

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM VEÍCULO ROBÓTICO SUBMARINO TELEOPERADO VIA INTERNET

Wallace Moreira Bessa

Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/RJ
Av. Maracanã, 229 – 20271-110 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: wmbessa@cefet-rj.br

Max Suell Dutra

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia, Bloco G/204 – 21945-970 – Cidade Universitária, RJ, Brasil
E-mail: max@serv.com.ufrj.br

Edwin Kreuzer

Technische Universität Hamburg-Harburg – TUHH – Mechanik und Meerestechnik
Eissendorfer Strasse 42 – D-21071– Hamburgo, Alemanha
E-mail: kreuzer@tu-harburg.de

Ney Robinson Salvi dos Reis

Centro de Pesquisas da Petrobras – CENPES/PETROBRAS
Quadra 7 – 21949-900 – Cidade Universitária, RJ, Brasil
E-mail: salvireis@cenpes.petrobras.com.br

Resumo. *Este trabalho descreve as principais características de um veículo robótico submarino projetado para ser utilizado como plataforma de testes experimentais em laboratório. O veículo é equipado com um Braço Mecânico Passivo para medir sua posição e orientação durante operações próximas a uma estrutura submarina. São apresentados detalhes do projeto mecânico/eletrônico, bem como a metodologia desenvolvida para possibilitar o controle via Internet. Alguns resultados obtidos são apresentados e discutidos com o objetivo de demonstrar a viabilidade da utilização da Internet no controle de sistemas robóticos e na condução de procedimentos experimentais remotamente.*

Palavras-chave: *ROV, Veículo de Operação Remota, Robótica, Mecatrônica, Internet*

1. INTRODUÇÃO

Devido ao grande desenvolvimento tecnológico atingido nas últimas décadas, tornou-se possível a utilização de veículos robóticos não tripulados para a exploração submarina. Estes veículos, freqüentemente chamados de ROV (*Remotely Operated underwater Vehicle*), têm substituído os mergulhadores na realização de tarefas que ofereçam risco à vida humana. Deste modo, os ROVs têm sido amplamente utilizados na pesquisa de fenômenos submarinos e na montagem, inspeção e reparo de estruturas *offshore*.

Entretanto, o progresso conseguido na área de robótica submarina trouxe consigo o aumento do custo destes veículos (Amat et al, 1999). Este custo torna restrita, na maioria dos casos, a

utilização de ROVs por universidades e grupos de pesquisa, o que dificulta o desenvolvimento de novas tecnologias para o setor. Diversas empresas e institutos vem trabalhando com o intuito de desenvolver sistemas robóticos de baixo custo que possibilitem sua utilização em pesquisa (Smallwood et al, 1999; Lygouras et al, 1998; Pinto, 1996 e Kreuzer et al, 1995a).

Em alguns casos, não só o custo do veículo em si, mas a inexistência de uma infra-estrutura laboratorial adequada (canal de ondas, por exemplo) torna impossível a realização de experimentos na área de robótica submarina. A teleoperação de robôs através da Internet têm, por sua vez se mostrado um campo muito promissor, por permitir o compartilhamento de instalações e equipamentos experimentais entre institutos de pesquisa, que em algumas vezes chegam a estar milhares quilômetros afastados um do outro.

Neste artigo aborda-se os detalhes de projeto e construção de um veículo robótico submarino, denominado AEGIR (*An Experimental General-purpose Internet-based underwater Robot*), desenvolvido para operar como plataforma de testes experimentais. O projeto é uma parceria envolvendo universidades e centros de pesquisa do Brasil e da Alemanha. Para garantir que todos os membros da parceria tenham acesso ao ROV, o computador principal do robô está permanentemente conectado à Internet, disponibilizando-o assim para a realização remota de experimentos nas áreas de cinemática, dinâmica e controle de robôs submarinos e aquisição e processamento de sinais.

2. CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO

O AEGIR foi idealizado para servir como plataforma experimental, auxiliando no desenvolvimento de novos paradigmas para a área de controle de veículos robóticos submarinos. Deste modo, optou-se por uma arquitetura que fosse capaz de torná-lo versátil o suficiente para incorporar com rapidez novas funcionalidades, como por exemplo sensores ou manipuladores. A Fig. (1) apresenta um modelo em CAD do AEGIR, na qual estão destacados seus principais subsistemas.

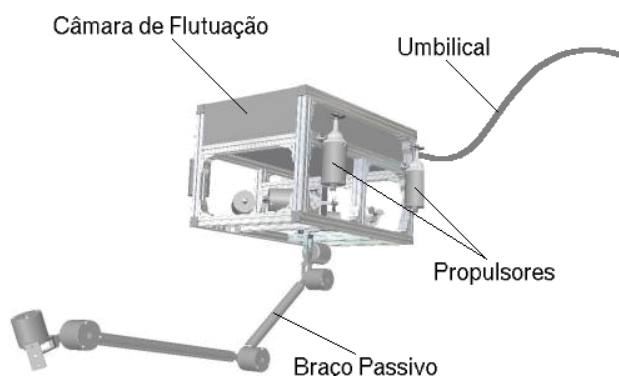


Figura 1: Modelo em CAD do AEGIR

Para a escolha dos sensores de posição e orientação deve-se primeiramente considerar a distância entre o veículo e o ponto de inspeção/intervenção (uma estrutura submersa, por exemplo), dividindo-se então o problema em dois domínios distintos (Kreuzer et al, 1995b):

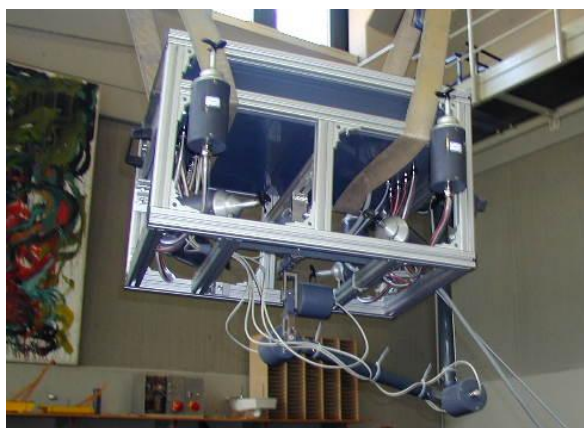
1. Veículo afastado da estrutura submersa
2. Veículo próximo à estrutura submersa

Na primeira situação, aonde a tolerância na medida da posição é maior, têm se tradicionalmente optado por sistemas acústicos e inerciais. Já no segundo caso, trabalhos recentes (Hsu et al, 2000; Pinto, 1996 e Kreuzer et al, 1995b) mostram que o Braço Passivo Mecânico pode representar uma alternativa interessante. Seu princípio de funcionamento é bem simples: fixando uma extremidade do braço a um ponto conhecido da estrutura, pode-se através da sua cinemática direta determinar a posição e a orientação do veículo, preso à outra extremidade.

O braço passivo do AEGIR possui seis graus de liberdade, aonde cada junta de rotação possui um encoder ótico digital para a medição da posição angular.

O veículo está também equipado com 8 propulsores dispostos de modo a possibilitar manobrabilidade total nos 6 graus de liberdade. Cada um deles possui um hélice de 3 pás, um motor DC de 24 V e 90 W, e um encoder ótico digital para medir a velocidade de rotação (necessário para fornecer o sinal de realimentação do sistema de controle do propulsor).

A câmara de flutuação possui dupla funcionalidade: igualar o peso do ROV ao empuxo, possibilitando peso nulo em baixo d'água, e proteger a eletrônica embarcada. Dentro da câmara estão, por exemplo, 14 microcontroladores da família 8051 responsáveis pelo pré-processamento dos sinais provenientes dos encoders (6 do braço + 8 dos propulsores). A Fig. 2(b) apresenta uma foto do AEGIR sem a tampa superior da câmara de flutuação, na qual pode-se observar a placa de circuito impresso contendo os 14 microcontroladores mencionados acima.



(a) Ao ser transportado para o tanque de testes



(b) Eletrônica embarcada

Figura 2: Fotos do AEGIR

A comunicação do veículo com o computador principal na superfície é feita através de um umbilical, utilizando o protocolo RS-485 para a transferência dos dados. O umbilical também é responsável pela alimentação dos motores DC.

O computador principal consiste de um PC do tipo industrial, no qual foram instaladas uma placa de entrada/saída digital para ler o sinal pré-processado dos sensores e um conversor digital/analógico de 12 Bits para o controle dos propulsores. Como sistema operacional optou-se pelo Linux por ser um sistema estável e um ótimo ambiente de desenvolvimento, possuindo ampla documentação disponível e uma vasta gama de aplicativos (editores, compiladores para diversas linguagens de programação, programas servidores, etc).

3. TELEOPERAÇÃO VIA INTERNET

O controle e a monitoração de sistemas através da Internet, têm se mostrado uma excelente ferramenta, podendo ser aplicada não só em nível de pesquisa, mas também com fins educacio-

nais, como um poderoso recurso no auxílio ao ensino de disciplinas freqüentemente presentes no currículo dos cursos de engenharia, como por exemplo, mecatrônica, controle e processamento de sinais (Parkin et al, 2002).

Particularmente na área de robótica, esta tecnologia vêm sendo empregada com sucesso a aproximadamente dez anos. Ao longo deste período foram desenvolvidos sistemas de teleoperação via Internet tanto para manipuladores fixos (Romariz Jr. et al, 2002 e You et al, 2001), quanto para robôs móveis (Álvares et al, 2003; Schilling et al, 2002 e Grange et al, 2000).

Como a velocidade da transmissão de dados via Internet é uma variável aleatória (Xi et al, 2000), que depende principalmente do tráfego na grande rede e do caminho percorrido pelos pacotes de dados através dela, não é recomendável que se adote uma metodologia baseada na teleoperação direta dos robôs.

Para contornar esta limitação optou-se por prover o AEGIR com autonomia o suficiente para que o operador precisa-se apenas enviar comandos de alto nível, deixando todo o controle de baixo nível a cargo do computador principal do ROV.

A interação com o veículo pode-se dar de duas maneiras distintas, cabendo ao operador julgar qual a alternativa que é mais conveniente. Como primeira opção o usuário tem à sua disposição uma interface que pode ser visualizada através de um navegador de Internet comum (Mozilla, Konqueror ou Internet Explorer, entre outros). A Fig. (3) mostra, como exemplo, a página na web disponibilizada para o controle do sistema de propulsão. Além dos campos destinados a receber os parâmetros do controlador (força desejada e tempo total de amostragem), pode-se encontrar algumas instruções e uma breve descrição do sistema de controle.

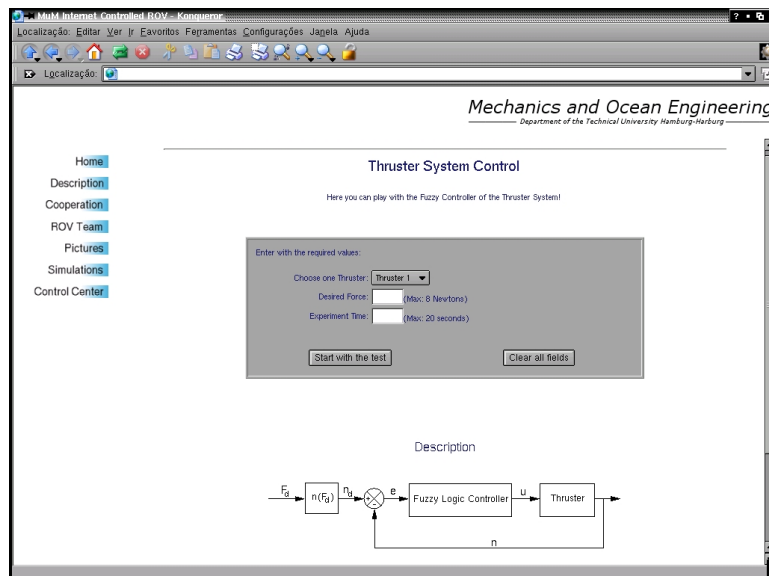


Figura 3: Interface com o operador para sistema de controle dos propulsores

Para viabilizar este procedimento foi instalado um programa servidor WWW (APACHE) no computador principal do AEGIR, ficando ele encarregado de enviar as páginas escritas em HTML (*Hypertext Markup Language*), para o navegador do usuário, através do protocolo HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*).

A comunicação entre o APACHE e o programa de controle do ROV é feita por um *script* CGI (*Common Gateway Interface*) escrito em Perl. Este mesmo *script* também é responsável por recolher e formatar os dados de resposta do sistema de controle, de modo que o APACHE possa devolver esta resposta na forma de gráficos ao navegador de Internet do operador. O CGI representa uma interface padrão entre aplicativos e servidores, possuindo inúmeros recursos que podem ser utilizados na geração dinâmica de páginas para a web (Gundavaram, 1996).

Além da interface de controle, é oferecida também uma interface de simulação que pode ser usada para avaliar o comportamento do sistema antes da realização do experimento propriamente dito.

Como segunda alternativa, o operador tem ainda a opção de controlar o veículo através um de um terminal SSH (*Secure Shell*, terminal semelhante ao telnet). Para isso o servidor OpenSSH foi instalado também no computador principal. Por este terminal o usuário pode acessar diretamente o programa de controle. Esta alternativa permite ainda que um programador possa remotamente desenvolver novas funcionalidades para o ROV.

O programa de controle foi escrito em C, por se tratar de uma linguagem de alto nível que possibilita a implementação de rotinas matemáticas com facilidade e por permitir também a realização de tarefas de baixo nível, como a comunicação com o *Hardware*.

A Fig. (4) apresenta os detalhes da arquitetura adotada para a teleoperação de AEGIR via Internet.

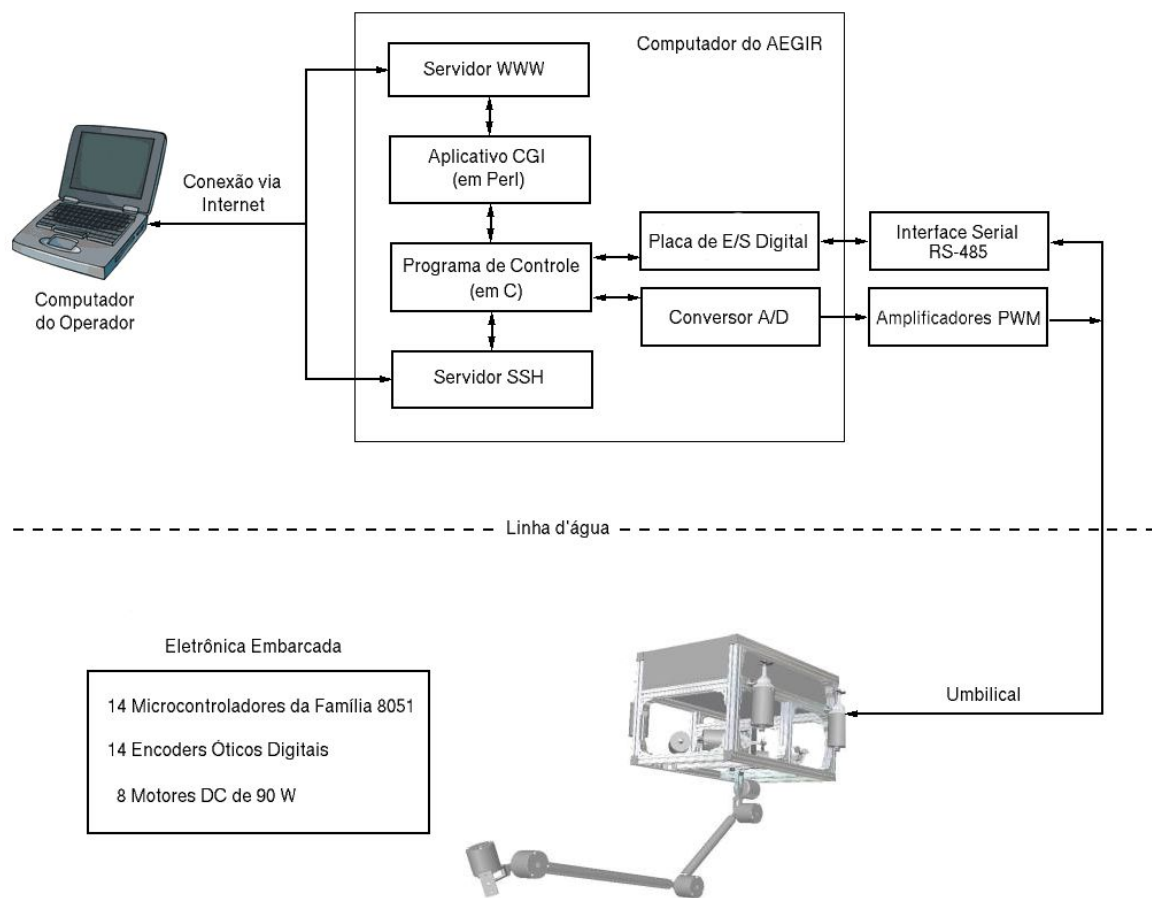


Figura 4: Esquema da configuração adotada para a teleoperação do veículo

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para demonstrar a viabilidade da metodologia proposta, foi implementado um servo-sistema para os propulsores do AEGIR. Um servo-sistema é um sistema de controle realimentado no qual a saída é alguma grandeza mecânica como: posição, velocidade ou aceleração (Ogata, 1993).

Neste caso, empregou-se um controlador fuzzy (FLC – *Fuzzy Logic Controller*) para administrar a força produzida pelos propulsores. Tendo em vista que a força de propulsão (F_p) é proporcional ao quadrado da velocidade de rotação do motor (Bessa et al, 2004; Bachmayer et al 2000 e Whitcomb et al, 1999), utilizou-se a velocidade como variável de realimentação do

controlador, pois esta pode ser facilmente obtida através do sinal proveniente dos encoders. A Eq. (1) apresenta a relação entre a força de propulsão e a velocidade de rotação.

$$F_p(kT) = k_{p1} \cdot \Omega(kT) \cdot |\Omega(kT)| - k_{p2} \cdot \text{sgn}(\Omega(kT)) \quad (1)$$

onde $\Omega(kT)$ é a velocidade de rotação em um dado instante kT (sendo T o período de amostragem), k_{p1} e k_{p2} são parâmetros que devem ser levantados experimentalmente (Bessa et al, 2004).

As variáveis de estado do sistema são o sinal de erro, definido na Eq. (2), e sua respectiva derivada $\dot{e}(kT)$. A variável de saída (ou manipulada) do controlador é a tensão $u(kT)$ que é enviada ao motor através do conversor D/A e do amplificador do tipo PWM (*Pulse-Width Modulated*, i.e. Largura de Pulso Modulada).

$$e(kT) = \Omega_d(kT) - \Omega(kT) \quad (2)$$

onde $\Omega_d(kT)$ é a velocidade de rotação de referência, calculada a partir da Eq. (1) para uma determinada força escolhida pelo usuário (F_d).

A Fig. (5) mostra o diagrama esquemático do sistema de controle dos propulsores.

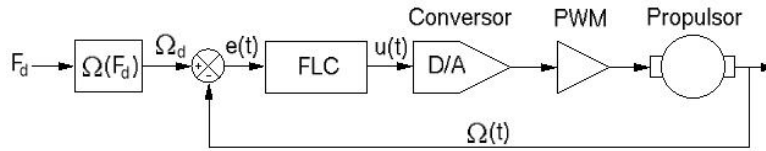


Figura 5: Controlador Fuzzy do Sistema de Propulsão

O programa do controlador foi implementado em C para permitir a comunicação com a placa de E/S digital e com o conversor D/A. Para a interface com o usuário, optou-se pela arquitetura Navegador \Leftrightarrow Servidor WWW \Leftrightarrow *Script* CGI (em Perl) \Leftrightarrow Programa de Controle (em C), descrita em detalhes na Seção 3.

A estrutura básica do controlador fuzzy consiste em transformar as variáveis de estado em variáveis lingüísticas, para então a partir de uma base de conhecimento, armazenada sob a forma de regras, determinar a saída do controlador (Testi et al, 2003).

O sistema de inferência adotado foi o TSK (Takagi – Sugeno – Kang) de ordem zero. Este modelo é equivalente às redes neurais do tipo RBF (*Radial Basis Function*) (Jang et al, 1997) e suas regras podem ser escritas como:

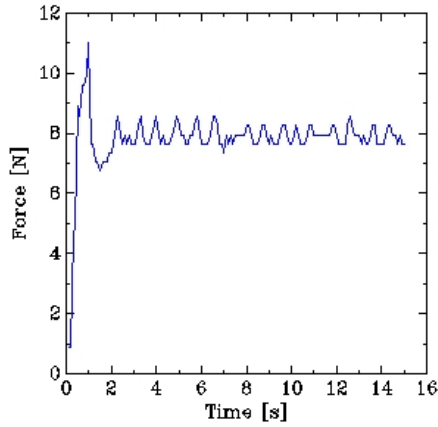
$$\text{Se } e(kT) \text{ é } E_l \text{ e } \dot{e}(kT) \text{ é } \dot{E}_m \text{ então } u_n(kT) = U_{lm}$$

onde E_l e \dot{E}_m são conjuntos fuzzy, representados por funções de pertinência triangulares, e U_{lm} é um valor constante. Tendo em vista que cada regra determina apenas um valor numérico como resposta, a saída final do controlador $u(kT)$ pode ser calculada através de uma média ponderada:

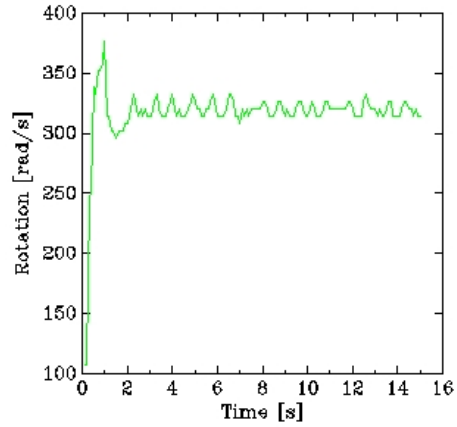
$$u(kT) = \frac{\sum_{n=1}^N \omega_n \cdot u_n(kT)}{\sum_{n=1}^N \omega_n} \quad (3)$$

onde ω_n é o valor de ativação da premissa de cada uma das N regras.

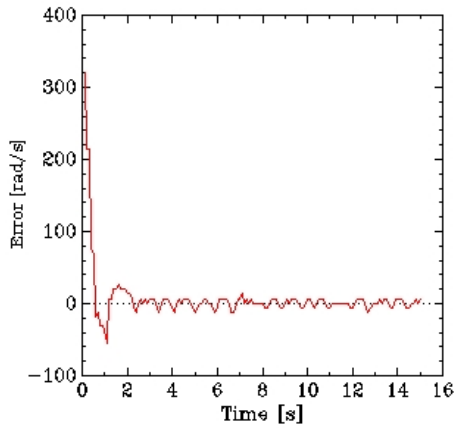
Alguns resultados obtidos experimentalmente via Internet são apresentados na Fig. (6). Neste exemplo, o usuário solicitou através do campo *Desired Force* na interface de controle (ver Fig. (3)) que o propulsor 1 exerça-se uma força de 8 N. Este valor é atingido pelo propulsor em



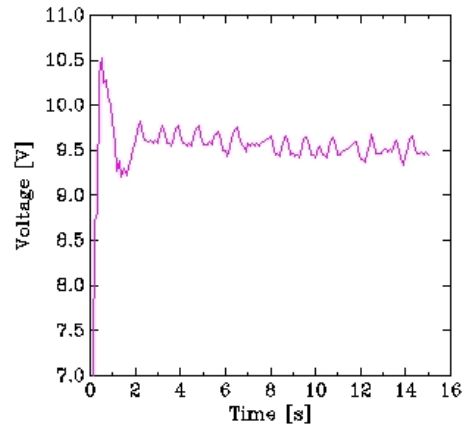
(a) Força \times Tempo



(b) Rotação \times Tempo



(c) Erro \times Tempo



(d) Tensão \times Tempo

Figura 6: Resultados Experimentais

aproximadamente 2 s, como pode ser visto na Fig. 6(a). As Figuras 6(b) e 6(c) apresentam, respectivamente, a velocidade medida pelo encoder e o sinal de erro calculado através da Eq. (2). A saída do controlador, ou seja a tensão utilizada para o acionamento do motor antes do amplificador PWM, é apresentada na Fig. 6(d).

Os dados obtidos em cada experimento são automaticamente armazenados em um arquivo ASCII no computador principal, em um diretório acessível via Internet. Estes arquivos podem ser utilizados em análises posteriores e para comparação de resultados.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foram abordadas as principais características de um veículo robótico submarino, projetado para funcionar como plataforma de testes experimentais e, deste modo, auxiliar na tarefa de desenvolvimento de novas tecnologias para o setor. Devido a distância geográfica

existente entre Brasil e Alemanha, países aonde se situam as instituições envolvidas no projeto, optou-se por uma estratégia que permitisse a teleoperação do veículo via Internet. A metodologia adotada mostrou-se perfeitamente adequada, atingindo com sucesso os objetivos inicialmente propostos. Graças à estrutura distribuída do controlador, provendo o ROV com capacidade para a realização de algumas tarefas autonomamente, eliminou-se o problema causado pela imprevisibilidade da taxa de transmissão de dados via Internet.

Além de suas inúmeras aplicações em nível de pesquisa, esta tecnologia pode ainda ser usada nas disciplinas dos cursos de engenharia como complemento às atividades em sala de aula, possibilitando aos alunos a realização de experimentos que de outro modo não seriam possíveis.

O controle e a monitoração de equipamentos via Internet representa também uma interessante opção no cenário industrial, podendo ser utilizada, por exemplo, na área de manutenção preditiva e diagnóstico de máquinas, possibilitando que um mesmo especialista, de sua casa ou escritório, possa ser responsável pela monitoração de plantas industriais situadas em locais distintos.

Por fim, destaca-se a eficácia dos controladores fuzzy, que pôde ser comprovada através dos resultados obtidos experimentalmente. Nos sistemas desenvolvidos e testados até o presente momento, a lógica fuzzy têm se mostrado bastante confiável para a implementação de sistemas de controle, cujo processo decisório baseie-se no sinal proveniente de sensores.

6. AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem ao apoio e suporte financeiro recebido da CAPES, do DAAD e do CENPES/PETROBRAS.

7. REFERÊNCIAS

- Álvares, A.J., Andriolli, G.F., Dutra, P.R.C., De Sousa, M.M. and Ferreira, J.C.E, 2003, "A Navigation and Path Planning System for the Nomad XR4000 Mobile Robot with Remote Web Monitoring", Proc. of the 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, Brazil.
- Amat, J., Monferrer, A., Batlle, J. and Cuffí, X., 1999, "GARBI: A Low-cost Underwater Vehicle", Microprocessors and Microsystems, Vol. 23, pp. 61-67.
- Bachmayer, R., Whitcomb, L.L. and Grosenbaugh, M.A., 2000, "An Accurate Four-Quadrant Nonlinear Dynamical Model for Marine Thrusters: Theory & Experimental Validation", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 146-159.
- Bessa, W.M, Dutra, M.S., Kreuzer, E. and Dos Reis, N.R.S, 2004, "Avaliação Experimental da Modelagem Matemática dos Propulsores de um Veículo Robótico Submarino", Proceedings of the 3rd National Congress of Mechanical Engineering, Belém, Brazil.
- Grange, S., Fong, T. and Baur, C., 2000, "Effective Vehicle Teleoperation on the World Wide Web", Proc. of the Int. Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA.
- Gundavaram, S., 1996, "CGI Programming on the World Wide Web", O'Reilly & Associates, Available on-line at <http://www.oreilly.com/openbook/cgi>.
- Hsu, L., Costa, R.R., Lizarralde, F. and Da Cunha, J.P.V.S., 2000, "Dynamic Positioning of Remotely Operated Underwater Vehicles", IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 7, No. 3, pp. 21-31.
- Jang, J.-S.R., Sun, C.-T. and Mizutani, E., 1997, Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence", Prentice Hall.
- Romariz Jr., L.S.J. and Álvares, A.J., 2002, "Telerobotics: A Method. for the Development

- of a Through-the-Internet Robotic Teleoperated System”, RBCM – J. of the Brazilian Soc. Mechanical Sciences, Vol. 24, No. 2.
- Kreuzer, E. and Pinto, F.C., 1995a, “Remotely Operated Vehicle - Mechatronic System”, Proc. of the 3rd Conference on Mechatronics and Robotics, Paderborn, Germany, pp. 248-261.
- Kreuzer, E. and Pinto, F.C., 1995b, “Sensing the Position of a Remotely Operated Underwater Vehicle”, Proc. of the 10th Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Gdansk, Poland, pp. 323-328.
- Lygouras, J.N., Lalakos, K.A. and Tsalides, P.G., 1998, “THETIS: An Underwater Remotely Operated Vehicle for Water Pollution Measurements”, Microprocessors and Microsystems, Vol. 22, pp. 227-237.
- Ogata, K., 1993, “Engenharia de Controle Moderno”, Prentice Hall do Brasil.
- Parkin, R.M., Czarnecki, C.A., Safaric, R. and Calkin, D.W., 2002, “A PID Servo Control System Experiment Conducted Remotely via Internet”, Mechatronics, Vol.12, pp. 833-843.
- Pinto, F.C., 1996, “Theoretische und experimentelle Untersuchung zur Sensorik und Regelung von Unterwasserfahrzeugen”, VDI Verlag.
- Schilling, K., Roth, H. and Lieb, R., 2002, “Remote Control of a ‘Mars Rover’ via Internet – To Support Education in Control and Teleoperations”, Acta Astronautica, Vol. 50, No. 3, pp. 173-178.
- Smallwood, D., Bachmayer, R. and Whitcomb, L., 1999, “A New Remotely Operated Vehicle for Dynamics and Control Research”, Proceedings of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, Durham, USA.
- Testi, L., Dos Santos, B.C. and Dutra, M.S., 2003, “Adaptive Fuzzy Control for Underwater Hydraulic Manipulators”, Proc. of 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, Brazil.
- Whitcomb, L. and Yoerger, D., 1999, “Development, Comparison, and Preliminary Exp. Validation of Non-linear Dynamic Thruster Models”, IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 481-494.
- Xi, N. and Tarn, T.J., 2000, “Stability Analysis of Non-time Referenced Internet Telerobotic Systems”, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 32, pp. 173-178.
- You, S., Wang, T., Engleson, R., Meng, C. and Zhang, Q., 2001, “A Low-cost Internet-based Telerobotic System for Access to Remote Laboratories”, Artif. Intelligence in Engineering, Vol. 15, pp. 265-279.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os Autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

PROJECT AND CONSTRUCTION OF AN UNDERWATER ROBOTIC VEHICLE TELEOPERATED VIA INTERNET

Wallace Moreira Bessa

Federal Center of Technological Education – CEFET/RJ
Av. Maracanã, 229 – 20271-110 – Rio de Janeiro, RJ, Brazil
E-mail: wmbessa@cefet-rj.br

Max Suell Dutra

Federal University of Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ – Mechanical Engineering Program
Centro de Tecnologia, Bloco G/204 – 21945-970 – Cidade Universitária, RJ, Brazil

E-mail: max@serv.com.ufrj.br

Edwin Kreuzer

Technical University of Hamburg-Harburg – TUHH – Mechanics and Ocean Engineering
Eissendorfer Strasse 42 – D-21071– Hamburg, Germany
E-mail: kreuzer@tu-harburg.de

Ney Robinson Salvi dos Reis

Petrobras Research Center – CENPES/PETROBRAS
Quadra 7 – 21949-900 – Cidade Universitária, RJ, Brazil
E-mail: salvireis@cenpes.petrobras.com.br

Abstract. *This work describes the development of an underwater robotic vehicle projected to be used as a test-bed for laboratory tests. The vehicle is equipped with a Passive Arm (PA) for position and orientation measurement in the proximity of an underwater structure. Details of the mechanical/electrical subsystems are presented, as well as the developed methodology that makes the control through the Internet possible. Some results are showed to assure the viability of the utilization of the Internet as a transmission media for the control of robotic systems and in conducting remotely experiments.*

Key-words: *ROV, Remotely Operated Vehicle, Robotics, Mechatronics, Internet*