

Controle por Modo Deslizante Adaptativo Aplicado ao Rastreamento de Trajetória de uma Embarcação^{*}

Vinicius Machado Barbas^{*} José Paulo Vilela Soares da Cunha^{*}
Paula B. Garcia-Rosa^{**}

^{*} Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica,
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, (e-mail:
viniciusbarbas@id.uff.br, jpaulo@ieee.org)

^{**} SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway, (e-mail:
p.b.garcia-rosa@ieee.org)

Abstract: This paper considers the dynamic positioning of a surface marine vessel. To improve the accuracy of the trajectory tracking in the presence of environmental disturbances with unknown amplitudes, a sliding-mode adaptive controller based on unit vector control is proposed. Simulation results allow the comparison of the performances of the proposed controller, a proportional-derivative (PD) controller and a sliding-mode controller with fixed gains, indicating a significant improvement in the trajectory tracking and the reduction of the amplitude of the control signals.

Resumo: Neste artigo considera-se o posicionamento dinâmico de uma embarcação marítima de superfície. Projeta-se um controlador por modo deslizante adaptativo baseado em controle vetorial unitário para melhorar a precisão de rastreamento de trajetória da embarcação na presença de perturbações ambientais com amplitudes desconhecidas. Resultados de simulações permitem comparações entre os desempenhos do controlador proposto, um controlador proporcional-derivativo (PD) e um controlador por modo deslizante com amplitude de controle constante, que indicam a melhora significativa do rastreamento da trajetória e a redução das amplitudes dos sinais de controle.

Keywords: Surface vessel; Trajectory tracking; Sliding-mode control; Adaptive control; Feedback linearization; PD control.

Palavras-chaves: Embarcação de superfície; Rastreamento de trajetória; Controle por modo deslizante, Controle adaptativo; Linearização por realimentação; Controle PD.

1. INTRODUÇÃO

Há algum tempo, o controle de posição e orientação de embarcações de superfície não tripuladas (*unmanned surface vessels* — USVs), com ou sem perturbações, é abordado em diversos trabalhos (Takahashi et al., 2007). Muitos modelos da dinâmica de embarcações com posicionamento dinâmico são desenvolvidos sob o pressuposto de baixa velocidade. Estes são válidos apenas para a manutenção da posição e pequenas manobras. Entretanto, na prática as embarcações são operadas onde há a necessidade de controle para o rastreamento de trajetórias, não apenas para mantê-las estacionárias em posicionamento dinâmico. Neste artigo, é estudado o rastreamento de trajetória de uma embarcação sujeita a perturbações ambientais.

O desenvolvimento de controladores para o rastreamento de trajetórias precisa considerar fenômenos dinâmicos não-lineares que são muito significativos durante o movimento da embarcação. Cabecinhas and Silvestre (2019) apresentaram o rastreamento de trajetória com um controle não

linear aplicando a técnica *backstepping*. Wang et al. (2015) apresentaram um piloto automático não linear adaptativo. Wang et al. (2018) apresentaram um controle preditivo de modelo não linear em tempo real. Cheng et al. (2007) utilizaram um controle por modo deslizante convencional para o rastreamento de trajetória para uma embarcação sem perturbações ambientais.

Neste artigo, é aplicada a linearização por realimentação (Slotine and Li, 1991, Capítulo 6) para transformar a dinâmica não-linear da embarcação em uma dinâmica linear. Isto facilita a aplicação de diversas técnicas de controle, por exemplo, a realimentação de estado linear, que neste caso equivale ao controle com ações proporcional e derivativa (PD) (Fossen, 2002, Capítulo 7).

Para rejeitar os efeitos de perturbações ambientais variantes no tempo, aqui se utiliza o controle por modo deslizante baseado no controle vetorial unitário (Edwards and Spurgeon, 1998). Para aumentar a eficiência do controle por modo deslizante, é desenvolvida uma versão adaptativa da sua função de modulação, que estabelece a amplitude do sinal de controle. A estratégia é baseada no controle equivalente estendido (Oliveira et al., 2016),

^{*} Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPERJ e CAPES — Código de Financiamento 001.

que permite estimar a amplitude da perturbação a partir do sinal de controle. Desta forma não há a necessidade de conhecimento prévio da magnitude das perturbações, pois o controle se adapta de acordo com a necessidade. Isto permite a redução de efeitos indesejáveis que decorreriam de sinais de controle exageradamente grandes, tais como alto consumo de energia, desgaste dos atuadores e o fenômeno *chattering* (Utkin et al., 1999) presente em controle por modo deslizante.

Este texto é organizado como é descrito a seguir. A Seção 2 apresenta a modelagem da dinâmica de embarcações de superfície. Em seguida, a Seção 3 descreve a linearização por realimentação da embarcação. Com base nisto, na Seção 4 são desenvolvidos três controladores para o rastreamento de trajetórias. A Seção 5 apresenta resultados de simulações do rastreamento de trajetória realizado por uma embarcação sujeita a ondas e correnteza, o que permite a comparação dos desempenhos das estratégias de controle.

2. MODELAGEM DA DINÂMICA DA EMBARCAÇÃO

Uma embarcação marinha está exposta ao vento, ondas e correntezas e seu movimento ocorre em seis graus de liberdade, que incluem movimentos de translação e rotação. As equações de movimento podem ser derivadas usando as equações de *Newton-Euler* ou *Lagrange*. A modelagem da embarcação é feita com base em equações físicas, eventualmente em conjunto com abordagens estatísticas, sendo estes métodos convencionais para a construção de modelos para o desenvolvimento do controle (Ahani et al., 2020). O modelo dinâmico clássico de sistemas navais é complexo e seus coeficientes são difíceis de determinar com precisão (Fossen, 2002). Uma forma de simplificar esse modelo para o projeto de sistemas de controle é utilizar as propriedades físicas da embarcação.

2.1 Modelo em Três Graus de Liberdade

Uma simplificação frequentemente usada é a representação do movimento em apenas três graus de liberdade na superfície da água. Desta forma, assume-se que o balanço e o movimento vertical são desprezíveis, o que é uma boa aproximação para a maioria dos navios convencionais, plataformas semi-submersíveis (Fossen, 2021) e, também, a embarcação deste trabalho, pois não fazem movimentos de mergulho. Esta simplificação foi aplicada por exemplo em (Cheng et al., 2007; Brodtkorb et al., 2018).

A Figura 1 apresenta os sistemas de coordenadas utilizados: o sistema de coordenadas estacionário representado por $x_e O_e y_e$ e o sistema de coordenadas móvel que é fixo na embarcação, representado por $x_b O_b y_b$. O ângulo de rumo é representado por ψ . Assume-se que a embarcação se movimenta apenas na superfície da água ao longo dos eixos x_b e y_b , além da rotação em torno do eixo vertical z_b .

Sendo assim, é possível representar as equações dinâmicas genéricas de um veículo marinho (Fossen, 2002):

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

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

onde M é a matriz de inércia e massas adicionais; $C(\nu)$ é a matriz Coriolis-centrípeta; $D(\nu)$ é a matriz de amor-

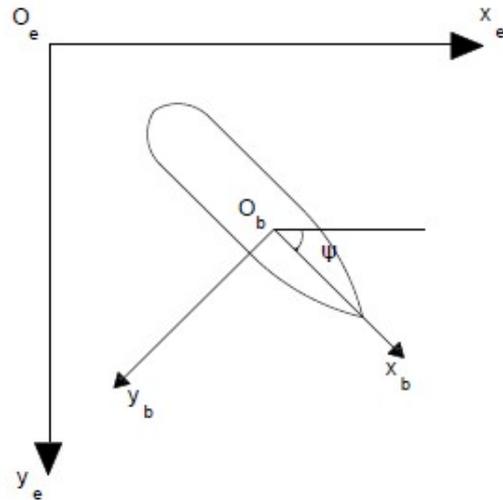


Figura 1. Vista superior da embarcação, sistemas de coordenadas fixas e móveis.

tecimento; $\nu := [u, v, r]^T$ é o vetor da velocidade generalizada representado no sistema de coordenadas móvel; $\tau := [X, Y, N]^T$ é o vetor da força generalizada gerada pelos propulsores; $\eta := [x, y, \psi]^T$ é o vetor de posição generalizada, no qual x e y são as coordenadas da origem O_b representadas no sistema estacionário; w é o vetor de perturbações ambientais. A Tabela 1 apresenta a notação adotada para forças, momentos e velocidades (SNAME, 1950).

Tabela 1. Notação SNAME para a embarcação.

Descrição	Força	Velocidade
Translação do eixo x_b	X	u
Translação do eixo y_b	Y	v
Rotação em torno do eixo z_b	N	r

A transformação de coordenadas do sistema móvel para o sistema de coordenadas estacionário na eq. (2) é realizada pela matriz Jacobiana (Feemster and Esposito, 2011):

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

2.2 Perturbações

Na equação (1), w representa a força generalizada resultante das perturbações ambientais causadas pelas ondas e correnteza. Neste trabalho, as perturbações causadas pelo vento não são consideradas. Os modelos dinâmicos considerados para essas perturbações são descritos com mais detalhes em (Fossen, 2021, Capítulo 10), onde as forças e os momentos são apresentados. As perturbações são modeladas independentemente. O espectro de onda considerado nas simulações é o espectro JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), com altura significativa e frequência definidos na Tabela 2. Neste caso, o estado de mar é considerado severo (Fossen, 2002, Tabela 4.2). Os dados

básicos utilizados para a simulação das perturbações são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Características da correnteza e ondas.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Altura significativa da onda	H_s	3,0	m
Frequência da onda	ω_0	0,6	rad/s
Direção média da onda	Psi_mean	5,2	rad
Velocidade da correnteza	vel	1,5	m/s
Direção da correnteza	dir	5,6	rad

3. LINEARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO

Segundo Silva (2006), a realimentação por linearização permite transformar a dinâmica de um sistema não-linear em uma dinâmica linear para que seja possível utilizar técnicas bem conhecidas e poderosas para controlar o sistema original. Este tipo de controle é comumente aplicado em veículos aquáticos e subaquáticos, desde que o sistema não-linear tipo massa-mola-amortecedor possa ser transformado em um sistema linear por meio de um mapeamento não-linear apropriado.

Basicamente, o procedimento é desassociar a parte não-linear da parte linear, anulando-a com uma entrada reversa, igual ou próxima da não-linearidade. A resultante será a parte linear do sistema mais uma perturbação. Seguindo-se (Fossen, 2002, Seção 7.3.2), para que este tipo de controle seja realizado, é necessário derivar a equação (2), obtendo-se

$$\dot{\nu} = J^{-1}(\eta)[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)\nu]. \quad (4)$$

De acordo com Rosario and Cunha (2016), a lei de controle linearizante é

$$\tau = Ma^b + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu. \quad (5)$$

na qual a^b é o comando de aceleração no sistema de coordenadas da embarcação. Aplicando-se (5) em (1) sem perturbação ($w \equiv 0$), foi obtido

$$M(\dot{\nu} - a^b) = MJ^{-1}(\eta)[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)\nu - J(\eta)a^b] = 0. \quad (6)$$

Designando-se

$$a^e = \dot{J}(\eta)\nu + J(\eta)a^b, \quad (7)$$

na qual a^e é a aceleração no sistema de coordenadas estacionário gerada por um controlador, obtém-se de (6)–(7) o sistema linear desacoplado

$$M^*(\ddot{\eta} - a^e) = 0, \quad (8)$$

no qual $M^* = J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta) > 0$. A partir da equação (7), obtém-se

$$a^b = J^{-1}(\eta)[a^e - \dot{J}(\eta)\nu]. \quad (9)$$

Esta realimentação aplica parâmetros nominais da embarcação. De forma ideal, a realimentação transformaria a dinâmica da embarcação em três duplos integradores com ganhos unitários, sendo um para cada grau de liberdade. Desta forma, a linearização reduz a equação da dinâmica da embarcação à

$$\ddot{\eta}(t) = a^e(t) + d(t), \quad (10)$$

na qual a^e é o sinal de controle (aceleração representada no sistema estacionário) e o sinal de entrada d representa as perturbações ambientais, incertezas e aproximações.

4. CONTROLADORES

A linearização por realimentação possibilita utilizar uma vasta gama de controladores. A seguir são apresentados três controladores tendo-se em vista a comparação dos seus desempenhos.

4.1 Controle com Ações Proporcional e Derivativa

O algoritmo mais simples para o controle de um duplo integrador usa as ações proporcional e derivativa (PD) (Cunha, 1992). Para o sistema (10), a lei de controle é dada por

$$a^e(t) = -K_p e(t) - K_d \dot{e}(t) + \ddot{\eta}_{ref}(t), \quad (11)$$

na qual o sinal de erro é

$$e(t) := \eta(t) - \eta_{ref}(t), \quad (12)$$

$\eta_{ref}(t)$ é a trajetória de referência a ser rastreada e $\ddot{\eta}_{ref}(t)$ é a aceleração da trajetória de referência, que é adicionada para reduzir o erro de rastreamento (Rosario, 2017).

Este controlador permite escolher arbitrariamente as posições dos autovalores da malha fechada. Para determinar os ganhos do controlador pelo método de posicionamento de autovalores, são calculadas as raízes da equação característica da malha fechada, que para o caso escalar é

$$s^2 + k_d s + k_p = 0. \quad (13)$$

Para que uma resposta transitória estável e superamortecida seja obtida, as raízes da equação (13) devem ser reais e negativas. A partir destas características, pode-se fazer

$$s^2 + k_d s + k_p = (s - \lambda_1)(s - \lambda_2), \quad (14)$$

na qual $\lambda_1 < 0$ e $\lambda_2 < 0$ são os autovalores desejados. Desta forma, a partir da solução de (14) pode-se escolher os ganhos pelas seguintes relações para o caso escalar

$$k_p = \lambda_1 \lambda_2, \quad k_d = -(\lambda_1 + \lambda_2). \quad (15)$$

Para que os autovalores dos três graus de liberdade sejam iguais, os ganhos da lei de controle multivariável (11) são

$$K_p = k_p I, \quad K_d = k_d I, \quad (16)$$

nos quais I é a matriz identidade 3×3 .

4.2 Controle por Modo Deslizante

Um problema do controle PD é que as perturbações afetariam a trajetória da embarcação. A inclusão de uma ação integral seria um remédio para eliminar os efeitos de perturbações que fossem constantes, entretanto, seria incapaz de eliminar efeitos de perturbações ambientais, pois são variantes no tempo.

O controle por modo deslizante é capaz de rejeitar os efeitos de perturbações casadas com o sinal de controle, tais como a perturbação de entrada no modelo (10). De acordo com Melo (2017), o projeto de um controlador por modo deslizante se divide em duas partes. Na primeira, deve-se projetar uma superfície no espaço de estado na qual o modo deslizante desenvolva uma trajetória de acordo com as especificações desejadas. Na segunda parte, projeta-se uma lei de controle que obedeça as condições de existência do modo deslizante e torne a superfície de deslizamento atrativa, independentemente de perturbações. Diversas técnicas para desenvolver essas etapas são bem

apresentadas em (Edwards and Spurgeon, 1998; Utkin et al., 1999).

Aqui utiliza-se o sinal

$$\sigma(t) = \dot{e}(t) - \Lambda e(t), \quad (17)$$

no qual Λ é uma matriz Hurwitz escolhida para definir a superfície de deslizamento $\sigma = 0$. Uma vez que o sinal σ tenha atingido essa superfície, a dinâmica do erro será regida pela equação diferencial $\dot{e}(t) = \Lambda e(t)$, e então o erro convergirá para zero exponencialmente.

Utiliza-se uma lei de controle vetorial unitário (*unit vector control* — UVC) para realizar o modo deslizante (Edwards and Spurgeon, 1998):

$$a^e(t) = U(t) + \ddot{\eta}_{ref}(t), \quad U(t) = -\rho(t) \frac{\sigma(t)}{\|\sigma(t)\|}, \quad (18)$$

na qual $\rho(t) > 0$ é a função de modulação que estabelece a amplitude do sinal de controle. Se esta satisfizer

$$\rho(t) \geq \|d(t)\| + \delta, \quad \forall t \geq 0, \quad (19)$$

na qual $\delta > 0$ é uma constante arbitrária, então garante-se que o modo deslizante na superfície $\sigma = 0$ será atingido em tempo finito (Hsu et al., 2019). Para se garantir que esta desigualdade seja sempre satisfeita, seria necessário conhecer algum majorante para a norma $\|d(t)\|$ que dispense a medição da perturbação $d(t)$, o que poderia resultar em algum procedimento muito conservador. O conservadorismo seria indesejável pois acarretaria em controle de grande amplitude, desperdício de energia e o agravamento do fenômeno *chattering*.

4.3 Controle por Modo Deslizante Adaptativo

Para o funcionamento do controle por modo deslizante há a necessidade de conhecimento de algum majorante da perturbação, para que a função de modulação satisfaça $\rho > \|d\|$ e, desta forma, o estado convirja para a superfície de deslizamento $\sigma = 0$. O avanço que o controle por modo deslizante adaptativo propõe é que não haja a necessidade de conhecimento prévio da perturbação nem da sua magnitude. O valor de $\rho(t)$ se adapta conforme a necessidade, o que reduz o consumo de energia e o desgaste dos atuadores.

Melo (2017) apresentou no Capítulo 4 da sua dissertação o controle por estrutura variável com adaptação baseada no *controle equivalente estendido* (Oliveira et al., 2016). Esta abordagem tem como vantagem a sua simplicidade e a possibilidade de resistir a perturbações não suaves. A seguir são apresentadas algumas hipóteses sobre a perturbação semelhantes àquelas assumidas em (Oliveira et al., 2016; Melo, 2017) para o caso do controle escalar, aqui adaptadas para o controle vetorial unitário.

Hipótese 1. A perturbação de entrada $d(t)$ é desconhecida, integrável localmente e possui norma limitada por $\|d(t)\| \leq \bar{d} < +\infty, \forall t$, na qual \bar{d} é um escalar desconhecido.

Hipótese 2. Assume-se conhecido um escalar $\bar{d}_0 \geq \|d(0)\|$.

Hipótese 3. Há constantes conhecidas $c_f > \gamma_f > 0$ e $\tau > 0$ tais que a desigualdade

$$\|d(t)\| \leq c_f e^{-\gamma_f t} * \left\| \tau^{-1} e^{-t/\tau} * d(t) \right\| + e^{-\gamma_f t} \bar{d}_0, \quad (20)$$

seja satisfeita $\forall t \geq 0$, na qual τ é a constante de tempo do filtro de média, c_f é o ganho de alta frequência da lei adaptativa e γ_f é o seu fator de esquecimento.

O sinal de modulação do UVC (18) é gerado pela lei de adaptação:

$$\dot{\rho}(t) = -\gamma_f \rho(t) + c_f (\|U_{x_{eq}}(t)\| + \Delta), \quad \rho(0) \geq \bar{d}_0 + \delta, \quad (21)$$

na qual $U_{x_{eq}}(t)$ é o sinal de *controle equivalente estendido* do controle vetorial unitário U e $\Delta \geq \delta \gamma_f c_f^{-1} > 0$ é uma constante escolhida para garantir a mínima amplitude de controle desejada δ , vide desigualdade (19).

Na ausência de modo deslizante, $\|U_{x_{eq}}(t)\| = \rho(t)$. Quando ocorrer o modo deslizante, então o sinal de controle U rejeita a perturbação, logo $\|U_{x_{eq}}(t)\|$ converge para $\|d(t)\|$.

Assim, antes de atingir o modo deslizante,

$$\dot{\rho}(t) = (c_f - \gamma_f)\rho(t) + c_f \Delta \quad (22)$$

é uma expressão equivalente à equação diferencial (21) quando $\|U_{x_{eq}}(t)\| = \rho(t)$. Da Hipótese 3, conclui-se que $c_f - \gamma_f > 0$, então $\rho(t)$ crescerá exponencialmente superando a magnitude da perturbação a partir de algum momento, de forma que a superfície de deslizamento seja atingida em tempo finito.

Após a superfície de deslizamento ser atingida, a adaptação é feita pelo filtro (21), cuja entrada é a estimativa de $\|d(t)\|$ dada pelo controle equivalente. Então, o sinal de modulação é a solução da equação diferencial (21):

$$\rho(t) = e^{-\gamma_f t} \rho(0) + c_f e^{-\gamma_f t} * (\|U_{x_{eq}}(t)\| + \Delta), \quad t \geq 0. \quad (23)$$

Entretanto, o controle equivalente estendido $U_{x_{eq}}$ não é um sinal disponível. Contudo, o mesmo pode ser aproximado pela componente de baixa frequência do sinal de controle U quando ocorrer o modo deslizante. De acordo com Utkin (1992), o controle médio U_{av} pode servir como uma estimativa de $U_{x_{eq}}$. O controle médio pode ser obtido por um filtro passa-baixas

$$\tau \dot{U}_{av}(t) = -U_{av}(t) + U, \quad (24)$$

com constante de tempo $\tau > 0$ pequena o bastante quando comparada com a componente lenta de U , porém grande o suficiente para atenuar o chaveamento de alta frequência presente em U . Este é denominado *filtro de média*.

A desigualdade (20) na Hipótese 3 pode ser obtida a partir de (19) e (23) pela inclusão do efeito do filtro de média (24).

5. SIMULAÇÕES

Neste artigo, as simulações foram realizadas considerando o modelo de uma embarcação do tipo *supply vessel*, amplamente utilizada na indústria marítima. As características principais da embarcação são apresentadas na Tabela 3 (Fossen, 2002). Para avaliar o desempenho do algoritmo de controle proposto, a embarcação deve seguir uma trajetória de referência curvilínea enquanto é submetida a perturbações ambientais de ondas e correnteza. As perturbações foram calculadas utilizando blocos disponíveis do *toolbox Marine Systems Simulator* (MSS) (Fossen and Perez, 2004).

Tabela 3. Características do *supply vessel*.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Massa	m	3268×10^3	kg
Comprimento	L	74,3	m
Área lateral projetada	A_L	400	m ²
Área transversal projetada	A_T	1000	m ²
Boca	B	16,4	m
Comprimento do perímetro da projeção do modelo	S	50	m

Para o rastreamento da trajetória, foram aplicados os controladores apresentados na Seção 4, i.e. controle PD, controle por modo deslizante com função de modulação constante e controle por modo deslizante adaptativo.

O rastreamento da trajetória foi realizado com velocidade de 2,0 m/s (3,89 nós náuticos). As perturbações ambientais aplicadas em todas as simulações são apresentadas na Figura 2. Essas foram aplicadas 100 segundos após o início da trajetória, para permitir comparações entre os desempenhos dos controladores após o transitório inicial.

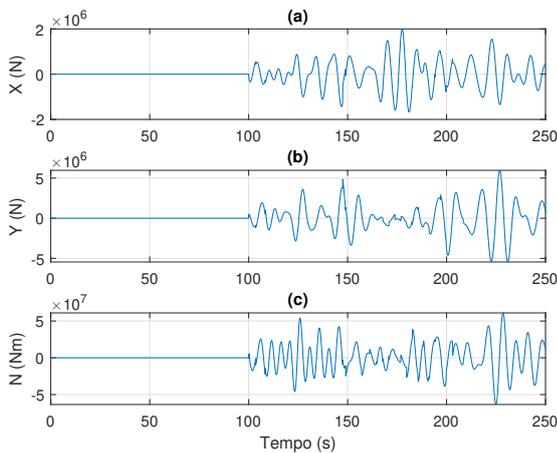


Figura 2. Forças resultantes das perturbações ambientais.

Algumas dificuldades foram contornadas para seguir uma trajetória ideal onde existem retas interpoladas com curvas. No momento em que a embarcação inicia a curva, haveria um salto na velocidade angular de referência ψ_{ref} , para que a orientação da embarcação fosse mantida tangencial à trajetória. Isso produziria impulsos na aceleração angular de referência e no sinal de controle, que por sua vez causariam deslocamentos indesejados. Para contornar este problema, um filtro passa-baixas suavizou a referência do ângulo de rumo, conforme sugerido em (Rosario and Cunha, 2016). Neste trabalho, o seguinte filtro é utilizado:

$$H(s) = \frac{1}{9s + 1}. \quad (25)$$

Inicialmente, o controlador PD foi implementado. Este controlador é o mais simples e mais utilizado e por isto serve como base para comparações. Para que o controlador PD funcione corretamente, os ganhos k_p e k_d são calculados por (15) de acordo com o comportamento desejado. Os autovalores $\lambda_1 = -0,09$ rad/s e $\lambda_2 = -0,1$ rad/s foram escolhidos com o auxílio de simulações de modo que os sinais de controle sejam condizentes com a realidade.

A Figura 3 apresenta os resultados de simulação obtidos com o controle PD. Observa-se que a embarcação busca rastrear a trajetória, mas apesar de fazer uma trajetória similar a desejada, não a percorre de forma fiel (Fig. 3(a)) devido às perturbações ambientais. O rumo seguido pela embarcação (Fig. 3(b)) também não é o desejado. Na Figura 3(c) são apresentadas as atuações do controle nos três graus liberdade. Verifica-se o esforço inicial em X da ordem de 10^6 N para que a embarcação siga na direção da trajetória, assim como em Y . No gráfico inferior da Figura 3(c), verifica-se a atuação do controlador para que a embarcação faça o movimento de curva, tanto para a direita quanto para a esquerda. Observa-se que após o período da curva, o controle neste eixo tenderia a ficar em repouso caso não houvesse perturbação.

O segundo algoritmo utilizado foi o controle por modo deslizante. Este foi apresentado na Seção 4.2, onde é criada uma superfície de deslizamento σ no espaço de estado atrativa, de forma que o controle tenda sempre a ela. Neste tipo de controle, onde a amplitude do controle ρ é fixo, esta deve ser sempre maior do que $\|d\|$. Isto garante que o estado convirja para a superfície $\sigma = 0$, ao custo de que o controle esteja sempre atuando à espera do maior pico da perturbação, ainda que a perturbação seja geralmente bem menor. Com isto há um gasto desnecessário de energia. Foram utilizados ganhos conservadores $\rho = 0,85$ e $\Lambda = -0,06I$.

Os resultados de simulação do controle por modo deslizante são apresentados na Figura 4. Na Figura 4(a) percebe-se que a trajetória de referência foi seguida corretamente e, além disso, é nítida a melhora em relação ao controle PD na Figura 3(a). Na Figura 4(b) é possível observar que a embarcação segue o rumo desejado. Na Figura 4(c), nota-se que o controle está a todo momento ativo, não apenas durante as curvas mas também durante os trechos retos, com ou sem influências de perturbações.

O terceiro algoritmo aplicado é o controle por modo deslizante adaptativo apresentado na Seção 4.3, no qual o valor de ρ varia de acordo com o controle equivalente e se adapta às perturbações. Desta forma, haveria economia de energia nos propulsores.

Para a lei de adaptação (21) foram escolhidos $c_f = 0,2$ rad/s e $\gamma_f = 0,1$ rad/s, respeitando-se a Hipótese 3, e $\Delta = 0,01$. O controle equivalente foi estimado pelo filtro de média (24) com constante de tempo $\tau = 0,1$ s. Foi usada a mesma matriz Λ para definir a superfície de deslizamento do controlador com modulação constante.

Os resultados de simulação do controle por modo deslizante adaptativo são apresentados na Figura 5. Pode-se verificar que, assim como no controle por modo deslizante com função de modulação constante, nas Figuras 5(a) e 5(b) a embarcação rastreia a trajetória corretamente. Porém, fazendo uma comparação entre as Figuras 4(a) e 5(a), é possível observar que a partir de 100 segundos, quando a perturbação é iniciada, há um pequeno erro de rastreamento em 5(b) e 5(a) que o controlador se recupera em seguida e volta ao rastreamento correto da trajetória. Verifica-se que em 4(a), a embarcação encontra mais rapidamente a trajetória de referência. Isto se dá pela superestimação do controle. Por outro lado, observa-se na Figura 5(a) que a embarcação demora um pouco mais

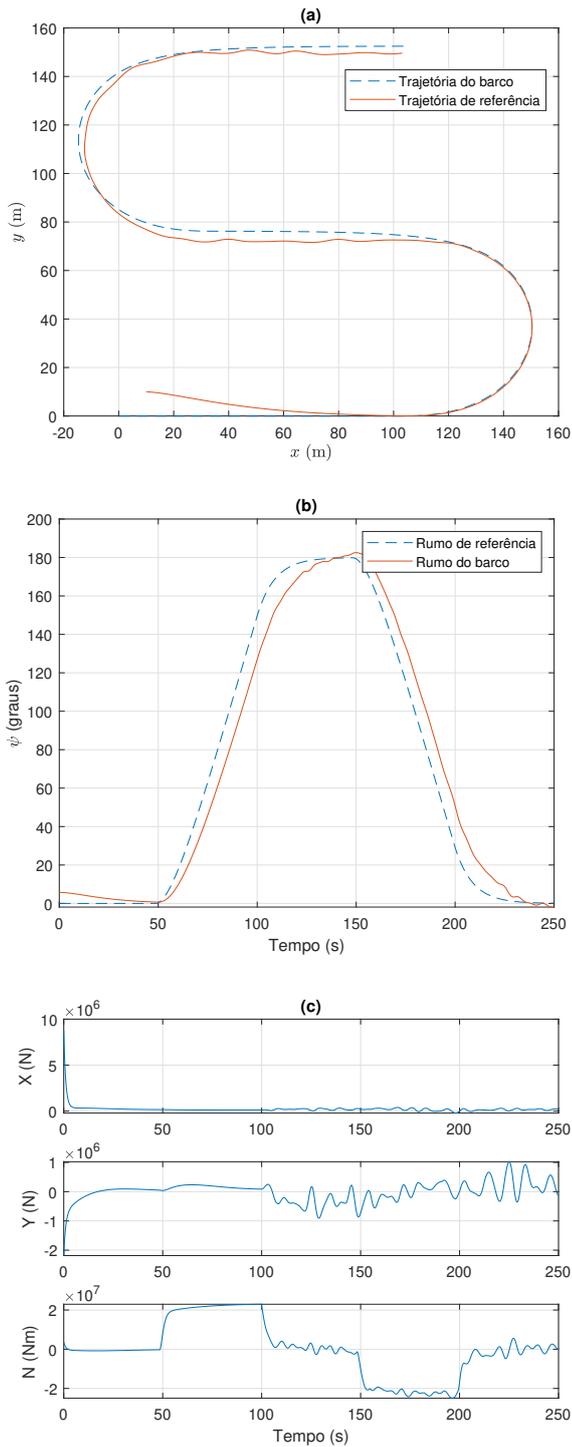


Figura 3. Resultados de simulação com controle PD: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.

para alcançar a trajetória por causa do transitório inicial da adaptação do controlador. A vantagem em relação ao controlador com modo deslizante e modulação constante anterior é que $\rho(t)$ se adapta conforme a trajetória e a influência da perturbação, o que se observa na Figura 6, economizando energia e deixando o controle mais suave.

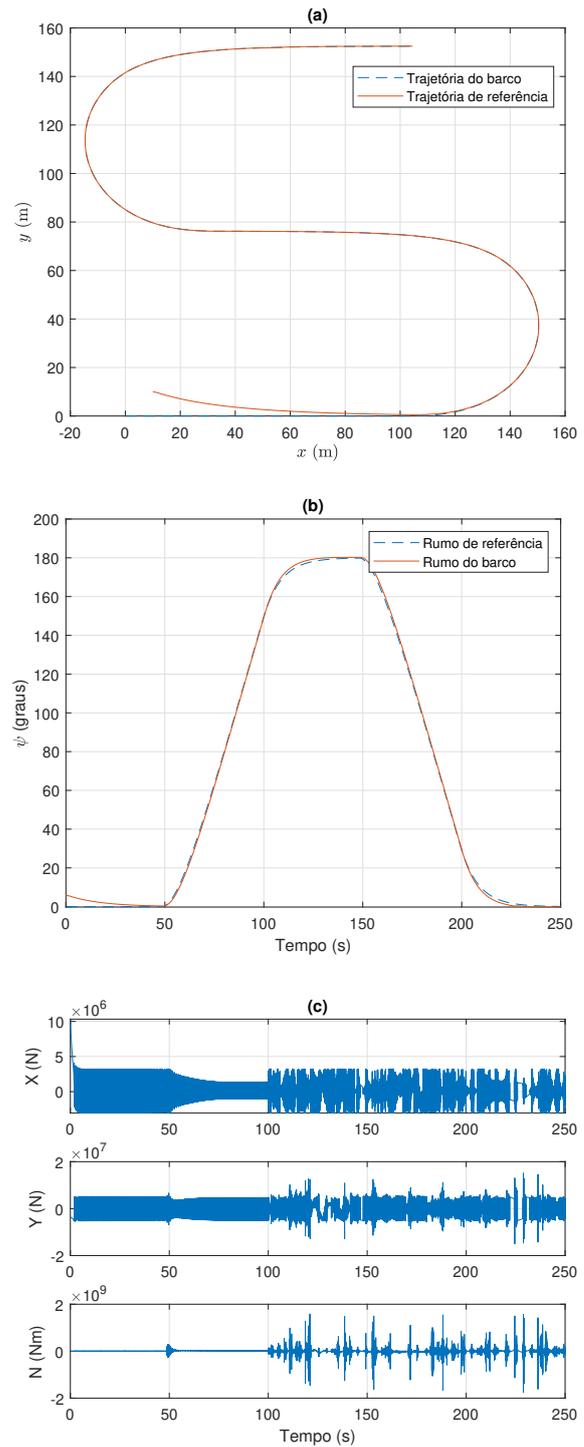


Figura 4. Resultados de simulação com controle por modo deslizante com modulação constante: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de rastreamento de trajetórias para uma embarcação de superfície sujeita a perturbações ambientais.

Para facilitar a aplicação dos controladores, houve a necessidade de utilizar um controle de linearização por re-

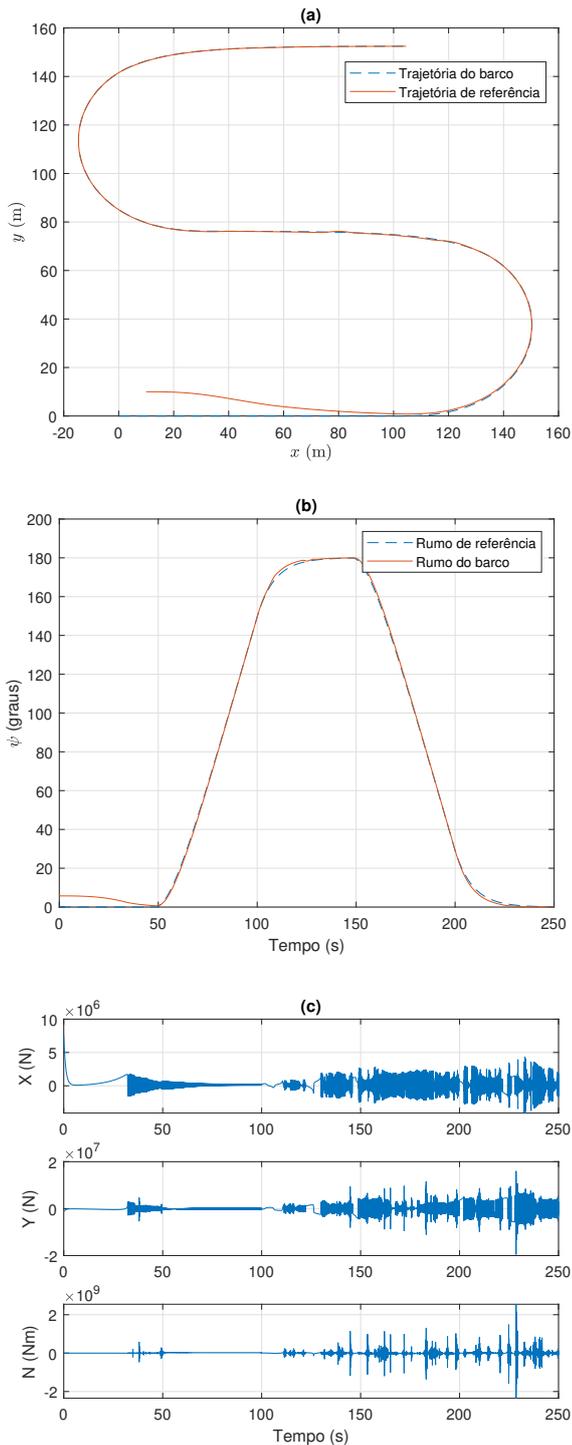


Figura 5. Resultados de simulação com o controle por modo deslizante adaptativo: (a) trajetória, (b) ângulo de rumo e (c) forças geradas pelos propulsores.

alimentação, o qual transforma a dinâmica não-linear da embarcação em um sistema linear formado por três duplo-integradores, um para cada grau de liberdade.

Foram comparados os resultados das simulações do controlador PD, controlador por modo deslizante com ganhos fixos e controlador por modo deslizante adaptativo. Foram observadas melhorias consideráveis do controle por modo deslizante adaptativo em relação aos demais, que apresen-

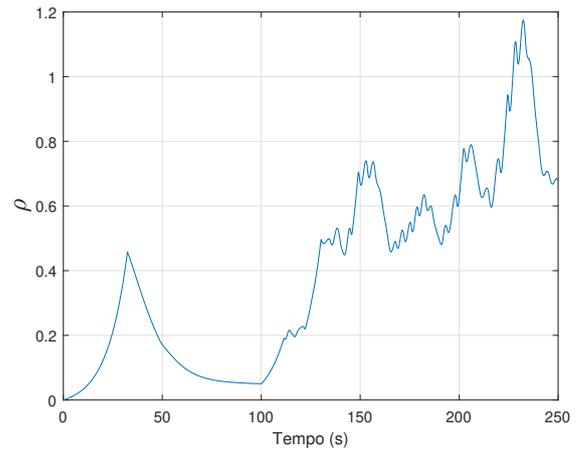


Figura 6. Sinal de modulação adaptativo.

tou uma partida mais suave, redução da amplitude dos sinais de controle, maior economia de energia, redução dos erros de rastreamento da trajetória e rejeição de perturbações com amplitudes desconhecidas.

A implementação da estratégia adaptativa parece simples, pois requer apenas dois filtros adicionais (21) e (24).

Futuramente, pretende-se comparar o desempenho desta estratégia de controle vetorial unitário adaptativo baseada no controle equivalente estendido com a estratégia baseada em funções de monitoração proposta em (Hsu et al., 2019).

REFERÊNCIAS

- Ahani, H., Familian, M., and Ashtari, R. (2020). Optimum design of a dynamic positioning controller for an offshore vessel. *Journal of Soft Computing and Decision Support Systems*, 7(1), 13–18.
- Brodtkorb, A.H., Værnø, S.A., Teel, A.R., Sørensen, A.J., and Skjetne, R. (2018). Hybrid controller concept for dynamic positioning of marine vessels with experimental results. *Automatica*, 93, 489–497.
- Cabecinhas, D. and Silvestre, C. (2019). Trajectory tracking control of a nonlinear autonomous surface vessel. In *Proc. American Contr. Conf.*, 4380–4385. Philadelphia, PA.
- Cheng, J., Yi, J., and Zhao, D. (2007). Design of a sliding mode controller for trajectory tracking problem of marine vessels. *IET control theory & applications*, 1(1), 233–237.
- Cunha, J.P.V.S. (1992). *Projeto e estudo de simulação de um sistema de controle a estrutura variável de um veículo submarino de operação remota*. Master's thesis, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Edwards, C. and Spurgeon, S.K. (1998). *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. Taylor & Francis Ltd., London.
- Feemster, M.G. and Esposito, J.M. (2011). Comprehensive framework for tracking control and thrust allocation for a highly overactuated autonomous surface vessel. *J. Field Robotics*, 28(1), 80–100.
- Fossen, T.I. (2002). *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs, and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics, Trondheim, Norway.

- Fossen, T.I. (2021). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, 2nd edition.
- Fossen, T.I. and Perez, T. (2004). *Marine Systems Simulator (MSS)*. <https://github.com/cybergalactic/MSS>.
- Hasselmann, K.F., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Eake, K., Euring, J., Gicnapp, A., Hasselmann, D., Kruseman, P., et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*.
- Hsu, L., Oliveira, T.R., Cunha, J.P.V.S., and Yan, L. (2019). Adaptive unit vector control of multivariable systems using monitoring functions. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 29(3), 583–600.
- Melo, G.T. (2017). *Controle por Modo Deslizante Adaptativo para Perturbações com Limitantes Desconhecidos*. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, UERJ, Rio de Janeiro.
- Oliveira, T.R., Cunha, J.P.V.S., and 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. (2017). *Controle a Estrutura Variável de um Barco Empurrando uma Carga Flutuante Subatuada*. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, UERJ, Rio de Janeiro.
- Rosario, R.V.C. and Cunha, J.P.V.S. (2016). Experimentos de rastreamento de trajetória de uma embarcação de superfície utilizando linearização por realimentação e controle a estrutura variável. In *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática*, 3034–3039. Vitória – ES.
- Silva, G.V.M. (2006). *Controle não linear*. Escola superior de tecnologia de Setúbal.
- Slotine, J.J. and Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- SNAME (1950). Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *Technical and Research Bulletin*, (1-5).
- Takahashi, Y., Nakaura, S., and Sampei, M. (2007). Position control of surface vessel with unknown disturbances. In *Proc. American Contr. Conf.*, 1673–1680. New Orleans, LA.
- Utkin, V. (1992). Sliding modes in control and optimization. In *Communications and Control Engineering Series*.
- Utkin, V., Guldner, J., and Shi, J. (1999). *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. Taylor & Francis Ltd., London.
- Wang, K., Liu, Y., and Li, L. (2015). Vision-based tracking control of underactuated water surface robots without direct position measurement. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(6), 2391–2399.
- Wang, W., Mateos, L.A., Park, S., Leoni, P., Gheneti, B., Duarte, F., Ratti, C., and Rus, D. (2018). Design, modeling, and nonlinear model predictive tracking control of a novel autonomous surface vehicle. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, 6189–6196. Brisbane, Australia.