

# **UM ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO DINÂMICO DE DIFERENTES TIPOS DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS**

**Adilson Melcheque Tavares**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas - CEFET RS, Coordenadoria de Eletrotécnica, Praça Vinte de setembro, 455 - CEP 96015-360, Pelotas, RS, Brasil, adilson@cefetrs.tche.br.

**Sebastião Cícero Pinheiro Gomes**

Fundação Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Departamento de Matemática, Av. Itália, Km 8, CEP 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil, dmtscpg@furg.com.

**Mauro André Barbosa Cunha**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas - CEFET RS, Coordenadoria de Eletrônica, Praça Vinte de setembro, 455 - CEP 96015-360, Pelotas, RS, Brasil, mauro@cefetrs.tche.br.

**Resumo.** *Este artigo descreve a modelagem de veículos subaquáticos incluindo cinemática, dinâmica da interação entre o fluido e a estrutura mecânica do veículo e também a dinâmica dos atuadores. São analisados diversos aspectos dinâmicos dos veículos subaquáticos, análise esta relativa aos efeitos de inércia, arrasto, sustentação, torques restauradores e propulsores, de forma a discernir sobre os seus respectivos comportamentos dinâmicos em malha aberta. Apresentam-se ao final resultados de simulações em malha aberta para dois veículos subaquáticos que possuem diferentes características construtivas: NEROV (Norwegian Experimental Remotely Operated Vehicle) e REMUS (Remote Environmental Monitoring Unit, MIT, USA).*

**Palavras-chave:** veículos subaquáticos, modelagem, cinemática, dinâmica.

## **1. INTRODUÇÃO**

Os Veículos subaquáticos não tripulados são de grande utilidade para a realização de tarefas tais como: inspeção de plataformas de exploração de petróleo; inspeção de barragens e tubulações subaquáticas; substituição de mergulhadores em tarefas de manutenção com algum risco à vida humana. Acreditamos ser de fundamental importância o domínio desta tecnologia, principalmente em razão dos altos custos envolvidos na importação de veículos operados remotamente (Remotely Operated Vehicles - ROVs) ou veículos subaquáticos autônomos (Autonomous Underwater Vehicles - AUVs). Objetivando a realização de um projeto visando a construção de um ROV na Região Sul do Brasil, deu-se início a um estudo detalhado sobre a cinemática e a dinâmica de veículos subaquáticos.

Em Tavares (2003) encontra-se uma apresentação do estado da arte na área de robótica subaquática. Observa-se que os trabalhos dedicados à análise da dinâmica dos veículos subaquáticos são muito raros, sendo que a maioria das publicações trata especificamente do desenvolvimento de leis de controle. Assim, este trabalho é dedicado ao estudo da modelagem e à análise da dinâmica dos veículos subaquáticos.

O artigo está dividido da seguinte forma: a seção dois descreve a modelagem cinemática com o uso de ângulos de Euler; a seção três apresenta a modelagem dinâmica dos propulsores e da interação entre fluido e estrutura; na seção quatro estão descritos dois veículos subaquáticos, o

Nerov e o Remus; a seção cinco apresenta resultados de simulações em malha aberta; a seção seis apresenta as conclusões finais.

## 2. CINEMÁTICA

Na modelagem de veículos subaquáticos trabalha-se com dois sistemas de referência: um fixo ao veículo (referencial do corpo,  $X_0Y_0Z_0$ ) e outro fixo a um ponto da terra (referencial inercial, XYZ). Com isto, a dinâmica é modelada no referencial do corpo. Durante as simulações, em cada passo de integração das equações diferenciais, efetuam-se transformações para o referencial inercial. D'souza e Garg (1984) apontam, como uma vantagem deste procedimento, o fato dos momentos de inércia do veículo permanecerem constantes em relação ao referencial do corpo para qualquer orientação do veículo. Além disso, a redução de ordem necessária para a solução numérica das equações diferenciais representativas da dinâmica do veículo já é feita automaticamente durante a modelagem. Assim, a dinâmica do veículo com seis graus de liberdade não é modelada por seis equações diferenciais de segunda ordem, mas por doze equações diferenciais de primeira ordem.

Na Fig. (1), segundo notação SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers), estabelecida em 1950, tem-se que:  $u$  é a componente da velocidade linear na direção  $X_0$  (eixo longitudinal), movimento de avanço (*surge*);  $v$  é a componente da velocidade linear na direção  $Y_0$  (eixo transversal), movimento de balanço (*sway*);  $w$  é a componente da velocidade linear na direção  $Z_0$  (eixo normal), movimento de oscilação (*heave*);  $p$  é a componente da velocidade angular na direção  $X_0$ , movimento de rolamento (*roll*);  $q$  é a componente da velocidade angular na direção  $Y_0$ , movimento de arfagem (*pitch*);  $r$  é a componente da velocidade angular na direção  $Z_0$ , movimento de guinada (*yaw*).

A velocidade linear ( $\mathbf{v}_1$ ) e a velocidade angular ( $\mathbf{v}_2$ ) podem ser expressas na forma vetorial:

$$\mathbf{v}_1 = [u, v, w]^T, \quad \mathbf{v}_2 = [p, q, r]^T \quad \text{e} \quad \mathbf{v} = [\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T]^T$$

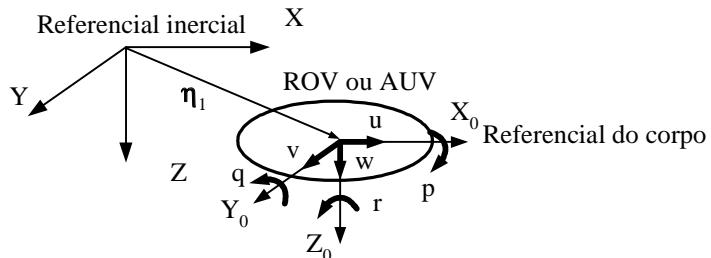


Figura 1. Referencial inercial e referencial do corpo.

Os vetores de posição ( $\eta_1$ ) e de orientação ( $\eta_2$ ) do veículo são expressos no referencial inercial por:  $\eta_1 = [x, y, z]^T$ ;  $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ ;  $\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T$ ; onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  indicam a posição da origem do referencial do corpo expressa no referencial inercial e  $\phi, \theta$  e  $\psi$  são os ângulos de Euler, que indicam a orientação do veículo no referencial inercial. A orientação também pode ser expressa por parâmetros de Euler (quaternions) ou por parâmetros de Euler-Rodrigues (Tavares, 2003). Neste trabalho adota-se Ângulos de Euler por serem mais intuitivos que os demais métodos.

Trabalhando-se com ângulos de Euler, a transformação é obtida a partir de uma seqüência de rotações em torno de cada um dos eixos coordenados. Com isto, gera-se uma matriz de transformação cujos elementos são funções trigonométricas dos ângulos de orientação do corpo rígido. Multiplicando-se a matriz de transformação pelo vetor expresso num referencial, obtém-se a representação deste vetor noutro referencial:

$$\dot{\eta}_1 = \mathbf{J}_1(\eta_2)\mathbf{v}_1 \quad (1)$$

$$\dot{\eta}_2 = \mathbf{J}_2(\eta_2)\mathbf{v}_2 \quad (2)$$

onde  $\dot{\eta}_1$  é a velocidade linear expressa no referencial inercial e  $\dot{\eta}_2$  é a taxa de variação dos ângulos de Euler,  $\mathbf{J}_1(\eta_2)$  é a matriz de transformação da velocidade linear e  $\mathbf{J}_2(\eta_2)$  é a matriz de transformação da velocidade angular. As composições das matrizes de transformação são encontradas em Fossen (1994) e Tavares (2003).

A desvantagem da utilização dos ângulos de Euler é que a matriz  $\mathbf{J}_2(\eta_2)$  não é definida para  $\theta = \pm 90^\circ$ , o que representa o veículo subindo ou descendo com seu eixo longitudinal disposto na posição vertical. Porém, isto não chega a ser problema uma vez os veículos subaquáticos normalmente são projetados para operar longe desta singularidade. A utilização de quaternions não apresenta esta limitação.

A Eq. (1) e a Eq. (2) podem ser agrupadas, de forma a obter-se simultaneamente a transformação da velocidade linear e da velocidade angular:

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}(\eta_2)\mathbf{v} \quad (3)$$

onde  $\dot{\eta} = [\dot{\eta}_1^T, \dot{\eta}_2^T]^T$ ,  $\mathbf{J}(\eta_2) = \text{diag}[\mathbf{J}_1(\eta_2), \mathbf{J}_2(\eta_2)]$  e  $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T]^T$

### 3. DINÂMICA

As equações dinâmicas de movimento do veículo, com seis graus de liberdade, podem ser obtidas através do Formalismo Newtoniano (Fossen, 1984; Dominguez, 1989) e expressas na forma matricial-vetorial como:

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \sum \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

onde, no referencial do corpo,  $\dot{\mathbf{v}}$  é o vetor aceleração,  $\mathbf{v}$  é o vetor velocidade,  $\sum \boldsymbol{\tau}$  é o vetor resultante de todas as forças e momentos aplicados no veículo,  $\mathbf{M}_{RB}$  é a matriz de inércia do corpo rígido e  $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$  é a matriz Coriolis e centrípeta do corpo rígido.

O veículo subaquático está sob a ação das seguintes forças (e momentos associados): massa adicional; restauradora (peso e empuxo); arrasto e sustentação; propulsão e controle. Além destas, existem ainda a força de Froude-Kriloff (causada pela ação da onda oceânica sobre o veículo) e a força devida à tração do cabo umbilical. No presente artigo, os veículos são considerados como sendo autônomos (sem cabo), deslocando-se em meio aquático sem ondas. Portanto, as duas últimas forças citadas anteriormente são inexistentes na dinâmica dos veículos estudados.

Inicialmente, desconsiderando o efeito da corrente marinha, tem-se:

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_A + \boldsymbol{\tau}_{WB} + \boldsymbol{\tau}_{DL} + \boldsymbol{\tau} \quad (5)$$

onde, no lado direito da igualdade, tem-se os vetores de forças e momentos de massa adicional ( $\boldsymbol{\tau}_A$ ), restauradores ( $\boldsymbol{\tau}_{WB}$ ), de arrasto e sustentação ( $\boldsymbol{\tau}_{DL}$ ) e de propulsão e controle ( $\boldsymbol{\tau}$ ).

A força de massa adicional manifesta-se sempre que o veículo acelera-se com relação ao fluido, devendo-se esta força à inércia do volume de fluido deslocado com o movimento do veículo. Ela pode ser obtida a partir da energia cinética do fluido deslocado pelo veículo e com o auxílio das equações de Kirchhoff, resultando na seguinte equação matricial-vetorial (Fossen, 1994):

$$\boldsymbol{\tau}_A = -\mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}} - \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v} \quad (6)$$

onde  $\mathbf{M}_A$  e  $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$  são, respectivamente, a matriz de inércia e a matriz de Coriolis e centrípeta associadas à massa adicional.

As forças de peso e empuxo dependem da massa e do volume do corpo, da massa específica do fluido e da aceleração da gravidade. Elas atuam sempre na direção vertical do referencial inercial e possuem sentidos contrários. Contudo, estas forças podem ter componentes nos três eixos do referencial do corpo, geradas pelos movimentos de rolamento e arfagem do veículo. Os momentos produzidos por peso e empuxo dependem das posições do centro de gravidade e do centro de empuxo em relação à origem do referencial do corpo. Como o centro de gravidade é projetado para ficar um pouco abaixo do centro de flutuação, os momentos produzidos por peso e empuxo atuam sempre no sentido de tentar trazer os ângulos de rolamento e de arfagem para zero. Assim, o vetor de forças e momentos devido ao peso e ao empuxo é denominado de vetor de forças restauradoras ( $\tau_{WB}$ ). Normalmente, o empuxo é um pouco maior do que o peso, de forma que na ocorrência de qualquer falha do sistema de controle o veículo desloque-se para a superfície (Prester, 2001).

As forças de arrasto e sustentação e os momentos associados são modelados de diferentes maneiras (Dominguez, 1989; Fossen, 1994; Conte e Serrani, 1996). Estas forças são não lineares e acopladas e variam com o ângulo de ataque e com o número de Reynolds. Se o veículo possuir aproximadamente três planos de simetria e deslocar-se com baixa velocidade pode-se desprezar o acoplamento hidrodinâmico e considerar-se apenas o efeito de amortecimento causado pelo fluido. Assim, o vetor de forças e momentos de amortecimento pode ser expresso por (Fossen, 1994):

$$\tau_{DL} = -\mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} \quad (7)$$

onde  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  é a matriz de amortecimento.

Assumindo-se que  $\mathbf{g}(\eta_2) = -\tau_{WB}$  e substituindo-se a Eq. (6) e a Eq. (7) na Eq. (5), obtém-se a equação diferencial que descreve a dinâmica da interação entre fluido e estrutura:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\eta_2) = \boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

onde  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$  e  $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A$ . A composição destas matrizes, bem como do vetor de forças restauradoras, é apresentada por Tavares (2003).

Fossen (1994) demonstra que para levar em consideração a corrente marinha basta trabalhar, na Eq. (8), com a velocidade do veículo em relação à água ( $\mathbf{v}_r$ ), dada por:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_C \quad (9)$$

onde  $\mathbf{v}_C$  é a velocidade da corrente marinha expressa no referencial do corpo.

Finalmente, o modelo dinâmico com corrente marinha é expresso por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\eta_2) = \boldsymbol{\tau} \quad (\text{modelo dinâmico}) \quad (10)$$

Isolando-se o vetor velocidade ( $\mathbf{v}$ ) na Eq. (9) e substituindo-o na Eq.(3), obtém-se:

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}(\eta_2)\mathbf{v}_r + \mathbf{v}_c^E \quad (\text{modelo cinemático}) \quad (11)$$

onde  $\mathbf{v}_c^E$  é a velocidade da corrente no referencial inercial.

A propulsão de muitos veículos subaquáticos é feita por hélices acionados por motores de corrente contínua, que podem girar em qualquer sentido de rotação e com velocidade controlada através da alimentação do motor (Fossen, 1994). Além dos propulsores, muitos veículos possuem lemes de controle. O controle de trajetória pode ser feito somente através dos propulsores ou pode-se utilizar também os lemes. No segundo caso, obtém-se um menor consumo de energia do que no primeiro caso.

Em Hsu *et al.* (2000) encontra-se uma descrição detalhada da modelagem estática e dinâmica dos propulsores, incluindo o levantamento experimental de parâmetros. O empuxo ( $F_{pi}$ ) e o torque ( $M_{pi}$ ) desenvolvidos pelo propulsor de número  $i$  são expressos por:

$$F_{pi} = C_T(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_{wi}^2 + (0,7\pi n_i D)^2] \pi D^2 \quad (12)$$

$$M_{pi} = C_Q(\sigma) \frac{\rho}{8} [v_{wi}^2 + (0,7\pi n_i D)^2] \pi D^3 \quad (13)$$

Nestas equações,  $C_T$  e  $C_Q$  são coeficientes expressos em função do ângulo de avanço:

$$\sigma = \tan^{-1} \left( \frac{v_{wi}}{0,7\pi n_i D} \right) \quad (14)$$

onde  $v_{wi}$  é a velocidade com que a água entra no hélice,  $D$  é o diâmetro do hélice e  $n_i$  é o número de rotações por segundo.

A velocidade de entrada de água no hélice ( $v_w$ ) é considerada igual à componente da velocidade relativa do veículo paralela à linha de ação do hélice. Por exemplo, para os hélices que atuam na direção  $X_0$ , a velocidade de entrada da água é igual à componente de velocidade relativa na direção  $X_0$ . Porém, observa-se que a parcela de propulsão associada à velocidade de entrada de água nos hélices é bem menor do que a parcela devida à rotação dos hélices (Fossen, 1994; Conte e Serrani, 1996; Antonelli *et al.*, 2001). Assim, tomando-se  $\sigma = 0^\circ$ , a Eq. (12) e a Eq. (13) podem ser expressas como:

$$T = T_{|n|n} |n|n \quad (15)$$

$$Q = Q_{|n|n} |n|n \quad (16)$$

onde  $T_{|n|n} = C_T(0^\circ) \rho (0,7)^2 \pi^3 D^4 / 8$  é o coeficiente de empuxo e  $Q_{|n|n} = C_Q(0^\circ) \rho (0,7)^2 \pi^3 D^5 / 8$  é o coeficiente de torque, ambos com o fluxo axial de água no hélice desprezado.

A equação diferencial matricial-vetorial para a dinâmica dos propulsores pode ser representada por (Tavares, 2003):

$$\dot{\mathbf{P}}\dot{\mathbf{n}} = \boldsymbol{\tau}_m - \boldsymbol{\tau}_r \quad (17)$$

onde  $\mathbf{P}$  é uma matriz diagonal contendo os momentos de inércia dos propulsores,  $\dot{\mathbf{n}}$  é o vetor aceleração angular dos hélices,  $\boldsymbol{\tau}_m$  é o vetor de torques motores e  $\boldsymbol{\tau}_r$  é o vetor de torques resistentes.

## 4. VEÍCULOS ANALISADOS

Neste trabalho são analisados os seguintes veículos subaquáticos: Nerov e Remus (Fig.2). A diferença entre os dois casos está basicamente no vetor de forças e momentos de propulsão e controle.

### 4.1. Nerov

O Nerov (*Norwegian Experimental Remotely Operated Vehicle*) é um veículo autônomo do tipo *open frame*. Ele foi projetado e construído pelo Departamento de Engenharia Cibernética do

Instituto Norueguês de Tecnologia (NTH), com o intuito de desenvolver e testar algoritmos de controle para veículos subaquáticos (Fossen e Balchen, 1991; Tavares, 2003).

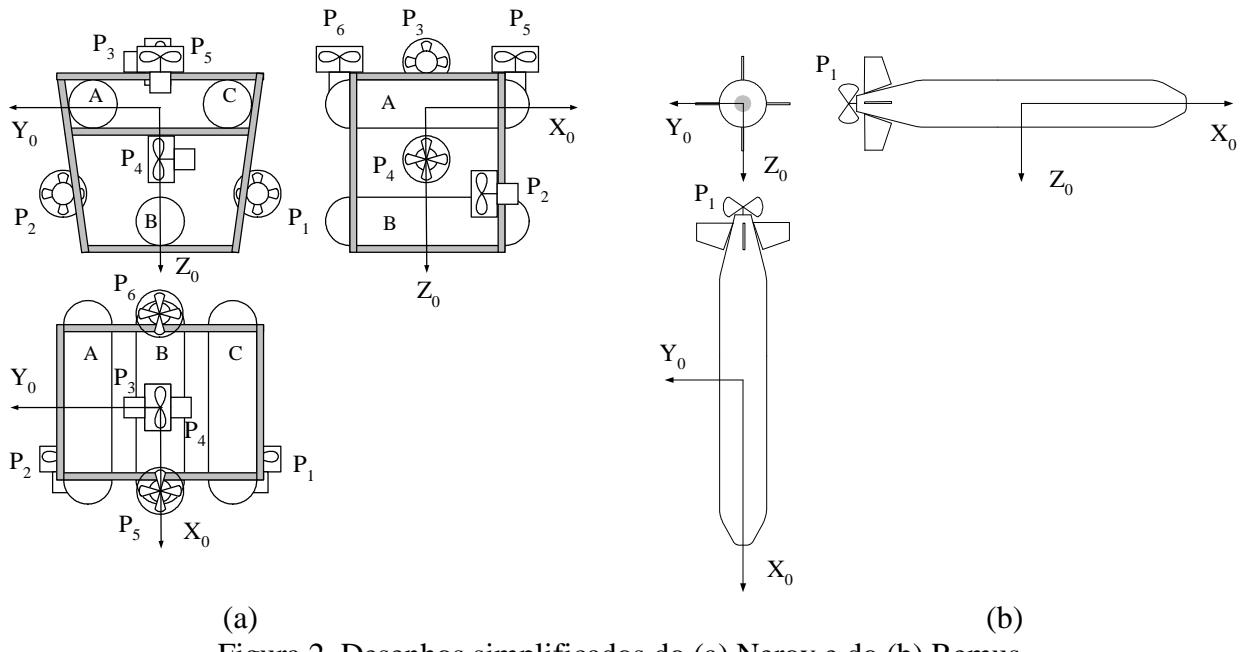


Figura 2. Desenhos simplificados do (a) Nerov e do (b) Remus.

O veículo possui três compartimentos (A, B e C) para a acomodação das baterias, sensores e sistema computacional. As baterias estão acondicionadas no compartimento inferior (B), com o objetivo de deslocar o centro de gravidade para abaixo do centro de empuxo.

A propulsão é feita por seis motores de corrente contínua de ímãs permanentes (24V/400W) diretamente acoplados aos hélices. Assim, pode-se controlar os seis graus de liberdade do veículo.

O vetor de forças e momentos de propulsão pode ser escrito na seguinte forma matricial-vetorial (Tavares, 2003):

$$\tau = \mathbf{Bu} \quad (18)$$

O vetor de controle  $\mathbf{u}$  e a matriz de propulsão  $\mathbf{B}$  são, respectivamente:

$$\mathbf{u} = [n_1|n_1|, n_2|n_2|, n_3|n_3|, n_4|n_4|, n_5|n_5|, n_6|n_6|]^T \quad (19)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} T_{|n|n} & -T_{|n|n} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{|n|n} & T_{|n|n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{|n|n} & -T_{|n|n} \\ Q_{|n|n} & Q_{|n|n} & -z_{p3}T_{|n|n} & -z_{p4}T_{|n|n} & y_{p5}T_{|n|n} & -y_{p6}T_{|n|n} \\ z_{p1}T_{|n|n} & -z_{p2}T_{|n|n} & Q_{|n|n} & -Q_{|n|n} & -x_{p5}T_{|n|n} & x_{p6}T_{|n|n} \\ -y_{p1}T_{|n|n} & y_{p2}T_{|n|n} & x_{p3}T_{|n|n} & x_{p4}T_{|n|n} & Q_{|n|n} & Q_{|n|n} \end{bmatrix} \quad (20)$$

onde  $x_{pi}$ ,  $y_{pi}$  e  $z_{pi}$  são as coordenadas do centro de empuxo do propulsores. As Eq. (18), (19) e (20) mostram que as forças e momentos de propulsão são funções das rotações dos hélices.

## 4.2. Remus

O REMUS (*Remote Environmental Monitoring Unit*) é um veículo autônomo, desenvolvido no WHOI (*Woods Hole Oceanographic Institution*). Este veículo é utilizado pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) para pesquisas oceanográficas e também para a identificação de minas em

águas rasas (Prester, 2001; Fodrea, 2002; Tavares, 2003). O Remus tem um formato semelhante ao de um torpedo. Trata-se de um veículo de baixo custo e de fácil transporte, já que seu comprimento é de aproximadamente 1,5 m, com diâmetro de 20 cm e massa em torno de 30 Kg.

O veículo possui apenas um propulsor, de modo que as manobras são executadas pela ação de dois lemes, um vertical e outro horizontal, localizados na parte traseira do veículo. Os ângulos de ação dos lemes podem variar de 0° a ±90°. Com a utilização de lemes no lugar de outros propulsores obtém-se maior durabilidade da bateria que, por sua vez, permite missões de longo alcance. Porém, devido ao reduzido número de atuadores (1 propulsor e 2 lemes), não é possível controlar diretamente os seis graus de liberdade.

A matriz de propulsão e o vetor de controle para o Remus são:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} T_{|n|n} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{uu\delta_r} u^2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{uu\delta_s} u^2 \\ Q_{|n|n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{uu\delta_s} u^2 \\ 0 & N_{uu\delta_r} u^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{u} = [n_1 | n_1 |, \delta_r, \delta_s]^T \quad (22)$$

A notação usada na Eq. (21) e na Eq. (22) é a seguinte:  $\delta_r$  é o ângulo do leme vertical e  $\delta_s$  é o ângulo do leme horizontal;  $u$  é a componente de velocidade do veículo na direção  $X_0$ ;  $Y_{uu\delta_r}$  e  $N_{uu\delta_r}$  são coeficientes que determinam a influência do ângulo do leme vertical, respectivamente, na força de propulsão na direção  $Y_0$  e no momento de propulsão em torno de  $Z_0$ ;  $Z_{uu\delta_s}$  e  $M_{uu\delta_s}$  são coeficientes que determinam a influência do ângulo do leme horizontal, respectivamente, na força de propulsão na direção  $Z_0$  e no momento de propulsão em torno de  $Y_0$ .

## 5. SIMULAÇÕES EM MALHA ABERTA

### 5.1. Nerov

A Fig. (3) mostra o comportamento do Nerov com os propulsores 1 e 2 acionados da seguinte forma: nos 20 s iniciais o propulsor 1 é alimentado com 8 V e o propulsor 2 é alimentado com -8V; no intervalo entre 20 s e 40 s, os dois propulsores são desligados; no intervalo entre 40 s e 60 s, o propulsor 1 é alimentado com -8 V enquanto que o propulsor 1 é alimentado com 8 V; em t=60 s os propulsores são desligados. Como os propulsores 1 e 2 atuam na direção  $X_0$  do referencial do corpo, a velocidade em  $X_0$  cresce até estabilizar-se em 0,2 m/s (Fig.3b), quando a força de propulsão é equilibrada pela força de arrasto. Devido aos propulsores 1 e 2 estarem localizados abaixo da origem do referencial do corpo, eles também produzem um momento em torno de  $Y_0$ . Com isto, o ângulo de arfagem cresce positivamente até que o momento produzido pelos propulsores seja equilibrado pelos momentos de amortecimento e restauradores (Fig.3d). Assim, o ângulo de arfagem estabiliza-se, após certa oscilação, em, aproximadamente, 8 graus. Portanto, além de deslocar-se à frente, na direção X do referencial inercial, o Nerov também se movimenta em direção a superfície, na direção Z do referencial inercial (Fig.3c), devido à pequena inclinação em arfagem. A tensão aplicada aos propulsores (8 V) é pequena em relação ao valor nominal (24 V), acarretando baixa rotação nos hélices e, em consequência, deslocamento lento do veículo. A inversão do sentido de rotação dos hélices produz movimento à ré, com dinâmica semelhante àquela apresentada no movimento de avanço. Apesar do ângulo de guinada ser negativo, o Nerov continua deslocando-se à superfície, pois a velocidade na direção  $X_0$  é negativa. Quando os propulsores são desligados, a

velocidade passa a diminuir até que o veículo pára. Os momentos restauradores fazem com que o ângulo de arfagem caia para zero, ou seja, o veículo retorna à orientação inicial.

Observa-se na Fig. (3a), que apresenta a tensão aplicada ao propulsor 1 e rotação desenvolvida, que a dinâmica dos atuadores é bastante rápida pois praticamente não existe diferença entre as duas curvas, a não ser pelas amplitudes das mesmas. A dinâmica associada ao movimento de translação do veículo (Fig.3b) é bem mais lenta, como seria de se esperar.

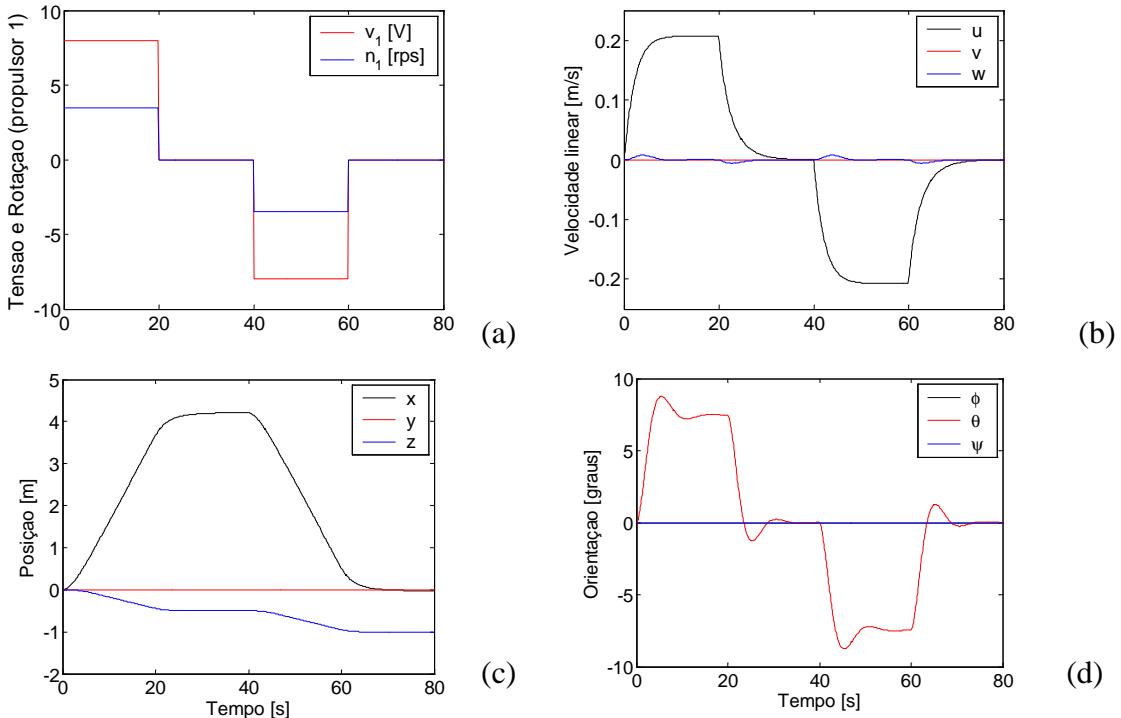


Figura 3. Resultados de simulação com o Nerov:  
(a) tensão e rotação; (b) velocidade linear; (c) posição; (d) Orientação

## 5.2. Remus

A Fig. (4) mostra o comportamento do Remus com o hélice acionado a uma rotação constante de 12 rps. O ângulo do leme vertical ( $\delta_r$ ) varia no tempo na forma de uma onda retangular com período de 20 s (Fig.4a). Na primeira metade do ciclo a amplitude é de  $-30^\circ$  e na segunda metade a amplitude é de  $30^\circ$ . O ângulo do leme horizontal ( $\delta_s$ ) varia de forma semelhante ao ângulo do leme vertical, porém, na primeira metade do ciclo o ângulo é  $30^\circ$  e na segunda metade passa para  $-30^\circ$ . Como o Remus possui apenas um propulsor, o qual atua na direção longitudinal, quando o propulsor entra em funcionamento gera-se uma força na direção  $X_0$ , mas também surge um torque em torno de  $X_0$ . O veículo desloca-se à frente, porém, este movimento é acompanhado de oscilações em rolamento com pequena amplitude (Fig. 4c e Fig. 4d) que são causadas pela ação conjunta do torque do propulsor e do momento restaurador. O Nerov não apresenta esta oscilação em rolamento devido à existência de dois propulsores, girando em sentidos contrários, direcionados ao longo do eixo longitudinal.

Como o leme vertical está localizado na parte traseira do veículo, quando o seu ângulo de ação varia, surge um momento em torno de  $Z_0$  que controla o ângulo de rumo do veículo (Fig. 4d). A variação do ângulo de rumo faz com que a componente de velocidade na direção  $Y_0$  varie (Fig.4b) e o veículo sofra deslocamentos laterais (Fig.4c).

Observa-se que o leme horizontal controla o ângulo de arfagem (Fig.4b), ou seja, controla o movimento no plano vertical (Fig.4b e Fig. 4c). A justificativa é semelhante àquela usada para a ação do leme vertical, porém, o momento gerado é em torno de  $Y_0$ .

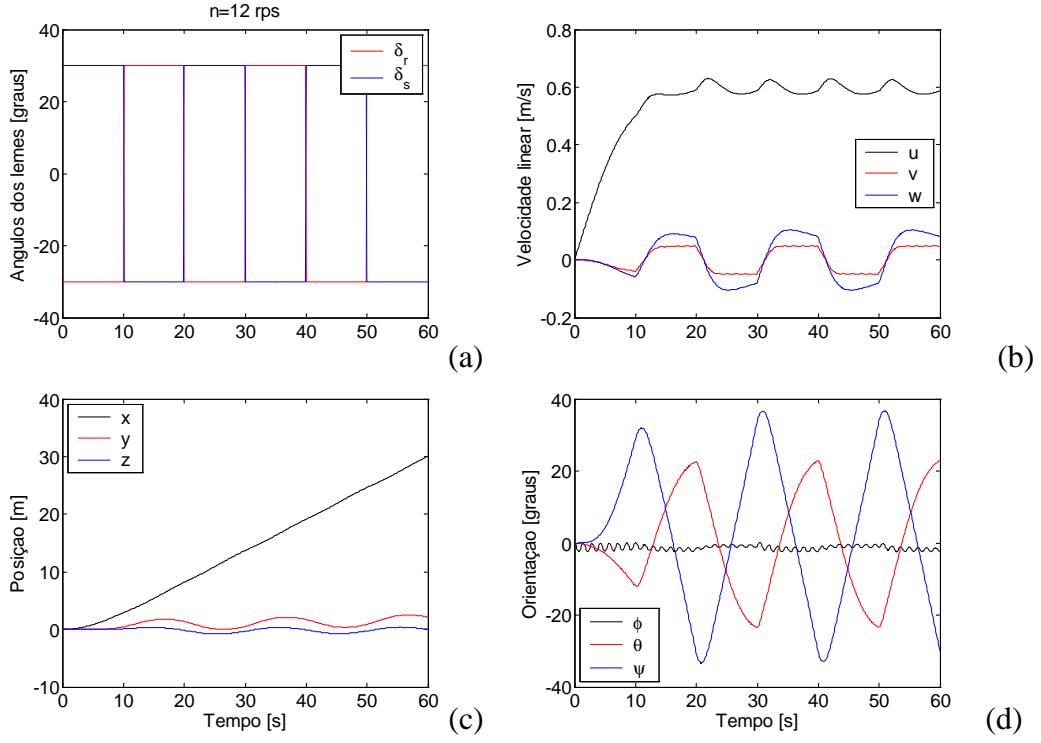


Figura 4. Resultados de simulação com o Remus: (a) Rotação do hélice e ângulos dos lemes; (b) velocidade linear; (c) posição; (d) orientação.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo matemático para veículos subaquáticos. A modelagem cinemática foi apresentada através de ângulos de Euler, que é o método mais utilizado por ser de fácil visualização. A modelagem dinâmica incluiu a interação entre fluido e estrutura e a ação dos propulsores. Foram apresentados dois veículos, um deles possui propulsores e lemes de controle (Remus) e o outro possui apenas propulsores (Nerov). A utilização de lemes de controle permite uma economia de energia no seguimento de trajetórias, sendo adequada para veículos autônomos, onde a fonte de energia está localizada no próprio veículo.

O modelo matemático mostrou-se ser bastante complexo, por ser não linear, acoplado e multivariável. Apesar desta complexidade, as simulações em malha aberta apresentaram resultados que estão de acordo com o comportamento físico esperado para os veículos.

O conhecimento do comportamento dinâmico dos veículos fornece subsídios para que trabalhos futuros sejam dedicados ao desenvolvimento de leis de controle.

## 7. REFERÊNCIAS

- Antonelli, G., Chiaverini, S., Sarkar, N., West, M, 2001. "Adaptative Control of an Autonomous Underwater Vehicle: Experimental Results on Odin". IEEE Transactions on Control Systems Technology, v.9, n°5, p.756-765.
- Conte, G., Serrani, A. 1996. "Modeling and Simulation of Underwater Vehicles". In: IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, Dearborn, MI. p.62-67.
- 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.
- D'Souza, A. F., Garg, V. K., 1984. "Advanced Dynamics: Modeling and Analysis". Englewood: Prentice-Hall. 358 p.

- Fodrea, L. R., 2002. ‘Obstacle Avoidance Control for the Remus Autonomous Underwater Vehicle’. Monterey, USA, 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Naval Postgraduate School.
- Fossen, T. I., 1994. ‘Guidance and Control of Ocean Vehicles’. Chichester: John Wiley & Sons. 480 p.
- Fossen, T. I., Balchen, J. G., 1991. ‘The NEROV Autonomous Underwater Vehicle’. In: Proceedings of the OCEANS’91 Conference, Honolulu, Hawaii.
- 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.
- Prestero, T., 2001. ‘Verification of a Six -Degree of Freedom Simulation Model for the Remus Autonomous Underwater Vehicle’. Davis, USA. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), MIT - Massachusetts Institute of Technology.
- Tavares, A. M., 2003. ‘Um Estudo sobre a Modelagem e o Controle de Veículos Subaquáticos Não Tripulados’. Rio Grande. 214 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), FURG, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

## **8. DIREITOS AUTORAIS**

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

### **A STUDY ABOUT THE DYNAMIC BEHAVIOR OF DIFFERENT TYPES OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLES**

#### **Adilson Melcheque Tavares**

Pelotas Federal Center for Technological Education - CEFET RS, 455, Praça Vinte de Setembro - ZIP CODE 96015-360, Pelotas, RS, Brazil, adilson@cefetrs.tche.br

#### **Sebastião Cícero Pinheiro Gomes**

Federal University Foundation of Rio Grande - FURG, Department of Mathematics, km 8, Italy Avenue, ZIP CODE 96201-900, Rio Grande, RS, Brazil, dmtscpg@furg.com

#### **Mauro André Barbosa Cunha**

Pelotas Federal Center for Technological Education - CEFET RS, 455, Praça Vinte de Setembro - ZIP CODE 96015-360, Pelotas, RS, Brazil, mauro@cefetrs.tche.br

**Abstract.** This paper describes the underwater vehicles modeling including kinematic, dynamic interactions between the fluid and the vehicle mechanical structure and also the actuators dynamic. Several dynamic aspects of underwater vehicles are analyzed; this analysis focuses on the effects of the inertia, drag, lift, restoring forces and propellers in the open loop behavior. Open loop simulation results are presented for two underwater vehicles with different constructive characteristics: NEROV (Norwegian Experimental Remotely Operated Vehicle) and REMUS (Remote Environmental Monitoring Unit, MIT, USA).

**Key-words:** underwater vehicles, modeling, kinematic, dynamic.