

Controle por Modo Deslizante Adaptativo com Estimativa de Perturbações para uma Embarcação Teleoperada *

Pedro P. P. Lima * José Paulo V. S. Cunha **

* *Marinha do Brasil, (e-mail: pinheiro.lima@marinha.mil.br).*

** *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica,
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, (e-mail: jpaulo@ieee.org)*

Abstract: This paper presents the application of an adaptive sliding-mode controller for trajectory tracking of a surface vessel. Sliding-mode control is insensitive to parametric uncertainties and disturbances. However, the control signal amplitude is usually overestimated that may cause energy losses and undesirable chattering effects, usual in sliding-mode systems. An adaptive control signal scheme is developed to reduce the amplitude. Adaptation is based on the estimation of the disturbances, that include environmental effects and residuals of imperfections of the adopted feedback linearization scheme. The estimation of disturbances on the vessel will also allow their modeling. Experimental results obtained with a small vessel subject to disturbances generated in pool tests are also presented. The position and orientation of the vessel were measured by an accurate motion capture system.

Resumo: Neste artigo foi aplicado um controlador por modo deslizante adaptativo para o rastreamento de trajetórias de uma embarcação de superfície. O controle por modo deslizante é insensível a incertezas paramétricas e perturbações. Entretanto, a amplitude do sinal de controle é usualmente superestimada, o que pode desperdiçar energia e acentuar efeitos indesejáveis do *chattering*, usuais em sistemas com modos deslizantes. A adaptação da amplitude do sinal de controle é desenvolvida tendo-se em vista reduzi-la. Esta foi realizada a partir da estimação das perturbações, que incluem efeitos ambientais e resíduos causados pelas imperfeições da linearização por realimentação da dinâmica da embarcação. A estimação das perturbações na embarcação também permitirá modelá-las. São apresentados resultados de experimentos com uma pequena embarcação sujeita a perturbações geradas numa piscina. A posição e a orientação do barco foram medidas por um sistema de captura de imagens de precisão.

Keywords: Sliding-Mode Control; Adaptive Control; Trajectory Tracking; Surface Vessel; Disturbances.

Palavras-chave: Controle por Modo Deslizante; Controle Adaptativo; Rastreamento de Trajetória; Embarcação de Superfície; Perturbações.

1. INTRODUÇÃO

O avanço da eletrônica, computação, sistemas de navegação, comunicação e sistema de posicionamento global possibilitaram o desenvolvimento de embarcações operadas remotamente (*unmanned surface vessels* — USV), que tornam-se cada vez mais eficientes e observaram o crescimento de suas aplicações. Muitas destas aplicações, executadas com auxílio de câmeras e sonares, como a busca subaquática e o reconhecimento do solo marinho, estão sujeitas à distúrbios ambientais que podem comprometer a execução dessas tarefas.

Poucos trabalhos apresentam experimentos do controle de rastreamento de trajetórias para embarcações de superfície. Rosario e Cunha (2017) apresentaram resultados experimentais, porém não havia perturbações significati-

vas. Mahini et al. (2013) consideraram uma estratégia de mudança de escala para comparar os distúrbios aplicados em seus experimentos em escala reduzida com aqueles presentes na natureza. Ambos os trabalhos utilizaram as técnicas de controle por modo deslizante e linearização por realimentação, sendo esta última denominada também como torque computado, que é bastante utilizada em robótica, pois cancela as não-linearidades do sistema para a obtenção de um sistema equivalente linear (Craig, 2005).

Assim como ambos os trabalhos supracitados, aqui é utilizado o controle por modo deslizante (*sliding-mode control* — SMC), pois permite que o desempenho do sistema de controle seja insensível a incertezas de seus parâmetros e rejeite as perturbações as quais está exposto (Young et al., 1999). Entretanto, a robustez geralmente é obtida de forma muito conservadora, isto é, ampliando-se de forma desnecessária a amplitude do sinal de controle, o que acarreta efeitos colaterais, tais como desperdício de energia, desgaste precoce de atuadores e aumento de vibrações

* Este trabalho foi realizado com apoio da FAPERJ, CNPq e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) — Código de Financiamento 001.

indesejadas, denominadas *chattering*. Esses efeitos podem ser atenuados pela inclusão de alguma lei adaptativa para a amplitude do sinal de controle. Dentre os diversos algoritmos presentes na literatura, Barbas (2021) elencou alguns trabalhos publicados, destacando o de Oliveira et al. (2016) devido à sua efetividade e fácil implementação. Barbas (2021) realizou simulações utilizando esta estratégia para uma embarcação sujeita a perturbações ambientais, constatando a eficiência e efetividade dessa abordagem, porém não realizou experimentos.

Este trabalho propõe uma variação dessa técnica adaptativa de controle por modo deslizante para uma embarcação teleoperada, que também possibilita estimar as perturbações. Também são apresentados experimentos do rastreamento de trajetórias de uma pequena embarcação sujeita a distúrbios. Uma grande dificuldade de se implementar distúrbios ambientais (ondas, vento e correnteza) em laboratório é mensurá-los, visto que dependem de fatores da natureza e os modelos existentes na literatura são muito complexos (Fossen, 2011, Cap. 8).

2. MODELAGEM DA EMBARCAÇÃO

De acordo com Fossen (2011), as equações dinâmicas de uma embarcação podem ser reescritas de acordo com a teoria da robótica. Para uma embarcação atuando na superfície, pode-se adotar um modelo simplificado com três graus de liberdade (*degrees of freedom* — DoF):

$$M \dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau + w, \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu, \quad (2)$$

no qual M é a matriz de inércia, $C(\nu)$ é a matriz Coriolis-Centrípeta, $D(\nu)$ é a matriz de arraste, τ é o vetor de força generalizada (forças e momento) gerada pelos propulsores, w é o vetor de perturbações ambientais, $J(\eta)$ é a matriz Jacobiana de transformação cinemática, η é o vetor de posições generalizadas e ν é o vetor de velocidades generalizadas no sistema de coordenadas da embarcação.

A matriz Jacobiana da transformação cinemática é uma rotação pura em torno do eixo- z vertical e portanto pode ser definida da seguinte forma:

$$J(\eta) = R_b^e(\psi_b) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_b) & -\sin(\psi_b) & 0 \\ \sin(\psi_b) & \cos(\psi_b) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

A Tabela 1 apresenta as variáveis utilizadas ao longo deste texto. O sistema de coordenadas utilizado na área marítima é o NED (*North-East-Down*), tangente à superfície da Terra, com x_n sempre apontando ao norte, y_n para leste e z_n para baixo. Entretanto, para a apresentação dos resultados, será considerado um sistema cartesiano. Uma embarcação neste sistema de coordenadas está representada na Fig. 1.

Por fim, η , ν e τ são definidos da seguinte forma:

$$\eta = \begin{bmatrix} x_b^e \\ y_b^e \\ \psi_b \end{bmatrix}, \quad \nu = \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix}. \quad (4)$$

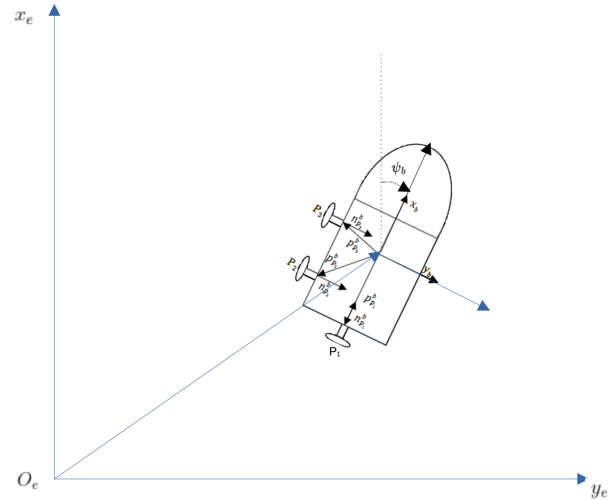


Figura 1. Representação da embarcação e sistemas de coordenadas.

Tabela 1. Notação utilizada.

DOF	Forças e Momentos	Velocidades Linear e Angular	Posições e Ângulos de Euler
Avanço	X	u	x_b^e
Desvio	Y	v	y_b^e
Guinada	N	r	ψ_b

2.1 Modelo dos Propulsores

A embarcação utilizada nos experimentos possui três propulsores, sendo dois laterais (P_2 e P_3) e um na popa (P_1), conforme a Fig. 1.

A força gerada por cada propulsor P_i pode ser descrita da seguinte forma:

$$F_{P_i} = \alpha_i^*(u_i) u_i |u_i|, \quad \alpha_i^*(u_i) = \begin{cases} \alpha_i^+, & \text{se } u_i \geq 0 \\ \alpha_i^-, & \text{se } u_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

com α_i^+ e α_i^- sendo os coeficientes de empuxo da i -ésima hélice no sentido direto e reverso, respectivamente, e u_i o comando de velocidade de rotação do i -ésimo propulsor em p.u. (por unidade) (Hsu et al., 2000).

A dinâmica da embarcação é multivariável e pode ser desacoplada permitindo que cada grau de liberdade possa ser reescrito de forma independente:

$$\tau = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_b^b \\ \mathbf{m}_b^b \end{bmatrix} = \mathbf{B}_P F_P, \quad (6)$$

na qual \mathbf{B}_P é a matriz de acoplamento, conforme a posição dos propulsores na embarcação:

$$\mathbf{B}_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & x_{P_2}^b & x_{P_3}^b \end{bmatrix}, \quad (7)$$

na qual $x_{P_2}^b$ e $x_{P_3}^b$ são as coordenadas dos propulsores P_2 e P_3 no eixo x_b .

3. CONTROLE

3.1 Linearização por Realimentação

A partir da equação (1), pode-se escolher o sinal de controle τ da seguinte forma:

$$\tau = \hat{M} \dot{\nu} + \hat{C}(\nu)\nu + \hat{D}(\nu)\nu, \quad (8)$$

na qual \hat{M} , \hat{C} e \hat{D} são estimativas das matrizes de inércia, Coriolis-Centrípeta e de arraste, respectivamente. Utilizando-se a propriedade da derivada de uma matriz de rotação em (2) (Siciliano et al., 2010),

$$\dot{\nu} = J^{-1}(\eta) \left[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)\nu \right]. \quad (9)$$

Substituindo-se (8) e (9) na equação (1), pode-se obter:

$$\begin{aligned} \ddot{\eta} &= J(\eta)M^{-1} \hat{M} J^{-1}(\eta) \left[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)\nu \right] \\ &+ J(\eta)M^{-1} \left[(\hat{C} - C)\nu + (\hat{D} - D)\nu + w \right] + \dot{J}(\eta)\nu. \end{aligned} \quad (10)$$

Subtraindo-se o sinal de controle u da equação (10), obtém-se:

$$\begin{aligned} \ddot{\eta} - u &= \left[J(\eta)M^{-1} \hat{M} J^{-1}(\eta) - I \right] u \\ &- J(\eta)M^{-1} \hat{M} J^{-1}(\eta) \dot{J}(\eta)\nu \\ &+ J(\eta)M^{-1} \left[(\hat{C} - C)\nu + (\hat{D} - D)\nu + w \right] + \dot{J}(\eta)\nu. \end{aligned} \quad (11)$$

Devido ao fato das matrizes nominais de inércia, Coriolis-centrípeta e arraste serem aproximações, o lado direito da equação (11) é o resíduo do desacoplamento usando essas aproximações e pode ser interpretado como uma perturbação de entrada d . Se os valores nominais fossem exatos, $\hat{M} = M$, $\hat{C} = C$ e $\hat{D} = D$, então a perturbação d resumiria-se à perturbação ambiental:

$$d = J(\eta)M^{-1}w. \quad (12)$$

Por fim, a dinâmica resultante equivale a três duplo integradores com ganhos unitários, sendo um para cada grau de liberdade:

$$\ddot{\eta} = u + d, \quad (13)$$

na qual $d = [d_1 \ d_2 \ d_3]^T$ engloba os resíduos das incertezas da planta, aproximações e perturbações.

A Fig. 2 representa o sistema de controle com desacoplamento no sistema de coordenadas estacionário.

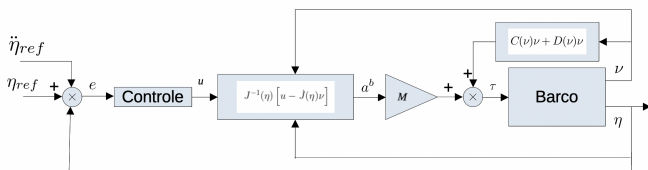


Figura 2. Sistema de controle com desacoplamento no sistema de coordenadas estacionário.

3.2 Controle por Modo Deslizante Adaptativo

A lei de controle por modo deslizante adaptativo proposta originalmente por Oliveira et al. (2016) é dada por:

$$u = \ddot{\eta}_{ref}(t) - \lambda \dot{\eta} + U, \quad (14)$$

$$e(t) := \eta(t) - \eta_{ref}(t), \quad (15)$$

na qual $\eta_{ref}(t)$ é o sinal de referência que define a trajetória a ser rastreada, $u_c = \ddot{\eta}_{ref}(t) - \lambda \dot{\eta}$ é a parte contínua do

sinal de controle e $u_s = U$ é a parte responsável pelo chaveamento do sistema durante o modo deslizante:

$$u_s = -\varrho(t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|}, \quad (16)$$

$$\sigma(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t). \quad (17)$$

A adaptação do sinal de modulação ϱ é gerada por dois filtros: um filtro de média

$$\tau \dot{u}_{av} = -u_{av} + u_s, \quad (18)$$

com constante de tempo $\tau > 0$ e uma função de modulação adaptativa

$$\dot{\varrho} = -\gamma_f \varrho + c_f (\|u_{av}\| + \delta), \quad \varrho(0) \geq 0, \quad (19)$$

sendo $\delta > 0$ uma constante arbitrária que garante um nível mínimo desejado para inicialização em condições iniciais nulas ($\varrho(0) = 0$).

Deve-se assumir as seguintes hipóteses:

(H.1) Assume-se que a perturbação de entrada $d(t)$ é desconhecida, integrável localmente e possui norma limitada por $\|d(t)\| \leq \bar{d}$, $\forall t$, na qual $\bar{d} \geq 0$ é um escalar desconhecido. Assume-se conhecido apenas um escalar $\bar{d}_0 \geq \|d(0)\|$. Além disso, existem as constantes conhecidas $c_f > \gamma_f > 0$ e $\tau > 0$ (constante de tempo do filtro de média), tais que para qualquer condição inicial $\varrho(0) > \|d(0)\|$:

$$\|d(t)\| \leq c_f e^{-\gamma_f t} * \left\| \tau^{-1} e^{-\frac{t}{\tau}} * d(t) \right\|, \quad \forall t \geq 0. \quad (20)$$

(H.2) É conhecido um $h > 0$ suficientemente grande tal que, para $\varrho(0) = \bar{d}_0 + h$ na lei de adaptação (19) seja válida a seguinte relação:

$$\|d(t)\| < \varrho(t), \quad \forall t \leq t_m, \quad (21)$$

na qual $t_m > 0$ é o primeiro instante de tempo no qual $\varrho(t_m) > \varrho(0)$.

(H.3) Para os respectivos valores de c_f e $\gamma_f > 0$ que satisfazem **(H.1)**, o crescimento de $d(t)$ é limitado exponencialmente por:

$$\|d(t)\| < \|d(0)\| e^{(c_f - \gamma_f)(t - t_m)}. \quad (22)$$

3.3 Controle por Modo Deslizante Adaptativo Baseado na Perturbação Estimada

Apesar dos diversos modelos existentes na literatura para estimativas de perturbações ambientais, com alguns deles sendo apresentados por Fossen (2011), sua reprodutibilidade em laboratório é inviável, por dependerem de características intrínsecas da natureza, tais como: as correntes oceânicas dependem da densidade da água, fricção do vento e trocas de calor na superfície, as ondas dependem dos cálculos de espectro, altura, etc. Sendo assim, além da dificuldade de gerar tais perturbações num experimento em laboratório, existe uma dificuldade ainda maior em mensurá-las.

Substituindo a equação (14) na (13) obtém-se

$$\ddot{\eta} = \ddot{\eta}_{ref} - \lambda \dot{\eta} + U + d. \quad (23)$$

Como $\ddot{e} = \ddot{\eta} - \ddot{\eta}_{ref}$, conclui-se que:

$$d = \ddot{e} - U. \quad (24)$$

Tanto o sinal de controle U quanto o sinal de deslizamento σ estão disponíveis nas leis de controle. A partir

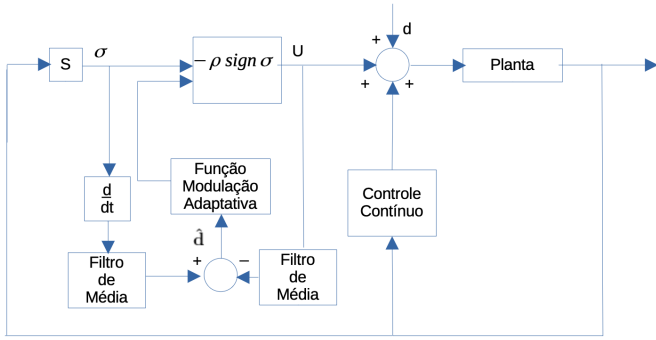


Figura 3. Controle por modo deslizante com modulação adaptativa baseada na estimativa da perturbação.

desta equação será possível não somente estimar as perturbações presentes no experimento, como também incluir tal estimativa da perturbação na lei de adaptação de forma que o sinal de modulação majore a perturbação estimada. O sinal σ deve ser derivado e aplicado em um filtro de média, para subtrair o sinal U também processado por um filtro do mesmo tipo. O sinal resultante é aplicado na lei de modulação adaptativa que também possui um filtro de média próprio, semelhante à equação (19). Esta lei de controle é ilustrada na Fig. 3.

4. EXPERIMENTOS

Foram realizados experimentos no Laboratório de Controle e Automação da UERJ utilizando uma piscinacom dimensões $3,25 \text{ m} \times 2,06 \text{ m} \times 0,75 \text{ m}$, com uma lâmina d'água de $0,2 \text{ m}$.

A embarcação utilizada no experimento foi construída por Amaral (2008), com dois propulsores laterais e um traseiro. Possui $0,48 \text{ m}$ de comprimento e atinge uma velocidade máxima de $0,25 \text{ m/s}$.

Com a finalidade de medir o posicionamento da embarcação na piscina, foi utilizado um sistema visual de captura de movimento, que atua como sensor de posição e orientação. Foram instalados na embarcação quatro marcadores esféricos que refletem a luz quase infravermelha emitida pelas câmeras. Esses marcadores definem o objeto representado graficamente no *software* utilizado, o *Vicon Tracker 3.7*. Esse *software* possibilita a definição de um ambiente de trabalho, a manipulação de dados do objeto e a medição da posição e orientação com precisão submilimétrica. A velocidade do barco é estimada a partir da medição de posição e orientação utilizando-se uma aproximação de Euler. Apesar do sistema atingir uma frequência de amostragem de até 1 kHz , optou-se por uma frequência de 100 Hz , pois frequências maiores ocasionaram perdas na aquisição de quadros (*frames*). A comunicação entre o microcontrolador a bordo da embarcação, que aciona seus motores, e o computador onde o algoritmo de controle é executado é realizada por uma rede sem fios *Wi-Fi*. A Figura 4 representa o sistema experimental.

4.1 Resultados Experimentais sem Perturbações

A velocidade de referência utilizada nos experimentos foi $u_d = 0,1 \text{ m/s}$. Tendo em vista a comparação do desem-

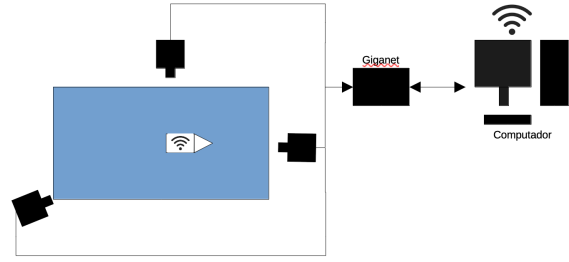


Figura 4. Diagrama esquemático do aparato experimental.

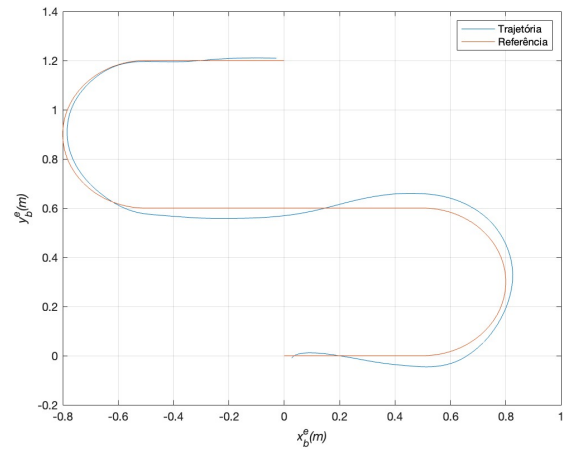


Figura 5. Trajetória da embarcação sem perturbações com controle PD.

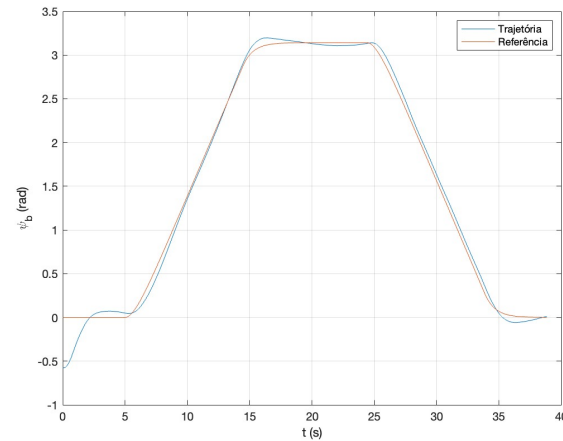


Figura 6. Ângulo de rumo da embarcação sem perturbações com controle PD.

penho do SMC adaptativo com um controlador básico, foi utilizado um controlador com ações proporcional e derivativa (PD):

$$u_{PD} = -(K_p e + K_d \dot{e}), \quad (25)$$

com ganhos $K_p = 12$ e $K_d = 8$, foram obtidos os resultados apresentados nas Figs. 5 e 6, sem efeitos de perturbações ambientais. As linhas em vermelho são as referências, sendo a Fig. 5 o caminho a ser percorrido pela embarcação e a Fig. 6 o ângulo de guinada ψ_b durante esta trajetória.

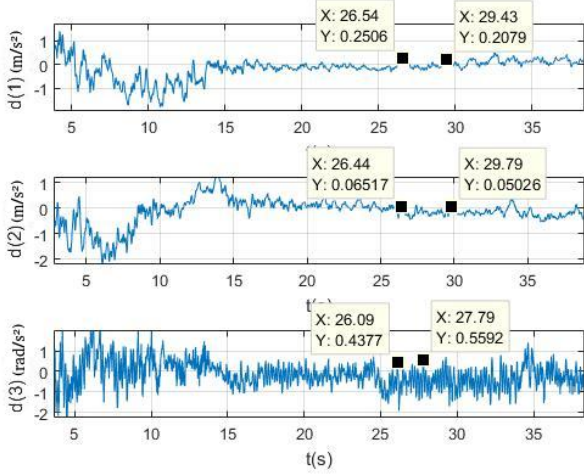


Figura 7. Perturbações estimadas em um experimento sem ondas.

Portanto, mesmo num experimento isento de perturbações ambientais, o controle PD já se mostrou ineficiente, principalmente devido a incertezas paramétricas do modelo dinâmico do barco utilizado na linearização por realimentação. Em simulações, tal comportamento poderia ser evitado pois há uma tendência natural em se utilizar na linearização por realimentação modelos e parâmetros estimados (\hat{M} , \hat{C} , \hat{D}) iguais àqueles do modelo de simulação da embarcação (M , C , D), o que resultaria num casamento perfeito e a convergência assintótica dos erros de rastreamento para zero.

4.2 Resultados Experimentais com Ondas

Foi utilizado o SMC adaptativo baseado na perturbação estimada, que é apresentada na Fig. 7 sem a presença de distúrbios ambientais, para servir de base comparativa com os demais experimentos. Nesta figura, nota-se que cada elemento do vetor \mathbf{d} tem módulo inferior a 1 na maior parte do tempo, oscilando bem próximo a zero a partir de 15 segundos. Estas perturbações estimadas se devem a imperfeições na linearização por realimentação e, possivelmente, ruído de medição.

Foram realizados experimentos com a geração de ondas aleatórias na piscina. Em todos os experimentos, as ondas só começaram a ser geradas após o barco finalizar a primeira reta, entre 2 e 3 segundos.

Com a presença de ondas na piscina, os componentes do vetor \mathbf{d} são apresentados na Fig. 8. É possível notar a formação de um padrão senoidal, presumivelmente induzido pelas ondas, com amplitudes próximas a 2 em $\mathbf{d}(1)$ e a 4 em $\mathbf{d}(2)$, além de um período médio estimado de 0,8 s.

Foram utilizados os seguintes parâmetros no SMC adaptativo baseado na perturbação estimada:

$$\begin{aligned} c_f = 1, 2, \quad \gamma_f = 0, 5, \quad \tau = 0, 1 \text{ s}, \quad \delta = 0, 1, \\ \varrho_1(0) = 10, \quad \varrho_2(0) = 10, \quad \varrho_3(0) = 10. \end{aligned} \quad (26)$$

A trajetória executada pelo barco é apresentada na Fig. 9 e os sinais de erro estão apresentados na Fig. 10. Os erros mantiveram-se muito pequenos, exceto em dois momentos quando foram aproximadamente 2 cm. Esses dois picos

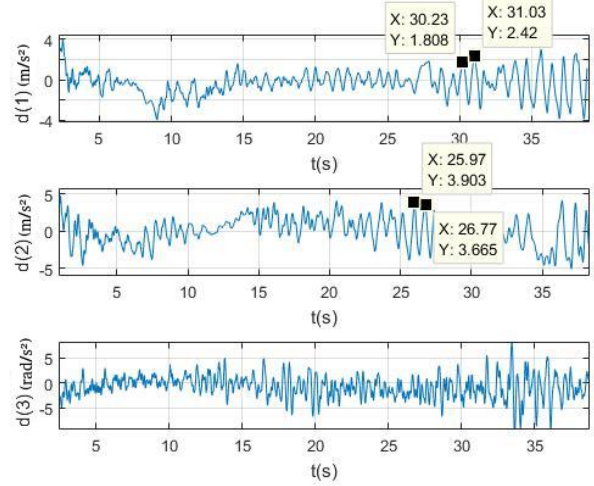


Figura 8. Perturbações estimadas em um experimento com ondas.

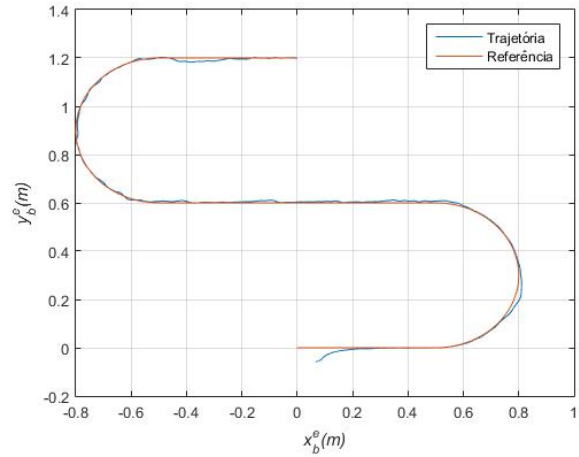


Figura 9. Experimento com SMC adaptativo baseado na perturbação: trajetórias de referência e a obtida com ondas.

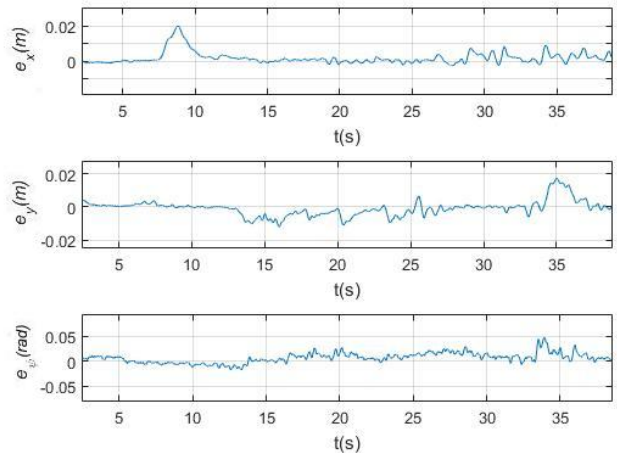


Figura 10. Experimento com SMC adaptativo baseado na perturbação: sinais de erro com ondas.

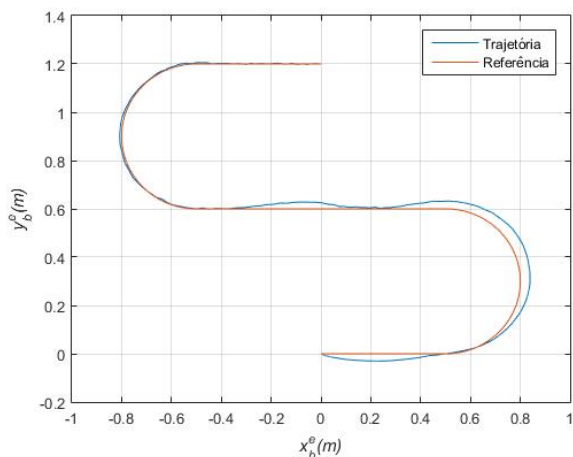


Figura 11. Experimento com controle PD: trajetórias de referência e a obtida com ondas.

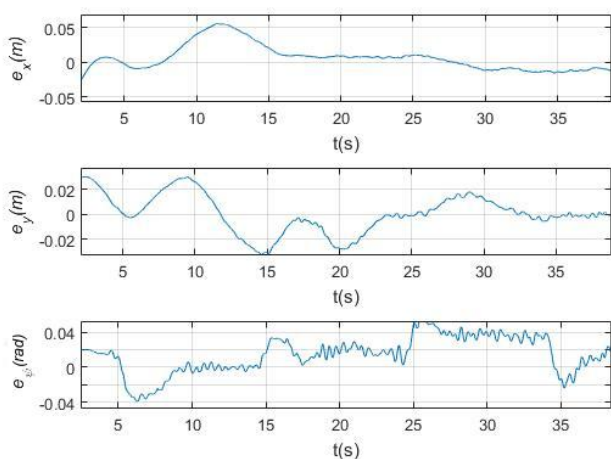


Figura 12. Experimento com controle PD: sinais de erro com ondas.

maiores nos sinais de erro ocorreram quando o barco entra ou sai de uma curva, visto que mesmo definindo-se uma velocidade constante ao longo do experimento, o barco naturalmente sofre aceleração centrípeta ao passar da reta para a curva.

Para o controlador PD obtém-se como resultados as Figs. 11 e 12, visivelmente tão ruins quanto aqueles obtidos na ausência de distúrbios, vide Fig. 5.

5. CONCLUSÃO

O controle por modo deslizante adaptativo proposto permitiu vencer as incertezas dos parâmetros da embarcação e perturbações ambientais. Para isso, foi utilizado um método para estimar os distúrbios a partir de sinais disponíveis no sistema de controle, mas que seriam difíceis de estimar a partir de sensores ambientais.

A linearização por realimentação transformou a dinâmica da embarcação em duplo integradores, para facilitar o projeto dos controladores. Entretanto, o descasamento entre o modelo dinâmico utilizado na linearização por

realimentação e a dinâmica do barco verdadeiro impediram o bom desempenho de um controlador PD, que idealmente permitiria a convergência dos erros de rastreamento para zero na ausência de perturbações ambientais.

Também foram apresentados resultados experimentais de rastreamento de trajetórias obtidos com uma pequena embarcação de superfície utilizando linearização por realimentação e controle por modo deslizante adaptativo, que resultaram num rastreamento bastante preciso, mesmo na presença de ondas.

O algoritmo de controle proposto mostrou-se eficiente contra ventos, ondas e correntezas, tendo sido obtidos erros de rastreamento pequenos também em outros experimentos não apresentados neste trabalho por limitação de espaço.

Os resultados obtidos nos experimentos foram favorecidos pela medição precisa do ângulo e da posição da embarcação pelo sistema de câmeras. Uma proposta de trabalho futuro com o algoritmo proposto seria a sua aplicação no controle de uma embarcação utilizando sensores usais, tais como sistemas de navegação por satélites integrados a navegadores inerciais.

REFERÊNCIAS

- Amaral, G.S. (2008). Sistema de posicionamento dinâmico para um pequeno veículo flutuante. Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro.
- Barbas, V.M. (2021). *Controle por Modo Deslizante Adaptativo Aplicado ao Rastreamento de Trajetórias para uma Embarcação Sujeita a Perturbações Ambientais*. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, UERJ, Rio de Janeiro.
- Craig, J.J. (2005). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 3 edition.
- Fossen, T.I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley, Chichester, UK.
- Hsu, L., Costa, R.R., Lizarralde, F., e Cunha, J.P.V.S. (2000). Dynamic positioning of remotely operated underwater vehicles. *IEEE Robotics & Automation Mag.*, 7(3), 21–31.
- Mahini, F., DiWilliams, L., Burke, K., e Ashrafiuon, H. (2013). An experimental setup for autonomous operation of surface vessels in rough seas. *Robotica*, 31(5), 703–715.
- Oliveira, T.R., Cunha, J.P.V.S., e Hsu, L. (2016). Adaptive sliding mode control for disturbances with unknown bounds. In *Proc. 14th Int. Workshop on Variable Structure Sys.*, 59–64. Nanjing, Jiangsu, China.
- Rosario, R.V.C. e Cunha, J.P.V.S. (2017). Experimental variable structure trajectory tracking control of a surface vessel with a motion capture system. In *Proc. 43rd Conf. IEEE Ind. Electronics Soc. (IECON)*, 2864–2869. Beijing, China.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., e Oriolo, G. (2010). *Robotics — Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag, London.
- Young, K.D., Utkin, V.I., e Özgüner, U. (1999). A control engineer's guide to sliding mode control. *IEEE Trans. Contr. Sys. Tech.*, 7(3), 328–342.