

# Controle em Profundidade de um Veículo Subaquático do Tipo ROV

Mário L. Centeno<sup>1</sup>; Sebastião C. P. Gomes<sup>2</sup>; Ismael M. Pereira<sup>2</sup>; Cláudio M. Diniz<sup>2</sup>; Paulo J. L. Drews<sup>3</sup>; Sílvia S. C. Botelho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET), Praça Vinte de Setembro, Pelotas, RS*

<sup>2</sup>*Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Núcleo de Matemática Aplicada e Controle (NuMA-FURG), av. Itália, km 8, 96201-900, Rio Grande, RS*

<sup>3</sup>*Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Núcleo de Automação e Computação (NAUTEC), av. Itália, km 8, 96201-900, Rio Grande, RS*

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma estratégia de controle aplicada a veículos subaquáticos, mais especificamente para veículos operados remotamente (ROV). A principal motivação desta pesquisa se baseia no fato da robótica subaquática no Brasil ser de domínio científico recente, principalmente no que se refere a aspectos experimentais. O ROV desenvolvido tem quatro atuadores (motor com hélice) e cinco sensores: três acelerômetros, altímetro e uma câmera de vídeo. O projeto foi implementado de tal forma a se ter quatro graus de liberdade ativamente controlados e dois graus de liberdade controlados de forma passiva (ângulos de rolamento e arfagem). Dois modos de operação foram desenvolvidos e implementados. O primeiro modo consiste no controle dos atuadores através de um *joystick* manipulado por um operador que pode visualizar imagens oriundas da câmera a bordo do veículo, enquanto que no segundo modo, o controle pode em malha aberta ou fechada é feito a partir de um microcomputador do tipo PC na superfície. A lei de controle desenvolvida para o movimento vertical do ROV privilegia a estabilidade em detrimento de um melhor desempenho. Resultados experimentais mostraram que a lei de controle foi capaz de manter o ROV próximo à posição de referência, apesar da perturbação devida à não flutuação neutra do veículo.

**PALAVRAS-CHAVE:** veículos subaquáticos, ROV, controle, modelagem.

**ABSTRACT:** This paper presents a control strategy applied to underwater vehicle, specifically a remotely operating vehicle (ROV). The main motivation of this research is based on the fact that underwater robotics in Brazil is a recent scientific domain, particularly in experimental aspects. The ROV developed has four actuators (motor with helices) and five sensors: three accelerometers (each one working in two axes), one altimeter and one video camera. There are four degrees of freedom actively controlled. The project was made with two degrees of freedom controlled in passive form (roll and pitch angles). Two modules of control had been developed and implemented: one consists of the control of the actuators from a joystick set in motion by an operator who can visualize the signal of the camera on board; another one is the control in open or closed loops from a PC in surface. The control law developed for the vertical motion (heave motion) of the ROV privileged the stability in detriment of a modest performance. Experimental results showed that the control law was capable to keep the ROV next to the reference position, despite of the disturbance due to the not neutral floatabilit.

**KEYWORDS:** Underwater vehicles, ROV, control, modeling.

## 1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste trabalho é o de introduzir uma descrição sobre o projeto de um ROV (*Remotely Operated Vehicle*) de baixo custo controlado em quatro graus de liberdade, incluindo-se ainda a implementação de uma lei de controle apenas para o plano vertical, mais especificamente para o controle de profundidade (eixo Z) do veículo. Foi projetado e construído um segundo ROV para validar experimentalmente a lei de controle. Este ROV e os resultados experimentais em malha aberta e fechada serão discutidos em mais detalhes nas próximas seções. 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 que toma as decisões. Devido a inexistência de cabo umbilical, os veículos subaquáticos autônomos têm maior liberdade de movimento e a sua utilização cresce devida aos avanços da capacidade dos processadores e de armazenamento de energia, que proporciona cada vez mais uma maior autonomia para estes veículos. No Brasil, a robótica subaquática ainda é insipiente quando comparada à desenvolvida nos grandes centros de pesquisa e tecnologia mundiais. Um dos primeiros trabalhos realizados no país foi a dissertação de mestrado de Dominguez (1989), na qual foi desenvolvido um software para a simulação do modelo dinâmico de um ROV. Após este trabalho, Cunha (1992) propôs um controle adaptativo para acompanhar a posição de um ROV. Mais recentemente, Hsu et al. (2000) propôs um procedimento de identificação do modelo dinâmico de atuadores utilizados em ROVs e AUVs (motor com hélice). Barros e Soares (2002) mostraram uma proposição de um veículo de baixo custo, que pode operar tanto como ROV quanto AUV. Souza e Maruyama (2002) investigaram o desempenho de algumas leis de controle de posição aplicadas a veículos subaquáticos. Tavares (2003) apresentou um trabalho de revisão em modelagem dinâmica e controle de veículos subaquáticos. Moraes (2005) desenvolveu o projeto de um ROV de muito baixo custo no qual, posteriormente, se baseou a parte mecânica do presente projeto. Em nível mundial, há um grande número de trabalhos publicados na área de veículos subaquáticos. Um importante trabalho foi desenvolvido por Fossen (1994), no qual há conceitos de cinemática, dinâmica e de controle. Fossen e Fjellstad (1995), Ridao et al. (2001) trabalharam na determinação de modelos dinâmicos para a interação entre o fluido e estrutura.

## 2. ASPECTOS MECÂNICOS DO PROJETO

A configuração escolhida para a construção pode ser vista na figura 1. Este é o formato estrutural do veículo ROVFURG-I (Moraes et. al., 2005). Os componentes em azul são os atuadores, compostos por motor, hélice e duto direcionador do fluxo d'água. Os dois cilindros em verde são os flutuadores, o cilindro em cinza é usado para acondicionar a parte eletrônica do veículo, servindo também como flutuador.

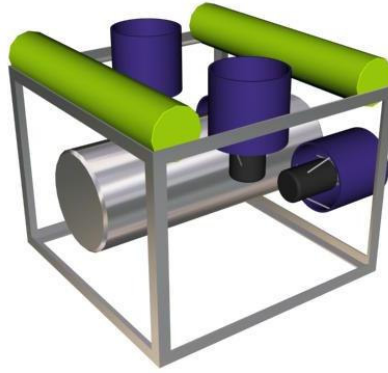


Figura 1. Figura em 3D com os aspectos estruturais básicos do ROV.

A figura 2 mostra apenas a estrutura em alumínio, na qual se pode ver o suporte para fixar os atuadores e o cilindro da eletrônica embarcada.

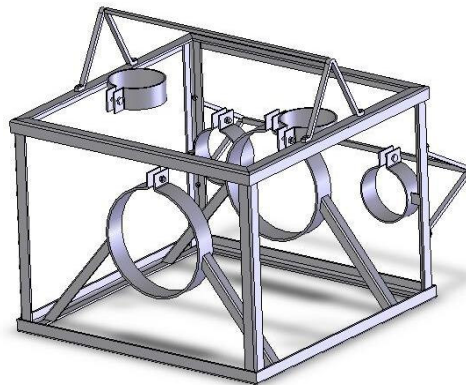


Figura 2. Aspectos mecânicos da fixação dos atuadores e do cilindro do ROV.

Uma foto do ROV pode ser vista na figura 3. Ele possui quatro atuadores, uma câmera de vídeo, sistema de iluminação, um altímetro e acelerômetros capazes de medir acelerações nas direções X, Y e Z. A fim de realizar tarefas de inspeção foi desenvolvido um módulo para controlar os atuadores através de comandos oriundos de um joystick. O movimento do joystick decide os níveis dos três canais PWM. Um deles envia o mesmo sinal para duas pontes H de potência que aciona os dois propulsores verticais. Os outros dois canais enviam sinais individuais para cada ponte H de potência que aciona os propulsores horizontal direito e esquerdo. Neste modo, “a malha de controle” pode ser fechada pelo operador através da observação da imagem gerada pela câmera de vídeo a bordo do ROV.

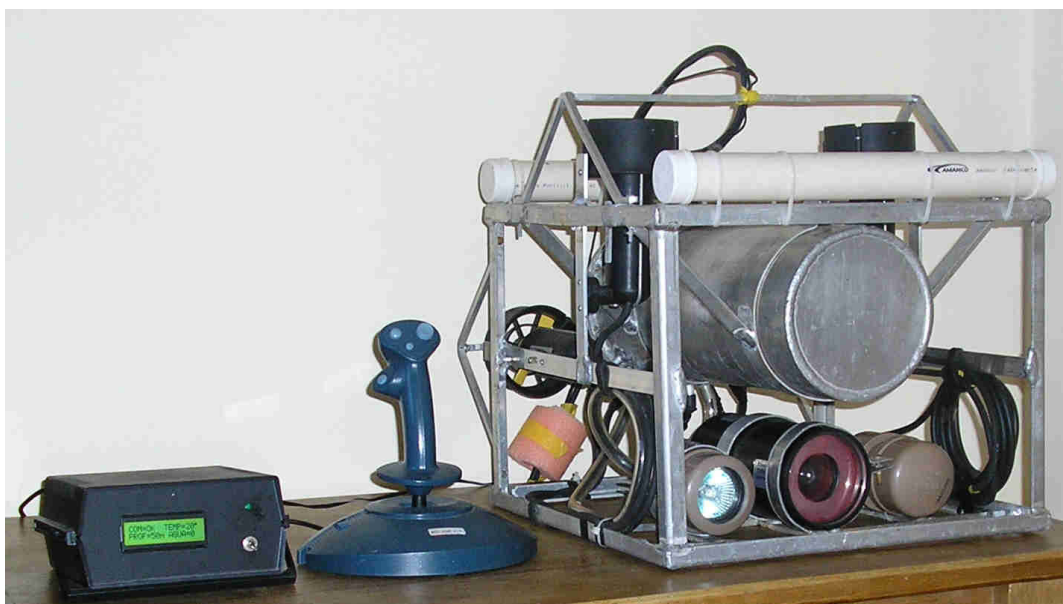


Figura 3 Foto do ROV.

## 2.1 Eletrônica e comunicação

O equipamento possui duas configurações, como é mostrado nas figuras 4 e 5. Na figura 4, é possível observar, que na superfície (fora do veículo) existe um microcomputador do tipo PC compatível rodando um software desenvolvido em DELPHI que é responsável por receber e transmitir os sinais para o veículo. Dentro do veículo existe um microcontrolador (PIC16F777) que de acordo com instruções recebidas do PC, é responsável por enviar dados adquiridos dos acelerômetros para a superfície e por controlar a tensão média sobre os atuadores através de técnicas de PWM. Para prevenir interferências nos sinais adquiridos dos sensores, foram utilizados filtros que proporcionam uma frequência de corte de aproximadamente  $30\text{ Hz}$  na saída dos acelerômetros. Um altímetro foi usado para adquirir informação de profundidade e fechar a malha de controle. Como o microcontrolador não possui saídas com potência suficiente para diretamente acionar os propulsores, uma etapa de potência baseada no circuito integrado MC33887 foi utilizada. A comunicação neste modo foi feita (RS232) a uma taxa de transmissão de  $115200\text{ bps}$ , o que possibilita ao veículo enviar para o PC na superfície informações dos acelerômetros a cada  $10\text{ ms}$ . Com o altímetro a comunicação (RS232) ocorre a uma taxa de transmissão de  $9600\text{ bps}$ . Junto com o cabo serial existe outro cabo de força para alimentar os circuitos internos do veículo e para fornecer a corrente necessária aos atuadores. A tensão de alimentação do veículo é de  $220\text{ V (AC)}$ , a qual é internamente rebaixada para  $24\text{ V (CC)}$  e posteriormente para  $\pm 12\text{ V}$  e  $+5\text{ V (CC)}$ .

Na figura 5 visualiza-se na superfície um monitor de TV que recebe o sinal de vídeo da câmera que se encontra a bordo do veículo, bem como um microcontrolador (PIC 16F877A) que roda o software responsável por trocar informações com o veículo. Nesta configuração o operador faz o controle da trajetória do veículo, além do nível de iluminação, foco e zoom de uma câmera modelo Typhoon que capta imagens em cores de alta resolução e sensibilidade. A comunicação é feita a  $19200\text{ bps}$ , de forma half-duplex, seguindo o padrão EIA-422/485. Para assegurar um enlace estável de comunicação foram utilizadas técnicas de checksum e watch dog timer. 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.

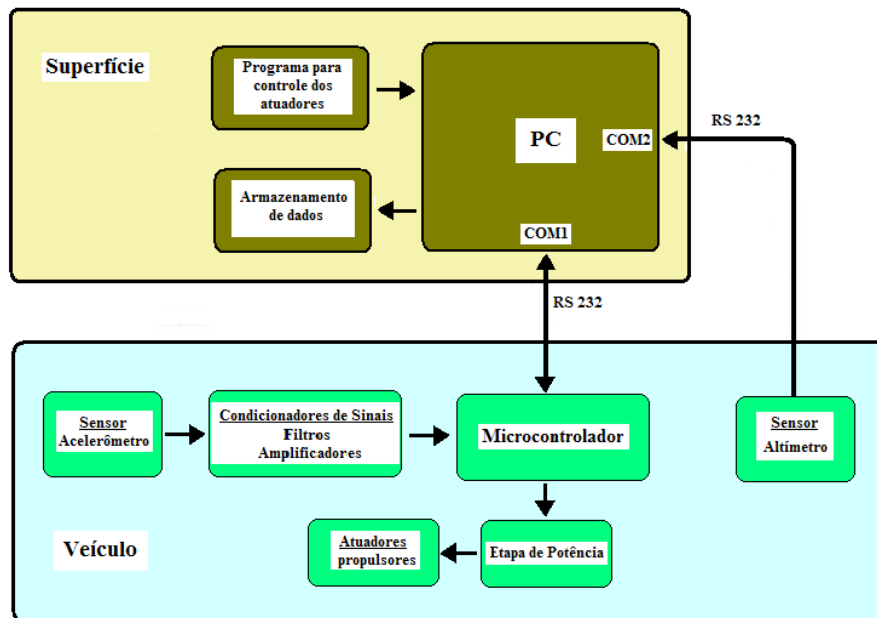


Figura 4. Diagrama em blocos de alto nível do funcionamento do hardware do veículo configurado para operar com o PC.

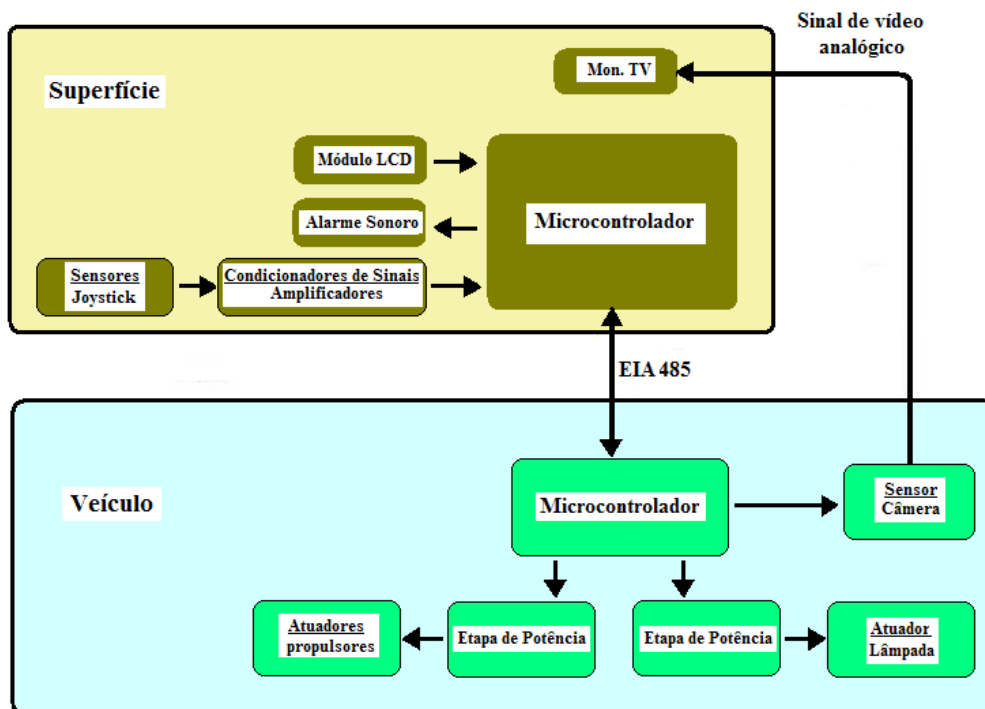


Figura5 - Diagrama em alto nível do funcionamento do *hardware* do veículo configurado para operar através de um joystick.

## 2.2 Atuadores do ROV

Os atuadores empregados no ROV são do modelo BTD150, fornecidos pela empresa Seabotix (ver Figura 6). Estes propulsores utilizam um motor C.C. com tensão de 12V (nominal) com hélices acopladas ao eixo do rotor. Estes atuadores foram construídos para operar em uma profundidade máxima de 150m. Um suporte experimental foi construído para medir o empuxo dos atuadores fixos no ROV. O ROV foi fixado na estrutura e conectado a uma balança com escala analógica, que mede a diferença de peso antes e depois de que são acionados os propulsores. A figura 7 mostra a seqüência de cinco repetições do experimento, relacionando tensão e empuxo. Uma curva da média, extraída das curvas levantadas, mostrou-se compatível com a fornecida pelo fabricante do propulsor.



Figura 6. Fotografia do atuador BTD150.

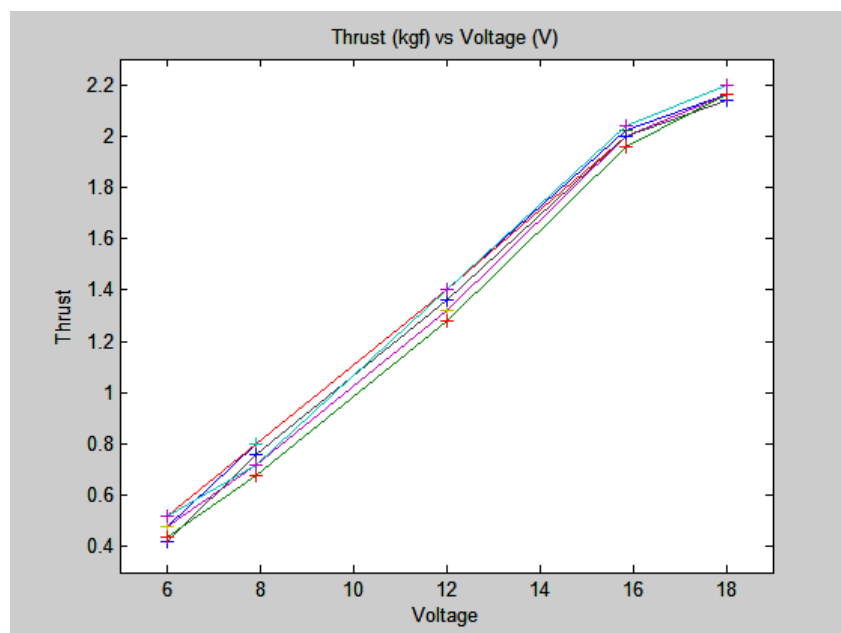


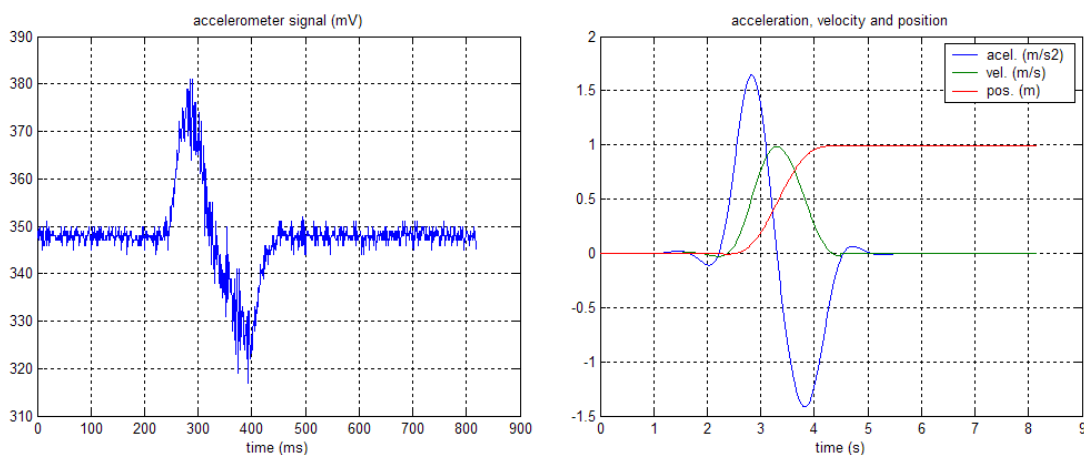
Figura 7 Cinco experimentos medindo o empuxo em função da voltagem.

## 2.3 Altímetro

Foi utilizado um altímetro digital do tipo PA200, fabricado pela Tritech International Limited Company. Seu princípio é o do sonar, cuja onda refletida mede a distância do veículo até o fundo do ambiente subaquático. O sinal do altímetro pode ser usado a distâncias compreendidas de 0.7m a 100m fundo entre o ROV e o fundo do ambiente subaquático. Fora deste intervalo o sensor não é indicado para utilização. A frequência de operação é 200Hz, a captura de dados é feita a partir da RS232, e a resolução digital é 1mm. O seu peso no ar é 1.1kg e submerso em água é 0.9kg. A alimentação do altímetro é 12V e a onda é enviada em formato de um cone de 20 graus de abertura.

## 2.4 Acelerômetros

Os acelerômetros utilizados foram do tipo LIS3L202AS4, fabricados por STMicroelectronics, cuja resolução é 0.5mg sobre 100Hz de largura de banda (dados do fabricante). Alguns experimentos foram realizados no intuito de calibrar estes sensores. Um aparato mecânico foi construído especialmente para a realização dos testes de calibração, consistindo em um carro com rodas, no qual o ROV foi fixado (fora d'água). Os experimentos consistiram em provocar o deslocamento do ROV sobre o carro por uma distância de 1m, rolando em um plano horizontal. Utilizou-se um filtro passa baixa cortando em 2Hz no sinal do acelerômetro e este sinal filtrado foi integrado duas vezes. A figura 8 dois experimentos realizados com o acelerômetro da direção X (eixo longitudinal do ROV). Os gráficos da esquerda mostram os sinais originais do acelerômetro, enquanto que os da direita mostram os sinais filtrados da aceleração, bem como as integrações destes correspondentes às velocidades e posições. Para cada acelerômetro, experimentos como estes foram repetidos seis vezes. A constante média de conversão física, nos casos dos três acelerômetros, é de aproximadamente 14.8 ( $m/s^2/(mV)$ ).



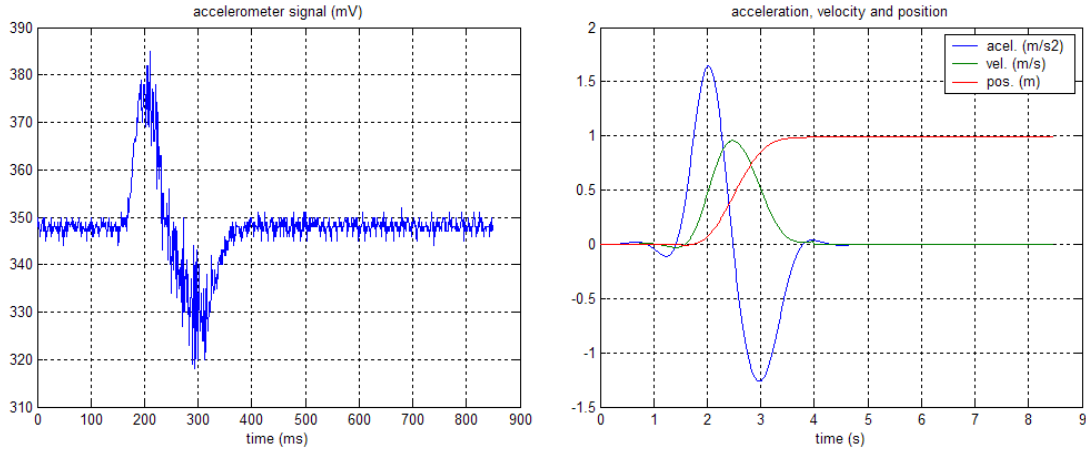


Figura 8. Experimentos para a calibração dos acelerômetros.

### 3. MODELOS CINEMÁTICO E DINÂMICO

A equação representando o equilíbrio de forças e torques atuantes no ROV podem ser escritas na seguinte forma:

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \quad (1)$$

Nesta equação,  $\mathbf{M}_{RB}$  é a matriz de inércia,  $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$  é a matriz de esforços do tipo Coriolis-centrífgos,  $\mathbf{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$  é o vetor velocidade e  $\boldsymbol{\tau}_{RB} = [X_{RB}, Y_{RB}, Z_{RB}, K_{RB}, M_{RB}, N_{RB}]^T$  é o vetor resultante de todas as forças e momentos aplicados ao veículo. Todos os termos da equação (1) estão explicitados no sistema do corpo (fixo ao ROV).

A equação (1) pode ser reescrita como:

$$(\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A) \dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}))\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g} = \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

$\mathbf{M}_A$  e  $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$  são contribuições devidas à massa adicional na matriz de inércia e nos termos coriolis-centrífgos, respectivamente.  $\mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v}$  são os termos relativos ao arrasto e à sustentação, e  $\mathbf{g}$  contém os esforços devidos ao peso e ao empuxo.

Definindo  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$  e  $\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})$  e considerando as relações cinemáticas entre os referenciais móvel (do corpo) e inercial, o modelo do veículo pode ser escrito na seguinte forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) &= \boldsymbol{\tau} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \end{aligned} \quad (3)$$

com  $\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1^T, \boldsymbol{\eta}_2^T]^T$ , onde  $\boldsymbol{\eta}_1 = [x, y, z]^T$  é o vetor com as posições inerciais do centro de massa e  $\boldsymbol{\eta}_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$  é o vetor com os ângulos de Euler (Gomes *et. al.*, 2005). A identificação dos parâmetros do modelo do ROV não é uma tarefa simples. Entretanto, no presente caso esta tarefa é relativamente simplificada em razão da arquitetura aberta do ROV, a qual permite considerar as matrizes de arrasto e sustentação como sendo diagonais.



Os parâmetros foram identificados observando-se respostas ao degrau em torque nos atuadores (empuxo no ROV) e comparando-se, por tentativa e erro, experimentos com simulações, o ROV se deslocando em linha reta. Porém, comparações entre simulações e experimentos em malha aberta nos casos mais gerais não são muito conclusivas em razão de erros (bias) na dupla integração dos sinais dos acelerômetros. Erros também acontecem devidos à medição de componente de aceleração gravitacional, quando o ROV apresenta pequenas oscilações em rolamento ou arfagem. Entretanto, o modelo com os parâmetros identificados foi útil para o projeto dos ganhos do controlador em malha fechada, projeto este refinado a partir de sucessivas repetições de simulações.

#### **4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM MALHA FECHADA**

Conforme comentado anteriormente, os sinais dos acelerômetros não se mostraram confiáveis para a identificação em tempo real da posição inercial do ROV. Considerou-se então no presente trabalho um controle em malha fechada na vertical, ou seja, em profundidade, utilizando-se, para tanto, o sinal do altímetro como informação da posição inercial do ROV na direção vertical. Um controle proporcional e integral (controle PI) foi utilizado, considerando uma janela flutuante de 10 valores de erros para o somatório da componente integral. Isto significa que, apenas 10 elementos foram considerados para o somatório, ou seja, quando o elemento (I+10) é incluso, o elemento I é retirado do somatório.

A figura 9 mostra um resultado experimental em malha fechada com o controle do ROV em profundidade. O gráfico superior contém o empuxo aplicado pelos atuadores verticais (força de controle), enquanto que o gráfico inferior contém a posição de referência e a posição vertical do ROV (sinal do altímetro). A altitude do ROV (com relação ao fundo do ambiente subaquático) era, inicialmente, 1.86m. A posição de referência foi um degrau de 1.5m. Pode ser observado um erro flutuando entre 5 e 10 cm em torno da referência, devido principalmente à não flutuabilidade neutra, ou seja, há uma diferença de 5% entre o peso e o empuxo do ROV.

#### **5. CONCLUSÕES**

Este artigo introduz uma descrição sobre o projeto de um ROV de muito baixo custo quando comparado a equivalentes importados. A arquitetura aberta proposta para o ROV, além de permitir um simples processo construtivo, possibilitou a instalação de equipamentos embarcados, tais como câmera de vídeo, iluminação e altímetro. Esta arquitetura também facilita a determinação dos posicionamentos das massas e dos flutuadores, de forma a garantir flutuação neutra e controle passivo em dois graus de liberdade (rolamento e arfagem).

O controle a partir de um operador usando um joystick e tendo a imagem da câmera embarcada constitui, atualmente, no mais útil modo de controle da atual versão do ROV, cuja principal destinação é a inspeção de ambientes subaquáticos. Neste sentido, os atuadores escolhidos para o ROV apresentaram um bom desempenho, provendo velocidades de até 0.6m/s e apresentando pequena zona morta em torque devida a atritos, limitada em  $\pm 0.5V$ .

Utilizar acelerômetros para implementar leis de controle em malha fechada não produz bons resultados em razão de erros (bias) que são integrados duas vezes para a recuperação da informação de posição. Resultados experimentais mostraram que, após vinte segundos de trajetória, o erro na posição do ROV obtida a partir dos acelerômetros já atinge valores que impedem um bom desempenho do controle em posição.

O controle em malha fechada projetado para o posicionamento vertical do ROV privilegiou a estabilidade em detrimento de um modesto desempenho. Os ganhos do controlador ficaram relativamente pequenos e o empuxo dos atuadores verticais foram

saturados em apenas 25% do empuxo máximo disponível. Apesar destas limitações, a lei de controle foi capaz de manter o ROV próximo da posição de referência, mesmo com a perturbação devida à flutuação não neutra.

Em futuros trabalhos, pretende-se testar um sensor de pressão para o controle em profundidade, bem como utilizar informações de imagens da câmera embarcada para a tomada de decisão sobre o controle do seguimento de trajetórias durante a inspeção de estruturas subaquáticas.

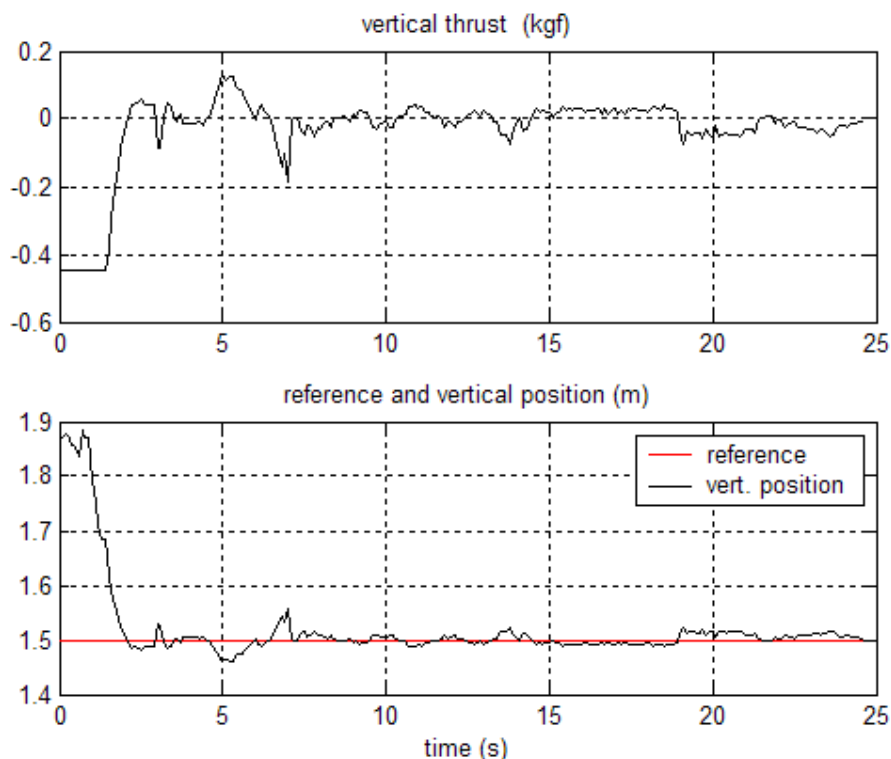


Figura 9. Resultado experimental mostrando o controle do movimento vertical do ROV.

## 6. REFERÊNCIAS

1. BARROS, E. A., SOARES, F. J. A., 2002. Desenvolvimento de um Robô Submarino de Baixo Custo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XIV, Natal-RN. p. 2121-2126.
2. CUNHA, J. P. V. S., 1992. Projeto e Estudo de Simulação de um Sistema de Controle a Estrutura Variável de um Veículo Submarino de Operação Remota. Rio de Janeiro, 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
3. DOMINGUEZ, R. B., 1989. Simulação e Controle de um Veículo Submarino de Operação Remota. Rio de Janeiro. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

4. FOSSEN, T. I., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles. Chichester: John Wiley & Sons. 480 p. ISBN 0-471-94113-1.
5. FOSSEN, T. I., FJELLSTAD, O. E., 1995. Nonlinear Modelling of Marine Vehicles in Six Degrees of Freedom. **Journal of Mathematical Modelling of Systems**, v.1, no.1, p.19-26, May.
6. Gomes, S. C. P., Moraes, C. E. M., Moreira, T. G. and Tavares, A. M., 2005. Underwater vehicle dynamic modeling. 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005), Ouro Preto, MG.
7. 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, Maio, Junho, Julho, Agosto.
8. Moraes, C. E. M., Gomes, S. C. P., Diniz, C. M. and Moreira, T. G., 2005. A guideline to construct a very low cost underwater vehicle. 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005), Ouro Preto, MG.
9. RIDAO, P., BATLLE, J., CARRERAS, M., 2001. Dynamics Model of an Underwater Robotic Vehicle. Research report IIA 01-05-RR. Institute of Informatics and Applications, University of Girona, April.
10. 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.
11. TAVARES, A. M., 2003. Um estudo sobre a modelagem e o controle de veículos subaquáticos não tripulados. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, FURG.
12. YUH, J., 2000. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, Int'l J. of Autonomous Robots.