aos meus pais Boaventura e Nora pelo incentivo em todos os momentos.

Aos meus filhos pela paciência e compreensão durante esta jornada.

A Deus por permitir eu ter chegado até aqui.

## RESUMO

A escassez de alguns recursos naturais como petróleo e gás na superfície terrestre, têm feito com que a raça humana volte sua atenção para as profundezas dos oceanos nestas últimas décadas. Os ROVs (*Remotely Operated Vehicle*) possuem função importante para o estudo, preservação e execução de tarefas em ambiente subaquático com segurança. Infelizmente no Brasil, as iniciativas de produzir um ROV com tecnologia nacional e de baixo custo, quando comparado a equivalentes importados, são ainda raras e se restringem a algumas poucas instituições acadêmicas, não tendo sido localizado nenhum fabricante comercial deste tipo de veículo no país. Visando preencher esta lacuna, o presente trabalho deu continuidade ao projeto e construção de um ROV de baixo custo iniciado por Moraes em 2005, do qual efetivamente foi aproveitado o projeto estrutural mecânico, que através de pequenas modificações, ganhou uma câmera de vídeo, propulsores mais potentes, e sistema de iluminação. A eletrônica embarcada foi totalmente modificada visando atender às novas exigências de potência do sistema, e de funções antes inexistentes tais como: *zoom*, *foco*, nível de iluminação e controle de trajetória efetivado através de um único *joystick*. O novo modelo de acelerômetro empregado permitiu a medição de aceleração em três eixos ortogonais. Na fase final do trabalho foi incorporado ao ROV um altímetro, o que propiciou alguns resultados experimentais envolvendo controle de profundidade em malha fechada. No último capítulo desta dissertação foram incluídas algumas conclusões e considerações que deverão colaborar para futuras melhorias deste projeto.

Palavras chaves- ROV, AUV, veículos subaquáticos, robôs subaquáticos, eletrônica embarcada, controle.

## ABSTRACT

The scarcity of some natural resources as oil and gas in the terrestrial surface has called human race attention toward the deepness of the oceans in these last decades. ROVs (*Remotely Operated Vehicles*) have important function for the study, preservation and execution of tasks in subaqueous environment with security. In Brazil, the initiatives to produce a ROV with national technology and low cost, when compared with imported devices, are still rare and restrict to some academic institutions, not having been found commercial manufacturer of this type of vehicle in the country. Aiming to fill this gap, the present work gave continuity to the project and construction of the ROV of low cost initiated by Moraes in 2005, from which effectively the mechanical structural project was used and, through small modifications, it was incorporated a video camera, more powerful propellants, and lighting system. The embarked electronics was totally modified aiming to supply the new requirements of power system, and functions before inexistent such as zoom, focus, level of illumination and control of trajectory accomplished through only one joystick. The new model of accelerometer employed allows the measurement of acceleration in three orthogonal axes. In the final phase of the work an altimeter was incorporated to the ROV, which propitiated some experimental results in depth closed loop control. In the last chapter of this dissertation were enclosed some conclusions and considerations that will collaborate for future improvements in this project.

Key-words: ROV, AUV, underwater vehicles, underwater robots, embarked electronics, control.

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE FIGURAS.....	13
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 OBJETIVOS.....	19
1.2 CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS.....	20
1.3 BIBLIOGRAFIA COMENTADA.....	22
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	25
<b>2. ESTUDO SOBRE OS EQUIPAMENTOS DE SUPERFÍCIE.....</b>	<b>26</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	26
2.2 UNIDADE DE FORÇA.....	28
2.3 PAINÉIS DE CONTROLE.....	30
2.4 SISTEMAS DE LANÇAMENTO E RECOLHIMENTO.....	34
2.5 ANÁLISE FINAL.....	35
<b>3. ESTUDO SOBRE COMUNICAÇÃO NOS ROVS.....</b>	<b>36</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	36
3.2 FIBRAS ÓTICAS.....	37
3.2.1 Conversores comerciais de sinais de vídeo para fibra ótica.....	39

3.2.2 Conversores comerciais RS 232 - Fibra Ótica.....	40
3.3 COMUNICAÇÃO ATRAVÉS DE CABOS METÁLICOS.....	40
3.3.1 Par metálico trançado.....	41
3.3.2 Cabo coaxial.....	42
3.4 ANÁLISE FINAL.....	43
<b>4. PROJETO ROVFURG II.....</b>	<b>44</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	44
4.2 ASPECTOS MECÂNICOS DO PROJETO.....	45
4.3 PROPULSORES.....	46
4.4 CÂMERA DE VÍDEO.....	48
4.5 ALTÍMETRO.....	50
4.6 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO.....	51
4.7 MODOS DE OPERAÇÃO.....	52
4.8 PAINEL DE CONTROLE NO MODO 1.....	54
4.9 ELETRÔNICA EMBARCADA NO MODO 1.....	57
4.9.1. Etapa de potência dos propulsores.....	59
4.9.2 Circuitos de interface com a câmera.....	60
4.9.3 Etapa de potência da lâmpada.....	61
4.10 MODO 2 DE OPERAÇÃO.....	62
4.11 ELETRÔNICA EMBARCADA NO MODO 2.....	63
<b>5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>67</b>
5.1 TESTES DOS PROPULSORES.....	67
5.2 EXPERIMENTOS COM ACELERÔMETRO.....	71
5.2.1 Teste de interferência.....	71

5.2.2 Calibração do acelerômetro.....	72
5.3 RESPOSTAS EM MALHA FECHADA.....	79
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>86</b>



## LISTA DE SÍMBOLOS

a	aceleração
D1,D2	comprimento do braço da balança
E	empuxo gerado pelo propulsor
F	vetor força
g	aceleração da gravidade
Ki	constante de ganho integral
Kp	constante de ganho proporcional
m	massa
P1	força peso medida com propulsor desligado
P2	força peso medida com propulsor ligado
X, Y, Z	eixos no referencial do corpo
- X	aceleração negativa no eixo X
+X	aceleração positiva no eixo X
- Y	aceleração negativa no eixo Y
+Y	aceleração positiva no eixo Y
- Z	aceleração negativa no eixo Z
+Z	aceleração positiva no eixo Z
Zr	Posição vertical de referência do eixo Z

## LISTA DE ABREVIATURAS

AUV	Autonomous Underwater Vehicles
CA	Corrente Alternada
CATV	Cable TV
CC	Corrente Contínua
CCD	Charge Coupled Device
CI	Circuito Integrado
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DOF	Degree of freedom
EIA	Electronic Industries Association
IES	Interferência Entre Símbolos
LARS	Launch and Recovery Systems
LCD	Liquid Cristal Display
NTSC	National Television Systems Committee
P	Proporcional
PAL	Phase-Alternate-Line
PC	Personal Computer
PD	Proporcional e Derivativo
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PVC	Poly Vinyl Chloride
PWM	Pulse Width Modulation
ROV	Remotely Operated Vehicles
RS	Recommended Standard
SOL	Simulador Off-line
STP	Shield Twisted Pair
TV	Televisão
UTP	Unshielded Twisted Pair

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Suportes de transmissão para comunicação.....	36
Tabela 5.1 – Sensibilidade (So).....	72
Tabela 5.2 – Nível zero-g (Voff).....	72

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – ROV fabricado pela Seabotix.....	26
Figura 2.2 – ROV fabricado pela VideoRay.....	27
Figura 2.3 – ROV fabricado pela Saab Seaeye Limited.....	27
Figura 2.4 – ROV fabricado pela SharkMarine Technologies Inc.....	28
Figura 2.5 – Unidade de força fornecida pela Seabotix.....	29
Figura 2.6 – Unidade de força fornecida pela Deep Sea.....	29
Figura 2.7 – Unidade de força fornecida pela Saab Seaeye Limited.....	30
Figura 2.8 – Painel de controle baseado em um notebook utilizado pela VideoRay.....	31
Figura 2.9 – Painel de controle dedicado da Seabotix com <i>joystick</i> integrado.....	32
Figura 2.10 – Painel de controle dedicado fabricado pela VideoRay.....	32
Figura 2.11 – Painel de controle dedicado do ROV Falcon DR.....	33
Figura 2.12 – Painel de controle dedicado fabricado pela Seaeye.....	33
Figura 2.13 – Guincho manual usado pelo ROV modelo Seaeye Falcon.....	34
Figura 2.14 – Guincho hidráulico fabricado pela Tech Safe Systems.....	34
Figura 2.15 – Guincho hidráulico fornecido pela Saab Seaeye Limited.....	35
Figura 3.1 – Estrutura mecânica de uma fibra ótica.....	37
Figura 3.2 – Cabo de fibra ótica.....	38
Figura 3.3 – Sistema de transmissão binária ponto-a-ponto por fibra ótica.....	38
Figura 3.4 – Par de conversores fornecido pela Tecnotrafo.....	39

Figura 3.5 – Conversor RS 232 – Fibra Ótica da Integral.....	40
Figura 3.6 – Par trançado típico.....	41
Figura 3.7 – Cabo coaxial típico.....	42
Figura 4.1 – Referencial do corpo.....	44
Figura 4.2 – Estrutura básica do ROVFURG I .....	45
Figura 4.3 – Imagem de ROVFURG II.....	45
Figura 4.4 –Foto do propulsor BTM 150.....	46
Figura 4.5 – Dimensões do propulsor BTM 150.....	46
Figura 4.6 – Curva empuxo x tensão, positivo.....	47
Figura 4.7 – Curva empuxo x tensão, sentido negativo.....	47
Figura 4.8 – Câmera modelo Typhoon da Tritech.....	48
Figura 4.9 – Altímetro PA200 fabricado pela Tritech International Limited.....	50
Figura 4.10 – Subsistema de iluminação do ROVFURG II.....	51
Figura 4.11 – Diagrama de alto nível do funcionamento do hardware do veículo configurado no modo 1.....	52
Figura 4.12 – Protótipo do ROVFURG II.....	53
Figura 4.13 – Diagrama elétrico do microcontrolador PIC 16F877A e suas conexões.	54
Figura 4.14 – Conexões do LCD.....	55
Figura 4.15 – Conexões do joystick.....	56
Figura 4.16 – Diagrama elétrico do microcontrolador PIC 16F777 embarcado no veículo subaquático.....	58
Figura 4.17 – Diagrama elétrico simplificado da etapa de potência dos propulsores....	59
Figura 4.18 – Diagrama elétrico do circuito que aciona o <i>zoom</i> da câmera.....	60

Figura 4.19 – Diagrama elétrico do circuito que aciona o foco automático.....	61
Figura 4.20 – Diagrama elétrico do circuito de acionamento da lâmpada.....	61
Figura 4.21 – O ROVFURG em operação durante uma demonstração na Festa do Mar, em Rio Grande, RS, 2007.....	62
Figura 4.22 – Diagrama de alto nível do funcionamento do hardware do veículo configurado no modo 2.....	63
Figura 4.23 – Diagrama elétrico do microcontrolador PIC 16F777 na configuração do modo 2.....	64
Figura 4.24 – Diagrama elétrico do circuito do acelerômetro.....	65
Figura 5.1 – Sistema para medição de empuxo dos propulsores.....	67
Figura 5.2 – Variante do sistema de medição do empuxo dos propulsores.....	68
Figura 5.3 – Curvas dos seis ensaios efetuados com o sistema de medição da figura 5.2.....	69
Figura 5.4 – Curvas que representam a média das seis curvas da figura 5.3.....	69
Figura 5.5 – Curva média entre tensão e empuxo aplicado.....	70
Figura 5.6 – Gráfico que mostra os sinais oriundos do acelerômetro.....	71
Figura 5.7 – Valores de tensão de saída do C.I. em função de sua posição.....	72
Figura 5.8 – Sentido das acelerações no ROV.....	73
Figura 5.9 – Estrutura montada para calibração dos acelerômetros.....	73
Figura 5.10 – Gráficos de aceleração, velocidade e posição referente ao eixo X.....	74
Figura 5.11 – Gráficos de aceleração, velocidade e posição referente ao eixo Y.....	75
Figura 5.12 – Gráficos de aceleração, velocidade e posição referente ao eixo Z.....	76
Figura 5.13 – O ROVFURG II posicionado para o início do movimento.....	77
Figura 5.14 – O ROVFURG II próximo a atingir a marca dos três metros.....	78

Figura 5.15 – Experimento realizado com 75% do torque máximo aplicado aos atuadores horizontais (repetição 1).....	78
Figura 5.16 – Experimento realizado com 75% do torque máximo aplicado aos atuadores horizontais (repetição 2).....	79
Figura 5.17 – Resposta ao degrau na posição vertical do ROV (controle PI, experimento 1).....	80
Figura 5.18 – Resposta ao degrau na posição vertical do ROV (controle PI, experimento 2).....	81

# 1. INTRODUÇÃO

Com as matérias primas necessárias à sobrevivência humana se exaurindo na superfície terrestre, e diante das barreiras atuais tanto de natureza econômica quanto em função das grandes distâncias e tempos que envolvem as viagens espaciais, a busca e extração de recursos naturais das profundezas dos oceanos devem ser incrementadas neste século. Fazer estas operações com responsabilidade de modo a preservar da melhor forma possível este ambiente marinho, implica em conhecer e entender melhor este ambiente. Os veículos subaquáticos operados remotamente, sem dúvida, passam a ser uma opção interessante como ferramenta de pesquisa, pois são capazes de coletar dados, permitir observações, efetuar trabalhos de implantação e manutenção de instalações subaquáticas a grandes profundidades e com a grande vantagem de não colocar vidas humanas em risco. Embora estes veículos já sejam bem conhecidos da indústria de extração de petróleo, no Brasil, existem poucos trabalhos principalmente no que se refere a pesquisas experimentais que tratem da construção física destes equipamentos. Dentre estes trabalhos cita-se Barros e Soares (2002), que aborda o desenvolvimento de um veículo híbrido que pode operar tanto como ROV (*Remotely Operated Vehicle*) quanto em modo autônomo AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), (Moraes, 2005) que trata do projeto e da construção de um veículo subaquático não tripulado de baixo custo.

Em nível mundial, existem muitos trabalhos sobre robótica subaquática, tanto no domínio apenas teórico quanto envolvendo também algum caráter experimental. Um importante trabalho foi desenvolvido por Fossen (1994), no qual são abordados conceitos relativos às modelagens cinemática e dinâmica de veículos subaquáticos, bem como sobre teoria de controle aplicada a estes veículos. Fossen and Fjellstad (1995) e Ridao *et al.* (2001) desenvolveram trabalhos envolvendo a dinâmica da interação entre fluido e estrutura para veículos subaquáticos. Trabalhos experimentais envolvendo o desenvolvimento de veículos subaquáticos aparecem em menor quantidade, mesmo na literatura internacional. Existem alguns veículos subaquáticos sendo desenvolvidos atualmente, principalmente em universidades ou centros de pesquisa dos Estados Unidos ou Europa. Alguns artigos aparecem na literatura sobre estes trabalhos experimentais: Aoki *et al.*(1999), Chardard e Copros



(2002), Koh *et al.*(2002), Miller (1996), Newman e Stakes (1994), Scott *et al.*(2006), McCarthy (2006), Allen *et al.* (2006) e Alt *et al.* (2006). Estes trabalhos que envolvem experimentação normalmente são financiados por grandes projetos e se destinam a atender necessidades de setores da economia que exploram o mar, como é o caso da indústria petrolífera, mas em alguns casos também atendem a objetivos militares (Fossen e Balchen, 1991).

Os trabalhos que abordam o tema robótica subaquática com forte conteúdo teórico tratam geralmente do projeto de leis de controle para veículos subaquáticos (Yhu, 2000, Sens *et al.*, 2006a, Sens *et al.*, 2006b, Tavares *et al.*, 2004c, Hsu *et al.*, 2000 e Souza e Muruyama, 2002). Em Sens *et al.* (2006a) há uma tentativa de controlar um ROV a partir de um controle baseado em estrutura variável (*Slide Mode Control*), lei de controle que pode ser empregada para sistemas não lineares e cuja fundamentação teórica encontra-se em Slotini e Li, (1991). Normalmente estes artigos já supõem a existência de um modelo dinâmico conhecido. A síntese de controle é realizada e resultados são apresentados a partir de simulações em malha fechada. Alguns autores enfatizam testes de robustez, principalmente a variações paramétricas, testes estes também realizados a partir de simulações (Tavares *et al.*, 2004a, 2004b). Outros trabalhos abordam teoria e experimento, principalmente no caso de artigos que se destinam à determinação de parâmetros de modelos dinâmicos de ROVs (Gomes *et al.*, 2005).

Conclui-se que, no Brasil, a robótica subaquática ainda é insipiente quando comparada à desenvolvida nos grandes centros de pesquisa e tecnologia mundiais. Existe, entretanto, um esforço para desenvolver este ramo de pesquisa no Brasil, efetuado principalmente a partir de projetos acadêmicos. A presente dissertação insere-se neste contexto, ou seja, pretende contribuir com o desenvolvimento da robótica subaquática no Brasil, principalmente de forma mais experimental, com a proposição, o projeto e a construção de um veículo subaquático do tipo ROV, com instrumentação relativamente importante e com a possibilidade de dois modos de operação independentes, um deles contando inclusive com a possibilidade de efetuar controle em malha fechada na posição vertical do veículo.

## 1.1 OBJETIVOS

Embora os veículos subaquáticos sejam excelentes ferramentas de pesquisa não só para a exploração do ambiente marinho como também para a dos ambientes lacustres, o alto custo dos equipamentos importados bem como sua posterior manutenção, de certa forma inviabiliza atualmente que a maioria dos centros de pesquisa nacionais, dedicados a explorar estes ambientes, possua estes equipamentos. Neste sentido foi iniciada uma pesquisa na FURG objetivando o desenvolvimento de um veículo do tipo ROV, destinado a inspeção de ambientes subaquáticos, podendo servir ainda à realização de trabalhos sobre modelagem dinâmica e controle. Uma primeira dissertação de mestrado foi finalizada em 2003, Tavares (2003), na qual foram desenvolvidas pesquisas teóricas sobre veículos subaquáticos não tripulados, mais especificamente sobre modelagem dinâmica e leis de controle para ROV. Posteriormente, uma segunda dissertação de mestrado, Moraes (2005), destinou-se ao início de pesquisas experimentais sobre a construção de um ROV. Nesta dissertação foi desenvolvido, o que poderia ser denominado de pré-protótipo de um ROV, sem câmera de vídeo, sem iluminação, sem controle por *joystick*, que utilizava atuadores com baixa capacidade de empuxo, com problemas de vedação, mas construídos localmente. A presente dissertação dá continuidade a estes trabalhos, tendo como principal objetivo a construção de um primeiro veículo com todos os módulos necessários a um veículo de inspeção.

De uma forma geral os objetivos desta dissertação foram definidos como sendo:

- desenvolver um estudo sobre os tipos de sistemas empregados na superfície para a operação de veículos subaquáticos não tripulados de mesma classe do veículo que se quer construir;
- desenvolver um estudo sobre como ocorre a transmissão de dados e vídeo nos ROVs;
- desenvolver um protótipo de veículo subaquático que funcione como veículo de inspeção e também opere como veículo de testes para aquisição de dados tais como aceleração, velocidade e profundidade;
- efetuar testes com o veículo, analisar os resultados obtidos, indicando as principais dificuldades existentes na construção de um ROV e as possíveis maneiras de contorná-las;

- aliar todo o esforço de projeto e construção do ROV ao requisito de baixo custo e desempenho adequado (controlabilidade aceitável e velocidades lineares de até 0.7m/s).

## 1.2 CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS

A maior parte da bibliografia divide os veículos subaquáticos não tripulados em dois grupos (Yuh, 2002): veículos operados remotamente (*Remotely Operated Vehicles – ROVs*) e veículos subaquáticos autônomos (*Autonomous Underwater Vehicles – AUVs*). Os ROVs recebem energia e trocam informações com o painel de controle na superfície através de um cabo umbilical. A partir do painel de controle o operador pode planejar tarefas ou utilizar um *joystick* para manobrar diretamente o veículo. Os AUVs não sofrem a intervenção do operador humano durante a missão e também não possuem cabo umbilical. A fonte de energia está embarcada no veículo, assim como a unidade central de processamento.

Os *ROVs* podem ser classificados por sua potência, tamanho, peso, profundidade de operação, tipos de atuadores, custo e função. Em nível mundial, percebeu-se, através da pesquisa, que não há uma unanimidade com relação aos parâmetros que definem cada classe. Constatou-se, também, variações de fabricante para fabricante nos termos empregados para definir, por exemplo, os nomes dos componentes que fazem parte de um sistema ROV. Neste aspecto, a norma denominada de *NORSOK standard U-102* ([www.standard.no/](http://www.standard.no/)) elaborada com ampla participação das indústrias de petróleo da Noruega em conjunto com o Centro de Tecnologia Norueguês chama a atenção por tentar definir em seu escopo os requisitos básicos de pessoal, equipamentos e sistemas, para operações com ROV relacionadas à indústria de petróleo. Entre as definições importantes desta norma cita-se a definição do que é um ROV, quais os seus principais componentes, e como se classificam. No seu quarto capítulo a norma define as diversas classes de ROV, sendo elas;

- Classe I - Observação pura (Pure observation)

Veículos de pura observação são fisicamente limitados a observação através de vídeo. Geralmente, eles são veículos pequenos equipados com uma câmera de vídeo, iluminação e

propulsores. Eles não podem empreender nenhuma outra tarefa sem modificações consideráveis.

- Classe II – Observação com opção de carga útil (*Observation with payload option*)

Veículos capazes de carregar sensores adicionais tais como; câmeras coloridas de fotografia, sistemas de medição de proteção catódica, câmeras de vídeo adicionais e sistemas de sonar. Os veículos da classe II devem ser capazes de operar, sem perder a sua função original, carregando no mínimo dois sensores adicionais.

- Classe III – Veículos da classe de trabalho (*Work Class Vehicles*)

São veículos grandes o suficiente para carregarem sensores e/ou manipuladores adicionais. Os veículos da classe III normalmente possuem capacidade de multiplexação, o que permite o uso de sensores e ferramentas adicionais para operar, sem a necessidade de vincular cada uma delas a um fio (*hardwired*) através do sistema do cabo umbilical. Estes veículos são maiores e mais potentes do que aqueles da classe I e II. Os veículos desta classe podem ser ainda classificados de acordo com a potência como:

Classe III A – Veículos da classe de trabalho <100HP

Classe III B – Veículos da classe de trabalho de 100HP até 150HP

Classe III C – Veículos da classe de trabalho >150HP

- Classe IV – Veículos para trabalho no leito do mar (*Seabed-working vehicles*)

Esta classe de veículo manobra no leito do mar através de rodas ou correia de tração, através de empuxo de propulsores ou pela força de jato de água, ou pela combinação de alguns destes métodos. Os veículos da classe IV são tipicamente muito maiores e pesados que os da classe III (*Work class*) e estão configurados para tarefas e propósitos especiais. Estas tarefas tipicamente incluem enterrar cabos e oleodutos, escavação, dragagem e outros trabalhos remotamente operados de construção no leito do mar.

- Classe V – Veículos protótipos ou em desenvolvimento (*Prototype or development vehicles*)

Veículos desta classe incluem aqueles que estão sendo desenvolvidos e aqueles considerados como protótipos. Veículos para propósitos especiais que não se encaixam em alguma das outras classes são também designados como da classe V.

### **1.3 BIBLIOGRAFIA COMENTADA**

Esta seção apresenta um resumo de livros e trabalhos consultados durante a elaboração desta dissertação, que de alguma forma contribuíram mais diretamente para dar suporte ao desenvolvimento da mesma.

**W.F.Giozza, J.F.M. de Araújo, J.A.B. Moura e J.P.Sauvé (1986)**

*Redes Locais de Computadores: Tecnologia e Aplicações*

Este livro, no capítulo 3, entre outros assuntos, trata da transmissão de bits e suportes de transmissão de dados. No capítulo 5 aborda a detecção de erros de transmissão e protocolos de comunicação. No capítulo 6 descreve as principais características da interface EIA RS 232C.

**R.B. Dominguez (1989)**

*Simulação e Controle de um Veículo Submarino de Operação Remota*

Essa dissertação trata do desenvolvimento de um modelo matemático e de um programa de simulação de veículos submarinos de operação remota para microcomputadores denominado de SOL (Simulador Off-Line). É, segundo a pesquisa realizada, o primeiro trabalho científico brasileiro, que trata especificamente de veículos subaquáticos não tripulados.

**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*

Neste trabalho é proposto um sistema de controle adaptativo para o rastreamento preciso de trajetórias em um ROV. Após a apresentação do modelo matemático no capítulo 2, o autor desenvolve controladores lineares do tipo PD (proporcional derivativo) e PI (proporcional integral) no capítulo 4, sendo efetuadas simulações utilizando o simulador SOL (Simulador Off-Line) desenvolvido na COPPE/URFJ em convênio com o CENPES/PETROBRÁS. No capítulo 5 aborda o controle a estrutura variável. Chama a atenção no capítulo 7 o método alternativo de medição de posição de um ROV conhecido por *taut-wire* (fio esticado), onde a posição pode ser calculada a partir da medição do comprimento do cabo e de alguns ângulos.

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

Esse livro é citado na maioria dos trabalhos que foram pesquisados. O trabalho abrange projeto de sistemas de controle para diversos tipos de veículos, como submarinos, torpedos, navios convencionais e veículos subaquáticos, entre outros. O capítulo 2 trata da modelagem de veículos marinhos, incluindo tópicos de cinemática e dinâmica. No Capítulo 3 são modeladas as perturbações ambientais representadas pelas ondas, ventos e correntes oceânicas. O Capítulo 4 é dedicado ao estudo de controle e estabilidade de veículos subaquáticos. Além das equações de movimento de um ROV são também apresentados neste capítulo, de forma resumida, diversos tipos de controladores, bem como aspectos de projeto de sistemas de controle com uso de *joystick*. O capítulo 5 discorre sobre o estado da arte com relação a técnicas de modelamento lineares e não lineares para navios. Os capítulos 6 e 7 são dedicados ao estudo de controle automático de navios e outras embarcações de superfície de alta velocidade.

**C.E.M.Moraes (2005)***ROVFURG-I: Projeto e construção de um veículo subaquático não tripulado de baixo custo*

Essa dissertação apresenta em seus capítulos 2 e 3 um estudo sobre os principais sensores e atuadores, utilizados em ROVs e AUVs, mostrando as suas principais características e princípios de funcionamento. O capítulo 4 descreve algumas características de diferentes ROVs e AUVs comerciais ou desenvolvidos por universidades, citando vantagens e desvantagens de cada modelo. No capítulo 5 são abordados aspectos do projeto do ROVFURG-I.

**J.M. Rosário (2005)***Princípios de Mecatrônica*

Este livro, no capítulo 15, discorre sobre os conceitos básicos de redes de comunicação em automação, e também aborda as redes de comunicação baseadas no padrão RS 485.

**A. M. Tavares (2003)***Um estudo sobre a Modelagem e o Controle de Veículos Subaquáticos não Tripulados*

Trata-se de uma dissertação de mestrado apresentada no programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da FURG, contendo um interessante conteúdo teórico sobre modelagem (cinemática e dinâmica) e controle de robôs subaquáticos. Após a fundamentação teórica sobre modelagem dos robôs, são apresentados três modelos desenvolvidos especificamente para três diferentes veículos subaquáticos. São apresentadas simulações em malha aberta, simulações em malha fechada com um controle do tipo PID, utilizado em conjunto com a técnica linearização por realimentação. Esta dissertação constitui um importante estudo teórico sobre robótica subaquática, aconselhável como bibliografia a quem pretende iniciar a realização de pesquisas na área.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O presente Capítulo 1 que trata da introdução geral, contendo explicações introdutórias sobre o tema de pesquisa, bibliografia existente na área e objetivos a serem alcançados.

O Capítulo 2 apresenta um estudo sobre os equipamentos básicos utilizados na superfície por um ROV das classes I e II.

O Capítulo 3 apresenta um estudo sobre os principais tipos de suportes de transmissão empregados na comunicação entre o veículo subaquático e a console de controle na superfície.

O Capítulo 4 aborda o projeto do ROVFURG II com seus principais subsistemas, modos de operação e circuitos elétricos.

O Capítulo 5 dedica-se a explorar os resultados experimentais da dissertação, envolvendo a calibração dos sensores e os experimentos em malhas aberta e fechada.

O Capítulo 6 trata das conclusões e considerações finais, apresentando ainda sugestões para a continuidade da pesquisa realizada.



## 2. ESTUDO SOBRE OS EQUIPAMENTOS DE SUPERFÍCIE

### 2.1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos de superfície básicos de um ROV de inspeção normalmente são divididos em dois blocos, que por vezes podem ser construídos de forma integrada em um único volume para facilitar o transporte, sendo denominados, por alguns fabricantes, de unidade de controle de superfície (*surface control unit*). O primeiro bloco, aqui denominado de unidade de força (*power unit*), tem como objetivo fornecer, com segurança, energia com tensão e corrente adequada ao veículo submerso (com exceção daqueles que utilizam baterias no seu interior). O segundo bloco é aqui denominado de painel de controle (*control console*), e tem por objetivo permitir ao operador controlar o veículo à distância (normalmente através de um *joystick*), visualizar informações dos sensores de sistema, missão e navegação, bem como as imagens oriundas do veículo através de um monitor e/ou painel. No caso de veículos de maior porte, os sistemas de lançamento e recolhimento do ROV e do cabo umbilical na água podem ainda ser relacionados como um outro subsistema. Nas figuras 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 é possível observar alguns veículos subaquáticos acompanhados de seus equipamentos de superfície tais como painel de controle, unidade de força e cabo umbilical.



Figura 2.1 – ROV fabricado pela Seabotix.



Figura 2.2 – ROV fabricado pela VideoRay com seus equipamentos de superfície.



Figura 2.3 – ROV fabricado pela Saab Seaeye Limited.



Figura 2.4 – ROV fornecido pela SharkMarine Technologies Inc.

## 2.2 UNIDADE DE FORÇA

Em função da distância razoável entre o veículo e a fonte de energia na superfície, para evitar quedas significativas de tensão no cabo, normalmente se eleva a tensão no processo de transmissão desta energia até o ROV, rebaixando-a no interior do veículo através de um conversor estático CA/CC ou CC/CC, de tal forma a diminuir o diâmetro do cabo de alimentação e, conseqüentemente, seu peso e influência no deslocamento do veículo. A energia, em caso de equipamentos portáteis pode ser obtida através de uma bateria, sendo que um inversor é utilizado para elevar sua tensão para a transmissão desta energia até o veículo. Outra opção é a utilização de geradores portáteis de energia ou do grupo gerador da própria embarcação que transporta o ROV. Normalmente, em ambos os processos, a energia elétrica é obtida a partir da queima de combustíveis fósseis. A transmissão desta energia pode ser em corrente contínua ou em corrente alternada, sendo que alguns ROVs utilizam o próprio cabo de alimentação para transmitir sinais de vídeo e dados, e podem optar, neste caso, por empregar corrente contínua a fim de minimizar interferências. Circuitos de proteção como fusíveis, sensores de sobrecorrente, sobretensão, e fuga de corrente são comuns neste subsistema.

A figura 2.5 apresenta a unidade de força que acompanha os ROVs da série LBV fabricada pela Seabotix. Este equipamento é responsável por fornecer tensão em corrente contínua através do cabo umbilical para o ROV de forma segura



Figura 2.5 – Unidade de força fornecida pela Seabotix

Na figura 2.6 observar-se um exemplo de uma unidade de força para um ROV da Classe III A, que tem tensão de entrada de 220 VCA monofásica, consome tipicamente 15KVA e fornece tensão de saída para o cabo umbilical de até 1000VAC. Esta unidade fornece em sua tampa frontal informações de corrente, tensão e fuga de corrente, de forma digital, sendo os mostradores protegidos por uma janela a prova de água. Uma outra unidade de força semelhante à da figura 2.6 é mostrada na figura 2.7, tratando-se de um equipamento fornecido pela Saab Seaeve Limited.



Figura 2.6 – Unidade de força fornecida pela Deep Sea.



Figura 2.7 – Unidade de força fornecida pela Saab Seaeye Limited

### 2.3 PAINÉIS DE CONTROLE

Os painéis de controle atuais normalmente são implementados de duas formas básicas: a partir de um microcomputador de uso geral do tipo PC compatível (*notebook, desktop*) ou através de um equipamento de uso dedicado, ou seja, com *hardware* desenvolvido especificamente para esta função. A figura 2.8 mostra um *notebook* sendo utilizado como painel de controle.

O emprego de um *notebook* como painel de controle permite ao operador, se assim for implementado, visualizar na tela do equipamento a imagem que vem da câmera do veículo bem como as informações de seus sensores, sendo possível a gravação destas informações e imagens na unidade de disco rígido para posterior análise. Um *joystick* acoplado ao *notebook* permite controlar a trajetória do veículo. Operações de posicionamento da câmera, *zoom*, foco, controle do nível de iluminação podem ser efetuadas tanto através dos botões do *joystick*, quanto do teclado. Controles em malha fechada de profundidade e posicionamento do veículo podem ser mais facilmente implementados e testados devido à grande capacidade de processamento e de memória dos PCs atuais. A atualização do *software* é simples,

podendo ser feita pela Internet. O custo atual relativamente elevado dos *notebooks*, comparado a um painel de controle mais simples, bem como sua fragilidade para operar em ambiente hostil (poeira, umidade, maresia, temperatura elevada) são algumas das desvantagens que se pode ressaltar.

Os painéis de controle dedicados, como mostram as figuras 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12, podem assumir as mais diversas formas em função da complexidade das funções implementadas e do seu custo. Podem ter o *joystick* integrado ao próprio painel de controle como mostram as figuras 2.9 e 2.12 ou separado formando um novo subsistema denominado de caixa de controle manual (*hand control box*) ou simplesmente controlador manual (*hand controller*) como se observa na figura 2.11.



Figura 2.8 – Painel de controle baseado em um notebook utilizado pela VideoRay



Figura 2.9 – Painel de controle dedicado da Seabotix que acompanha os ROVs da série LBV.



Figura 2.10 - Painel de controle dedicado fabricado pela VídeoRay.



Figura 2.11 – Painel de controle dedicado do Falcon DR.



Figura 2.12 – Painel de controle dedicado fabricado pela Seaeeye.



## 2.3 SISTEMAS DE LANÇAMENTO E RECOLHIMENTO

Estes sistemas, também conhecidos por LARS (*Launch and Recovery Systems*), normalmente são empregados para facilitar as tarefas de lançar e recolher o veículo subaquático e seu cabo umbilical. Eles podem ser manuais, elétricos ou hidráulicos. Um guincho manual é apresentado na figura 2.13, onde através do movimento de uma alavanca o operador pode lançar e recolher o cabo umbilical de um ROV. O equipamento, além de diminuir o esforço físico do operador no lançamento e recolhimento do cabo, evita com que ele se torça e quebre. Nas figuras 2.14 e 2.15 são mostrados dois guinchos hidráulicos usados para lançar e recolher veículos subaquáticos de maior porte.



Figura 2.13 – Guincho manual usado pelo ROV modelo Seaeye Falcon.



Figura 2.14 – Guincho hidráulico fabricado pela Tech Safe Systems



Figura 2.15 – Guincho hidráulico fornecido por Saab Seaeve Limited.

## 2.4 ANÁLISE FINAL

Conforme foi observado nas subseções anteriores, a escolha do tipo de painel de controle a ser empregado vai depender das funções que o ROV terá que desempenhar, das condições ambientais a que estes painéis serão submetidos e do preço que o usuário está disposto a pagar pelo equipamento. Muitos fabricantes, inclusive, oferecem as duas opções para um mesmo modelo de ROV. No ROVFURG II se optou por desenvolver painéis dos dois tipos, um baseado em um PC de mesa (*desktop*) e outro dedicado de muito baixo custo, baseado em microcontrolador. Com relação à unidade de força, um transformador isolador, um interruptor bipolar, fusíveis e procedimentos operacionais deverão ser adotados visando garantir a segurança do operador e do equipamento. Em função de que se irá operar inicialmente o veículo com um cabo umbilical de pequeno comprimento, não será necessário empregar nenhum dos tipos de guincho anteriormente apresentados.

### 3. ESTUDO SOBRE COMUNICAÇÃO NOS ROVs

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo foi efetuar um estudo para identificar os suportes de transmissão mais comuns empregados para a comunicação entre o painel de controle e o veículo submerso. Para tanto, foram analisadas as especificações técnicas de alguns ROVs comerciais e montada a tabela 3.1. As principais características de cada um destes suportes e dos equipamentos comerciais a eles vinculados foram analisadas nas seções 3.2 e 3.3, de forma a fornecer elementos para a escolha de um destes suportes para o projeto do ROVFURG II.

Tabela 3.1 – Suportes de transmissão para comunicação

<b>Modêlo do ROV</b>	<b>Transmissão dos sinais de vídeo</b>	<b>Enlace de dados</b>
LBV 150S	Através do cabo de alimentação	Através do cabo de alimentação
Seaeeye Falcon DR	Através de fibra ótica	Através de Fibra ótica
Stingray	Através de cabo coaxial de 75 Ohms	Através de par trançado com blindagem - RS 485
Seaeeye Cougar	Através de fibra ótica	Através de par trançado com blindagem - RS 485
Seaeeye Tiger	Através de par trançado com blindagem e fibra ótica.	Não especificado

### 3.2 FIBRAS ÓTICAS

As fibras óticas são finos fios que normalmente podem ser feitos de sílica ou plástico. Estes materiais são isolantes, transparentes e constituem suportes de transmissão para a luz infravermelha, caracterizados como guias de onda luminosa. Uma fibra como a que utiliza sílica, por exemplo, é constituída de uma *casca* com índice de refração  $n_2$ , envolvendo um *núcleo* com índice de refração  $n_1$  ligeiramente superior, conforme mostrado na figura 3.1. A variação dos índices de refração se deve à dopagem diferente da sílica empregada na casca e no núcleo. O encapsulamento plástico externo proporciona uma proteção mecânica para a sílica, (Giozza *et al*, 1986).

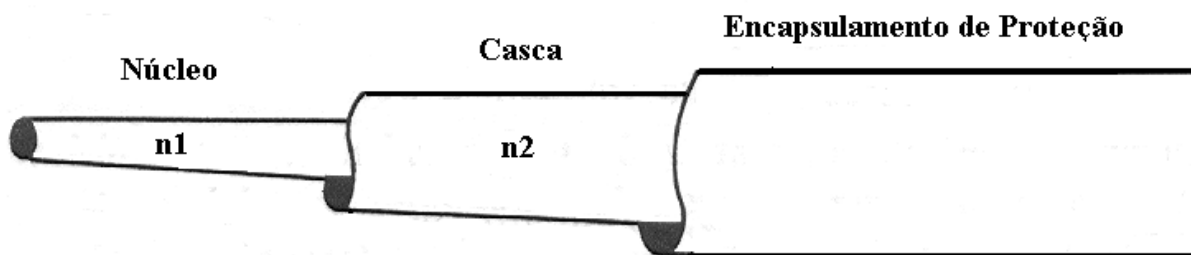


Figura 3.1- Estrutura mecânica de uma fibra ótica

As fibras óticas podem ser classificadas como multimodo e monomodo. As multimodo são fibras que possuem vários modos de propagação, o que faz com que os raios de luz percorram por diversos caminhos o interior da fibra, normalmente são utilizadas em enlaces de até 2 km. As multimodos subdividem-se em fibra com índice degrau, se o índice de refração na divisa entre a casca e o núcleo mudar abruptamente, ou em fibra com índice gradual se a mudança de índice do núcleo for crescente da periferia para o centro. Estas características influenciam diretamente no tempo de propagação dos vários feixes luminosos dentro da fibra e definem a dispersão modal maior no primeiro tipo restringindo a capacidade de transmissão desta de fibra. A capacidade de transmissão de uma fibra ótica é dada pela multiplicação da banda passante pela distância ( $MHz.km$ ). Como valores típicos de capacidade de transmissão, as fibras com índice degrau e índice gradual apresentam 15-25  $MHz.km$  e 400

*MHz.km*, respectivamente. As fibras monomodo possuem um único modo de propagação, ou seja, os raios de luz percorrem o interior da fibra por um só caminho. Por possuírem dimensões mais reduzidas que as fibras multimodos, as fibra do tipo monomodo têm um processo de fabricação mais complexo, contudo, as características destas fibras são muito superiores às multimodos, principalmente no que diz respeito à banda passante, mais larga, o que aumenta sua capacidade de transmissão para um valor típico na ordem de  $100\text{GHz.km}$ . Apresentam atenuação mais baixa, aumentando, com isto, a distância entre as transmissões sem o uso de repetidores para valores médios de  $20\text{km}$ . Na figura 3.2 observar-se um cabo de fibra ótica com várias fibras e capa de proteção.

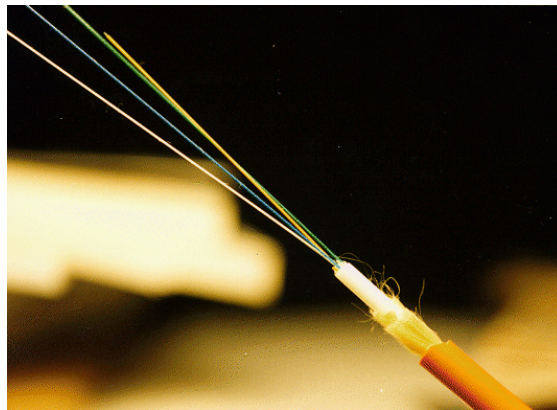


Figura 3.2 – Cabo de fibra ótica

A figura 3.3 mostra um sistema de transmissão binária ponto-a-ponto por fibra ótica. O transmissor emprega normalmente um dispositivo emissor de luz, que pode ser um diodo emissor de luz (LED) ou um diodo laser, já no receptor é comum a utilização de um fotodetector do tipo fotodiodo.



Figura 3.3 - Sistema de transmissão binária ponto-a-ponto por fibra ótica

As fibras óticas, quando empregadas como suporte para transmissão de sinais, apresentam como vantagens, em relação aos cabos metálicos, a grande capacidade de transmissão, total imunidade a interferências e ruídos eletromagnéticos, completa isolamento elétrica, tamanho e peso reduzidos, e baixo consumo de energia. Como desvantagem, cita-se a necessidade de equipamentos especiais e caros para realização de emendas e conexões entre fibras, de tal forma a se ter baixa atenuação nas mesmas.

### 3.2.1 Conversores comerciais de sinais de vídeo para fibra ótica

Estes dispositivos têm como objetivo principal converter um sinal de vídeo composto analógico em sinal luminoso (TX) de tal forma que possam ser transmitidos por fibra ótica e na outra extremidade do cabo proceder de forma inversa, ou seja, converter este sinal luminoso novamente em sinal de vídeo composto (RX). A figura 3.4 mostra os equipamentos de transmissão e recepção para circuito fechado de TV para uma distância de até 3000m fornecidos no Brasil pela Tecnotrafo.



Figura 3.4-Par de conversores fornecidos pela Tecnotrafo

### 3.2.2 Conversores comerciais RS 232 - Fibra Ótica

Estes conversores têm a função de converter os sinais digitais de uma porta serial do PC no padrão RS-232 em sinais luminosos possibilitando a transmissão e recepção de dados através de fibras óticas. Dependendo do modelo, não necessita de algoritmo de controle de fluxo de dados, operando, inclusive, no modo *full-duplex*. Podem utilizar uma ou duas fibras. A figura 3.5 mostra um conversor deste tipo fornecido no Brasil pela Integral Sistemas e Comércio LTDA, que trabalha com duas fibras.



Figura 3.5 – Conversor RS-232 – Fibra Ótica da Integral

### 3.3 COMUNICAÇÃO ATRAVÉS DE CABOS METÁLICOS

Os cabos metálicos são utilizados para comunicação há várias décadas, desde os primórdios do telégrafo até a telefonia fixa dos dias de hoje. Entre os diversos tipos de cabos metálicos empregados para comunicação dois se destacam; o cabo coaxial e o par metálico trançado, ambos podem ser usados tanto para uma transmissão ponto-a-ponto de dados,

quanto para formar uma rede local de computadores. As características de cada um destes suportes de transmissão serão abordadas a seguir.

### 3.3.1 Par metálico trançado

O par trançado, conhecido em inglês por *twisted pair*, é um suporte de transmissão constituído de dois fios metálicos (normalmente de cobre ou cobre estanhado), revestidos cada um por uma capa isolante (normalmente de *PVC*) e enrolados em espiral. A figura 3.6 mostra um par trançado de cobre usado em telefonia fixa.

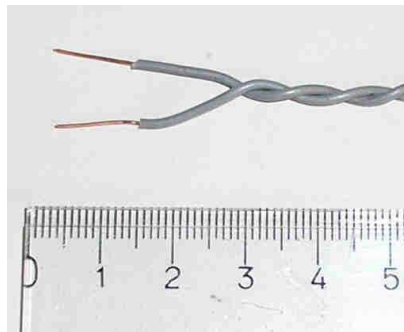


Figura 3.6 – Par trançado típico

A disposição dos fios de forma entrelaçada faz com que o campo magnético gerado por um dos fios tenda a ser cancelado pelo campo magnético do outro condutor, mantendo também desta forma as propriedades elétricas ao longo do suporte, e minimizando a emissão e captação de ruídos. A capacidade de transmissão deste suporte é definida pelas propriedades elétricas dos condutores nesta disposição, tais como: resistência por unidade de comprimento e capacitância mútua por unidade de comprimento. Com relação ao aspecto construtivo, pode possuir apenas dois fios (*UTP-Unshielded Twisted Pair*) ou dois fios e blindagem (*STP-Shielded Twisted Pair*). O par trançado apresenta como vantagens com relação ao cabo coaxial um menor custo por metro, maior facilidade na soldagem de conectores e manuseio, devido a suas pequenas dimensões e grande maleabilidade. A sua capacidade de transmissão de dados é normalmente referenciada com relação ao tipo de sinal que se vai transmitir e o nível de interferência entre símbolos (IES).



O EIA-485, ou RS 485 como ficou conhecido, é um dos padrões de comunicação mais utilizados na indústria e emprega pares trançados como suporte de transmissão para comunicação entre equipamentos em chão de fábrica. Este padrão define a camada física e não o protocolo de comunicação e emprega circuitos baseados em tensão diferencial balanceada, que propiciam uma alta imunidade a ruído e elevadas taxas de transmissão de até 10Mbps a uma distância que pode chegar a 1200 metros, além disto, permite conexões multiponto com as quais é possível criar redes de até 32 nós, (Rosário, 2005). Como foi mostrado na tabela 3.1, muitos ROVs estudados empregam este padrão para comunicação entre o painel de controle na superfície e o veículo submerso.

### 3.3.2 Cabo coaxial

O cabo coaxial (figura 3.7) é constituído basicamente por um condutor cilíndrico (D), normalmente de cobre, envolto em um tubo metálico ou malha concêntrica (B), normalmente também de cobre, que serve ao mesmo tempo de blindagem eletrostática e condutor de retorno. Estes dois condutores são separados por um material normalmente plástico (C) que serve como dielétrico. Uma última capa de plástico (A) envolve as demais camadas servindo como proteção mecânica.

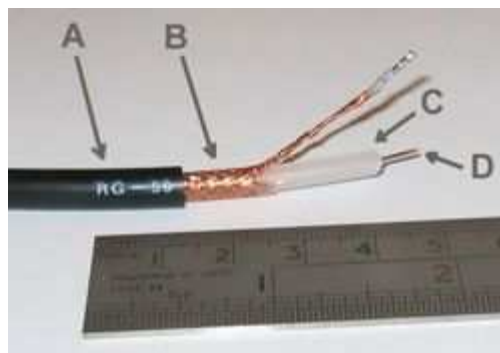


Figura 3.7 - Cabo coaxial típico

Os parâmetros elétricos deste tipo de cabo são determinados pela disposição geométrica dos condutores e pelas propriedades dos materiais utilizados, em particular do dielétrico entre os condutores. Possui uma melhor capacidade de transmissão quando comparados com os pares metálicos trançados (Giozza et al, 1986).

Os cabos coaxiais normalmente são classificados de acordo com a tecnologia de transmissão empregada:

- **Banda básica** (50 ohms): O sinal digital é diretamente injetado no cabo e a capacidade de transmissão dos cabos coaxiais varia entre alguns Mbps.km (mega bits por segundo x quilometro) nos cabos mais finos, até uma dezena Mbps.km nos cabos mais grossos.
- **Banda larga** (75 ohms): Nesta tecnologia de transmissão, em que se utiliza modulação e multiplexação no domínio da frequência, muito empregada nos sistemas de televisão por cabo (CATV), os cabos coaxiais suportam bandas passantes úteis de até 400 MHz.

### 3.4 ANÁLISE FINAL

Como resultado do estudo, concluiu-se que tanto os cabos metálicos quanto as fibras óticas são largamente empregados como suporte de transmissão para a comunicação nos ROVs. Especificamente com relação ao projeto do ROVFURG II, ambos os suportes teoricamente atenderiam plenamente aos quesitos técnicos de propiciar uma boa taxa de transmissão, para uma distância máxima de 150 metros, com imunidade relativamente razoável a ruídos. A escolha de par trançado metálico para transmissão de dados e de cabo coaxial para transmissão de sinais de vídeo se deu em função basicamente do custo, tamanho, e da experiência da equipe de pesquisadores com esta tecnologia. Um par de conversores RS232-Fibra Ótica comerciais foi cotado em R\$ 800,00 a R\$ 2400,00, conforme o modelo e fabricante, enquanto que os circuitos integrados para implementar o padrão RS 485 custavam na época R\$ 1,59 cada um. Com relação ao sinal de vídeo, o fabricante da câmera específica que para a distância em questão, um cabo coaxial comercial padrão seria suficiente para garantir uma boa recepção de imagem na superfície.

## 4. PROJETO ROVFURG II

### 4.1 INTRODUÇÃO

Conforme explicado no capítulo de introdução, a presente dissertação tem como principal objetivo a construção de um protótipo de veículo de inspeção subaquático remotamente operado, que possibilite ao operador através de um *joystick* controlar tanto a trajetória do veículo, quanto todas as funções de uma câmera e de um sistema de iluminação a ele incorporado, além de possibilitar o levantamento de dados experimentais tais como aceleração, velocidade, profundidade e empuxo dos propulsores. Da mesma forma que o ROVFURG I (Moraes, 2005), a construção deste protótipo teve como requisito um baixo custo de produção, facilidade de construção mecânica, e o uso, sempre que possível, de tecnologia nacional, de maneira a possibilitar a utilização de mão de obra local e com orçamento compatível com a realidade de pequenos laboratórios e centros de pesquisas. O veículo possui fluviabilidade neutra e controle ativo de quatro graus de liberdade (figura 4.1), sendo eles: avanço (direção X), oscilação (direção Z), guinada (rotação em torno de Z) e balanço (direção Y). Porém, os movimentos arfagem (rotação em torno de Y) e rolamento (rotação em torno de X) são controlados passivamente a partir do distanciamento entre os centros de empuxo e o de massa, formando assim os chamados torques restauradores (Tavares, 2004). Isto significa que, apesar de haver a possibilidade do controle ativo em rolamento, este não é usado em razão do controle passivo naturalmente imposto com as forças peso e empuxo.

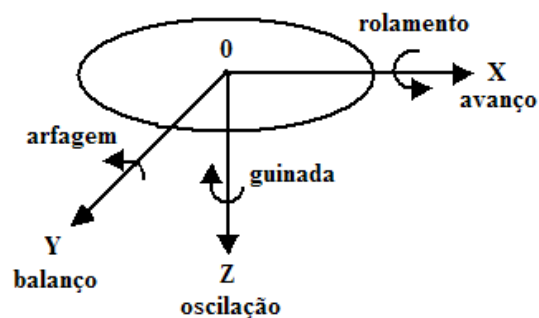


Figura 4.1- Referencial do corpo

O protótipo desenvolvido na presente dissertação, embora tenha sido projetado para operar em profundidades de até 150 metros (propulsores, energia, comunicação, iluminação, câmera de vídeo), foi testado somente em piscina.

#### 4.2. ASPECTOS MECÂNICOS DO PROJETO

A estrutura mecânica básica do ROVFURG I (Moraes, 2005) foi mantida, como pode ser observado nas figuras 4.2 e 4.3, sendo que, ao ROVFURG II foi acrescentado uma câmera, novos propulsores e um sistema de iluminação.

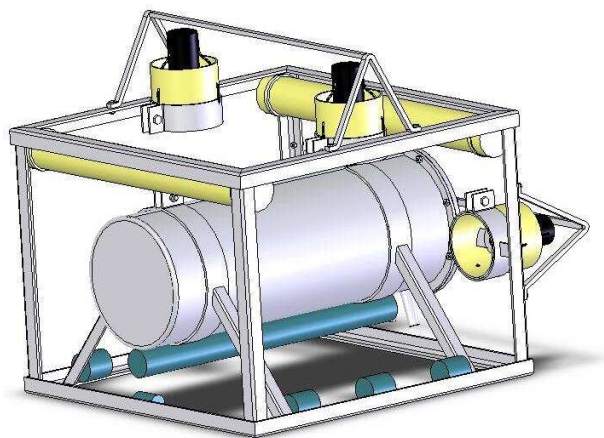


Figura 4.2 – Estrutura básica do ROVFURG I

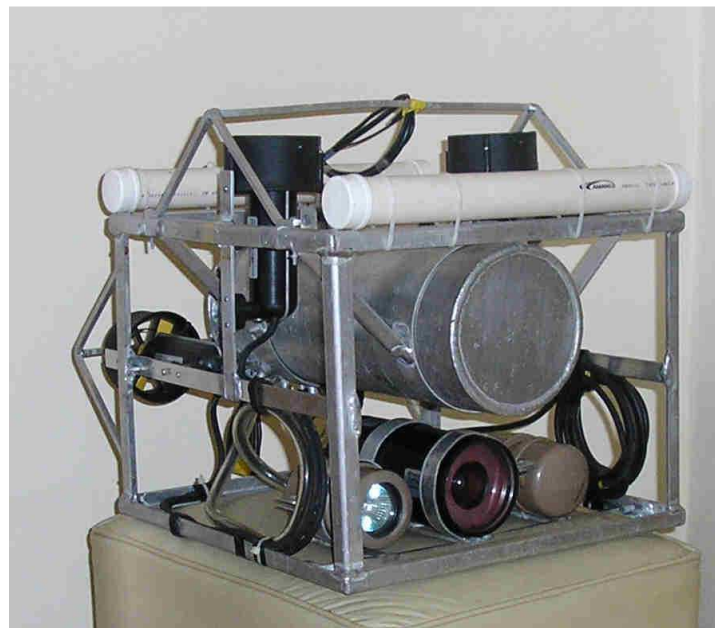


Figura 4.3 – Imagem do ROVFURG II

### 4.3. PROPULSORES

Após algumas tentativas frustradas de desenvolvimento de propulsores empregando motores de corrente contínua utilizados pela indústria automobilística, seja pelo baixo desempenho ou por problemas de vedação, optou-se pela importação de propulsores fabricados pela Seabotix Inc., modelo BTD 150, mostrado na figura 4.4, que, conforme especificações do fabricante, são dimensionados para operar até profundidade de 150 metros. Suas dimensões geométricas podem ser vistas na figura 4.5.



Figura 4.4 - Foto do propulsor BTD 150.

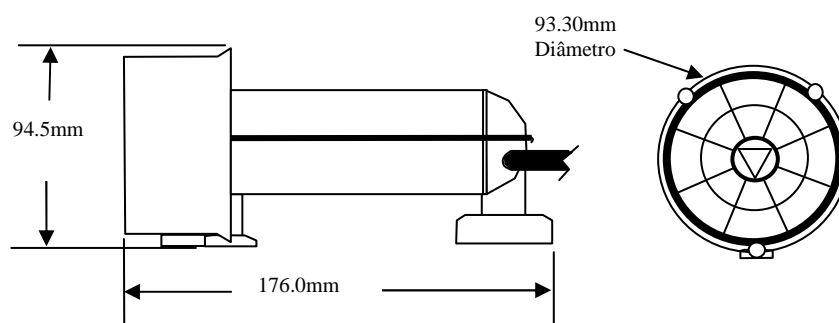


Figura 4.5 - Dimensões do propulsor BTD 150

As curvas de empuxo *versus* tensão, fornecidas pelo fabricante, são mostradas na figura 4.6 para o sentido positivo (para frente) e na figura 4.7 para o sentido negativo (para trás). Percebe-se que, segundo o fabricante, há uma região de grande linearidade entre tensão e empuxo.

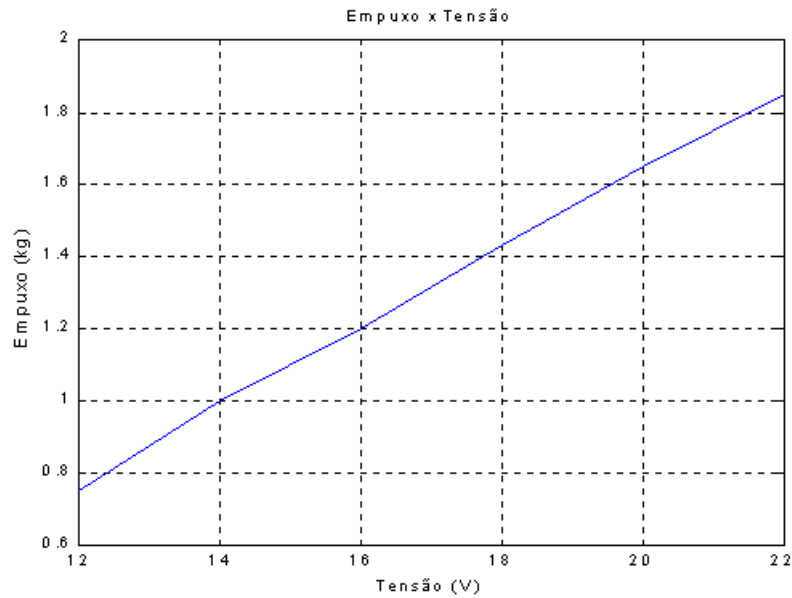


Figura 4.6 - Curva empuxo x tensão, sentido positivo

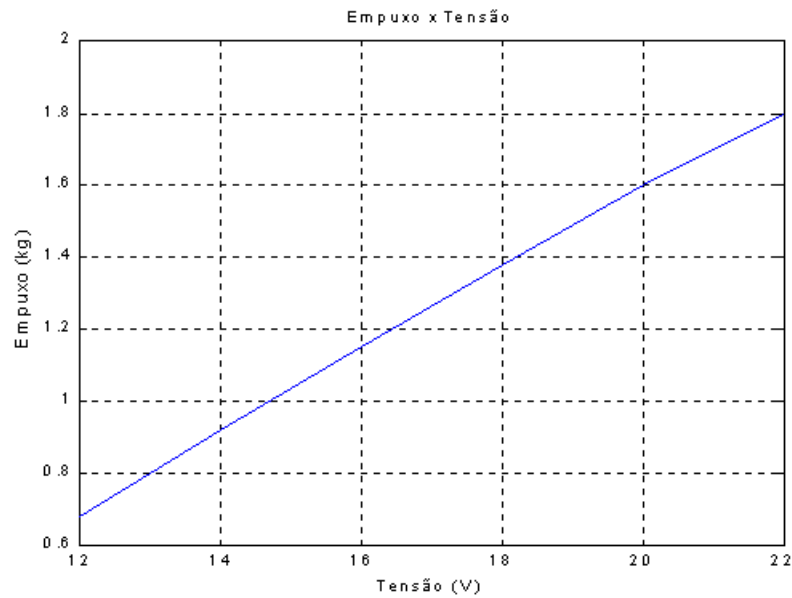


Figura 4.7 - Curva empuxo x tensão, sentido negativo

Os demais dados fornecidos pelo fabricante são: a corrente máxima nos enrolamentos do motor (4.0A), o peso no ar (754 g) e o peso na água (124 g). Correntes acima de 6A podem ser usadas, mas irão diminuir drasticamente a vida útil dos propulsores se ocorrerem continuamente. Salvas de altas correntes de um minuto ou menos podem ser efetuadas desde que a média da corrente seja mantida em 4A máximos, a fim de prevenir excessivo calor nos enrolamentos do motor.

#### 4.4 CÂMERA DE VÍDEO

A câmera de vídeo acoplada ao veículo (figura 4.8) é do modelo Typhoon, produzida pela Trittech International Limited. Esta câmera possui características de cor, resolução de imagem, sensibilidade, zoom e baixa distorção que excedem as necessidades de um ROV de baixo custo, mas foi adquirida com o objetivo de viabilizar o início dos testes experimentais de processamento de imagem do futuro AUV a ser projetado e construído pela FURG, bem como garantir boas imagens em condições adversas de águas turvas, típicas da região sul do Brasil.



Figura 4.8 - Câmera modelo Typhoon da Trittech

A câmera utilizada no ROVFURG II possui as seguintes especificações eletrônicas:

- Sensor do tipo CCD;
- Foco e zoom manual controlado por sinal analógico;
- Zoom de 22:1 através de lentes e com foco automático;
- Resolução de 470 linhas horizontais de TV;
- Relação sinal ruído maior do que 50 dB;
- Saída de vídeo composto 1.0Vpp;
- Estágio de saída de vídeo com capacidade para enviar sinal até 1500 metros (com cabo coaxial de boa qualidade);
- Sinal de vídeo no sistema PAL ou NTSC;
- Alimentação de 11 a 30vdc;
- Corrente nominal de 500 mA.
- Processamento de sinal com utilização de lógica fuzzy para permitir o funcionamento da câmera em condições de baixa luminosidade;

A câmera ainda possui as seguintes especificações óticas:

- Alcance focal de 0.2 metros até o infinito;
- Campo de visão (diagonal) de 47 graus (amplo).

Suas especificações de condições ambientais são:

- Temperatura de armazenagem de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ ;
- Temperatura de operação de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ .

Constituem suas especificações mecânicas:

- Peso no ar de 1.9 kg;
- Peso na água de 0.7kg;
- Anteparo frontal de acrílico corrigido para água;
- Formato cilíndrico com dimensões de 92 mm de diâmetro, 190 mm de comprimento, mais 100 mm de conector e arremate do cabo na parte traseira do cilindro;



- Material do Encapsulamento em duro alumínio anodizado que permite operação da câmara até 3000 metros de profundidade.

#### 4.5. ALTÍMETRO

O altímetro modelo PA200/20-S (figura 4.9) foi acoplado posteriormente ao veículo, tendo sido fornecido pela Tritech International Limited. Este equipamento serve para medir a distância entre o veículo e o fundo do ambiente subaquático, baseando-se no princípio da reflexão do sinal (onda sonora) em um obstáculo (fundo), em que o tempo entre a emissão e a recepção do sinal refletido é proporcional à distância. Este sensor emprega uma frequência de 200 *kHz* com feixe cônico de 20 graus, possui resolução digital de 1 *mm* e os dados são enviados à superfície a 9600 *bps*, através de interface serial com padrão RS-232. Sua alimentação nominal é de 12VCC, corrente de 160 *mA*, faixa de medição de 0.7 a 100 *m* e o seu encapsulamento permite operar em profundidades de até 4000 *m*.



Figura 4.9 - Altímetro PA200 fabricado pela Tritech International Limited.

#### 4.6. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

O sistema de iluminação (figura 4.10) foi desenvolvido no âmbito desta dissertação, custou cerca de 50 reais e utiliza uma lâmpada dicrónica de 12 VCC / 25 W. Projetou-se o sistema para operar a uma profundidade máxima de 150 metros (ainda não testado) e de tal forma que a intensidade de iluminação possa ser variada a partir de botões do *joystick*.



Figura 4.10 - Subsistema de iluminação do ROVFURG II

### 4.7. MODOS DE OPERAÇÃO

O projeto em questão atende a duas finalidades básicas, o que resulta em dois modos de operação distintos. No modo 1 o ROVFURG II está configurado para operar como veículo de inspeção. Neste modo o operador, a partir de um *joystick*, pode controlar a trajetória e a velocidade do veículo, bem como todas as funções da câmera e sistema de iluminação, utilizando um *hardware* mínimo de baixo custo, pequeno volume e baixo consumo, propiciando, desta forma, o uso do equipamento alimentado por uma bateria automotiva. No modo 2, com algumas modificações, o ROVFURG II serve para coleta de dados e testes de algoritmos de controle, empregando para isso um PC como painel de controle. As figuras 4.11 e 4.22 mostram as duas estruturas que foram produzidas para atender a estas finalidades.

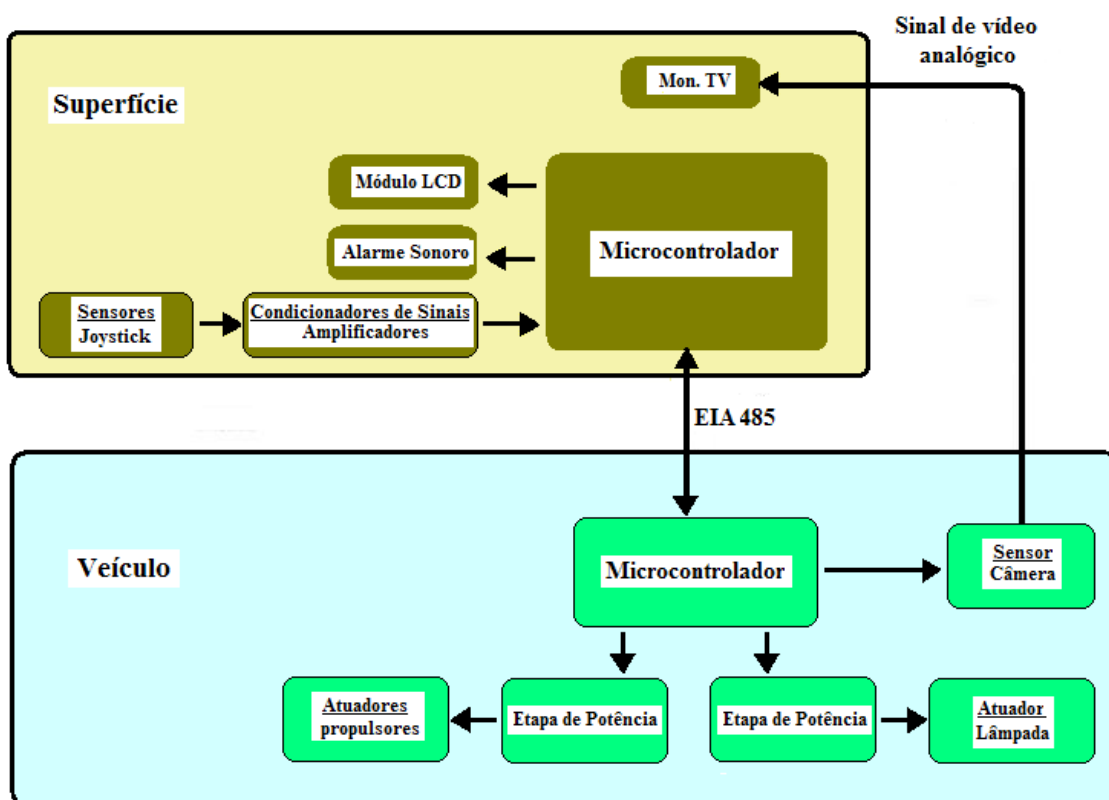


Figura 4.11 - Diagrama em alto nível do funcionamento do *hardware* do veículo configurado no modo 1.

A figura 4.11 mostra de forma resumida o funcionamento do sistema no modo 1. Na superfície, os sinais referentes à posição do *joystick* são enviados através de amplificadores operacionais aos conversores analógicos digitais de 10 bits de resolução, implementados em um microcontrolador PIC16F877A, fabricado pelo Microchip ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)). Após o processamento destes sinais, e também aos dos sinais oriundos dos botões do *joystick*, é implementado um protocolo de comunicação que utiliza uma técnica de verificação de consistência de dados conhecida como *checksum*. Uma interface serial de comunicação que obedece ao padrão EIA-RS 485/422 é responsável por transmitir estes dados a uma taxa de transmissão de 19200 bps através de um cabo até o veículo submerso. Embaixo d'água, dentro do cilindro metálico do ROV, um microcontrolador PIC 16F777, através de uma interface de comunicação semelhante à utilizada na superfície, recebe os dados, verifica sua consistência, e, caso eles sejam válidos, executa os comandos para a câmera, propulsores e lâmpada através de suas etapas de potência. A câmera envia diretamente através de um cabo coaxial o sinal de vídeo analógico para um monitor na superfície (TV usada como monitor) permitindo ao operador visualizar o ambiente subaquático durante a trajetória do ROV. O circuito de *watch dog timer* existente no PIC16F777 é utilizado para garantir rapidamente o reinício da comunicação, em caso de falha devida a ruídos espúrios. Um sensor de presença de água foi implementado dentro do veículo, mais precisamente no interior do cilindro que contém a eletrônica embarcada, a fim de proporcionar um alarme sonoro (*buzzer*) e visual (*display*) ao operador na superfície. Na figura 4.12 abaixo é possível observar o protótipo nesta configuração.



Figura 4.12- Protótipo do ROVFURG II

### 4.8 PAINEL DE CONTROLE DO MODO 1

O painel de controle utilizado no modo 1 é baseado no microcontrolador PIC16F877A da Microchip e utiliza um *joystick* modelo flight2000 F22 fabricado pela Genius. Possui *display* do tipo LCD com duas linhas de 16 caracteres cada. Seus diagramas elétricos são mostrados em partes nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15 para facilitar o entendimento.

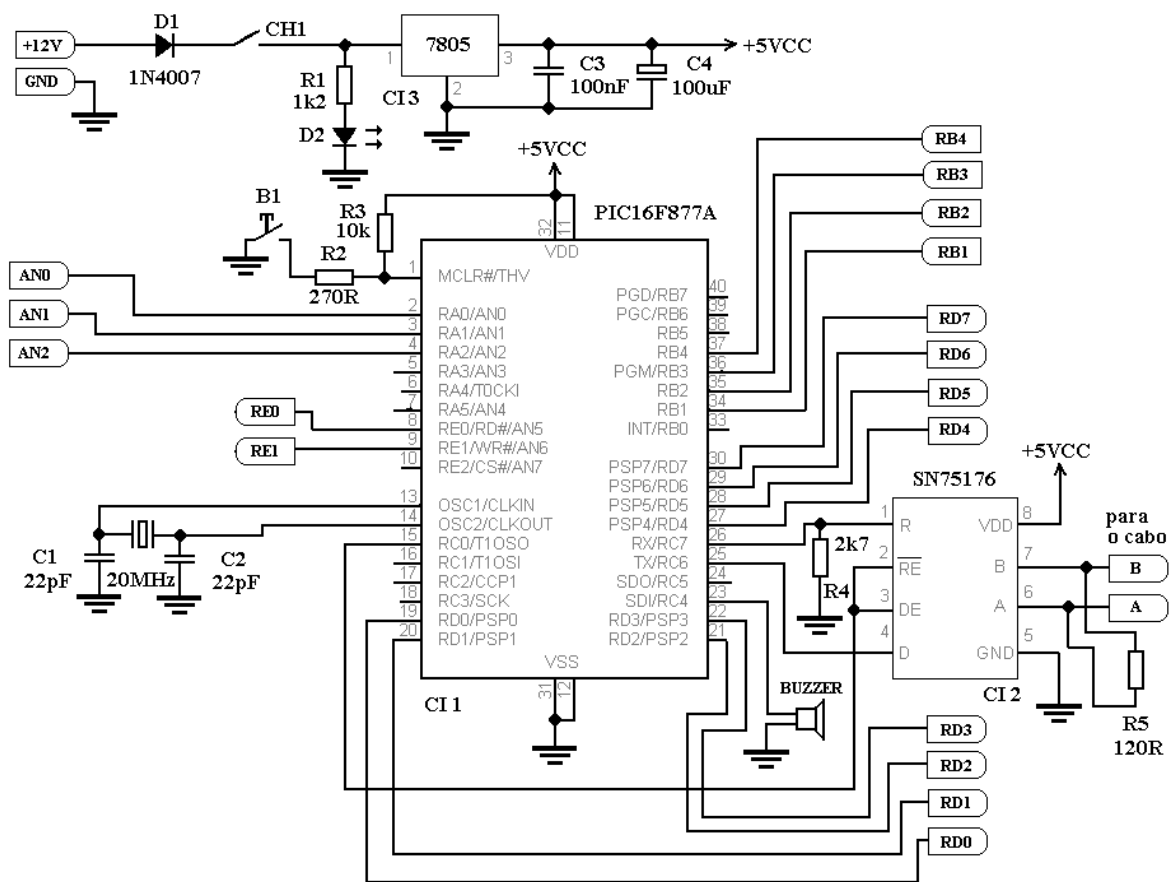


Figura 4.13- Diagrama elétrico do microcontrolador PIC16F877A e suas conexões.

Os sinais analógicos provenientes dos potenciômetros do *joystick* (figura 4.13) são levados através das entradas AN0, AN1 e AN2 aos conversores analógicos digitais do microcontrolador. De forma semelhante os sinais digitais referentes ao estado dos botões do *joystick* são levados a este mesmo circuito integrado através das entradas RB1, RB2, RB3 e RB4. Uma vez processados os sinais pelo microcontrolador ele monta uma mensagem com 12 bytes e a envia posteriormente ao veículo subaquático através do transceptor de

barramento (C.I.2). Os sinais para o acionamento do *display* são obtidos através das saídas RE0, RE1 e de RD0 a RD7. O alarme sonoro é produzido por um *buzzer* conectado ao pino 23 (RC4) do C.I.1. O *clock* do sistema é de 20MHz e a taxa de transmissão neste modo é de 19200 *bps*.

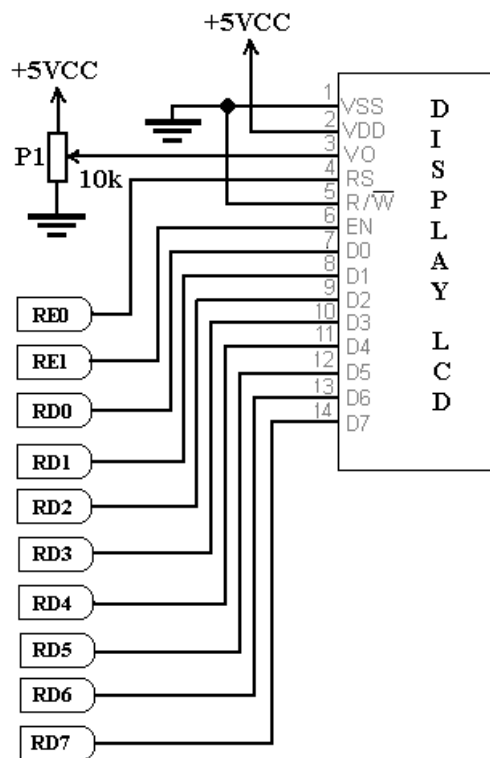


Figura 4.14 – Conexões do LCD

O potenciômetro P1, na figura 4.14, é responsável pelo ajuste de contraste dos caracteres do *display*. RE1 habilita-o e RE0 define se o *byte* que chega pelo barramento (D0 a D7) é dado ou comando.

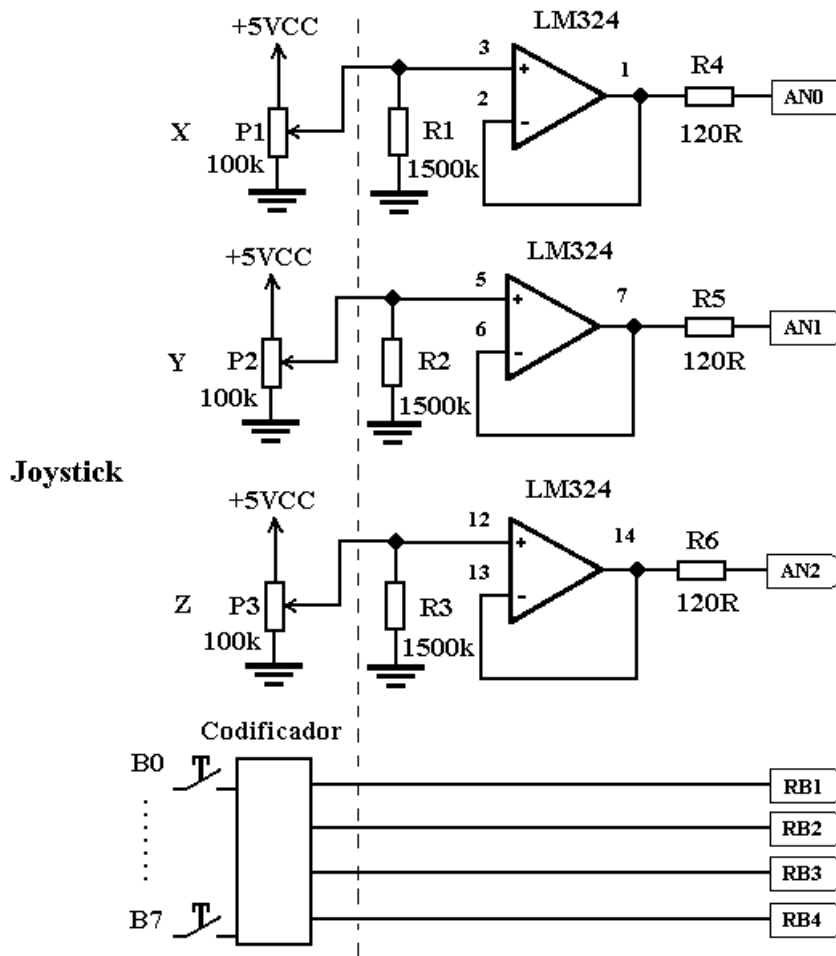


Figura 4.15 - Conexões do joystick.

À esquerda da linha pontilhada (figura 4.15) os potenciômetros P1, P2, P3, o codificador e os botões fazem parte do joystick. À direita da mesma linha os amplificadores operacionais, resistores e demais componentes levam os sinais às entradas analógicas e digitais do microcontrolador PIC 16F877A do painel. Ao se mover o joystick, as tensões nos cursores dos potenciômetros P1 e P2 se alteram, e através dos amplificadores operacionais são levadas às entradas analógicas do PIC onde estes sinais são processados e desta forma sendo definido o sentido de rotação e a informação de velocidade que será enviada para os propulsores direito e esquerdo do veículo subaquático. Os amplificadores possuem como objetivo condicionar os sinais para possibilitar a perfeita leitura das tensões por parte dos conversores analógico-digitais, uma vez que P1 e P2 possuem alta impedância ( $100k\Omega$ ). Ao se pressionar um dos oito botões existentes no joystick (B0, B1, ..., B7) o codificador envia para as quatro entradas RB1, RB2 e RB4 um código referente à tecla pressionada que é lida pelo microcontrolador e que

define as funções da câmera (*zoom*, foco, foco automático) e o nível de luminosidade da lâmpada do subsistema de iluminação do veículo. B0 faz com que o *zoom* aumente, B1 faz com que o *zoom* diminua, B2 muda o foco para mais distante, e B3 para mais perto, B4 coloca a câmera em foco automático, B6 e B7 aumenta e diminui a luminosidade da lâmpada respectivamente.

## 4.9 ELETRÔNICA EMBARCADA NO MODO 1

Dentro do veículo, além de uma fonte chaveada 220VCA/24VCC, existe um microcontrolador PIC16F777 da Microchip que foi escolhido por possuir oito entradas analógicas, três saídas de PWM independentes, uma *usart* que possibilita efetuar comunicação serial a uma taxa de transmissão de até 115200 bps, bem como memória e velocidade de processamento suficientes para as atividades a serem desenvolvidas. O C.I. SN75176 é o responsável pela transmissão e recepção de dados pelo cabo atendendo ao padrão EIA-RS 485/422 que garante comunicação a taxas de transmissão de até 10 Mbps a uma distancia de 1200 metros com grande imunidade a ruídos. Os demais circuitos embarcados serão descritos a seguir.

O microcontrolador PIC16F777 (figura 4.16) é o responsável por receber através do pino 26 (RX) e do pino 1(R) do C.I. 2 os comandos enviados serialmente pelo painel de controle que se encontra na superfície. Uma vez verificada a consistência destes dados, o microcontrolador passa a executar estes comandos. Através das saídas PWM1 e PWM2 são acionadas individualmente as etapas de potência dos propulsores horizontais direito e esquerdo, respectivamente. A saída PWM3 aciona simultaneamente as duas etapas de potência encarregadas de fornecer energia aos dois propulsores verticais. DIR1, DIR2 e DIR3 definem o sentido de rotação dos propulsores. As saídas +Z e -Z aumentam ou diminuem o *zoom* da câmera, enquanto que as +F e -F são responsáveis por aproximar ou afastar o foco, sendo que a saída F.AUT coloca o sistema de foco da câmera em modo automático. A intensidade da iluminação é comandada pelas saídas +L e -L. Um sensor de presença de água foi instalado estrategicamente dentro do cilindro com a eletrônica embarcada. No caso de infiltração de água neste compartimento, T1 satura e coloca nível lógico zero no pino 23(RC4) que é lido periodicamente pelo microcontrolador, gerando neste caso, um código de



alarme que será enviado à superfície através de seu pino 25 (TX) e do pino 4(D) do CI2. O sinal é então enviado pelo cabo e será recebido pelo microcontrolador do painel de controle que por sua vez acionará um alarme auditivo e visual, possibilitando ao operador voltar rapidamente com o veículo para a superfície. Como a comunicação neste modo é *half-duplex* é necessária a troca do sentido da comunicação através do pino 15 (RC0) do PIC e dos pinos 2 e 3 (RE e DE) do C.I.2. Neste modo de operação as entradas analógicas do microcontrolador não são usadas.

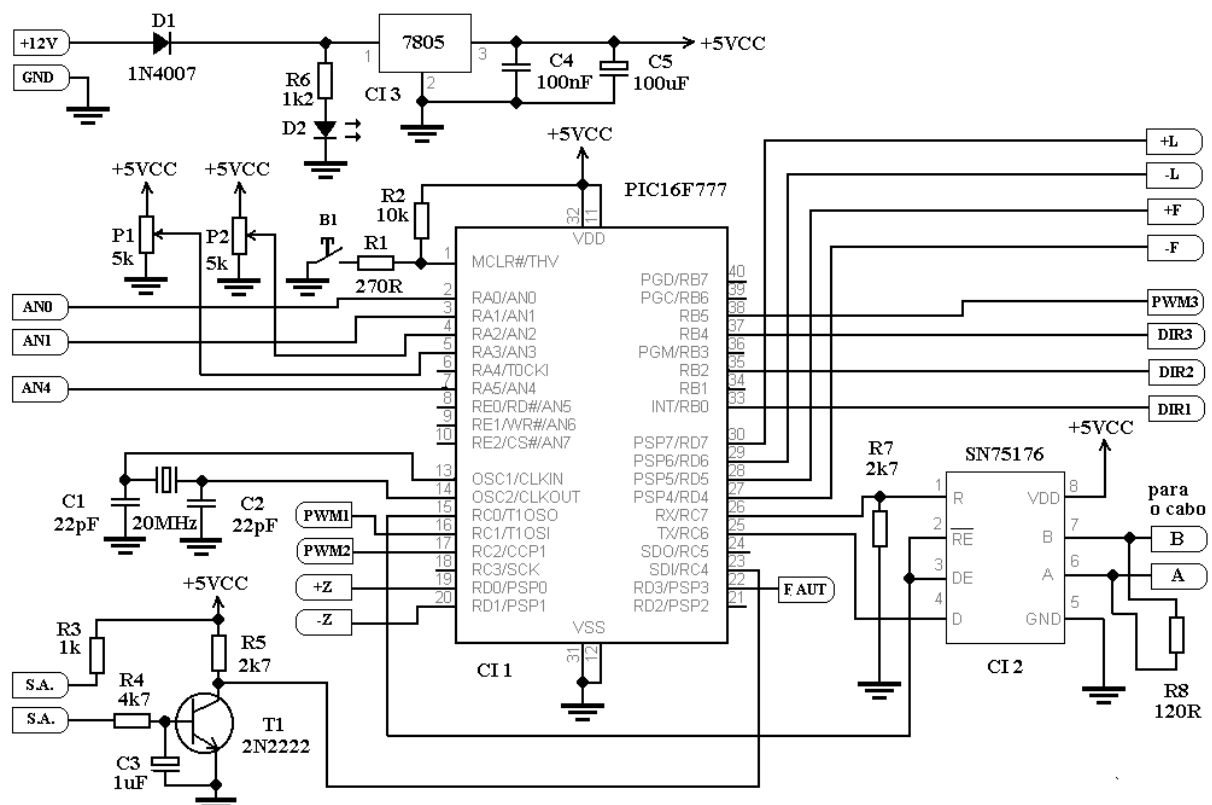


Figura 4.16 – Diagrama elétrico do microcontrolador PIC16F777 embarcado no veículo subaquático.

### 4.9.1. Etapa de potência dos propulsores

As etapas de potência dos propulsores (figura 4.17) são baseadas no C.I. MC33887 fabricado pela Freescale Semiconductor ([www.freescale.com](http://www.freescale.com)). Este circuito integrado de potência é constituído de uma ponte H implementada através de *MOSFETs* de baixa resistência ( $120\text{ m}\Omega$  no estado de condução), corrente máxima acima de 5A, possuindo toda a lógica necessária para a sua operação e proteção. No circuito as duas portas AND recebem o sinal modulado em largura de pulso (PWM) em uma de suas duas entradas. O nível lógico da entrada denominada de DIR seleciona, através destas portas, qual das entradas IN1 ou IN2 receberá este sinal, definindo desta forma o sentido de rotação do motor M1 (propulsor). A saída FB possui tensão proporcional à corrente do motor e está sendo utilizada para desabilitar a ponte através de T2, que saturando coloca nível lógico zero no pino D2. Isto ocorre quando a corrente ultrapassa os 4A (ajuste através de P1), protegendo, desta forma, o motor em caso de sobrecorrente. Os sinais DIR e PWM são diretamente provenientes do microcontrolador PIC16F777.

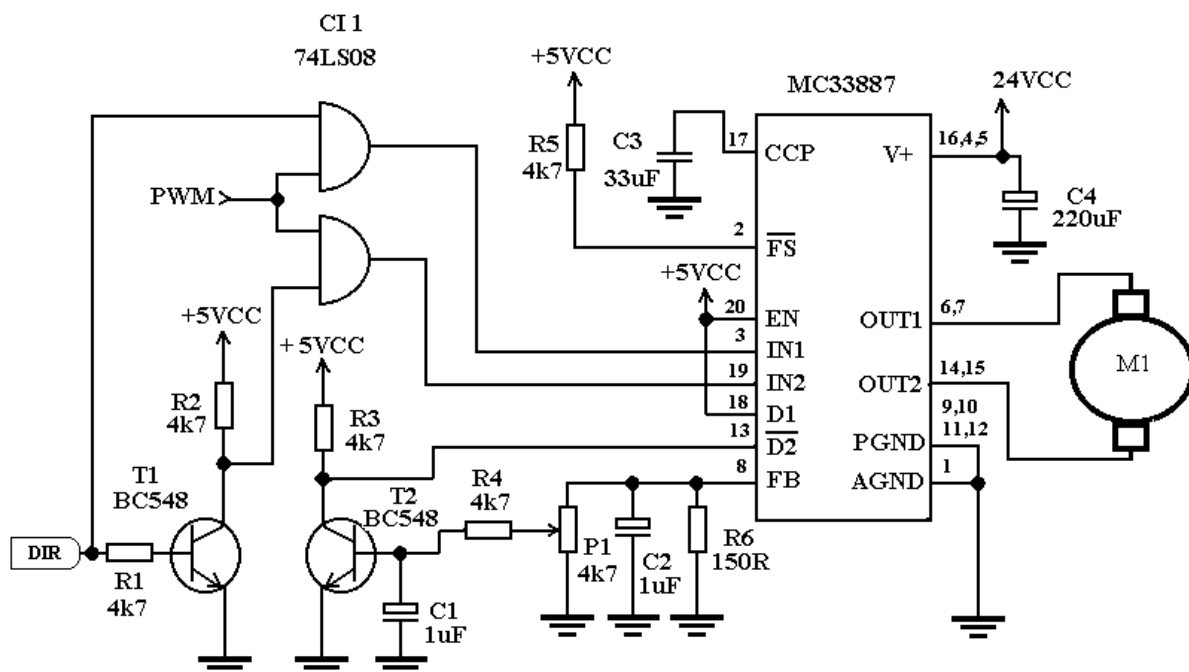


Figura 4.17 – Diagrama elétrico simplificado da etapa de potência dos propulsores.

### 4.9.2 Circuito de interface com a câmera

Para integrar a eletrônica da câmera de vídeo com a do veículo, foi necessário desenvolver os circuitos de interface mostrados nas figuras 4.18 e 4.19.

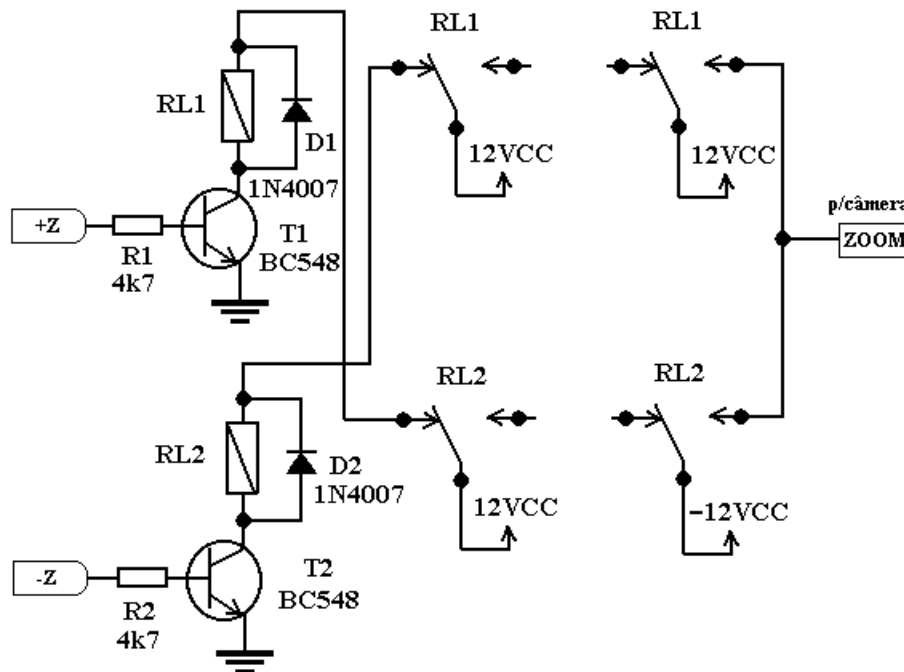


Figura 4.18 - Diagrama elétrico do circuito que aciona o *zoom* da câmera.

As entradas +Z e -Z são acionadas diretamente pelas respectivas saídas da placa do microcontrolador PIC16F777. A saída do circuito é conectada diretamente ao circuito de *zoom* da câmera. É importante notar que, por segurança, as bobinas dos relés encontram-se intertravadas, fazendo com que no terminal de saída (*zoom*) possa surgir apenas uma das três tensões possíveis 0V, +12VCC ou -12VCC, selecionadas através dos níveis lógicos enviados às entradas +Z e -Z pelo microcontrolador. Com +12VCC na saída, o *zoom* aumenta, com -12VCC ele diminui, e com 0V permanece com o mesmo nível. O circuito de foco funciona de forma semelhante. A necessidade de se ter -12VCC para comandar a câmera fez com que fosse imperativo projetar um conversor DC-DC com entrada de 24VCC e saída de -12VCC.

O diagrama elétrico da figura 4.19 mostra como foi implementado o acionamento do foco automático da câmera. O microcontrolador através da entrada F.AUT do circuito, aciona o relé RL5, que utiliza o seu contato para enviar 12VCC ao respectivo terminal de entrada da câmera, o que coloca o seu sistema de foco em modo automático.

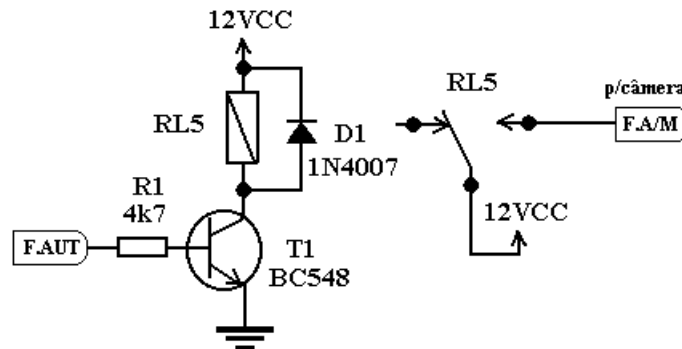


Figura 4.19 - Diagrama elétrico do circuito de interface que aciona o foco automático

### 4.9.3. Etapa de potência da lâmpada

Como a lâmpada é de 12VCC e a fonte principal do veículo de 24VCC, foi implementada, através de *software*, uma saída em PWM no PIC12F675 com 5 níveis distintos de largura de pulso (figura 4.20), sendo que o nível máximo é de 50%, e o mínimo é de 0%. O comando para troca de nível é feito através das entradas +L (incremento) e -L (decremento) que vêm do PIC16F777.

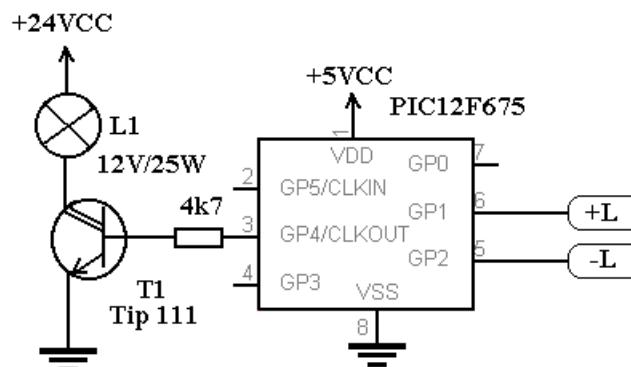


Figura 4.20 – Diagrama elétrico do circuito de acionamento da lâmpada.

No modo 1 de operação, o ROVFURG II passou por um importante teste de confiabilidade em termos de robustez à falhas, quando foi apresentado na Festa do Mar (Rio Grande, RS), em 2007. Durante este evento, o ROV foi operado em uma pequena piscina durante quinze dias, não apresentando nenhuma falha. Uma foto obtida durante uma demonstração pode ser vista na figura 4.21. Nela vê-se o ROV com o sistema de iluminação ligado (as operações foram realizadas a noite), bem como uma televisão reproduzindo as imagens capturadas pela câmera embarcada.



Figura 4.21 - O ROVFURG II em operação durante uma demonstração na Festa do Mar, em Rio Grande, RS, 2007.

#### 4.10 MODO 2 DE OPERAÇÃO

A figura 4.22 mostra, de forma resumida, o funcionamento do sistema no modo 2. Na superfície, um PC através da porta serial de comunicação COM1 configurada para uma taxa de transmissão de 115200 bps, envia comandos para variar a velocidade dos propulsores, e recebe as informações dos três acelerômetros de 10 em 10ms, que são armazenadas em arquivos na unidade de disco rígido de um microcomputador do tipo PC compatível para posterior análise. Pela porta serial de comunicação COM2, configurada para uma velocidade

de transmissão de 9600 *bps*, chegam as informações do altímetro referente à profundidade do ROV, possibilitando o fechamento da malha de controle no que se refere ao movimento vertical. O programa que roda no PC foi desenvolvido em DELPHI.

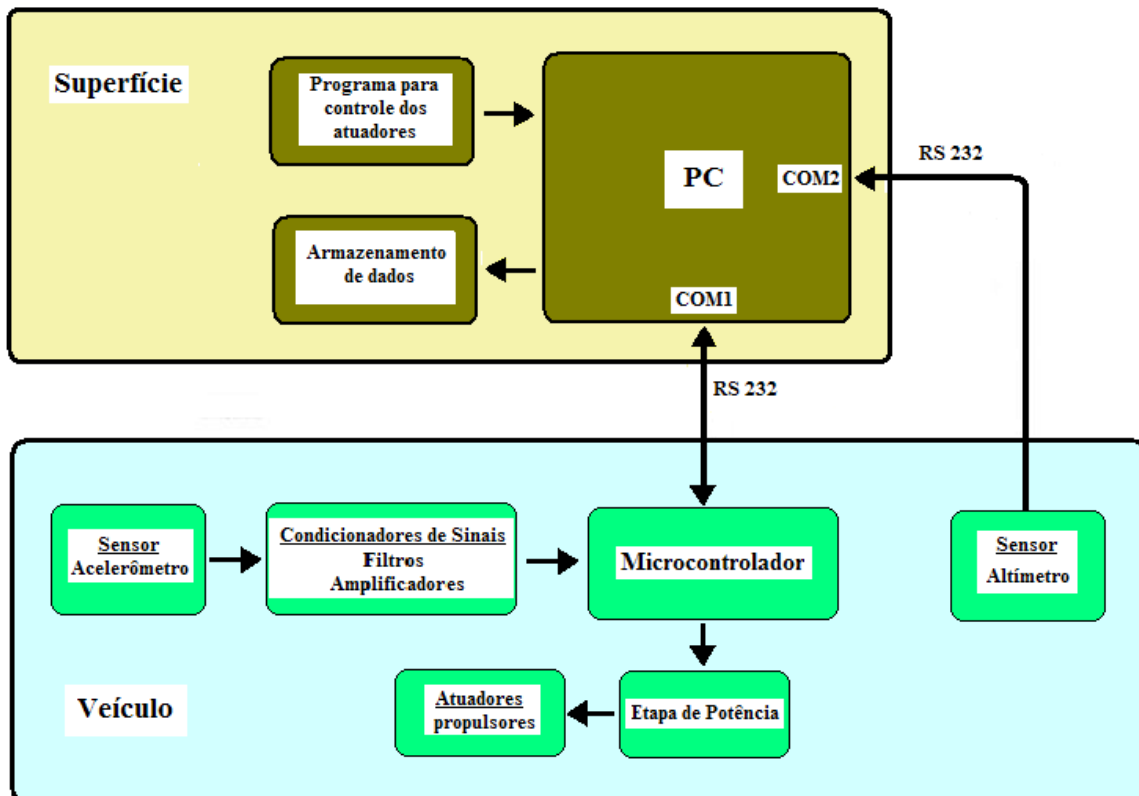


Figura 4.22 - Diagrama em alto nível do funcionamento do hardware do veículo para operar configurado no modo2.

#### 4.11 ELETRÔNICA EMBARCADA NO MODO 2

Na figura 4.23 podem ser observadas as alterações elétricas efetuadas neste modo para comunicação com a superfície. O microcontrolador e as etapas de potência que acionam os propulsores são as mesmas empregadas no modo 1. Conforme se observa nesta mesma figura, apenas o C.I. SN75176 foi substituído pelo C.I. MAX 232, pois no modo 2 é importante se ter comunicação em (*full-duplex*) uma vez que ao mesmo tempo em que, de 10 em 10 *ms* o veículo envia informações dos acelerômetros, ele deve também receber os comandos que

definem a velocidade dos propulsores e os de parada. As entradas AN0, AN1 e AN4, neste modo, recebem os sinais oriundos dos acelerômetros, e P1 e P2 possuem a função de fornecer tensões de referência máxima e mínima às entradas AN2 e AN3, melhorando, se necessário, a resolução de tensão das leituras efetuadas pelo conversor A/D do PIC.

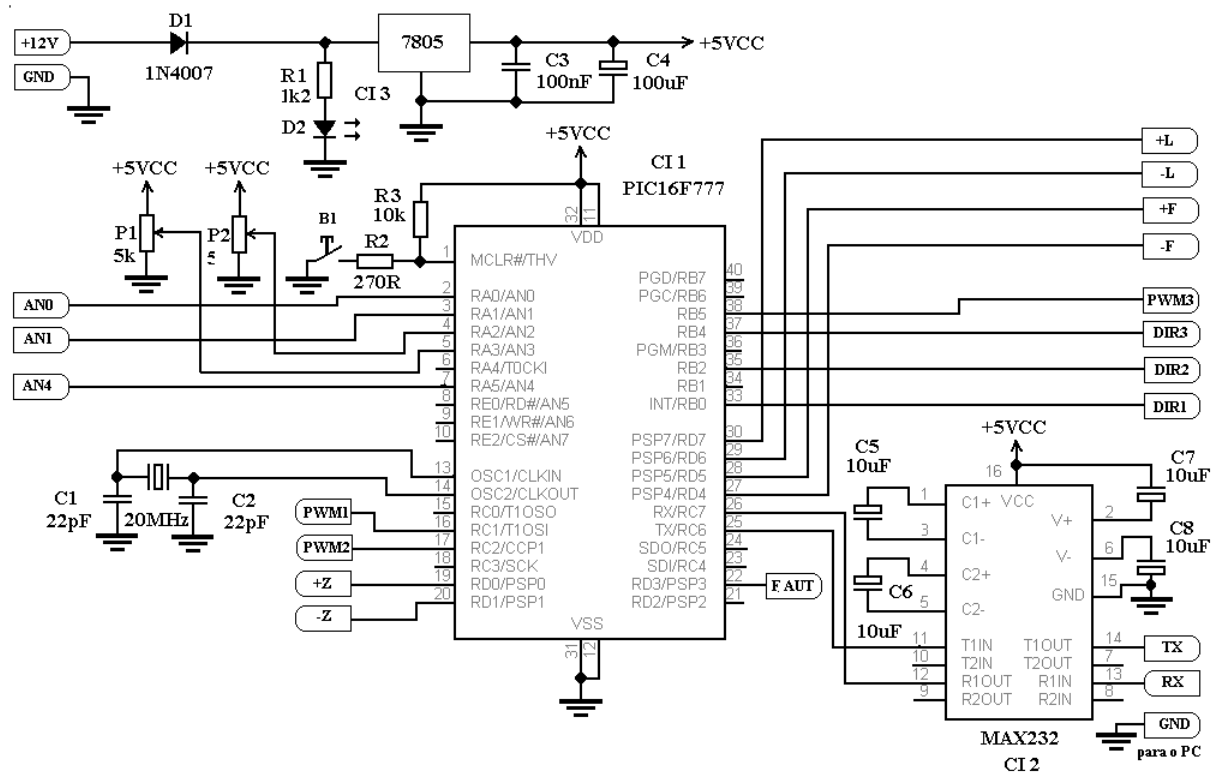


Figura 4.23 – Diagrama elétrico do PIC16F777 na configuração do modo 2

O acelerômetro LIS3L02AS4 utilizado no ROVFURG II, foi fabricado pela STMicroelectronics, possui encapsulamento em plástico do tipo SO24 (*smd*), pode operar com uma alimentação simples na faixa de 2.4V a 3.6V, apresenta baixo consumo, possibilita ao operador selecionar sua faixa de medição para +/- 2g ou +/-6g e é capaz de medir aceleração em três eixos (X, Y, Z), com sensibilidade típica de 0.66V/g quando alimentado por uma tensão de 3.3V e configurado para a faixa +/-2g. Na figura 4.24 observa-se o diagrama elétrico do circuito que condiciona o sinal do acelerômetro.

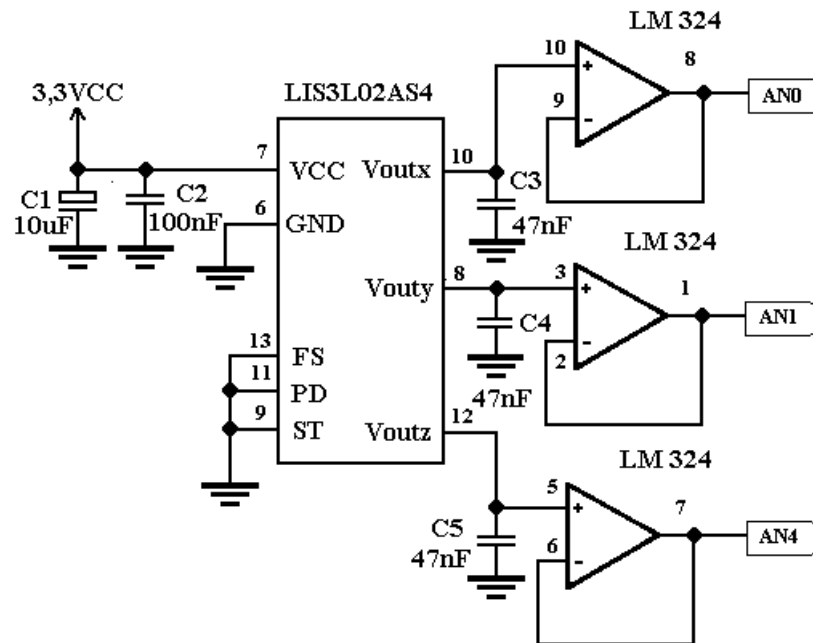


Figura 4.24 – Diagrama elétrico do circuito do acelerômetro.

A fim de não sobrecarregar as saídas do acelerômetro, que possuem uma impedância relativamente alta, foi acoplado a cada uma delas um amplificador operacional na configuração de *buffer*. As saídas dos amplificadores operacionais (AD0, AD1 e AD2) foram conectadas diretamente às entradas analógicas do microcontrolador. Nesta configuração os amplificadores possuem ganho de tensão unitário, porém alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, condição ideal para que o conversor A/D do PIC possa efetuar a conversão de forma rápida, conforme informa o fabricante. Os capacitores C3, C4 e C5 formam com as resistências internas das saídas dos acelerômetros (aproximadamente  $110\text{ k}\Omega$ ) um filtro passa baixas e definem a frequência de corte deste filtro que é dado por:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \text{ [Hz]} \quad (4.1)$$

onde  $F_c$  é a frequência de corte,  $R$  é a resistência interna de uma das saídas do acelerômetro, e  $C$  é o valor da capacitância do capacitor a ser colocado em sua saída.



De forma simplificada tem-se:

$$F_c = \frac{1.45\mu F}{C} [Hz] \quad (4.2)$$

Para  $R=110 \text{ k}\Omega$  e  $C3 = C4 = C5 = 47nF$ , a frequência de corte do filtro será de aproximadamente  $31Hz$ .

## CAPITULO 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 TESTES DOS PROPULSORES

Um suporte experimental, baseado no que foi empregado nos testes do ROVFURG I, foi construído para levantar as curvas de tensão versus empuxo dos propulsores e confrontá-las com as fornecidos pelo fabricante. A figura 5.1 mostra um desenho esquemático desse suporte desenvolvido.

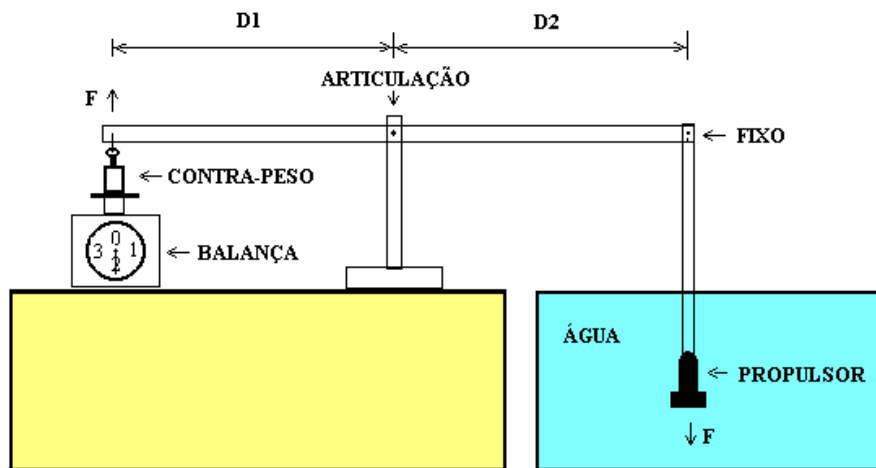


Figura 5.1- Sistema para medição de empuxo dos propulsores.

No sistema de medição do empuxo a balança possui um contrapeso que produz um determinado valor  $P1$  em seu mostrador com o propulsor desligado. Ao se fornecer uma tensão com polaridade adequada ao propulsor, ele gera uma força  $F$  (empuxo), que através da estrutura diminui a força peso sobre a balança e, conseqüentemente, o seu valor lido, que será denominado de  $P2$ . Uma vez que a distância  $D1$  é igual a  $D2$ , a diferença das leituras com o propulsor ligado e desligado é o valor do empuxo dado em  $kgf$ , ou na forma matemática,  $\text{Empuxo (kgf)} = P1 - P2$ . O sistema de medição de empuxo mostrou-se de fundamental importância na escolha da frequência (PWM) utilizada para acionar o propulsor, pois se observou experimentalmente que frequências muito baixas (abaixo de  $20\text{ Hz}$ ) provocavam vibrações elevadas, e as muito altas (acima de  $3.5\text{kHz}$ ) diminuíam de forma considerável o empuxo (aproximadamente 10%) chegando a aproximadamente 30% de perda de empuxo em

8kHz. Neste ensaio foi empregada a etapa de potência semelhante à descrita no capítulo 4, sem o circuito de limitação de corrente, e com PWM (ciclo ativo) fixado em 50%. Experimentos realizados com o sistema apresentado na figura 5.1 mostraram que o atuador testado em corrente contínua reproduziu aproximadamente a relação tensão versus empuxo informada pelo fabricante (figura 4.6).

Uma variante do sistema de medição de empuxo da figura 5.1 é mostrada na figura 5.2. Com estas alterações executadas foi possível medir, de forma aproximada, o valor do empuxo fornecido pelos dois propulsores horizontais ao veículo, pois esta medida inclui todas as possíveis perdas devido aos cabos, resistência das conexões e quedas de tensão na fonte e na ponte H.

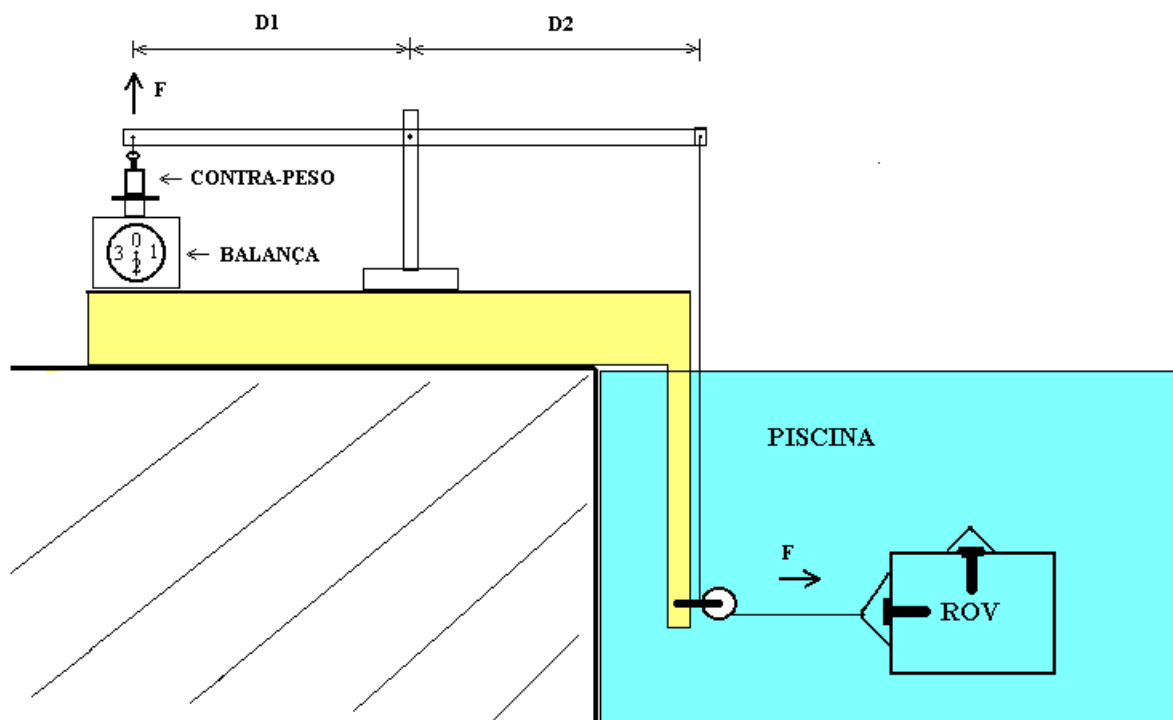


Figura 5.2 - Variante do sistema de medição de empuxo dos propulsores.

Diversos resultados experimentais foram realizados com o sistema de medição descrito na figura 5.2 para valores de PWM (ciclo ativo) variando entre 25 e 75%. A figura 5.3 mostra seis desses resultados. Cada curva colorida no gráfico representa um ensaio, no qual foram medidos os empuxos para larguras de pulso (PWM) em percentuais de 25, 33, 50, 66 e 75%, equivalentes a valores de tensão de 6, 8, 12, 16 e 18 VCC. A curva média aritmética dentre estas seis curvas é mostrada na figura 5.4, enquanto que esta mesma curva média com relação

às tensões aplicadas é vista na figura 5.5. Considerando-se as dificuldades naturais deste sistema de medição desenvolvido, tais como imprecisões na medida analógica da balança e dificuldade de manter o ROV em equilíbrio estático durante o experimento, pôde ser verificado que os resultados confirmaram, de forma bem aproximada, a relação tensão versus empuxo fornecida pelo fabricante.

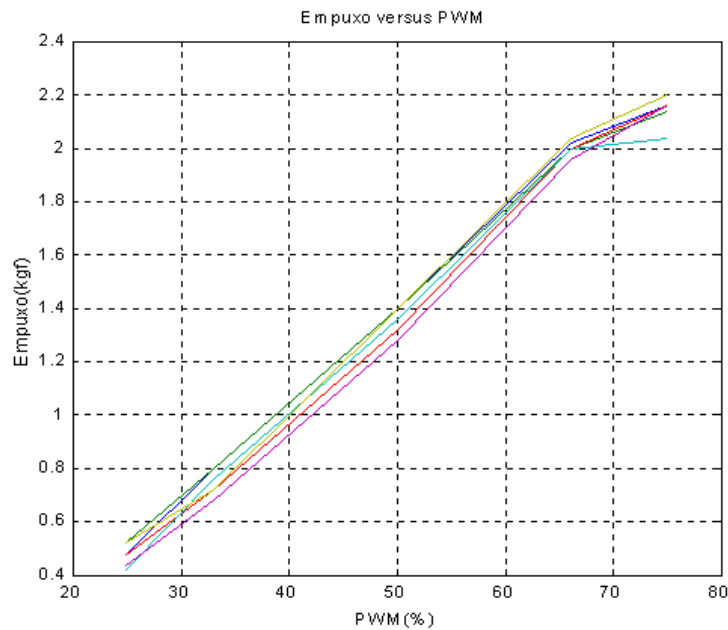


Figura 5.3 – Curvas dos seis ensaios efetuados com o sistema de medição da figura 5.2

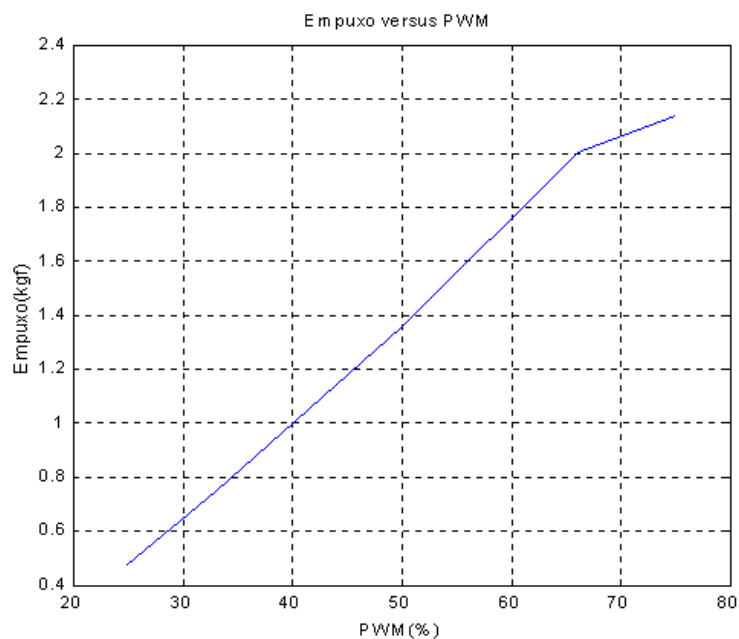


Figura 5.4 – Curva que representa a média das seis curvas da figura 5.3.

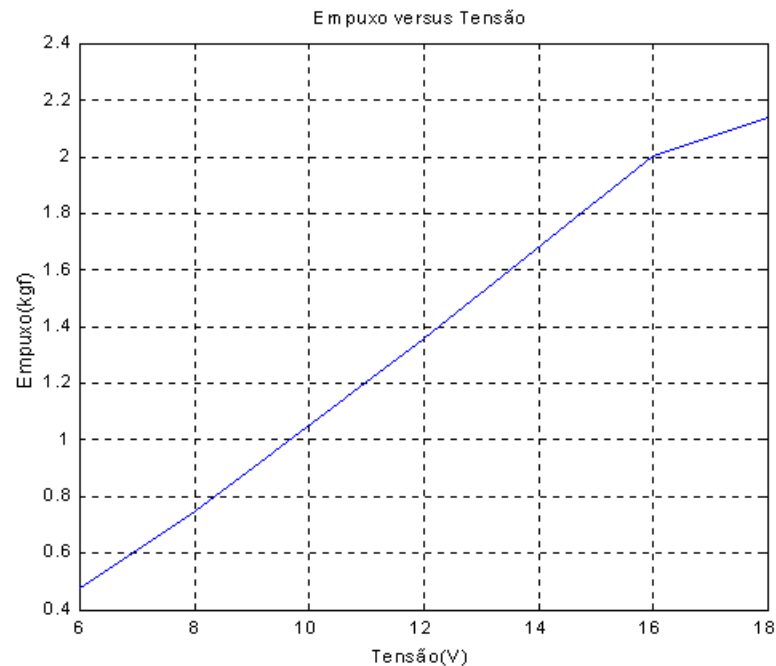


Figura 5.5 – Curva média entre tensão e empuxo aplicado.

A fonte que alimenta os propulsores possui tensão de saída nominal de 24VCC. Portanto, em condições ideais, para uma largura de pulso de 25% ter-se-ia um valor médio de tensão sobre o propulsor correspondente a 6VCC e esta relação pode ser estendida aos demais valores de PWM. Os valores encontrados nas medições estão de acordo com as especificações do fabricante dos propulsores até aproximadamente à tensão de 16VCC (PWM de 66%). A partir deste valor passou a atuar o limitador de corrente da etapa de potência. A medição de empuxo foi feita com os dois propulsores horizontais atuando e, conseqüentemente, o valor médio do empuxo de cada atuador é na realidade a metade do mostrado no gráfico. Por exemplo, para uma largura de pulso de 50%, o valor médio da tensão aplicada ao motor é de 12VCC, que resulta em um empuxo total de aproximadamente 1.36 kgf no gráfico. Como existem dois propulsores atuando, e, supondo-se que os mesmos forneçam empuxos iguais, cada propulsor fornece 0.68 kgf de empuxo.

## 5.2 EXPERIMENTOS COM OS ACELERÔMETROS

### 5.2.1 TESTE DE INTERFERÊNCIA

Este experimento teve como objetivo verificar se o acionamento dos propulsores, através de técnicas de PWM, causava algum tipo de ruído significativo aos sinais provenientes dos sensores. A largura de pulso utilizada no experimento da figura 5.6 foi de 50%. Inicialmente, os sinais do acelerômetro são medidos com os propulsores desligados e o veículo parado dentro da piscina. No instante T1 são acionados os propulsores, gerando uma aceleração no ROV.

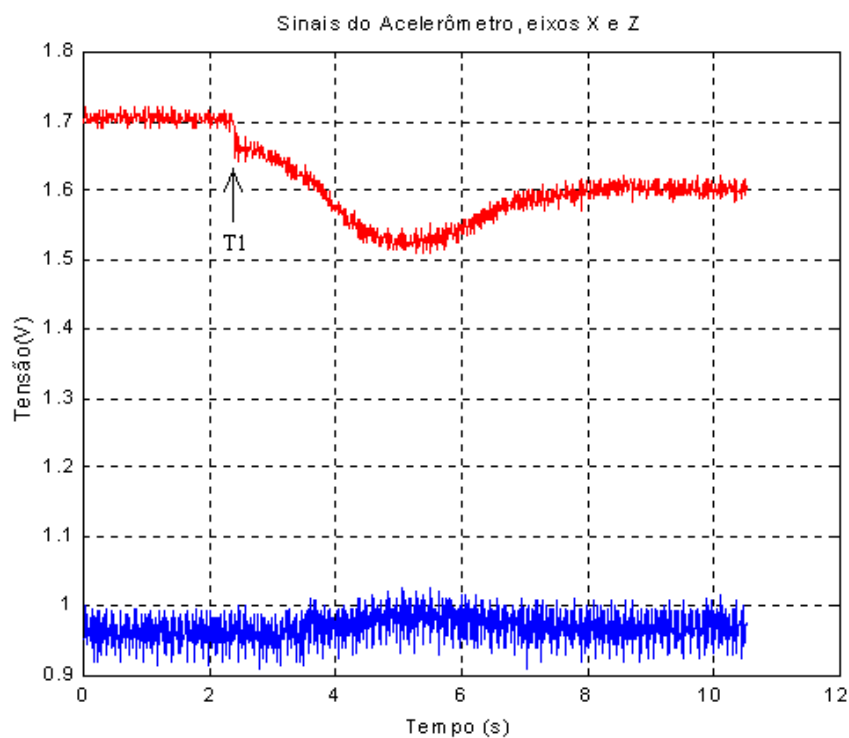


Figura 5.6 – Gráfico que mostra os sinais oriundos do acelerômetro.

No gráfico da figura 5.6, em vermelho, aparece o sinal captado na saída referente ao eixo X do acelerômetro, e em azul o que diz respeito ao sinal do eixo Z. Observa-se também que a medição se inicia no tempo  $t = 0$ , e que aproximadamente no instante T1 os propulsores são ligados gerando aceleração no veículo, o que resulta em uma visível alteração nos valores de aceleração lidos pelo sensor, principalmente no seu eixo X. Nota-se, no entanto, que a magnitude do ruído não se altera de forma significativa ao longo de todo o período da medição, tanto no eixo X como no eixo Z.

### 5.2.2 Calibração do acelerômetro

Nas tabelas 5.1 e 5.2 são relacionados os valores típicos de sensibilidade ( $S_o$ ) e nível de tensão de saída para zero-g ( $V_{off}$ ) do acelerômetro configurado para um fundo de escala de 2g,  $V_{dd}$  de 3.3V (tensão de alimentação do acelerômetro) e  $T = 25^{\circ}C$ , fornecidos pelo fabricante em suas folhas de especificações e que devem servir como referência para os ensaios experimentais.

Tabela 5.1 - Sensibilidade ( $S_o$ )

Min. = $V_{dd}/5 - 10\%$	Típico = $V_{dd}/5$	Max. = $V_{dd}/5 + 10\%$
Min. = 0.594 V/g	Típico = 0.66 V/g	Max. = 0.726 V/g

Tabela 5.2 Nível zero-g ( $V_{off}$ )

Min. = $V_{dd}/2 - 10\%$	Típico = $V_{dd}/2$	Max. = $V_{dd}/2 + 10\%$
Min. = 1.485V	Típico = 1.65 V	Max. = 1.815V

Na figura 5.7 observa-se a variação da tensão de saída em volts dos três eixos X, Y, Z do acelerômetro em função de sua posição com relação à superfície terrestre.

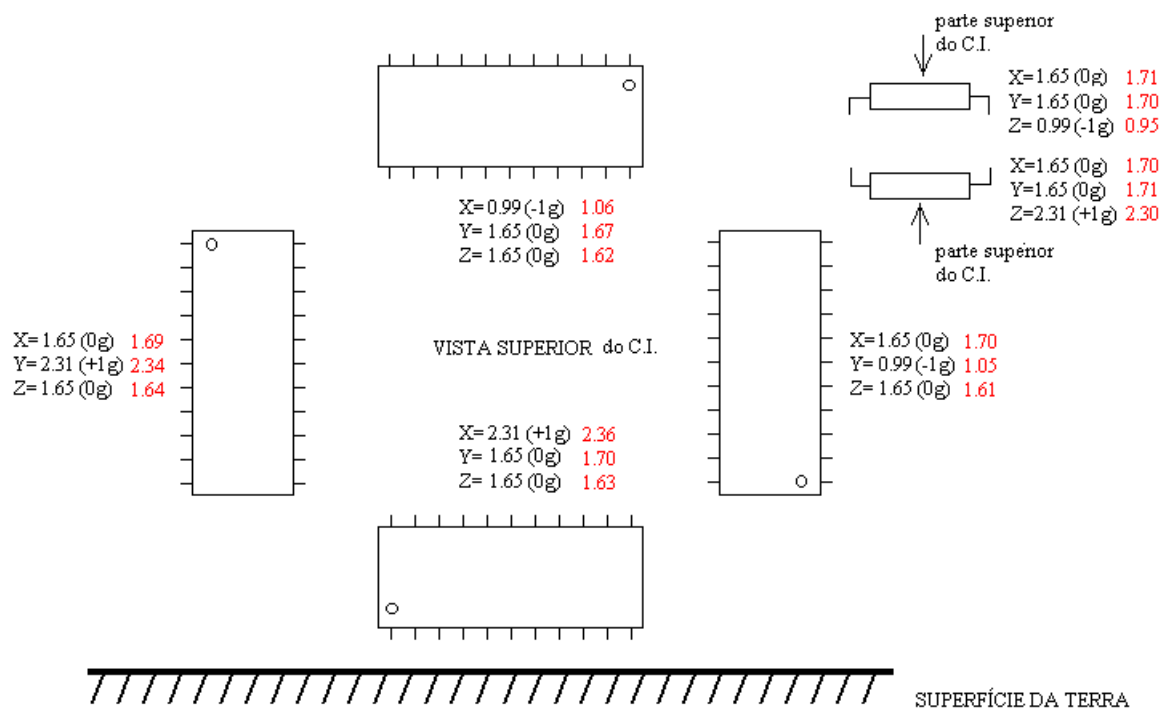


Figura 5.7 - Valores de tensão saída do C. I. em função de sua posição

Estas tensões são válidas para o sensor alimentado com 3.3V e podem variar dentro dos limites da tabela 5.2, de acordo com o fabricante. Os valores em vermelho foram obtidos experimentalmente em aquisição feita pelo sistema de medição do ROV.

Em função da posição do acelerômetro no interior do veículo as acelerações têm sinal de acordo com a figura 5.8. Por exemplo, ao se acelerar o ROV para frente, o nível do sinal de saída do eixo X do acelerômetro deverá diminuir. Se o veículo for acelerado em direção ao fundo da piscina o nível de sinal na saída Z do acelerômetro deverá aumentar.

Com o objetivo de levantar a constante de conversão física do acelerômetro foram realizados seis experimentos utilizando a estrutura da figura 5.9. Manualmente o veículo é acelerado e desacelerado do ponto A até o ponto B, sendo a distância percorrida conhecida e igual a aproximadamente 1 m.

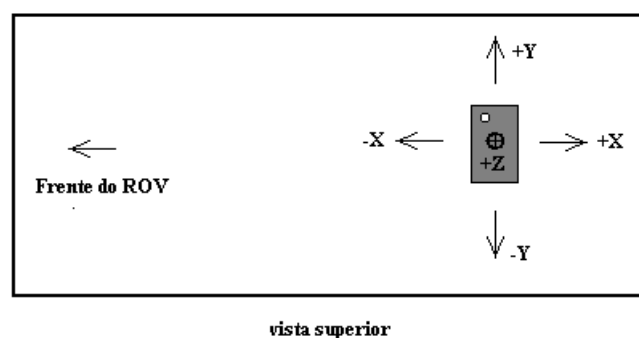


Figura 5.8 – Sentido das acelerações no ROV.

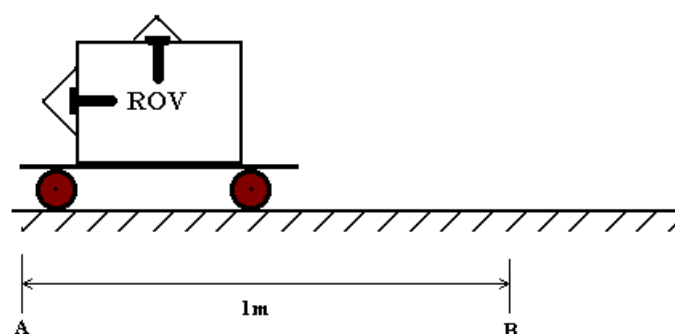


Figura 5.9 – Estrutura montada para calibração dos acelerômetros.



No PC são armazenados em um arquivo, os sinais referentes à saída do eixo X do acelerômetro. Cada sinal é tratado e posteriormente integrado duas vezes no tempo, no intervalo entre o início da aceleração e no momento da parada do veículo, gerando as curvas das figuras 5.10, 5.11, e 5.12. Como a distância total percorrida é conhecida, a dupla integração do sinal do acelerômetro deve coincidir com esta distância, permitindo assim a obtenção da constante de conversão física para a obtenção da aceleração. Seis experimentos foram feitos para cada eixo do acelerômetro, mas apenas dois gráficos por eixo são apresentados uma vez que apresentaram curvas muito semelhantes. As constantes de conversão encontradas ficaram muito próximas às informadas pelo fabricante do acelerômetro.

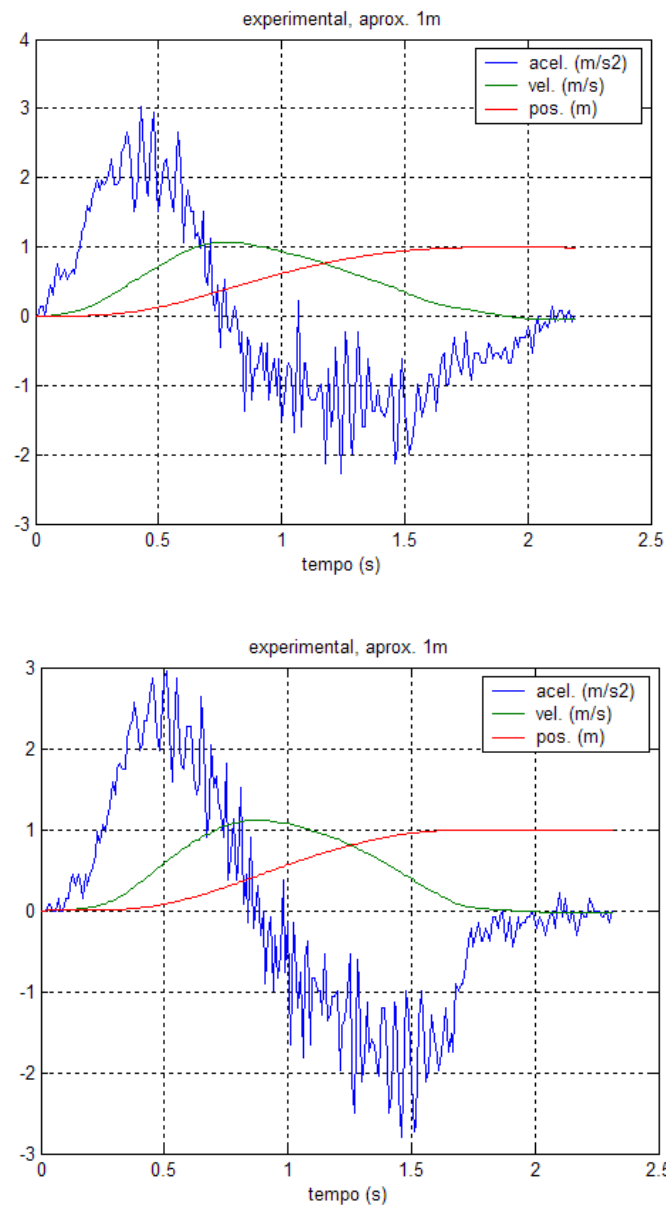


Figura 5.10 – Gráficos de aceleração, velocidade e posição referente ao eixo X.

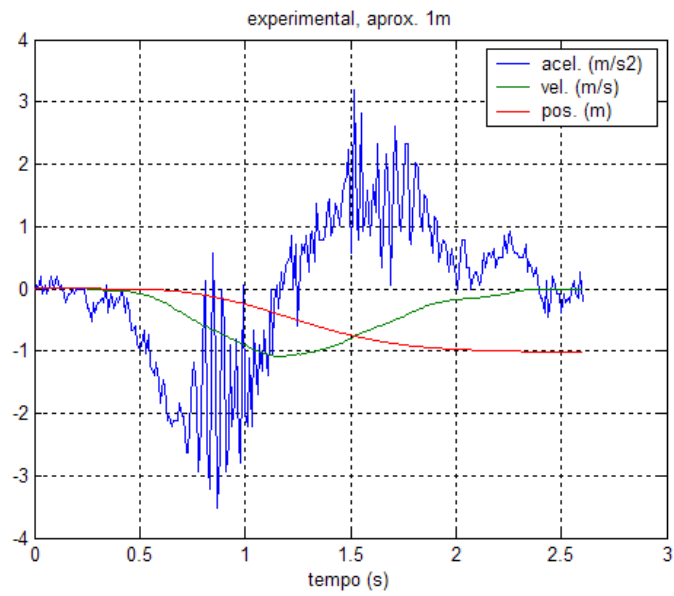
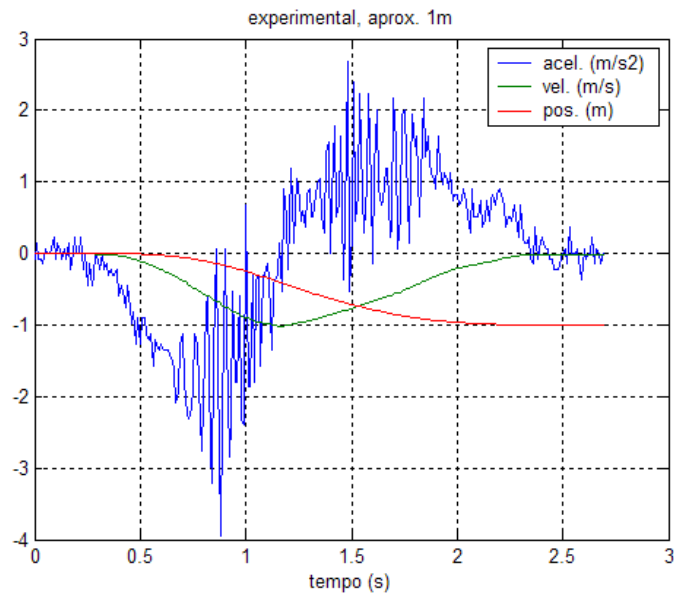


Figura 5.11 – Gráficos de aceleração, velocidade e posição referente ao eixo Y.

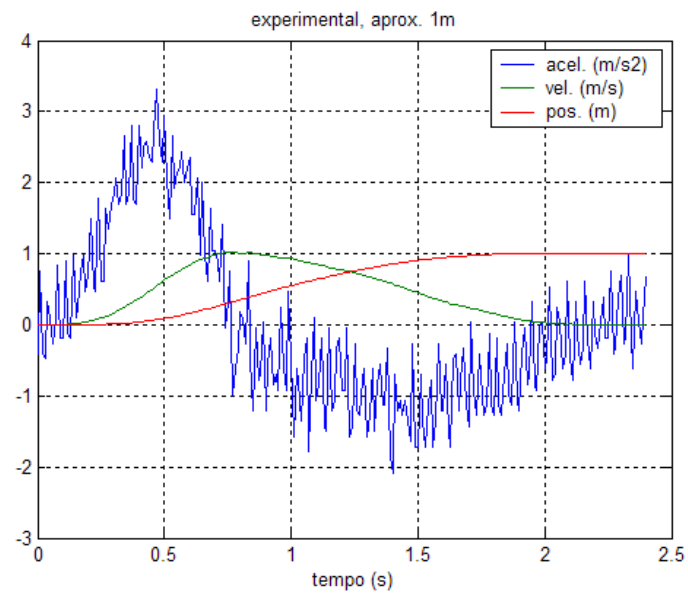
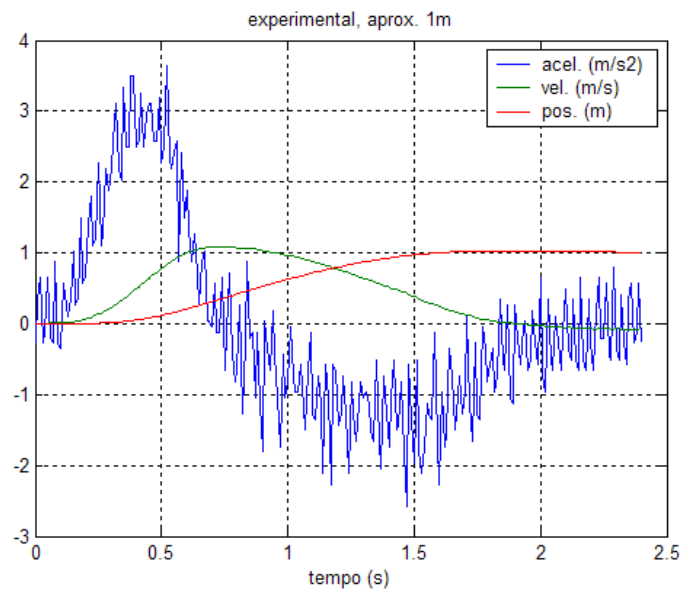


Figura 5.12 – Gráficos de aceleração, velocidade e posição referente ao eixo Z.

Os resultados mostrados a seguir correspondem a experimentos com o ROV em uma piscina. Estes experimentos foram realizados em malha aberta, com torques motores constantes. A borda da piscina foi demarcada com fitas adesivas, espaçadas em intervalos de 1m. As figuras 5.13 e 5.14 mostram duas imagens do experimento. ROV foi posicionado de forma a ficar totalmente submerso (figura 5.13) e, posteriormente, os atuadores do movimento horizontal foram ligados, ambos com 75% do torque máximo (PWM em 75%). Os atuadores foram desligados sempre que o ROV passava pela marca dos 3m (figura 5.14).

As figuras 5.15 e 5.16 mostram dois dos seis experimentos realizados aproximadamente sob as mesmas condições. O sinal do acelerômetro é integrado duas vezes, obtendo-se assim os sinais de velocidade e posição. Percebe-se que a velocidade estacionária do ROV com PWM de 75% é de aproximadamente 0.6 m/s. Apesar da aparente qualidade do sinal do acelerômetro, que permitiu a aferição da posição após a dupla integração, este sinal não se presta à utilização como sensor de posição em uma estratégia de controle em tempo real porque ocorre sempre um erro variável de *off set*. Pós-processando o sinal do acelerômetro após a sua captação, este *off set* pode ser facilmente identificado e eliminado, como foi o caso para a obtenção das figuras 5.13 e 5.14. Porém, como isto não é possível em tempo real, a integração deste erro de *off set* conduz a erros em posição inaceitáveis para o referenciamento inercial do ROV.

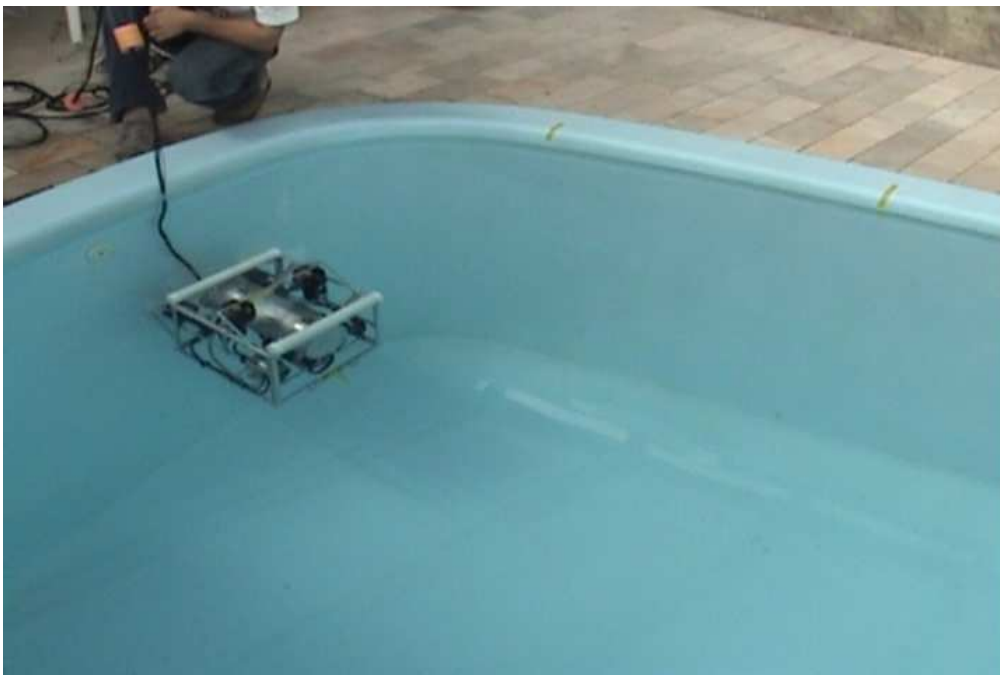


Figura 5.13 – O ROVFURG II posicionado para o início do movimento.

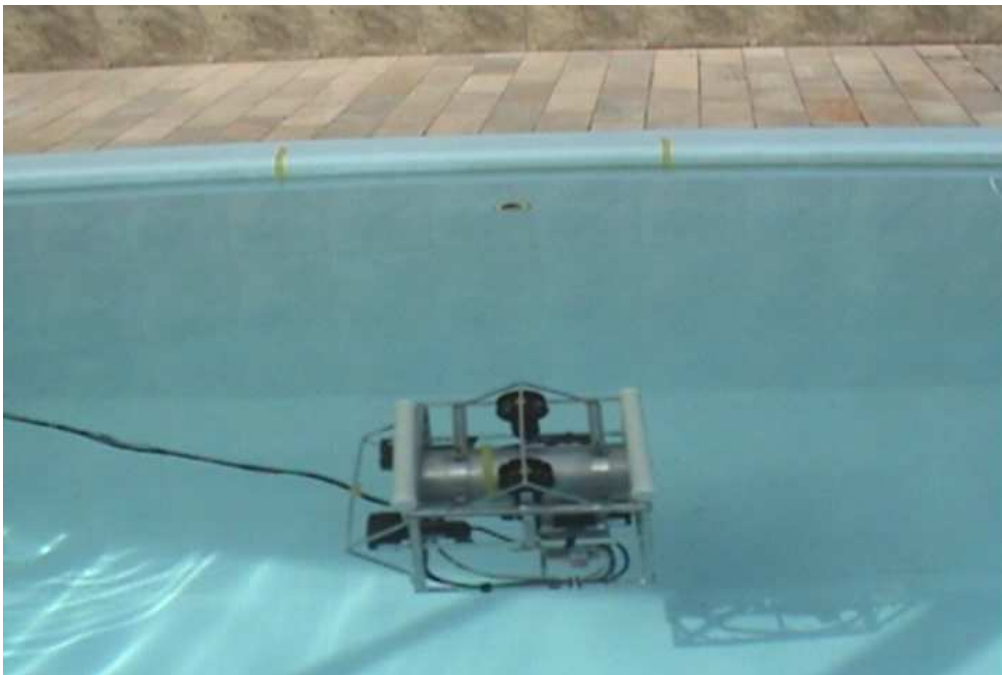


Figura 5.14 – O ROVFURG II próximo a atingir a marca dos três metros.

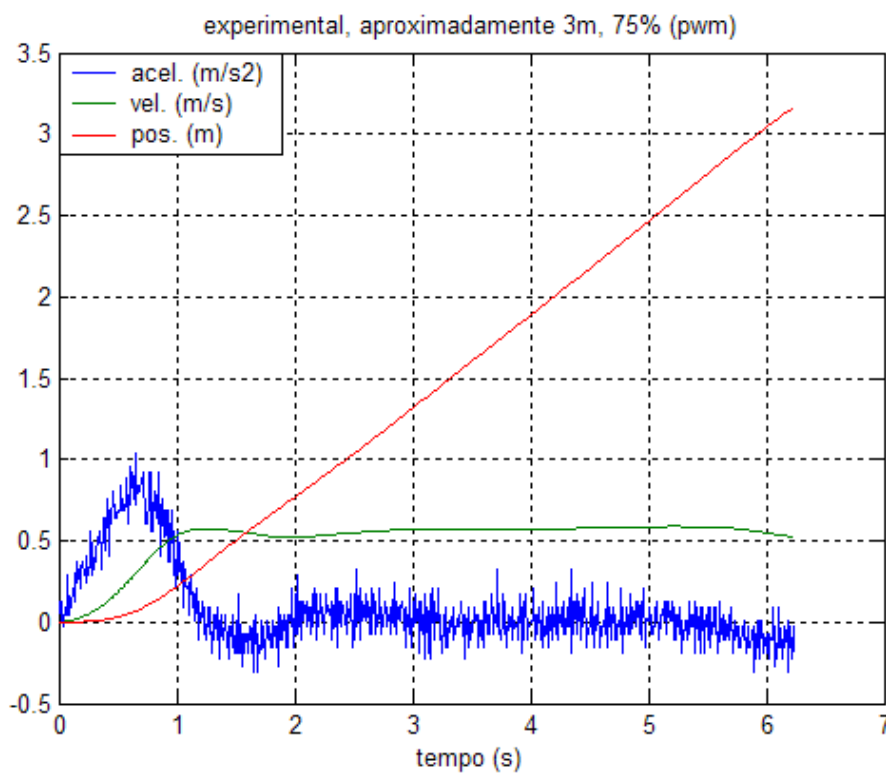


Figura 5.15 – Experimento realizado com 75% do torque máximo aplicado aos atuadores horizontais (repetição 1).

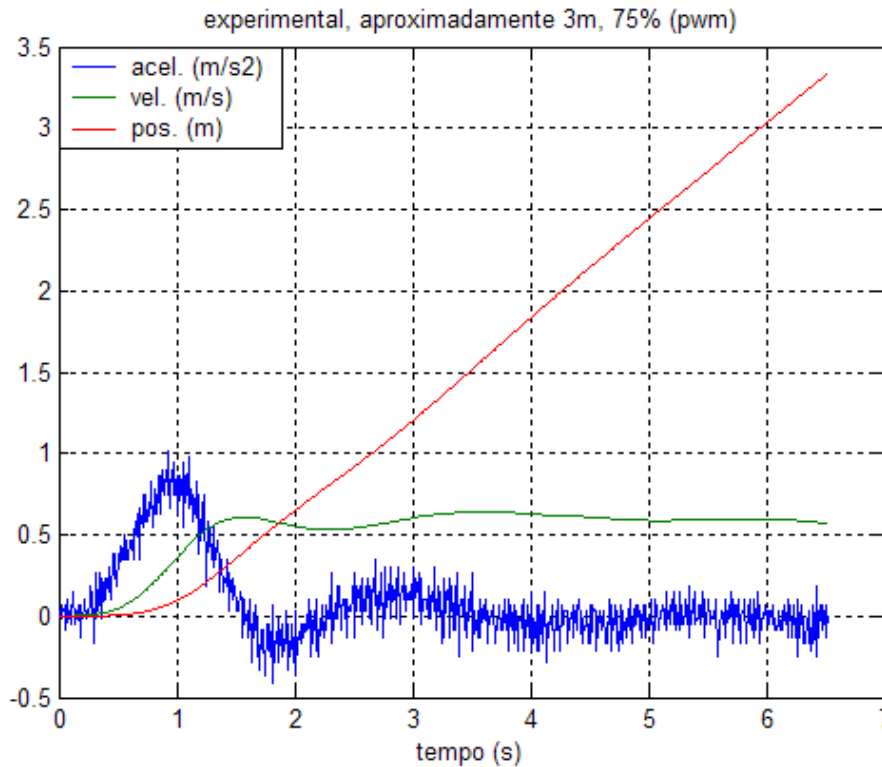


Figura 5.16 – Experimento realizado com 75% do torque máximo aplicado aos atuadores horizontais (repetição 2).

### 5.3 RESPOSTAS EM MALHA FECHADA

Para mostrar que o projeto atende aos seus objetivos de veículo de coleta de dados e teste de leis de controle, foi implementada uma malha fechada com relação à variável posição vertical do veículo. O operador define a posição desejada (referência), sendo que a posição vertical real do ROV em relação ao fundo da piscina é fornecida por um altímetro e o erro é tratado por um controlador digital do tipo proporcional integral (PI) (Powell *et. al*, 1994), que tenta posicionar o ROV na posição desejada a partir dos atuadores verticais. A lei de controle foi implementada com uma janela de esquecimento na componente integral, a qual permite implementação digital com maior estabilidade (Gomes e Bier, 1998). A seguinte equação ilustra como se realiza o controle PI com a janela de esquecimento:

$$\tau_{k+1} = K_p (Z_r - Z_k) + K_i \sum_{j=k-n+1}^k (Z_r - Z_j)$$

onde  $Z_r$  e  $Z$  correspondem às posições verticais de referência e de saída (medida do altímetro), respectivamente. Percebe-se que sempre  $n$  valores de erro em posição formam o

somatório da componente integral. Portanto, têm-se os ganhos proporcional ( $K_p$ ) e integral ( $K_i$ ) e o tamanho da janela de esquecimento  $n$  como parâmetros de projeto. A definição do parâmetro  $n$  é fortemente relacionada com o passo de discretização da lei de controle. Todos os parâmetros deste projeto foram determinados por tentativa e erro, analisando-se respostas ao degrau em malha fechada.

As figuras 5.17 e 5.18 mostram dois resultados experimentais do controle vertical do ROV. A posição vertical inicial era aproximadamente  $1.9m$  em relação ao fundo da piscina, tendo-se escolhido  $1.5m$  como posição de referência (desejada). Os resultados mostram o desempenho do sistema em malha fechada. Este desempenho pode provavelmente ser melhorado refinando-se a sintonia dos ganhos. O teste, porém, comprova que o controle vertical é possível com o sensor e com os atuadores utilizados. Além disso, o torque motor máximo nestes experimentos foi configurado para apenas 25% do torque nominal, fator preponderante na diminuição de desempenho em malha fechada, mas responsável também pela melhora na estabilidade do sistema. Os efeitos da saturação decorrente desta configuração são bem visíveis no início do movimento.

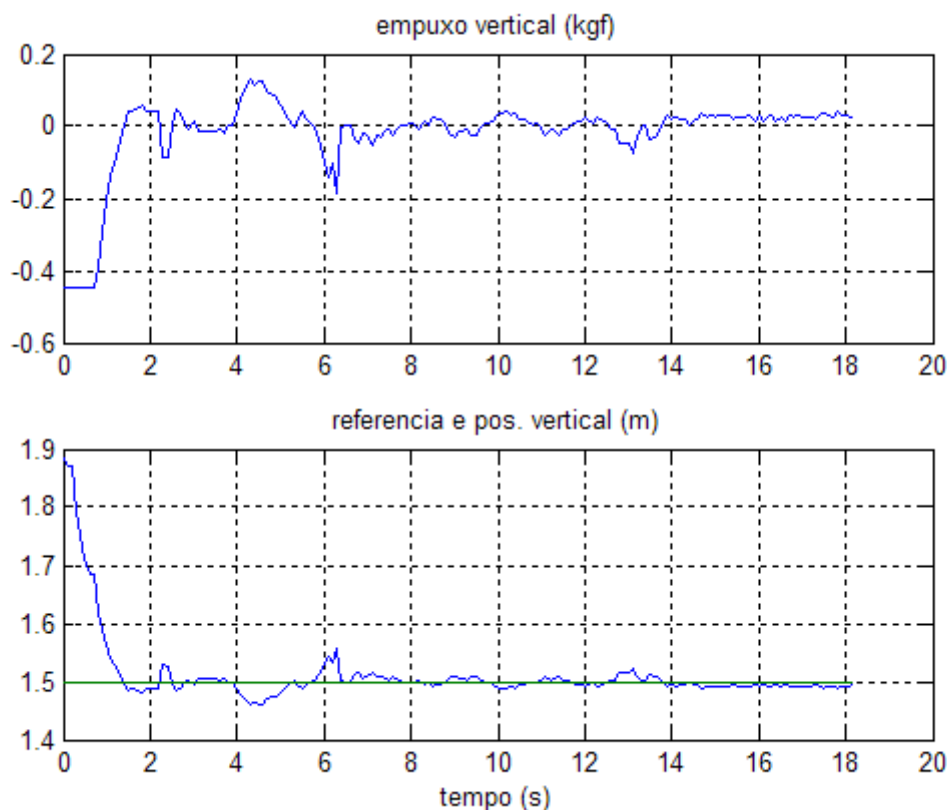


Figura 5.17 – Resposta ao degrau na posição vertical do ROV (controle PI, experimento 1).

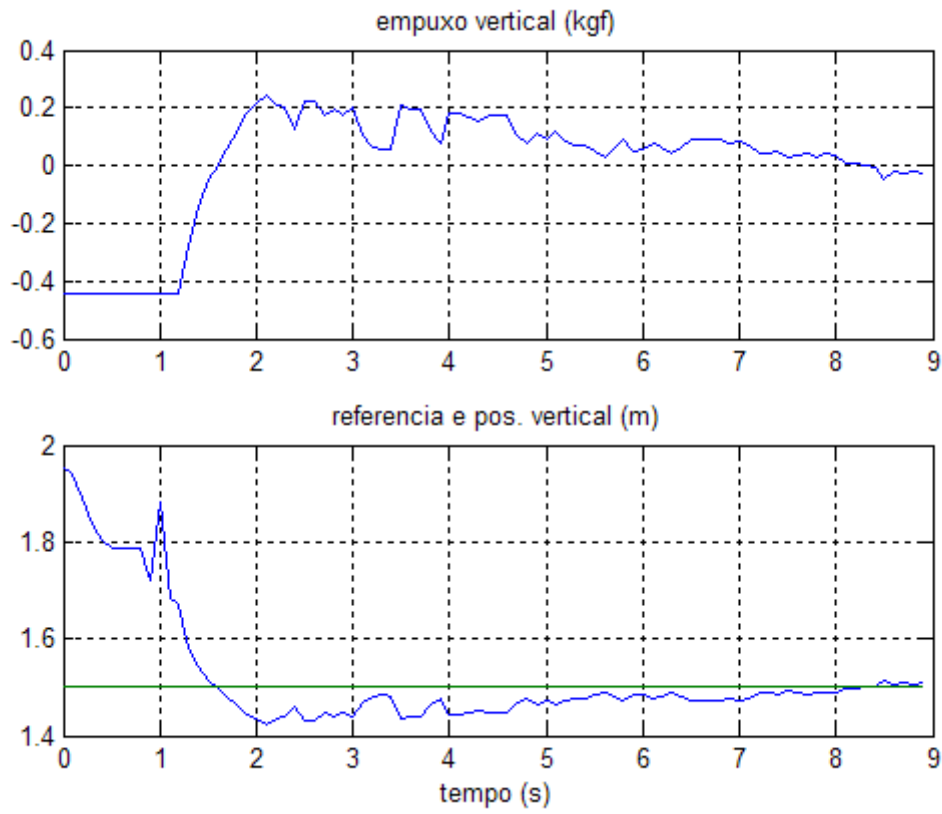


Figura 5.18 – Resposta ao degrau na posição vertical do ROV (controle PI, experimento 2).



## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho discorre inicialmente sobre a classificação dos diversos tipos de ROV existentes no mercado, onde se procurou definir a classe do veículo a ser construído. Foi feito um estudo sobre os equipamentos de superfície obrigatórios e opcionais para a operação de um veículo subaquático desta classe, tendo-se detectado a necessidade de se construir uma console de pequeno porte. Após uma avaliação realizada nas existentes comercialmente, fez-se a opção pelo projeto e construção própria de uma console de muito baixo custo, inferior a duzentos reais, mas que funcionou com um ótimo desempenho.

Foi concebida uma estrutura em alumínio a fim de que, a exemplo do ROVFURG I, o ROVFURG II tivesse uma arquitetura aberta. Esta estrutura foi projetada de modo a incorporar os propulsores, um cilindro contendo a eletrônica embarcada, uma câmera de vídeo, um sistema de iluminação, um altímetro e flutuadores em formato cilíndrico. Todo o projeto mecânico foi elaborado de forma a garantir flutuabilidade neutra e ainda, torques restauradores devidos às forças peso e empuxo que garantem controle passivo em dois graus de liberdade, relativos aos movimentos de arfagem e rolamento, controle este que conferiu respostas rápidas e bem amortecidas.

Foi feito um estudo sobre os tipos de enlace de comunicação existentes nos ROVs e foi definido o tipo de enlace de mais baixo custo e tecnicamente viável para a aplicação desejada, ou seja, a construção de um ROV que se aplique principalmente à inspeção de ambientes subaquáticos. Toda a parte eletrônica foi projetada de maneira a atender às especificações dos equipamentos incorporados e aos novos modos de operação, estando inclusa a comunicação com os sensores. Como veículo de inspeção (operado no modo 1) o protótipo apresentou boa dirigibilidade e confiabilidade. O ROV foi operado através do *joystick* em uma piscina, com sucesso e sem falhas por aproximadamente duas semanas na 11ª Feira do Mar (Rio Grande, RS, Março, 2007). Em apresentações noturnas em água relativamente turva, a iluminação e a câmera se mostraram adequadas a tal ponto que permitiu a leitura do código de barras de uma garrafa plástica colocada no fundo da piscina, a uma distância 30 cm. As funções de zoom, foco e foco automático também foram testadas sem falhas. Como veículo de testes, o ROVFURG II se portou satisfatoriamente sendo operado

através de um PC (modo 2 de operação) fato que permitiu a coleta de informações tais como: empuxo dos propulsores, aceleração e profundidade do ROV.

Os sinais do acelerômetro, embora tenham sido captados com sucesso, mostraram-se inadequados para servir de base para um sistema de posicionamento preciso em tempo real. Os movimentos de rolamento e arfagem, que normalmente ocorrem durante a operação do veículo, fazem com que a gravidade influencie nas medidas de aceleração, tornando complexo o emprego destes sinais para controle de posição do veículo através de processos de dupla integração da aceleração. Além deste problema, existem erros de nível zero nos sinais do acelerômetro, que praticamente inviabilizam sua utilização em sistemas de posicionamento inercial. A causa destes erros deverá ser mais profundamente investigada em futuros trabalhos.

Para se desenvolver um ROV de inspeção realmente de baixo custo, a câmera atual deveria ser substituída por uma de menor custo (algo na faixa de no máximo R\$ 600,00), os quatro propulsores importados (R\$ 2800,00) representam aproximadamente 40% do preço de custo total do equipamento sem impostos. A parte eletrônica do projeto, sem a inclusão da fonte chaveada e mão de obra, não ultrapassou R\$ 600,00. A comparação entre os custos de um ROV importado e de um nacional deve levar em conta os custos de manutenção e impostos de importação.

As dificuldades enfrentadas para construção do ROVFURG II foram muitas, podendo-se citar:

- A importação demorada dos propulsores, que resultou em praticamente dois projetos de etapas de potência e em tentativa de fabricar um propulsor localmente;
- A demora de empresas nacionais em fornecer componentes eletrônicos, mesmo aqueles ditos em estoque no Brasil;
- A conciliação em um mesmo projeto, de especificações de um ROV de teste em piscina com as de um ROV de inspeção com características de veículo comercial.

Exemplificando-se esta última dificuldade, cita-se a escolha da tensão (220 VCA) a ser enviada para alimentar o veículo. Ela foi definida em função de se considerar que o veículo poderia atingir até 150 m de profundidade, levando-se em conta, neste caso, as cargas, as

perdas de tensão decorrentes do comprimento do cabo, bem como a necessidade de se ter um cabo umbilical com o menor diâmetro possível, de forma a minimizar sua influência na trajetória do veículo. Esta especificação impôs uma série de cuidados adicionais no projeto e manuseio do ROVFURG II. A carcaça da fonte foi isolada do restante da estrutura, procedimentos operacionais foram adotados para minimizar a possibilidade de choque elétrico, e em todos os testes um transformador isolador foi empregado para alimentar não só o veículo como todos os demais equipamentos conectados a ele. A comunicação também foi dimensionada para a mesma distância e houve todo um esforço no projeto de *hardware* e *software* no sentido de se ter uma comunicação estável entre console de controle e veículo subaquático. Os acionadores foram dimensionados de modo a serem compactos e a garantirem um bom desempenho e segurança. Já em um ROV de uso exclusivo para testes em piscina seria possível empregar uma tensão inferior para transmissão de energia ao veículo, uma vez que o cabo umbilical, neste caso, poderia ter um comprimento reduzido (aproximadamente 15 m), minimizando, desta forma, o risco de choque elétrico acidental de conseqüências mais graves. O ideal, neste tipo de veículo, é que ele tenha um sistema de acionamento para os propulsores com monitoramento de corrente ou tensão e que este gere o mínimo de ruído, a fim de proporcionar sinais de boa qualidade oriundos dos sensores. A comunicação, neste caso, deve ser do tipo *full-duplex* e atingir taxas mais elevadas de transferência de dados, de modo a diminuir o tempo entre amostras dos sinais provenientes dos sensores (acelerômetros, giroscópio, altímetro) e com isto proporcionar testes de algoritmos de controle em malha fechada e medições que possibilitem chegar ao modelo dinâmico deste veículo.

O controle em malha fechada, embora inicialmente não fizesse parte dos objetivos iniciais da dissertação, foi implementado com sucesso, conforme demonstrado a partir dos resultados experimentais mostrados no Capítulo 4. Este controle foi do tipo proporcional e integral (PI), especificamente para o movimento vertical do ROV. O desempenho foi aceitável uma vez que não se efetuou um refinamento mais detalhado em termos da sintonia dos ganhos do controlador. Porém, ficou demonstrado que o controle de profundidade pode ser implementado com o sensor e os atuadores utilizados.

Podem ser citadas as seguintes sugestões de melhorias no ROVFURG II:

- É importante a substituição dos atuais cabos de energia, dados e vídeo, por um único cabo umbilical com vedação adequada para trabalhar imerso na água e que inclua todos os cabos citados anteriormente em um mesmo invólucro;
- Desenvolver um sistema flutuante para enrolar e desenrolar o único cabo, de forma automática e em função da necessidade do ROV alcançar maiores profundidades;
- O isolamento entre a fonte embarcada e o cilindro metálico deve ser melhorado;
- Utilizar novos conectores adequados à profundidade proposta, para interligar os diversos cabos ao cilindro, onde se encontra a eletrônica embarcada do veículo, substituindo o sistema hoje empregado, e permitindo desta maneira, que os propulsores, câmera, sistema de iluminação e altímetro possam ser retirados rapidamente para uma eventual manutenção.

Como sugestão de equipamentos auxiliares para o desenvolvimento futuro de tecnologia de base para pesquisas em robótica subaquática, seria interessante a construção de uma câmara de alta pressão, que possibilite testar a resistência estrutural e a vedação de futuros ROVs e demais equipamentos subaquáticos a serem desenvolvidos na FURG.

Finalmente, espera-se que este trabalho, por ter alcançado sucesso na maioria dos objetivos a que se propôs, venha a contribuir de alguma forma para o desenvolvimento de futuros protótipos ou até mesmo de um futuro ROV nacional de baixo custo, guardando desempenhos aceitáveis de controle durante a sua operação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALLEN, B., AUSTIN, T., FORRESTER, N., GOLDSBOURGH, R., KUKULYA, A., PACKARD, G., PURCELL, M., STOCKEY, R. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology. IEEE Ocean Conference Proceedings, 2006.
- [2] ALMEIDA, J. L. A. Eletrônica Industrial, 10ª edição - São Paulo: ÉRICA, 1991, 245p.
- [3] ALT, C., ALLEN, B., AUSTIN, T., FORRESTER, N., FREITAG, L., GOLDSBOURG, R., GRUND, M., PURCELL, M., STOCKEY, R. Semi-Autonomous Mapping Systems. IEEE Ocean Conference Proceedings, 2006.
- [4] AOKI, T., MURASHIMA T., TSUKIOKA S., NAKAJYOH H., IDA M., 1999. Development of Deep Sea Free Swimming ROV “UROV7K”. IEEE, Oceans ‘99 MTS, v.3, p.1307-1311.
- [5] 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.
- [6] CHARDARD, Y., COPROS, T. SWIMMER: Final Sea Demonstration of this Innovative Hybrid AUV/ROV System. IEEE, International Symposium on Underwater Technology, 2002, p.17-23.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] FOSSEN, T. I., FJELLSTAD, O. E. Nonlinear Modeling of Marine Vehicles in Six Degrees of Freedom. *Journal of Mathematical Modeling of Systems*, 1995, v.1, no.1, p.19-26, May.
- [10] FOSSEN, T. I., BALCHEN, J. G. The NEROV Autonomous Underwater Vehicle. *OCEANS '91. 'Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's'*.
- [11] FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D. and EMAMI-NAEINI, A. Feedback control of dynamic systems. Addison-Wesley, New York, 1994.
- [12] GIOZZA, W. F. *Redes locais de Computadores*. São Paulo: McGraw-Hill, 1986 399p.
- [13] GOMES, S. C. P., BIER, C. C.. Estudo sobre trajetórias de controle para robôs manipuladores. In: XII Congresso Brasileiro de Automática, 1998, Uberlândia, MG. *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática*, 1998.
- [14] GOMES, S. C. P., DINIZ, C. M., MOREIRA, T. G., VELLOSO, B. "A guideline to construct a very low cost underwater vehicle" - 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005), 2005, Ouro Preto (MG). 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005), 2005.
- [15] GOMES, S. C. P., MORAES, C. E. M., DREWS JR, P. L.; MOREIRA, T. G., TAVARES, A. M. Underwater vehicle dynamic modeling. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005), 2005, Ouro Preto (MG). 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005). 8 páginas, : ABCM, 2005.
- [16] HSU, L., CUNHA, J. P. V. S., LIZARRALDE, F., COSTA, R. R., 2000. Avaliação Experimental e Simulação da Dinâmica de um Veículo Submarino de Operação

- Remota. Revista Controle & Automação, vol.11, nº 2, p.82-93.
- [17] KOH, T. H.; LAU W. S., LOW E.; SEET G., SWEI S., CHENG P., 2002. A Study of the Control of an Underactuated Underwater Robotic. In: Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 2049-2054.
- [18] McCARTHY, K. REMUS – a role model for AUV technology transfer. International Ocean Systems, 2006.
- [19] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. – “*PIC12F629/675 Data Sheet 8-Pin Flash – Based 8-Bit CMOS Microcontrollers*” – 2003.
- [20] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. – “*PIC16F7X7 Data Sheet 28/40/44-Pin, 8-Bit CMOS Flash Microcontrollers With 10-Bit A/D and nano Watt Technology*” – 2004.
- [21] MICROCHIP TECHNOLOGY, INC. – “*PIC16F87XA Data Sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers*” – 2003.
- [22] MILLER, D. P. Design of a Small Cheap UUV for Under-Ship Inspection and Salvage. In: IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Monterey CA, June 1996.
- [23] MORAES, C. E. ROVFURG-I: Projeto e construção de um veículo subaquático não tripulado de baixo custo. Rio Grande, 2005. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Fundação Universidade Federal de Rio Grande.
- [24] OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1998.
- [25] RIDAO, P., BATLLE, J, CARRERAS, M., 2001. Dynamics Model of an Underwater Robotic Vehicle. Research report IliA 01-05-RR. Institute of Informatics and Applications, University of Girona, April.

- [26] SCOTT, R. RN Surveys Remus Progress. Jane's Navy International Journal, November, 2006.
- [27] SENS, R., GOMES, S. C. P., TAVARES, A.M. Controle de um veículo subaquático minimizando o choque na aproximação de um alvo. In: II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2006, Rio Grande, RS. II SEMENGO 2006, 2006 a.
- [28] SENS, R., GOMES, S. C. P., TAVARES, A. M. Controle do um veículo subaquático utilizando estrutura variável. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2006, Salvador, BA. CBA 2006, 2006b.
- [29] SLOTINE, J., LI, W. Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1991, 461p.
- [30] SOUZA, E, MARUYAMA, N., 2002. An Investigation of Dynamic Positioning Strategies for Unmanned Underwater Vehicles. Congresso Brasileiro de Automática, XIV, Natal-RN. p.1273-1278.
- [31] TAVARES, A. M., GOMES, S. C. P., CUNHA, M. A. B. Controle de veículos subaquáticos subatuados utilizando linearização por realimentação.. In: XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado, RS. ANAIS do CBA2004. 6 páginas, Gramado, RS: Sociedade Brasileira de Automática (SBA), 2004 a.
- [32] TAVARES, A. M., GOMES, S. C. P., CUNHA, M. A. B., PINTO, V.T. Modelagem Dinâmica e Controle de um Veículo Subaquático. Revista Vetor, 11 páginas, Rio Grande, RS, v. 2, n. 1, p. 7-18, 2004c.
- [33] TAVARES, A. M., GOMES, S. C. P., CUNHA, M. A. B. Um estudo sobre o comportamento dinâmico de diferentes tipos de veículos subaquáticos não tripulados. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2004, Belém. CONEM2004, 2004b.
- [34] YUH, J., 2000. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, Int'l J. of Autonomous Robots.