CONTROLE DO VEÍCULO SUBAQUÁTICO TATUÍ UTILIZANDO ESTRUTURA VARIÁVEL

Samuel da Silva Gomes[1], Adriano Pilla Zeilmann[2], Marco Antônio de Souza Madeira Terres[3], Leonardo Bandeira Soares[4], Sebastião Cícero de Pinheiro Gomes[5]

RESUMO
Projetar leis de controle para veículos subaquáticos não tripulados apresenta dificuldades extras, geralmente associadas a diferenças entre o modelo dinâmico nominal e a planta física. Estas diferenças existem principalmente em razão da existência de dinâmicas não modeladas e ainda, parâmetros do modelo difíceis de serem identificados. Portanto, é fundamental que a lei de controle, projetada para ser implementada na prática, apresente características de robustez que lhe permita manter o desempenho e a estabilidade. Neste sentido, o controle a estrutura variável é reconhecidamente adequado a sistemas com incertezas paramétricas. O presente artigo descreve o modelo cinemático e dinâmico de veículos subaquáticos. Apresenta também o desenvolvimento de um controlador automático de posição. Esse controle em posição é necessário sempre que se deseja levar o veículo para uma determinada posição e lá mantê-lo durante a realização de alguma tarefa. Após o desenvolvimento teórico, simulações são apresentadas com o ROV (Tatuí), onde se verificou que a estrutura variável com superfície integral apresentou o melhor comportamento.

Palavras-Chave: Controle de Posição. ROV. Estrutura Variável. Modelagem Dinâmica. Robustez.

TATUÍ UNDERWATER VEHICLE CONTROL USING VARIABLE STRUCTURE

ABSTRACT
Designing control laws for unmanned underwater vehicles presents extra difficulties, mostly associated with differences between the nominal dynamic model and the physical plant. These differences exist mainly because of the existence of non-modeled dynamics and also the model parameters difficult to be identified. Therefore, it is essential that the control law, designed to be deployed in practice, has characteristics of strength enabling him to maintain the performance and stability. In this sense, control the structure variable is known suitable for systems with parametric uncertainties. This paper describes the kinematic and dynamic model of underwater vehicles. It also presents the development of an automatic controller position. This control is necessary in a position where you want to take the vehicle to a certain position and keep it there while performing some task. After the theoretical development, simulations are presented with the ROV (Tatuí), where it was found that the surface integral variable structure showed the best behavior.

Key Words: Position Control. ROV. Variable Structure. Dynamic Model. Robust.

[1] Mestre em Engenharia Oceânica – FURG, samgomesfurg@bol.com.br
[2] Mestre em Modelagem Computacional – FURG, adriano.zeilmann@gmail.com
[3] Graduando do curso de Engenharia da Computação – FURG, marcoterres@gmail.com
[4]Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – UFRGS, leobsoares@gmail.com
[5] Professor Dr. em Automação, Instituto de Matemática, Estatística e Física – FURG, sebastiaogomes@furg.br

1. INTRODUÇÃO

Robôs subaquáticos possuem dinâmicas não lineares e ainda, grande dificuldade na determinação dos parâmetros dos seus modelos dinâmicos. Pode-se citar, por exemplo, esforços dinâmicos tais como arrasto e sustentação, os quais dependem de fatores de forma e são realmente difíceis de serem identificados experimentalmente, de forma a se conhecer os seus parâmetros. Portanto, qualquer lei de controle que tenha a pretensão de apresentar bons resultados experimentais, deve conter alguma característica de robustez, de forma a manter o desempenho e a estabilidade mesmo em presença de dinâmicas não modeladas ou variações paramétricas, responsáveis por diferenças entre modelo nominal e planta física.

No Brasil existem poucos trabalhos na área de robótica subaquática. Dominguez [3] fez um estudo sobre a modelagem e desenvolveu um programa para a simulação dinâmica de veículos submarinos. Cunha [2] propôs um sistema de controle adaptativo para o seguimento de trajetória. Hsu et al. [7] apresentaram um procedimento para identificação do modelo dinâmico dos propulsores. Barros e Soares [1] apresentaram uma proposta de veículo de baixo custo que pode operar como ROV (*Remotly Operated Vehicle*) ou AUV (*Autonomus Underwater Vehicle*). Souza e Maruyana [10] investigaram diferentes técnicas de controle para posicionamento de veículos. Tavares [11] fez um estudo que trata da modelagem e do controle de veículos subaquáticos.

Veículos subaquáticos apresentam projetos de controle complexos devido a problemas de não linearidade em suas dinâmicas, incertezas nos modelos e ainda, devido à presença de distúrbios que são difíceis de mensurar ou estimar (Yoerger, [13]).

A estratégia de controle que utiliza estrutura variável (modos deslizantes) foi desenvolvida na União Soviética na década de 60 (ver, por exemplo, Emelyanov, [5]), tendo sido empregada em diversos sistemas não lineares. No presente artigo, esta técnica de controle, conhecida em literatura inglesa como *sliding mode*, é projetada em duas diferentes modalidades (Slotine *and* Li, [9]): utilizando superfície de controle simples e superfície de controle integral.

O artigo está dividido da seguinte forma: na seção dois apresenta-se o modelo matemático (cinemática e dinâmica) de um veículo subaquático; na seção três

desenvolve-se um controlador automático de posição; na seção quatro mostram-se resultados de simulações, efetuadas no Matlab, do comportamento do veículo sob a ação do controlador projetado; na seção cinco apresentam-se as conclusões do trabalho.

2. MODELO MATEMÁTICO

Na modelagem de veículos subaquáticos trabalha-se com dois sistemas de referência: um fixo ao veículo (referencial do corpo) e outro fixo a um ponto da terra (referencial inercial). 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.

A transformação entre o referencial do corpo e o referencial inercial pode ser efetuada por meio de ângulos de Euler, parâmetros de Euler ou parâmetros de Rodrigues (Tavares, [11]). Neste trabalho adota-se a transformação por ângulos de Euler, a qual é mais intuitiva que as demais.

Assim, as seguintes equações gerais são utilizadas para modelar a dinâmica do veículo (Tavares, [11]):

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (01)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v}_r + \mathbf{v}_c^E \quad (02)$$

$$\mathbf{P}\dot{\mathbf{n}} = \boldsymbol{\tau}_m - \boldsymbol{\tau}_r \quad (03)$$

A equação (01) descreve a dinâmica da interação entre o fluído e a estrutura mecânica do veículo, expressa no referencial do corpo. Nesta equação tem-se $\mathbf{v_r = v - v_c}$ é a velocidade relativa, ou seja, expressa a velocidade do veículo **(v)** em relação à velocidade da corrente marinha ($\mathbf{v}_c$); **M** é a matriz de inércia associada ao corpo rígido e à massa adicional; $\mathbf{C(v}_r\mathbf{)}$ é a matriz de Coriolis e centrípeta, também associada ao corpo rígido e à massa adicional; $\mathbf{D(v}_r\mathbf{)}$ é a matriz de arrasto e sustentação; $\boldsymbol{\tau}$ é o vetor de forças e momentos dos propulsores; $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ é o vetor de forças e momentos produzidos por peso e empuxo; $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ é o vetor posição e orientação, expresso no referencial inercial, onde x, y e z são as coordenadas da origem do referencial do corpo e ϕ, θ e ψ são os ângulos de orientação.

A equação (02) descreve a cinemática do modelo, efetuando a transformação entre o referencial do corpo e o referencial inercial. Utiliza-se a seguinte notação: $\dot{\boldsymbol{\eta}}$ é

o vetor velocidade do veículo no referencial inercial; $\mathbf{v}_c^E$ é o vetor velocidade da corrente marinha no referencial inercial; **J(η)** é a matriz de transformação do referencial do corpo para o referencial inercial, usando ângulos de Euler.

Nas equações (01) e (02), todas as matrizes possuem dimensão *6x6* e todos os vetores têm dimensão *6x1*. Os elementos destas matrizes estão apresentados detalhadamente em Fossen [6] e em Tavares [11].

A equação (03) descreve a dinâmica dos propulsores, sendo **P** a matriz inércia dos propulsores, $\dot{\mathbf{n}}$ o vetor aceleração angular dos propulsores, $\boldsymbol{\tau}_m$ o vetor de torques motores e $\boldsymbol{\tau}_r$ o vetor de torques resistentes. Considerando-se que o veículo possua *p* propulsores, a matriz de inércia destes possui dimensão *pxp*, enquanto que os vetores $\boldsymbol{\tau}_m$ e $\boldsymbol{\tau}_r$ possuem dimensão *p x 1.*

3. CONTROLE SLIDING MODE

Esta sessão traz o desenvolvimento do controle não linear a modos deslizantes (Sliding mode, [9]).

Inicialmente considera-se o sistema na forma de estado. Assim, a idéia principal é projetar o controle de modo que todas as trajetórias do sistema convirjam para a superfície de controle e nela permaneçam indefinidamente. Na superfície definida, as trajetórias descritas pelo vetor de estado deslizam assintoticamente para os valore desejados (*set points* ou valores de referência), justificando assim o nome de modo de deslizamento. A Fig. 3 traz uma ilustração gráfica da atuação do controle, na tentativa de conduzir o estado para a referência ou estado desejado.

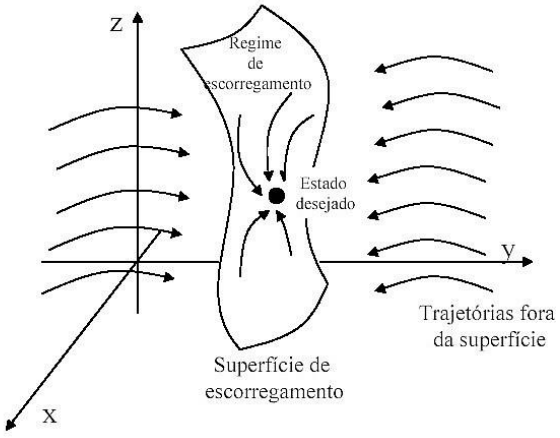


Fig. 1. Trajetórias convergindo para superfície de deslizamento.

Considerando-se uma única entrada, o sistema pode ser posto na seguinte forma de estado:

$$x^n = f(X) + b(X)u \quad (04)$$

onde o vetor X é o vetor de estados do sistema $X = [x\ \dot{x}\ ...\ x^{n-1}]^T$, x é a saída de interesse, u é a entrada de controle e as funções genéricas $f(X)$, $b(X)$ são conhecidas, mas com uma faixa de incertezas em relação aos seus parâmetros.

Sendo X_d a referência desejada para os estados, o erro na trajetória é dado por

$$\tilde{X} = X - X_d \quad (05)$$

Portanto o projeto deve ser feito para que os estados *X* sigam X_d.

a) Superfície simples:

Definindo-se $\tilde{x} = x - x_d$ (erro em posição), a superfície de deslizamento simples $s(X,t)$ no espaço R^n é definida a partir da seguinte equação:

$$s(X,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad (06)$$

Para $n = 2$, por exemplo:

$$s = \dot{\tilde{x}} + \lambda\tilde{x} \quad (07)$$

sendo λ uma constante positiva. Derivando-se (7) apenas uma vez aparece o termo x^n, o qual é substituindo em (4), possibilitando determinar a entrada *u* (sinal de controle).

Considera-se um sistema de segunda ordem dado por:

$$\ddot{x} = f(x,\dot{x},t) + u(t) \quad (08)$$

A superfície é definida por *s*(*X*,*t*)=0, obtida em (6) com n=2. Derivando-se (7) em relação ao tempo e após substituindo-se em (8) tem-se:

$$\dot{s} = \ddot{x}_d - \ddot{x} + \lambda\dot{\tilde{x}} = f + u - \ddot{x}_d + \lambda\dot{\tilde{x}} = 0 \quad (09)$$

Na ausência de erros de modelagem e de perturbações o controle teria a forma:

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - \lambda\dot{\tilde{x}} \quad (10)$$

onde $\hat{f}$ e $\hat{u}$ são estimativas de f e *u* respectivamente. Para se lidar com essas incertezas do modelo, acrescenta-se um termo descontínuo, que é função do sinal da superfície s:

$$u = \hat{u} - k(x,\dot{x},t)sinal(s) \quad (11)$$

onde k representa o ganho do termo chaveado:

$$sinal(s) = \begin{cases} 1, \text{se } s > 0; \\ 0, \text{se } s > 0; \\ -1, \text{se } s < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Define-se uma "camada limite" de largura ϕ da superfície s, para suavizar a função sinal (12) e evitar assim o fenômeno de *chattering*, o qual corresponde a oscilações ou transições do sinal do controle em torno do valor zero. Assim, utiliza-se:

$$u = \hat{u} - k(x, \dot{x}, t) sat\left(\frac{s}{\phi}\right) \tag{13}$$

onde:

$$sat(s/\phi) \begin{cases} sinal(s), se \left|\frac{s}{\phi}\right| > 1; \\ \frac{s}{\phi}, se \left|\frac{s}{\phi}\right| \leq 1; \end{cases} \tag{14}$$

Aplicando-se (1) em (9) e (10) e adotando-se:

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{\tilde{v}}, \qquad \ddot{x} = \ddot{v}, \qquad \ddot{x}_d = \ddot{v}_d, \qquad u = \tau \tag{15}$$

$$\hat{u} = \hat{\tau} \; e \; f = -[\mathrm{C}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} + \mathrm{D}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} + \mathrm{g}(\mathrm{x})] \tag{16}$$

obtém-se duas equações, para $\dot{s}$ e $\hat{T}_m$, respectivamente:

$$\dot{s} = \mathrm{M}^{-1}[\tau - \mathrm{C}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} - \mathrm{D}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} - \mathrm{g}(\mathrm{x})] - \ddot{x}_d + \lambda\dot{\tilde{x}} \tag{17}$$

$$\hat{\tau} = \mathrm{M}\left(\ddot{x}_d - \lambda\dot{\tilde{x}}\right) + \mathrm{C}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} + \mathrm{D}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} + \mathrm{g}(\mathrm{x}) \tag{18}$$

b) Superfície Integral:

Para a superfície integral, o raciocínio é o mesmo, mas a superfície $s(t)$ assume a seguinte forma:

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \left(\int_0^t \tilde{x} dr\right) \tag{19}$$

Para n=3, por exemplo:

$$s = \ddot{\tilde{x}} + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{x} dr \tag{20}$$

Derivando-se (19) em relação ao tempo, obtém-se:

$$\dot{s} = \dddot{\tilde{x}} + 2\lambda\ddot{\tilde{x}} + \lambda^2\dot{\tilde{x}} \tag{21}$$

sendo que, neste caso, a função do controle estimado assume a forma:

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - 2\lambda\ddot{\tilde{x}} - \lambda^2\dot{\tilde{x}} \tag{22}$$

Por fim, aplica-se (1) nas equações (21) e (22), usam-se as relações (15) e (16) e obtém-se o controle estimado e a superfície integral do modelo:

$$\dot{s} = \mathrm{M}^{-1}[\tau - \mathrm{C}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} - \mathrm{D}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} - \mathrm{g}(\mathrm{x})] - \ddot{\mathrm{x}}_\mathrm{d} + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2\tilde{x} \tag{23}$$

$$\hat{\tau} = \mathrm{M}(\ddot{\mathrm{x}}_\mathrm{d} - 2\lambda\dot{\tilde{x}} - \lambda^2\tilde{x}) + \mathrm{C}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} + \mathrm{D}(\dot{\mathrm{x}})\dot{\mathrm{x}} + \mathrm{g}(\mathrm{x}) \tag{24}$$

Partindo-se do princípio que se deseja fazer o posicionamento do veículo relativo ao referencial inercial, a aceleração de referência no sistema móvel (referencial do corpo) não é inicialmente conhecida. O primeiro passo é escolher uma trajetória de referência, no referencial inercial, em função das posições e orientações iniciais e finais. Posteriormente, a aceleração de referência é transformada do referencial inercial para o referencial do corpo.

Com o objetivo de observar a estabilidade dos controles, foi adotada a estratégia de seguir um perfil trapezoidal de velocidades. A estratégia consiste em dividir a simulação do controle em três tempos diferentes: primeiramente com aceleração positiva, em seguida com aceleração nula e, por fim, com aceleração negativa.

4. RESULTADOS E SIMULAÇÕES

O Tatuí é um veículo construído pela CONSUB / Rio de Janeiro, o qual é utilizado para inspeção de estruturas subaquáticas. Os parâmetros de simulação encontram-se em Dominguez [3], Cunha [2] e Tavares [11]. Este veículo possui apenas quatro propulsores, o que não permite que se controle de forma ativa todos os seis graus de liberdade. Em função da localização dos propulsores, os movimentos de rolamento e de arfagem são controlados de forma passiva pelas forças restauradoras.

O Tatuí está representado de forma simplificada na figura 2, onde se pode observar a seguinte configuração dos propulsores:

- um propulsor localizado na parte frontal (P_1), paralelo ao eixo lateral;
- um propulsor localizado na parte central (P_2), paralelo ao eixo normal;
- dois propulsores laterais localizados na parte traseira (P_3 e P_4) e ligeiramente inclinados em relação ao eixo longitudinal.

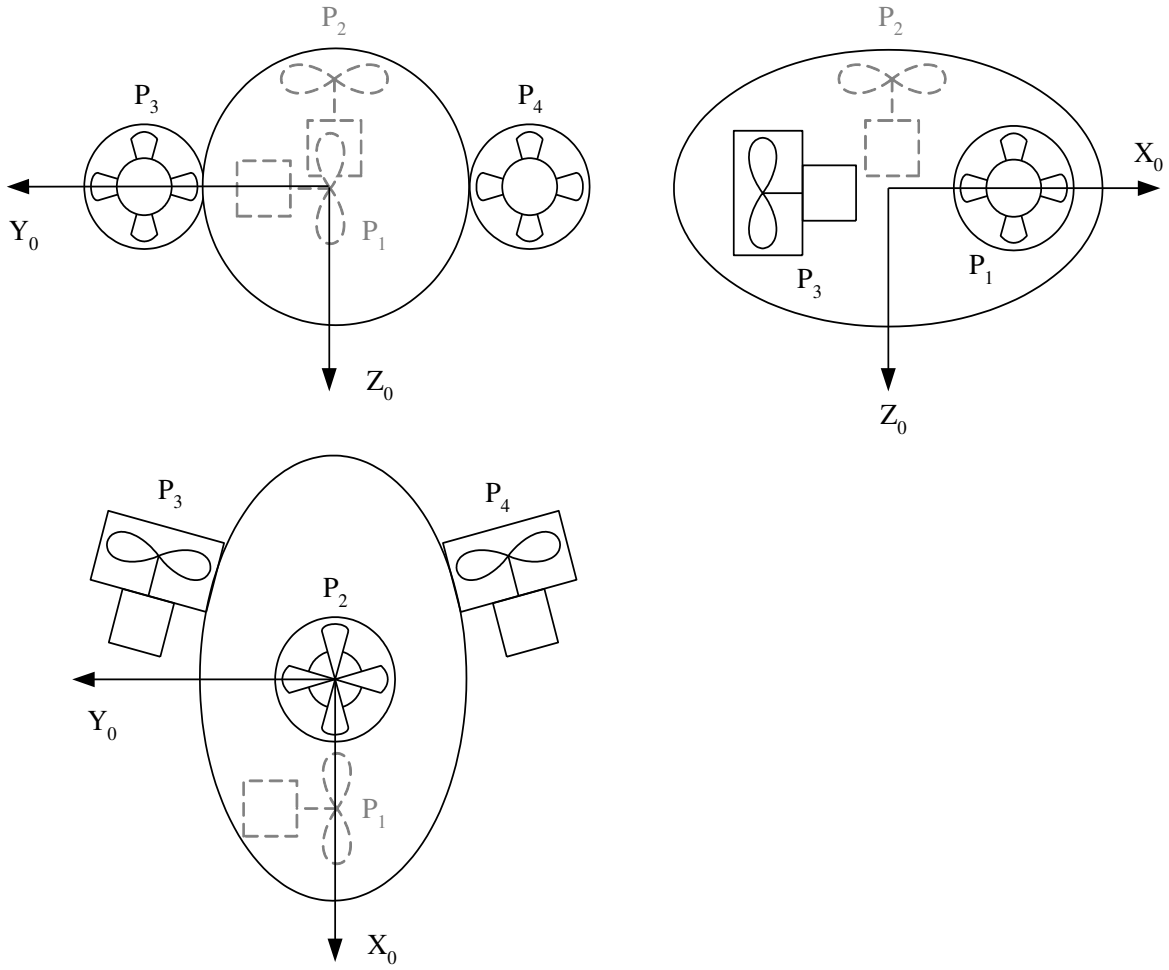


Figura 2 – Representação simplificada do ROV Tatuí.

As forças e momentos produzidos pelos propulsores dependem das características construtivas dos hélices, da rotação dos mesmos e da velocidade do veículo em relação ao fluído. Porém, o efeito da velocidade do veículo em relação ao fluído é pouco significativo, sendo muitas vezes negligenciado no modelo dinâmico.

Considerando-se esta simplificação, o vetor de forças e momentos de propulsão resulta em:

$$\tau = \boldsymbol{Bu} \tag{25}$$

Sendo o número de propulsores igual a quatro, **u** é um vetor de dimensão *4x1* com elementos $u_i = |n_i|n_i$, onde n_i é a velocidade de rotação do *i-ésimo* hélice. **B** é uma matriz de dimensão *6x4* cujos elementos estão distribuídos em função da localização dos propulsores.

A determinação das rotações necessárias à geração das forças e momentos solicitados pela lei de controle é feita a partir da seguinte equação:

$$\mathbf{u} = \mathrm{B}^{+}\boldsymbol{\tau} = (\mathrm{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{B})^{-1}\mathrm{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\tau} \quad (26)$$

onde $\mathbf{B}^{+}$ é uma pseudo-inversa de **B**.

Conhecendo-se as componentes do vetor de controle, obtém-se a velocidade do i-*ésimo* hélice sob a forma (Tavares, [11]):

$$\mathrm{ni} = \mathrm{sign}(\mathrm{ui})\sqrt{|u_i|} \quad (27)$$

As velocidades dos hélices dependem das tensões aplicadas aos motores de corrente contínua. Como as dinâmicas dos propulsores são bem mais rápidas do que a dinâmica do veículo, pode-se utilizar um modelo estático para estimar as tensões necessárias a produção das velocidades desejadas.

A seguir, são apresentadas simulações que ilustram o comportamento do veículo com o sistema de controle desenvolvido. Durante o funcionamento existem distúrbios que não podem ser previstos na lei de controle. Estes distúrbios são a corrente marinha e as diferenças entre o modelo adotado e a planta física.

Quando se considera o modelo nominal idêntico ao modelo da planta física (realmente usado na simulação), não há diferenças significativas entre os controles por modo deslizante com superfície simples e com superfície integral, sendo que ambos os resultados apresentam um bom desempenho. Os controles aplicados foram EVSS (estrutura variável com superfície simples) e EVSI (estrutura variável com superfície integral).

a) Simulação 1

O objetivo estipulado nesta simulação foi o de levar o veículo da posição inicial (-10 m, -10 m, -10 m), com ângulos de rolamento, arfagem e guinada iguais a 60° para a posição final (0 m, 0 m, 0 m), com ângulos de rolamento, arfagem e guinada nulos. Considerou-se que a corrente oceânica possui componentes de 0,3 m/s nas direções contrárias a X e Y do referencial inercial e que o modelo adotado é igual à planta física.

Observa-se que o sistema de controle desenvolvido com superfície integral apresentou um bom desempenho, conseguindo acompanhar de modo satisfatório a trajetória prevista (fig. (06), (07) e (08)). Apenas os ângulos de rolamento e arfagem não foram diretamente controlados. Isto ocorreu porque o número de propulsores,

quatro no total, é insuficiente para controlar todos os seis graus de liberdade. O controle de rolamento e arfagem foi deixado passivo, sob a ação de forças e momentos restauradores. Nenhum dos atuadores saturou (saturação estipulada em 20 rps), fato que contribui para o bom desempenho do sistema. O controle com superfície simples não apresentou um bom resultado (figuras (03), (04) e (05)).

a.1) Controle com a superfície simples

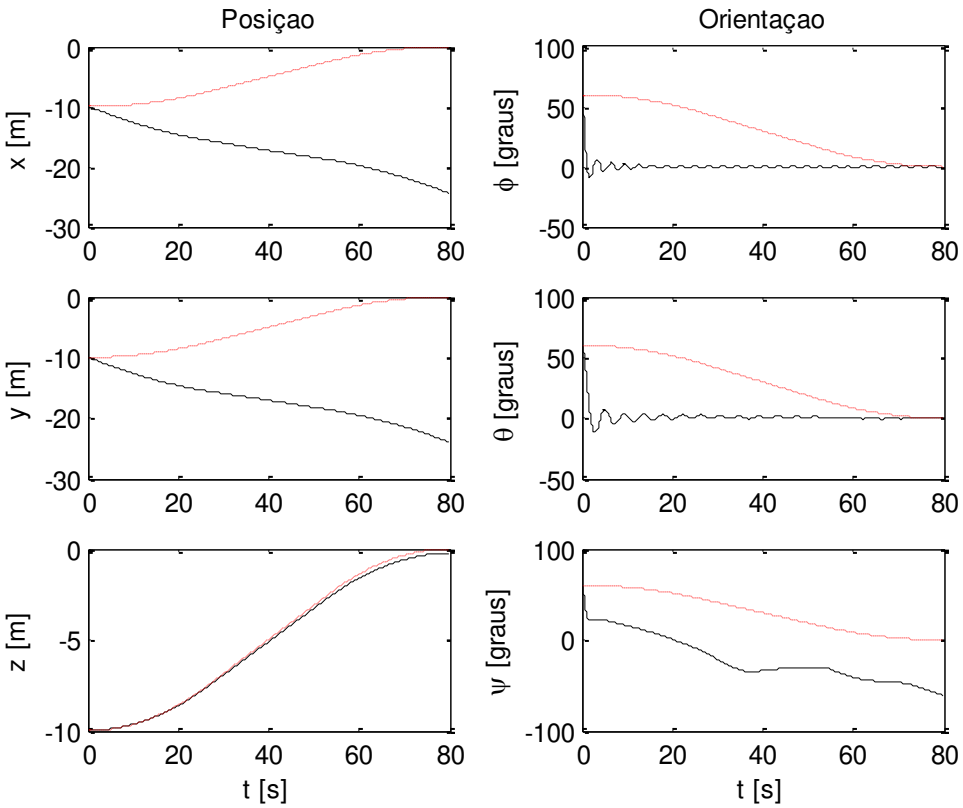


Figura 3 – Posição e orientação (referencial inercial)

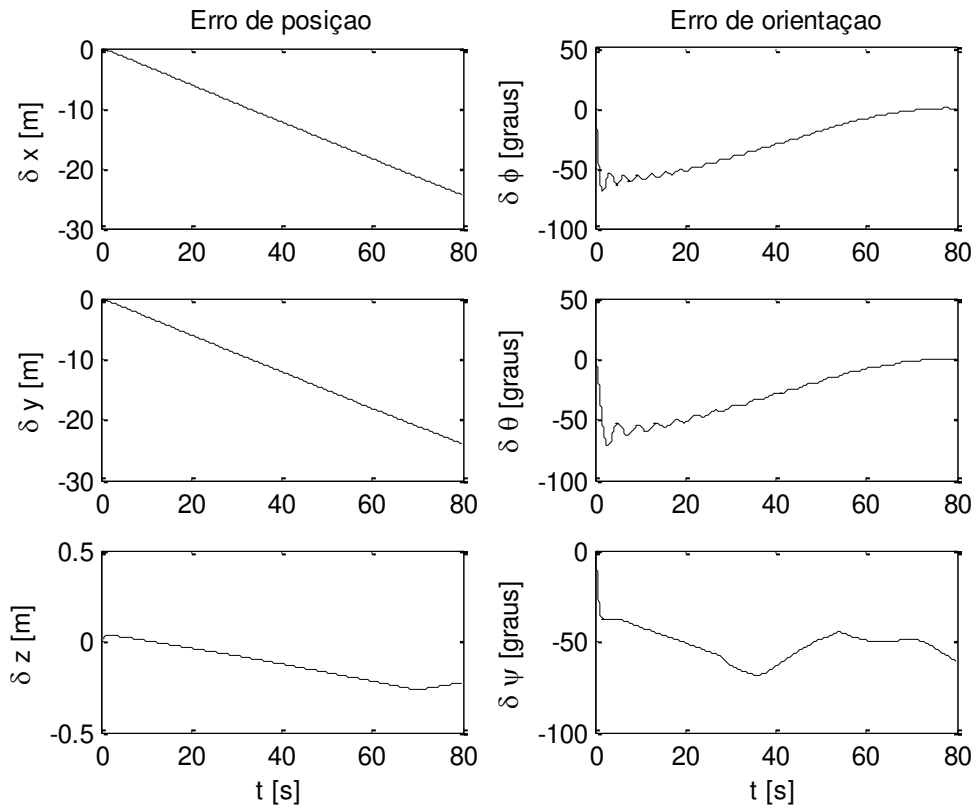


Figura 4 – Erros de posição e orientação

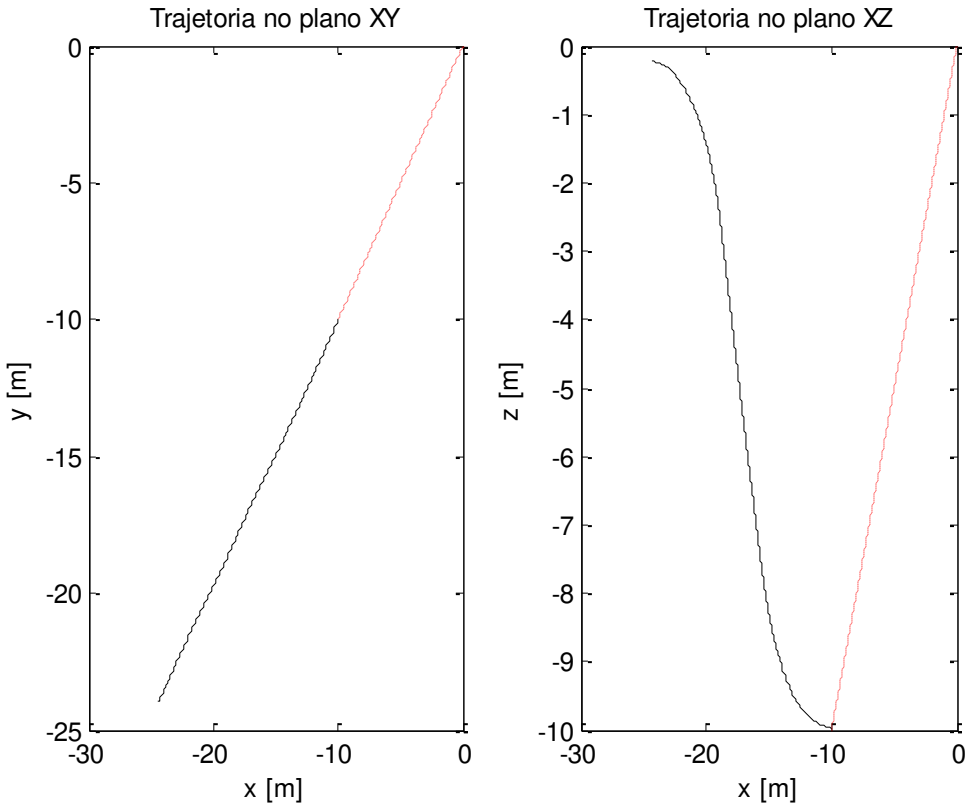


Figura 5 – Trajetória no plano XY e XZ

a.2) Controle com a superfície integral

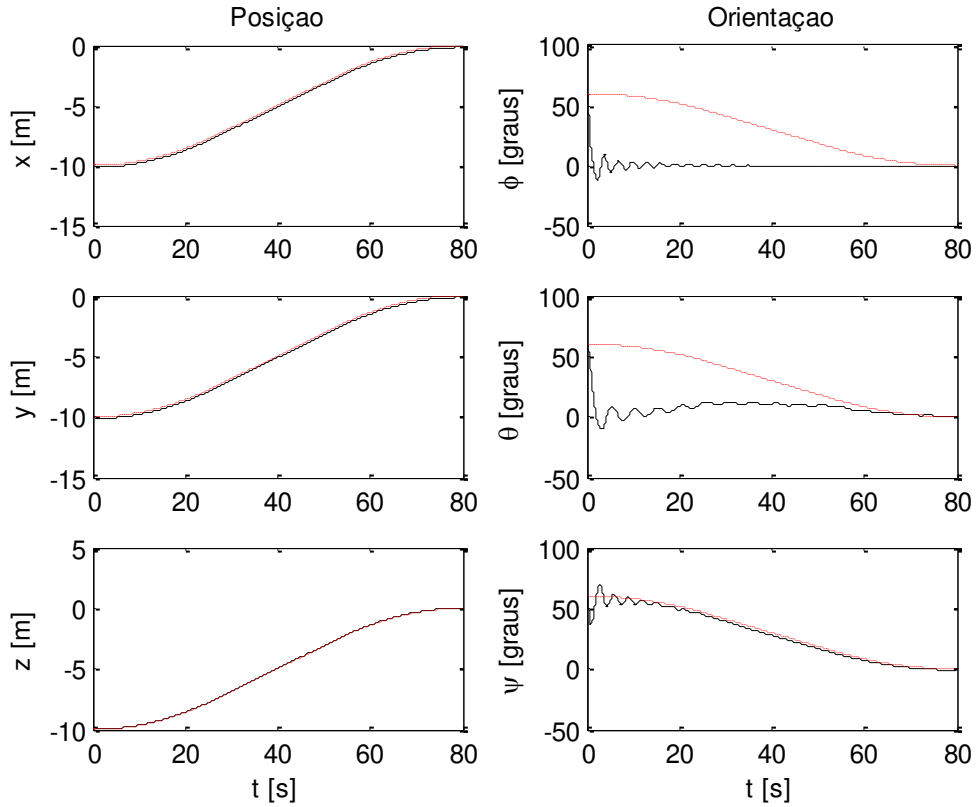


Figura 6 – Posição e orientação (referencial inercial)

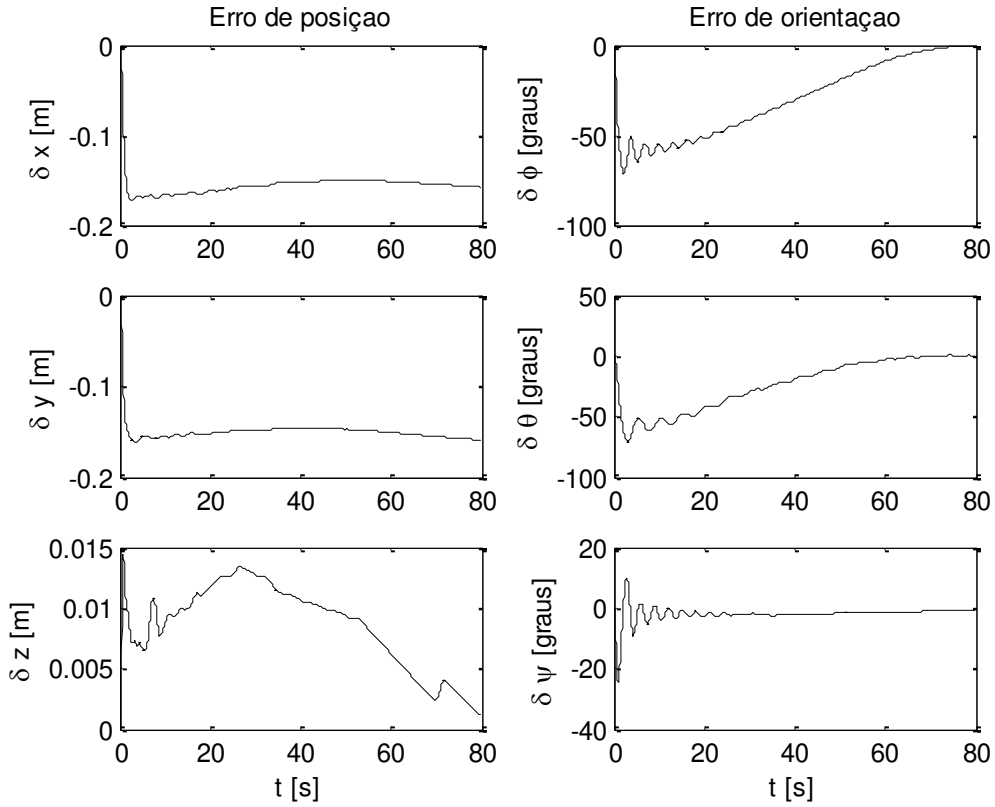


Figura 7 – Erros de posição e orientação

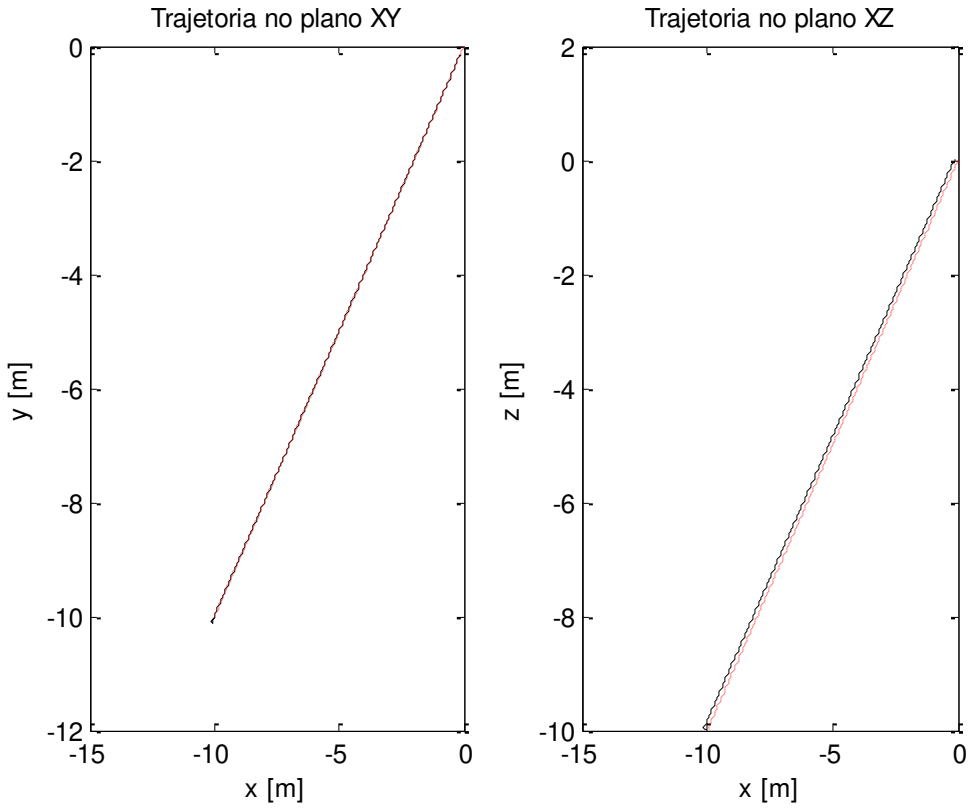


Figura 8 – Trajetória no plano XY e XZ

b) Simulação 2

Inicialmente, para avaliar os efeitos de variações paramétricas, as matrizes do modelo matemático (matriz de propulsão, matrizes de inércia e matriz de arrasto e sustentação) foram alteradas isoladamente, observando-se, posteriormente, os efeitos destas variações em simulações. O mesmo procedimento foi adotado para outros parâmetros como: massa específica da água, volume do veículo, posições do centro de gravidade e centro de empuxo e constantes de torque e inércia dos motores.

Observou-se que os parâmetros críticos são a massa e o volume do veículo, assim como a massa específica da água. Sabe-se que estas grandezas determinam o peso e o empuxo. Isto mostra que o maior problema é o movimento do veículo no plano vertical. Se a diferença entre peso e empuxo for maior que 5%, para mais ou para menos, a corrente de comando do propulsor vertical, que é único, satura e leva o sistema à instabilidade. Portanto, para que o controle aplicado ao Tatuí funcione satisfatoriamente, este veículo deve possuir flutuação aproximadamente neutra. Nesta simulação considerou-se que o empuxo é 3% maior do que o empuxo nominal. O objetivo estipulado nesta simulação foi o de levar o veículo da posição

inicial (10 m, 10 m, 10 m), com ângulos de rolamento, arfagem e guinada iguais a 45° para a posição final (0 m, 0 m, 0 m), com ângulos de rolamento, arfagem e guinada nulos. As figuras (09), (10) e (11) mostram a simulação com o controle que utiliza a superfície simples. Houve uma significativa perda de desempenho, mesmo sem a saturação de nenhum atuador. Todos os erros mostrados na figura (10) aumentaram em relação a simulação com o caso em que o modelo nominal é igual a planta física, chamando atenção o erro de posição δ_z. Na figura (11) observa-se que a trajetória no plano XY foi seguida corretamente, ao contrário da trajetória do plano XZ, onde houve um erro considerável de posição.

A simulação do controle com a superfície integral é mostrado nas figuras (12), (13), (14) e (15). Este controle obteve resultados satisfatórios no seguimento da trajetória de referência conforme figuras (12), (13) e (14). Os pequenos erros de acompanhamentos nas posições y (δ_y) e z (δ_z) são devidos a suavização, eliminando o fenômeno de chattering. Devido à diferença entre peso e empuxo os atuadores permanecem ligados, mesmo depois de o Tatuí ter atingido a posição e orientação desejados. O gráfico das correntes, figura (15) mostra que não houve saturação dos atuadores.

b.1)Controle com a superfície simples

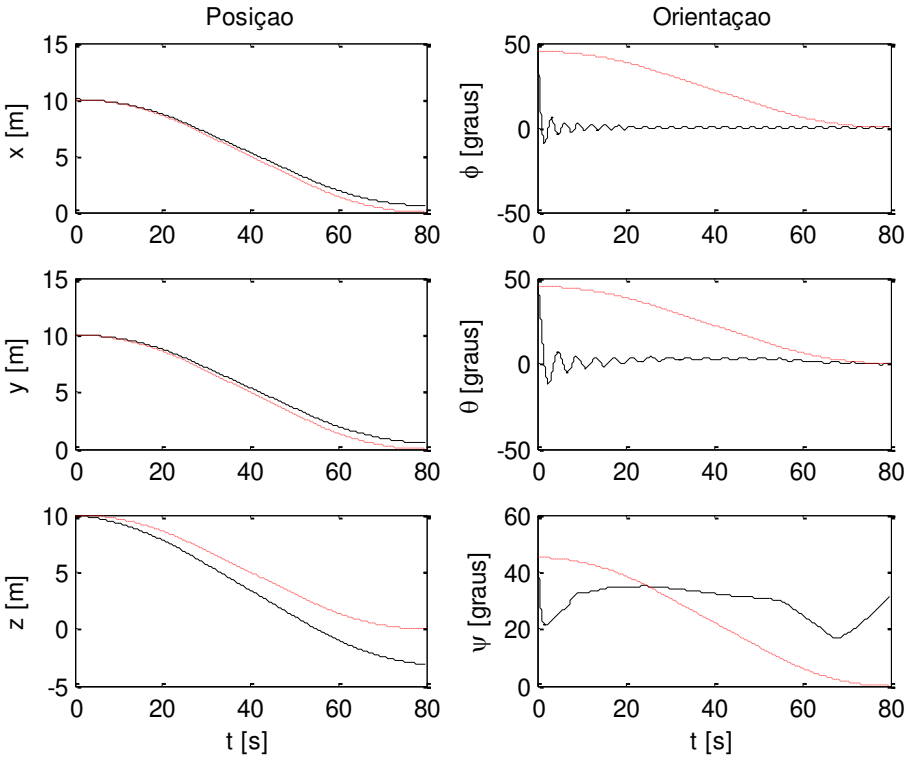


Figura 9 – Posição e orientação (referencial inercial)

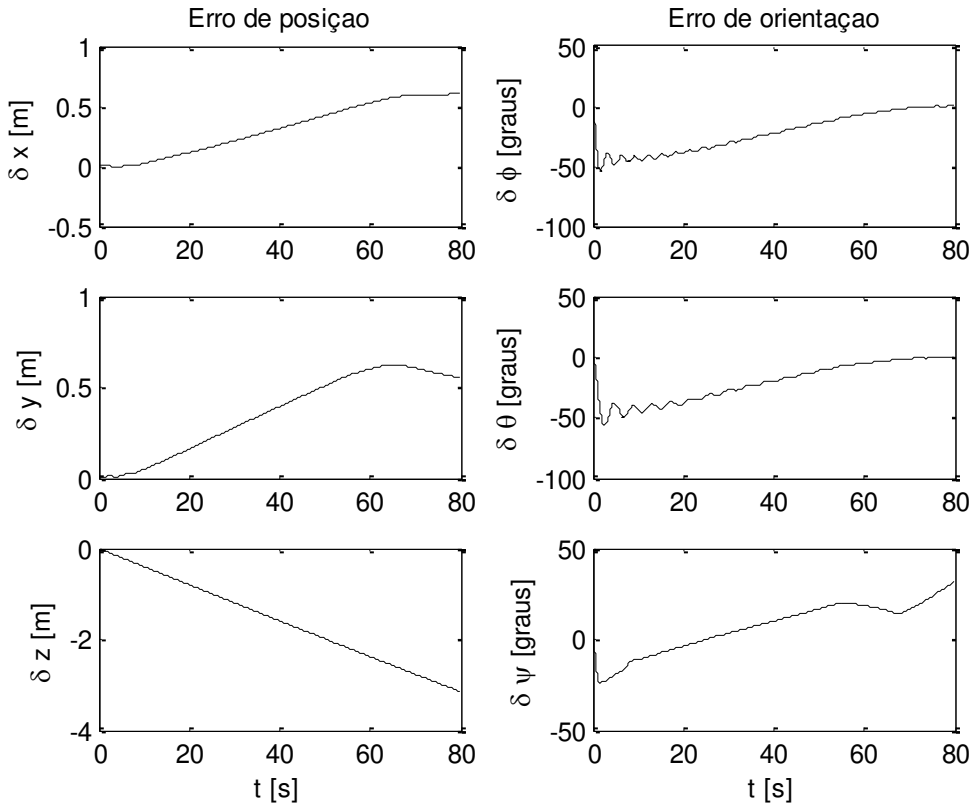


Figura 10 – Erros de posição e orientação

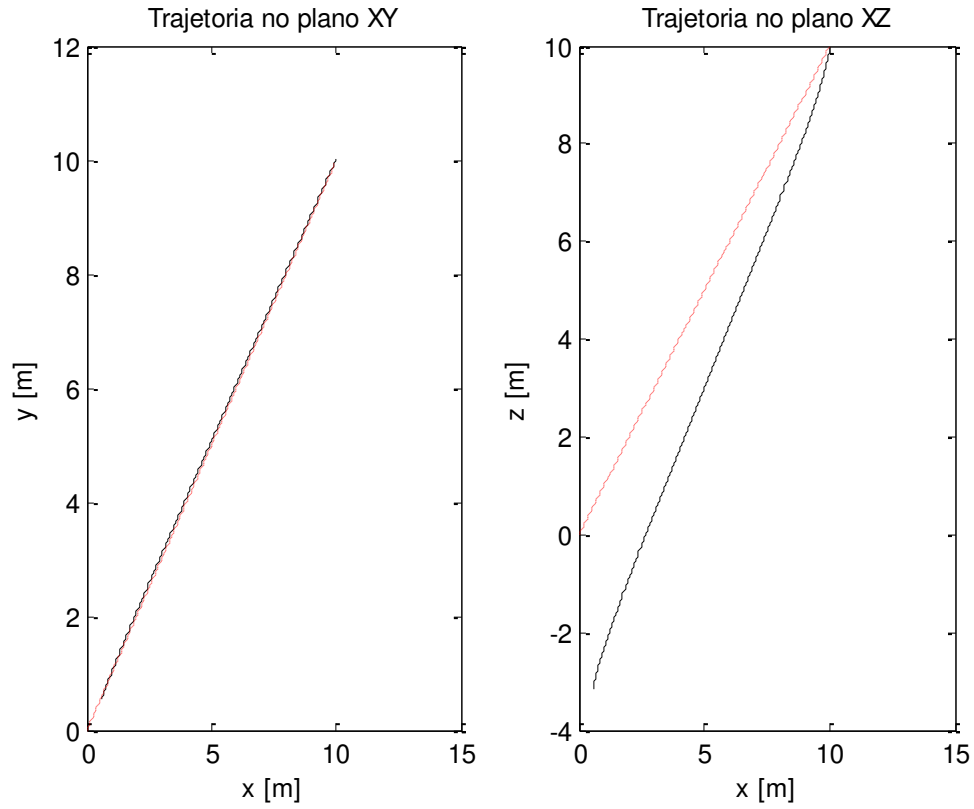


Figura 11 – Trajetória no plano XY e XZ

b.2) Controle com a superfície integral

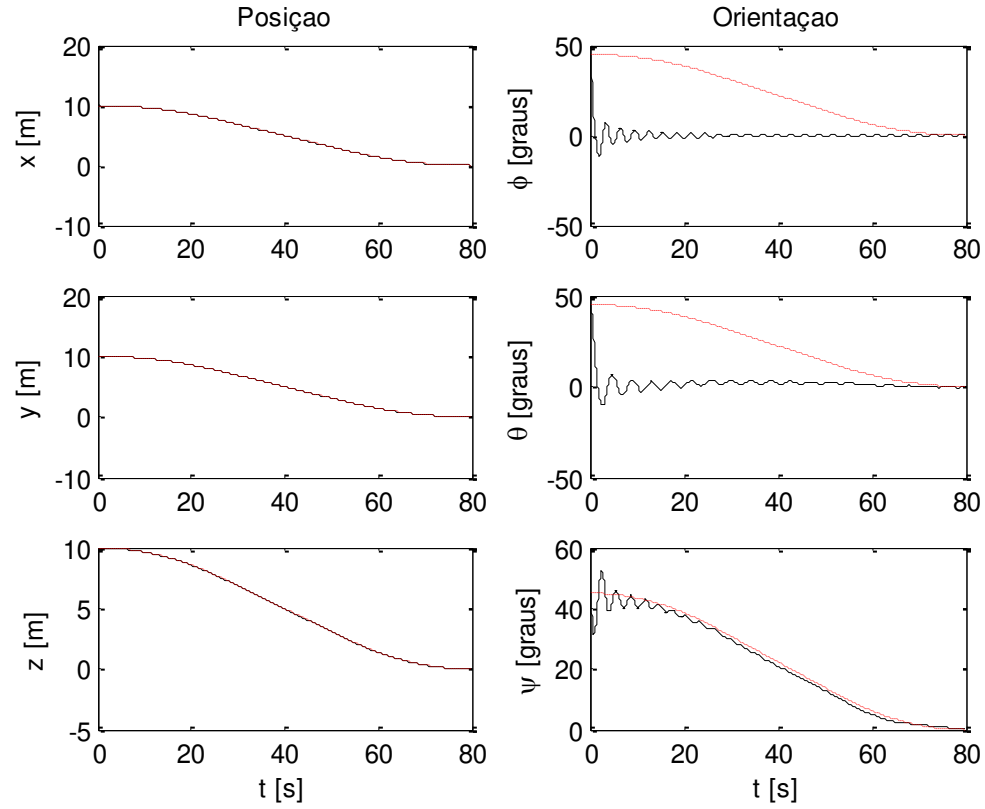


Figura 12 – Posição e orientação (referencial inercial)

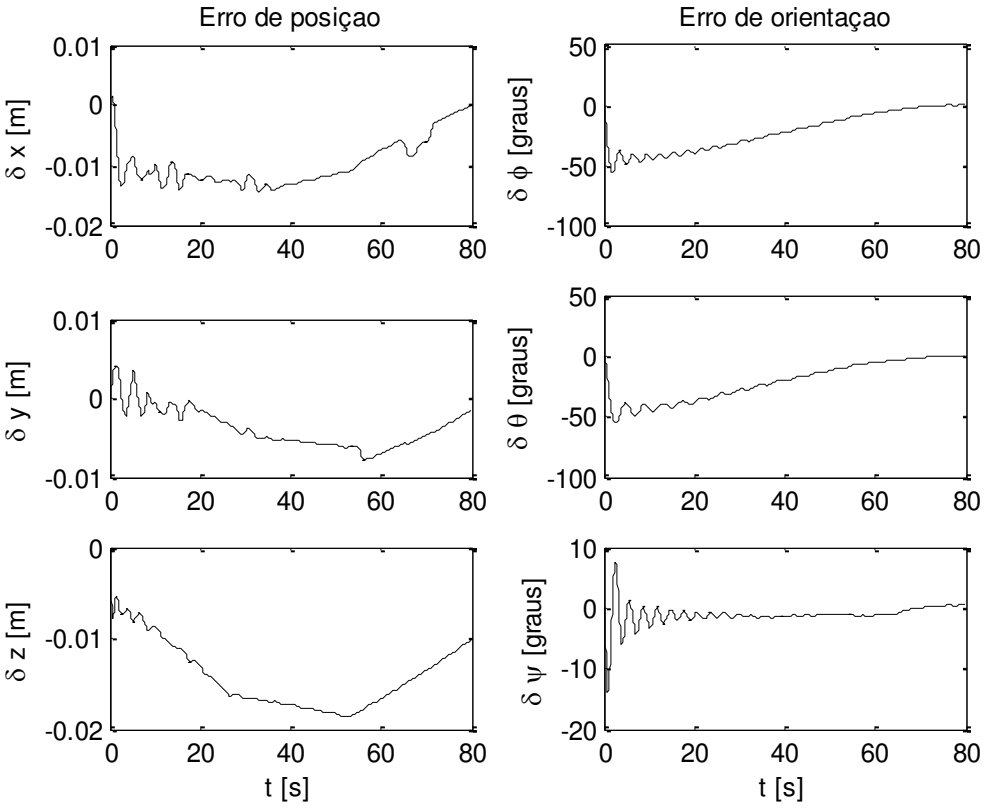


Figura 13 – Erros de posição e orientação

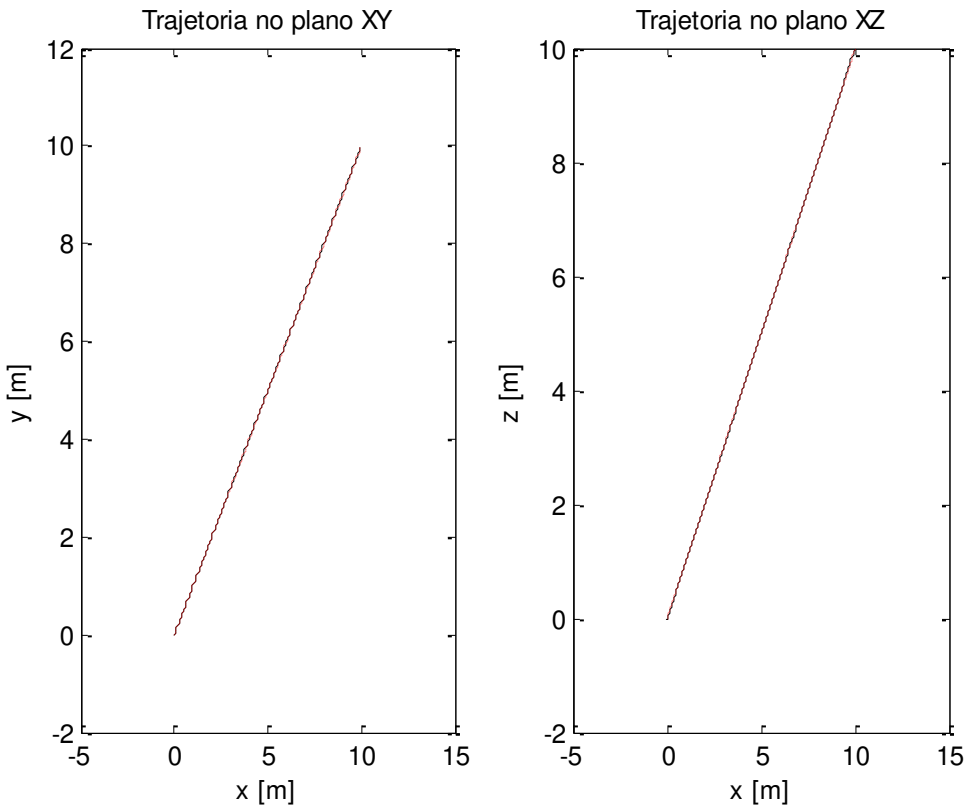


Figura 14 – Trajetória no plano XY e XZ

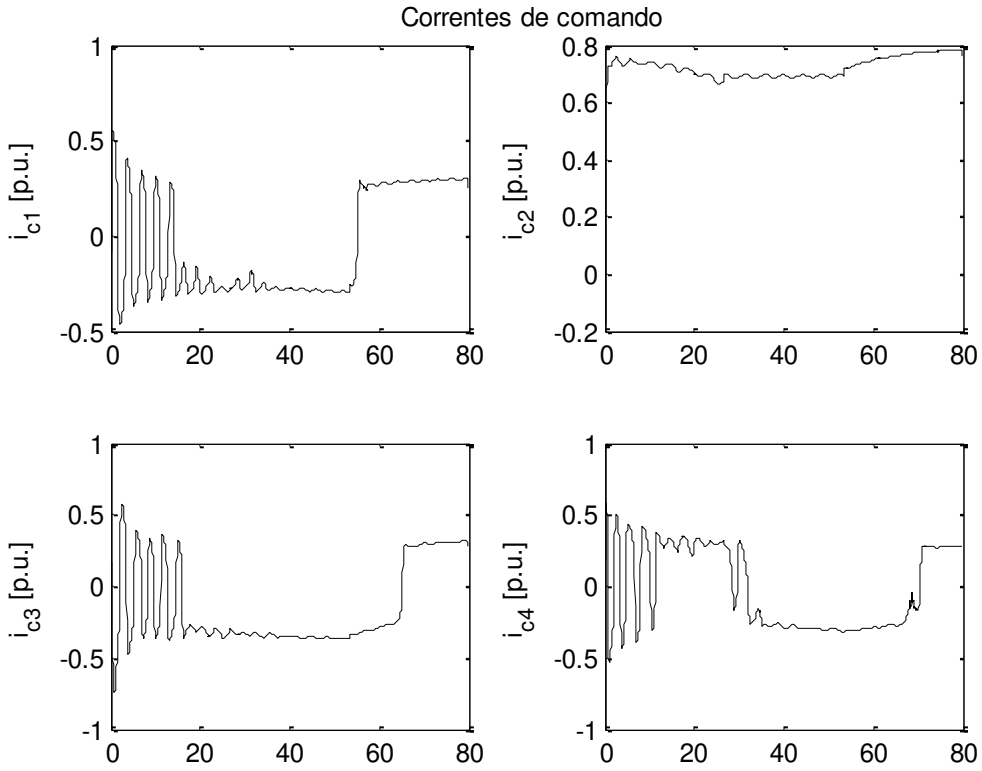


Figura 15 – Correntes de comando

5. CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o modelo matemático (cinemático e dinâmico) de veículos subaquáticos usando ângulos de Euler. Foi apresentado, ainda, o problema do controle de veículos subaquáticos, considerando-se correntes oceânicas e incertezas paramétricas no modelo e avaliando-se a robustez quanto à manutenção do desempenho de controladores a estrutura variável (modos deslizantes).

Foram desenvolvidos dois tipos de controle que utilizam modos deslizantes: um com superfície simples e outro com superfície integral. Em ambos os casos o objetivo foi o de efetuar o posicionamento dinâmico do veículo.

Os resultados das simulações desenvolvidas na seção cinco mostraram que quando a planta é igual ao modelo os resultados de ambos os controladores são satisfatórios. Na simulação com variação paramétrica que resultou num empuxo 3% maior do que o nominal, o controle utilizando a superfície simples apresentou uma significativa perda de desempenho. O controle com superfície integral mostrou-se relativamente robusto às diferenças entre modelo e planta e também à ação de correntes marinhas, mantendo um desempenho próximo do caso sem corrente oceânica e sem variação paramétrica.

Verificou-se que os parâmetros mais sensíveis do modelo estão relacionados à massa e ao volume do veículo, assim como à massa específica do fluido. Estes parâmetros influenciam diretamente as forças de peso e empuxo, responsáveis pelos torques restauradores. Foi verificado ainda que no controle com superfície integral, se a diferença entre peso e empuxo for, na prática, maior do que 5% com relação ao valor nominal, o atuador responsável pelo movimento vertical não teria autonomia para compensar este efeito e permaneceria saturado, inviabilizando completamente o desempenho em malha fechada.

Trabalhos futuros incluem a validação experimental da estratégia de controle a estrutura variável, a fim de se avaliar desempenho e estabilidade deste tipo de lei de controle. O veículo que servirá de suporte experimental está sendo construído atualmente no Núcleo de Matemática Aplicada e Controle, da Fundação Universidade Federal do Rio Grande (NuMA-FURG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BARROS, E. A., SOARES, F. J. A. DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ SUBMARINO DE BAIXO CUSTO. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XIV, 2002, NATAL-RN. P. 2121-2126.

[2] CUNHA, J. P. V. S. Projeto e Estudo de Simulação de um Sistema de Controle a Estrutura Variável de um Veículo Submarino de Operação Remota. Rio de Janeiro, 1992. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[3] DOMINGUEZ, R. B. Simulação e Controle de um Veículo Submarino de Operação Remota. Rio de Janeiro, 1989. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[4] D´SOUZA, A. F., GARG, V. K. Advanced Dynamics: Modeling and Analysis. Englewood: Prentice-Hall, 1984. 358 p.

[5] EMELYANOV, S. V. Variable structure control systems, Moscow, Nauka, 1967.

[6] FOSSEN, T. I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 480 p.

[7] HSU, L., CUNHA, J. P. V. S., LIZARRALDE, F., COSTA, R. R. 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 2000.

[8] OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1998.

[9] SLOTINE, J., LI, W. Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1991, 461p.

[10] SOUZA, E., MARUYAMA, N. An Investigation of Dynamic Positioning Strategies for Unmanned Underwater Vehicles. CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XIV, 2002, Natal-RN. p.1273-1278.

[11] TAVARES, A. M. Um estudo sobre a modelagem e o controle de veículos subaquáticos não tripulados. Rio Grande, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

[12] UTKIN, V.I. Sliding Modes and their Application to Variable Systems. MIR

Publishers, Moscow, 1978.

[13] YOERGER, D. R., SLOTINE J. Robust Trajectory Control of Underwater Vehicle. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 0E-10, N^0 4, October 1985.

[14] YUH, J. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, Int'l J. of Autonomous Robots, 2000.