

# AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA MODELAGEM MATEMÁTICA DOS PROPULSORES DE UM VEÍCULO ROBÓTICO SUBMARINO

**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.** *O conhecimento do comportamento dinâmico do sistema de propulsão é de grande importância para a elaboração do sistema de controle de veículos robóticos submarinos. Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento do modelo matemático dos propulsores de um veículo submarino de operação remota (ROV), construído para ser utilizado como plataforma de testes em laboratório. Os parâmetros do modelo foram levantados em um tanque do tipo canal de ondas. Discute-se também a análise dos testes realizados com diferentes tipos de hélice, tendo como objetivo a identificação de qual modelo proporcionaria um melhor desempenho aos propulsores.*

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

## 1. INTRODUÇÃO

Veículos robóticos não tripulados têm desempenhado um importante papel, tanto na pesquisa de fenômenos submarinos, quanto na exploração dos recursos naturais disponíveis nos oceanos. Particularmente no Brasil, aonde 75% de nossas reservas de petróleo estão localizadas em águas profundas (de 400 a 1000 m de profundidade) e ultra-profundas (com profundidade superior a 1000 m)<sup>1</sup>, os ROVs (*Remotely Operated underwater Vehicle*) têm substituído os

---

<sup>1</sup>Fonte: [http://www2.petrobras.com.br/minisite/aguas\\_profundas/importante/ProducaoImportante.stm](http://www2.petrobras.com.br/minisite/aguas_profundas/importante/ProducaoImportante.stm)

mergulhadores nas tarefas de montagem, inspeção e reparo de estruturas *offshore*, quando estas estão situadas em locais que ofereçam risco à vida humana.

Durante a execução de uma determinada tarefa com o ROV, o operador precisa monitorar e controlar uma série de parâmetros. Se alguns destes parâmetros, como por exemplo a posição e a orientação do veículo, forem assistidos automaticamente por um sistema de controle, a teleoperação do ROV pode ser incrivelmente facilitada. O crescente número de trabalhos dedicados ao problema de posicionamento dinâmico de robôs submarinos (Kiriazov et al, 1997; Hsu et al, 2000b; Akkizidis et al, 2003; Zanolì et al, 2003 e Smallwood et al, 2004) confirmam a necessidade de se desenvolver um sistema confiável, capaz de lidar com as incertezas resultantes dos efeitos hidrodinâmicos.

Artigos recentes (Fossen et al, 1991; Whitcomb et al, 1999b e Hus et al, 2000a) destacam a importância de se considerar a dinâmica do sistema de propulsão na modelagem do comportamento dinâmico do veículo como um todo, e por conseguinte na elaboração do seu sistema de controle.

Neste trabalho apresenta-se um modelo não-linear para representar resposta dinâmica dos propulsores de um ROV, denominado AEGIR (*An Experimental General-purpose Internet-based underwater Robot*), desenvolvido para operar como plataforma de testes experimentais (Bessa et al, 2004). O modelo dinâmico considera as características eletromecânicas do motor e incorpora também parâmetros que devem ser levantados experimentalmente para cada propulsor. Este mesmo modelo serve ainda de base para o sistema de controle proposto.

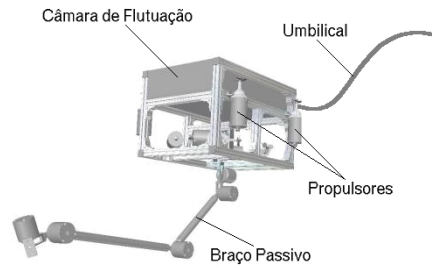


Figura 1: Modelo em CAD do AEGIR, destacando seus principais subsistemas.

## 2. MODELO DINÂMICO DO PROPULSOR

A força de propulsão ( $F_p$ ) produzida por um propulsor marinho em regime permanente é convencionalmente apresentado na literatura como sendo proporcional ao quadrado da velocidade de rotação do hélice ( $\Omega$ ) (Newman, 1986). Esta relação quadrática é aqui convenientemente representada pela Eq. (1).

$$F_p = k\Omega|\Omega| \quad (1)$$

Em Yoerger et al (1990) os autores apresentam um modelo dinâmico não-linear de primeira ordem, utilizando a velocidade de rotação como variável de estado e incorporando a velocidade axial do fluido ( $v_a$ ) no cálculo da força de propulsão. Este modelo pode ser escrito conforme as Eq. (2) e Eq. (3).

$$J_{mh}\dot{\Omega} + k\Omega|\Omega| = Q_m \quad (2)$$

$$F_p = F_p(\Omega, v_a) \quad (3)$$

onde  $J_{mh}$  é o momento inércia do conjunto motor/hélice e  $Q_m$  é o torque fornecido ao motor.

Healey et al (1995) modificaram o modelo proposto em Yoerger et al (1990), apresentando um sistema de segunda ordem, aonde as variáveis de estado são a velocidade de rotação do hélice e a velocidade axial do fluido, possibilitando assim a representação do efeito de sobrepasso do empuxo:

$$J_{mh}\dot{\Omega} + k_1\Omega = Q_m - Q_p \quad (4)$$

$$k_2\dot{v}_a + k_3v_a|v_a| = F_p \quad (5)$$

$$F_p = F_p(\Omega, v_a) \quad (6)$$

$$Q_p = Q_p(\Omega, v_a) \quad (7)$$

Validações experimentais dos modelos citados, Eq. (1), Eq. (2)–(3) e Eq. (4)–(7), bem como comparações dos resultados obtidos com cada bem como comparações dos resultados obtidos com cada um deles, são apresentadas em Whitcomb et al (1999a). Variações do modelo proposto por Healey et al (1995) podem ser encontradas em Fossen (1994), Bachmayer et al (2000), Blanke et al (2000) e Bachmayer et al (2003).

Todos os modelos presentes na literatura, com exceção do modelo estático descrito pela Eq. (1), levam em consideração a velocidade axial do fluido através do hélice. Esta variável, porém, dificilmente pode ser medida com precisão durante operações reais com o ROV, o que compromete a utilização destes modelos no desenvolvimento do sistema de controle dos propulsores.

No entanto, se as seguintes simplificações forem feitas:

1. A magnitude e o sentido da velocidade axial do fluido são decorrentes, principalmente, da velocidade de rotação do hélice.
2. A interferência do fluxo de água de um propulsor sobre o outro pode ser desprezada.
3. A velocidade ambiente da água e a velocidade de manobra do ROV são desprezíveis quando comparadas com a velocidade do fluxo gerado pela rotação do hélice.

pode-se, então representar o empuxo produzido pelos propulsores em função apenas da velocidade de rotação. Esta variável possui a grande vantagem de poder ser facilmente obtida em tempo real, tanto em testes de laboratório, quanto em operações reais com o veículo, através de um encoder acoplado ao eixo do motor.

Deste modo, o propulsor pode ser representado por um modelo dinâmico não-linear de primeira ordem, cuja única variável de estado é a velocidade de rotação  $\Omega$ , e que incorpora as características eletromecânicas do motor. As Eq. (8)–(9) apresentam o modelo proposto.

$$J_{mh}\dot{\Omega} + \left( \frac{k_t k_{emf}}{R_m} + k_{v1} \right) \Omega = \frac{k_t}{R_m} V_m - k_{v2} \Omega |\Omega| \quad (8)$$

$$F_p = k_{p1} \Omega |\Omega| - k_{p2} \operatorname{sgn}(\Omega) \quad (9)$$

onde  $k_t$ ,  $k_{emf}$  e  $R_m$  são respectivamente a constante de torque eletromagnético, a constante de tensão induzida (*back emf constant*) e a resistência de armadura, e podem ser obtidas diretamente no catálogo do fabricante do motor elétrico. Já as constantes  $k_{v1}$ ,  $k_{v2}$ ,  $k_{p1}$  e  $k_{p2}$  devem ser levantadas experimentalmente, pois dependem dos detalhes construtivos de cada propulsor.  $V_m$  é a tensão fornecida para o acionamento do motor.

Os termos  $k_{v1}\Omega$  e  $k_{v2}\Omega|\Omega|$  da Eq. (8) representam o atrito viscoso no eixo do propulsor, e o torque de rotação devido ao carregamento hidrodinâmico no hélice.

O termo  $k_{p2} \operatorname{sgn}(\Omega)$  da Eq. (9) representa o efeito dissipativo gerado pelo fluxo axial da água no hélice. Tendo em vista as simplificações assumidas, considerou-se que o sentido da velocidade axial do fluido dependia exclusivamente do sentido de rotação do eixo ( $\operatorname{sgn}(v_a) = \operatorname{sgn}(\Omega)$ ).

### 3. SISTEMA DE CONTROLE DO PROPULSOR

Baseado modelo dinâmico do propulsor, Eq. (8)–(9), propõem-se também um sistema de controle de malha fechada que utiliza a velocidade de rotação ( $\Omega$ ) como variável de realimentação.

$$\Omega_d = k_{p1}^{-\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(F_d) |F_d + k_{p2} \operatorname{sgn}(F_d)|^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$u = \left( k_{emf} + \frac{R_m k_{v1}}{k_t} \right) \Omega_d + \frac{R_m k_{v2}}{k_t} \Omega_d |\Omega_d| + k_c (\Omega - \Omega_d) \quad (11)$$

onde  $\Omega_d$  é a velocidade de rotação necessária para proporcionar a força de propulsão desejada ( $F_d$ ) e  $u$  é a tensão fornecida ao motor, e representa a variável manipulada do controlador.

Os dois primeiros termos da Eq. (11) são provenientes do modelo dinâmico proposto na Eq. (8), enquanto o último termo,  $k_c(\Omega - \Omega_d)$ , é o responsável pela realimentação do controlador. O ganho de realimentação  $k_c$  deve ser estimado experimentalmente, de modo que a velocidade desejada seja atingida ( $\Omega \rightarrow \Omega_d$ ) o mais rápido possível, sem comprometer porém a estabilidade do sistema.

Este tipo estratégia, baseada no modelo matemático do propulsor, têm se mostrado bastante eficiente no problema de controle de empuxo do sistema de propulsão (Whitcomb et al, 1995; Whitcomb et al, 1999b e Bachmayer, 2001).

### 4. TESTE DOS PROPULSORES E ESCOLHA DO HÉLICE

Para a realização dos testes com o propulsor foi montado um aparato experimental em um tanque de água, do tipo canal de ondas. Um esquema básico do dispositivo de testes é apresentado na Fig. (2).

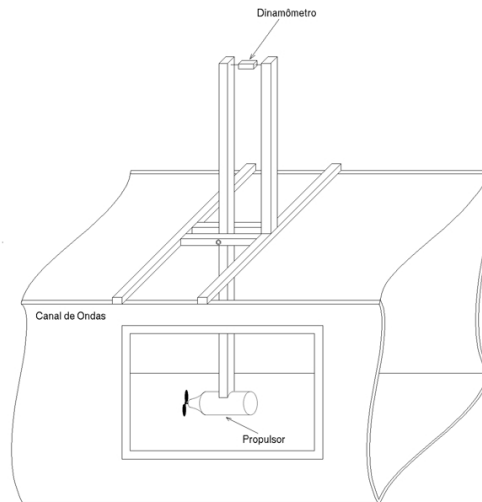


Figura 2: Esquema do aparato experimental montado para o teste com o propulsor.

O aparato consiste de um pêndulo rotulado, no qual em uma extremidade fixou-se o propulsor e na extremidade oposta um dinamômetro para a medição do empuxo produzido. Além do empuxo, monitorou-se também a velocidade de rotação do hélice, a corrente elétrica e a voltagem fornecida ao motor.

Estes testes tiveram como objetivo, a obtenção experimental dos parâmetros do modelo e avaliação do desempenho do propulsor com diferentes tipos de hélice, possibilitando a escolha de um hélice que proporcionasse a melhor performance. A Fig. (3) mostra o propulsor antes de sua montagem final.



Figura 3: Montagem do propulsor.

O propulsor é composto por um motor de 24 V e 90 W da empresa alemã Faulhaber (Modelo 3863 H 024 C) e um encoder ótico digital com 2 canais defasados de 500 pulsos por rotação e 1 canal com 1 pulso por rotação (*index*), também da Faulhaber (Modelo HEDS 5540 A).

Foram testados 6 tipos de hélice, cada um deles apresentando características (diâmetro, passo e nº de pás) diferentes dos demais. A Fig. (4) mostra uma foto dos hélices testados, e um resumo de suas principais características são apresentados na Tab. (1).

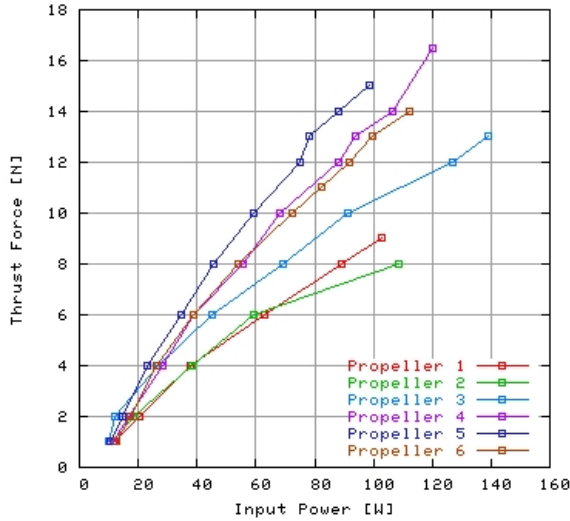


Figura 4: Hélices testados

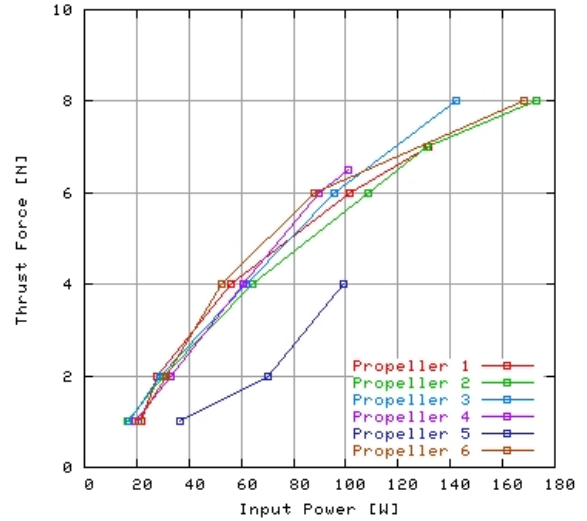
Tabela 1: Resumo das características dos hélices testados.

Hélice	Nº de Pás	Diâmetro	Fabricante
1	4	80 mm	Krick
2	3	80 mm	Krick
3	3	70 mm	Krick
4	4	70 mm	Graupner
5	3	65 mm	Graupner
6	2	60 mm	Graupner

Para avaliar a performance do conjunto motor/hélice, foi-se gradativamente aumentando a tensão ( $V_m$ ) fornecida ao motor, e a cada aumento de tensão mediu-se os valores da corrente elétrica ( $i_m$ ) e da velocidade de rotação ( $\Omega$ ). Estes valores são aqui apresentados em gráficos, sob a forma Potência ( $P = V_m \cdot i_m$ )  $\times$  Empuxo ( $F_p$ ), exibidos na Fig. (5).



(a) Empuxo obtido no modo direto.



(b) Empuxo obtido no modo reverso.

Figura 5: Empuxo  $\times$  Potência fornecida ao motor. Resultados experimentais.

Pode-se verificar através dos gráficos que o empuxo produzido no sentido reverso é bem inferior ao produzido no sentido direto. Isto ocorre devido a característica assimétrica dos hélices, pois estes possuem um sentido preferencial de rotação.

Aliás, para escolha do modelo que equipa o sistema de propulsão levou-se em consideração a necessidade do hélice ser fabricado nos dois sentidos preferenciais de rotação, direito e esquerdo. Esta condição visa minimizar o efeito sobre o veículo do torque produzido pelo hélice.

Após a realização dos testes verificou-se que o fabricante não dispunha dos modelos 4 e 6 com sentido preferencial de rotação contrário ao testado, impossibilitando assim que estes modelos fossem escolhidos.

Deste modo, optou-se pelo hélice nº 5, pois além deste modelo estar disponível pelo fabricante nos dois sentidos de rotação, ele foi um dos que apresentou melhor desempenho nos testes realizados (ver Fig. (5)).

## 5. OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DO MODELO

Para a obtenção dos parâmetros  $k_{v1}$ ,  $k_{v2}$ ,  $k_{p1}$  e  $k_{p2}$  do modelo matemático do propulsor, Eq. (8)–(9), foram utilizados os dados experimentais obtidos durante os testes com o propulsor, descritos na Seção 4.

Os parâmetros supracitados foram calculados através de uma implementação do algoritmo de Levenberg–Marquadt. Este método iterativo pode ser aplicado para a solução de problemas não-lineares do tipo mínimos quadrados (Jang et al, 1997).

A Tab. (2) apresenta os parâmetros obtidos, tanto para o modo de operação direto, quanto para o modo reverso. Ressalta-se mais uma vez que esta diferença é decorrente da característica assimétrica dos hélices.

Tabela 2: Parâmetros obtidos experimentalmente.

Parâmetro	Valor	Unidade	Modo de operação
$k_{p1}$	$9,40 \times 10^{-5}$	$N \cdot s^2 / rad^2$	Direto
$k_{p2}$	1,84	$N$	Direto
$k_{v1}$	$1,73 \times 10^{-5}$	$Nm \cdot s^2 / rad^2$	Direto
$k_{v2}$	0,042	$Nm \cdot s / rad$	Direto
$k_{p1}$	$2,12 \times 10^{-5}$	$N \cdot s^2 / rad^2$	Reverso
$k_{p2}$	1,89	$N$	Reverso
$k_{v1}$	$1,08 \times 10^{-5}$	$Nm \cdot s^2 / rad^2$	Reverso
$k_{v2}$	0,039	$Nm \cdot s / rad$	Reverso

As Fig. (6) e (7) apresentam uma comparação do modelo resultante (linha sólida) com os dados experimentais obtidos.

Os parâmetros  $R_m$ ,  $k_t$  e  $k_{emf}$  empregados na simulação, foram extraídos diretamente do catálogo do fabricante do motor e podem ser visualizados na Tab. (3).

Tabela 3: Parâmetros obtidos no catálogo do fabricante do motor.

Parâmetro	Valor	Unidade
$R_m$	0,62	$\Omega$
$k_t$	$3,33 \times 10^{-2}$	$N \cdot m / A$
$k_{emf}$	$3,33 \times 10^{-2}$	$V \cdot s / rad$

## 6. CONCLUSÕES

Neste artigo propôs-se um modelo dinâmico não-linear para a representação matemática do sistema de propulsão de um veículo robótico submarino, denominado AEGIR. O modelo considera as características eletromecânicas do propulsor e utiliza apenas a velocidade de rotação do hélice como variável de estado. Por ser de fácil medição, inclusive em operações reais com o ROV, a velocidade de rotação foi adotada também como variável de realimentação para o sistema de controle também proposto neste trabalho.

Os parâmetros do modelo matemático foram obtidos experimentalmente a partir do método dos mínimos quadrados, mas especificamente o Método de Levenberg-Marquadt, por ser um algoritmo para a solução iterativa de problemas não-lineares.

Baseado nos resultados experimentais, foi ainda possível, determinar o hélice mais adequado ao sistema de propulsão do AEGIR.

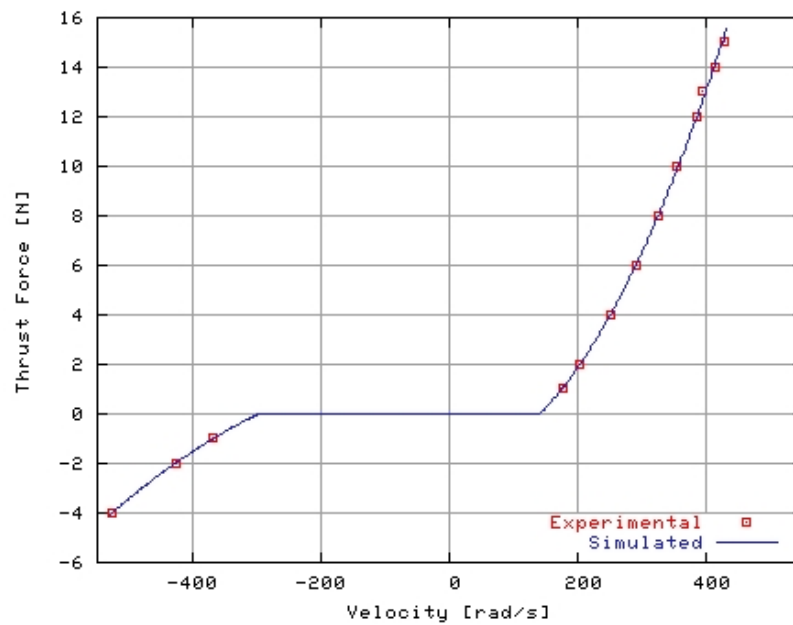


Figura 6: Empuxo  $\times$  Velocidade de rotação. Resultados experimentais e simulados.

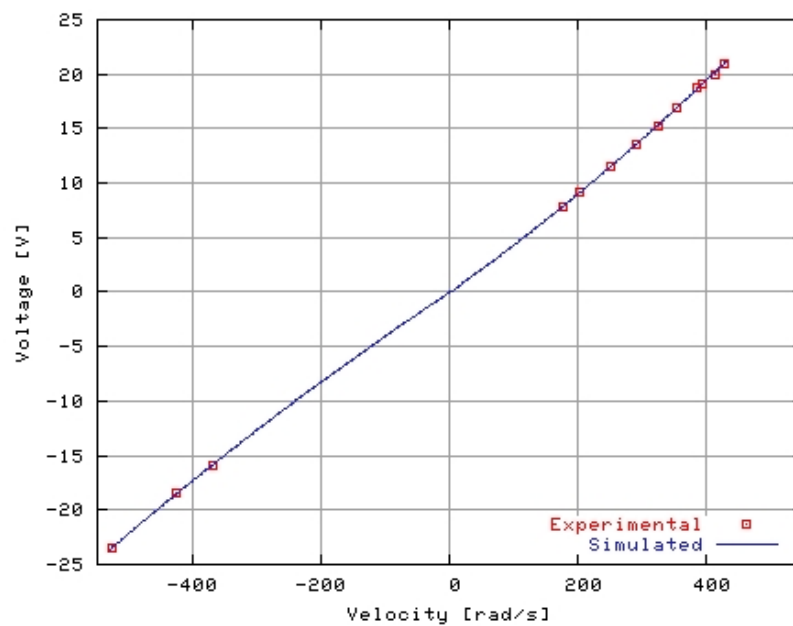


Figura 7: Voltagem  $\times$  Velocidade de rotação. Resultados experimentais e simulados.

## 7. AGRADECIMENTOS

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



## 8. REFERÊNCIAS

- Akkizidis, I., Roberts, G., Ridao, P. and Batlle, 2003, "Designing a Fuzzy-like PD Controller for an Underwater Robot", *Control Engineering Practice*, Vol. 11, pp. 471-480.
- Bachmayer, R. and Whitcomb, L., 2001, "A Nonlinear Model Based Thrust Controller for Marine Thrusters", *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Hawaii, USA, pp. 1817-1823.
- Bachmayer, R. and Whitcomb, L., 2003, "Adaptive Parameter Identification of an Accurate Nonlinear Dynamic Model for Marine Thrusters", *ASME – Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 125, No. 3, pp. 491-494.
- Bachmayer, R., Whitcomb, L.L. and Grosenbaugh, M.A., 2000, "An Accurate Four-Quadrant Nonlinear Dynamic Model for Marine Thrusters: Theory and 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, "Projeto e Construção de um Veículo Robótico Submarino Teleoperado via Internet", *Proceedings of the 3rd National Congress of Mechanical Engineering*, Belém, Brazil.
- Blanke, M., Lindegaard, K.-P. and Fossen, T.I., 2000, "Dynamic Model for Thrust Generation of Marine Propellers", *Proceedings of the 5th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft (MCMC'2000)*, Aalborg, Denmark, pp. 363-368.
- Fossen, T.I., 1994, "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons.
- Fossen, T.I and Balchen, J.G., 1991, "The NEROV Autonomous Underwater Vehicle", *Proc. of the OCEANS'91 Conference*, Honolulu, USA.
- Healey, A.J., Rock, S.M., Cody, S., Miles, D. and Brown, J.P., 1995, "Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 354-361.
- Hsu, L., Costa, R.R., Lizarralde, F. and Da Cunha, J.P.V.S., 2000a, "Avaliação Experimental da Modelagem e Simulação da Dinâmica de um Veículo Submarino de Operação Remota", *Revista Controle e Automação*, Vol. 11, No. 2, pp. 82-93.
- Hsu, L., Costa, R.R., Lizarralde, F. and Da Cunha, J.P.V.S., 2000b, "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.
- Kiriazov, P., Kreuzer, E. and Pinto, F.C., 1997, "Robust Feedback Stabilization of Underwater Robotic Vehicles", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 21, pp. 415-423.
- Newman, J.N., 1986, "Marine Hydrodynamics", MIT Press, Massachusetts, 5th Edition.
- Smallwood, D.A. and Whitcomb, L., 2004, "Model-based Dynamic Positioning of Underwater Robotic Vehicles: Theory and Experiment", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, No. 1.
- Whitcomb, L. and Yoerger, D., 1995, "Comparative Experiments in the Dynamics and Model Based Control of Marine Thrusters", *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS'95 Conf.*, San Diego, USA.
- Whitcomb, L. and Yoerger, D., 1999a, "Development, Comparison, and Preliminary Exp. Validation of Non-linear Dynamic Thruster Models", *IEEE J. of Oceanic Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 481-494.
- Whitcomb, L. and Yoerger, D., 1999b, "Preliminary Experiments in Model-Based Thruster Control for Underwater Vehicle Positioning", *IEEE J. of Oceanic Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 495-506.
- Yoerger, D.R., Cooke, J.G. and Slotine, J.-J.E., 1990, "The Influence of Thruster Dynamics on

Underwater Vehicle Behavior and their Incorporation into Control System Design”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 167-178.  
Zanoli, S.M. and Conte, G., 2003, “Remotely Operated Vehicle Depth Control”, Control Eng. Practice, Vol. 11, pp. 453-459.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

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

# EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE MATEMATICAL MODELING OF THE THRUSTERS OF AN UNDERWATER ROBOTIC VEHICLE

### 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.** *The understanding of the dynamical behavior of the thruster system is vitally important for the development of the control system of underwater robotic vehicles. This paper presents the development of the mathematical model of the thrusters of a ROV (Remotely Operated Underwater Vehicle), built to be used in laboratory tests. The model parameters were experimentally obtained in a wave tank. The tests carried out with many different propellers, for the identification of which propeller increases the thrusters efficiency, are also reported.*

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