

SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO HÍBRIDO COM LQR E RMRAC PARA O VOO AUTÔNOMO DE DRONES

JOÃO GABRIEL PIRAINÉ BANDEIRA¹; RÉGIS SPEROTTO DE QUADROS²

¹Universidade Federal de Pelotas – joaogabrielpbandeira@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – quadros99@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), especialmente quadricópteros, cresceu exponencialmente em aplicações civis e militares devido à sua versatilidade, capacidade de decolagem e pouso vertical e alta manobrabilidade (YAACOUB et al., 2020). Contudo, a dinâmica de um quadricóptero representa um desafio de controle complexo: o sistema é inherentemente não linear, multivariável e subatuado, possuindo seis graus de liberdade controlados por apenas quatro atuadores (HOFFMANN et al., 2007). Essa característica impõe um forte acoplamento entre os movimentos translacionais e rotacionais, exigindo estratégias de controle avançadas para garantir a estabilidade e o desempenho (SABATINO, 2015).

Este trabalho aborda o projeto e a validação de um sistema de controle em cascata para o seguimento de trajetória de um quadricóptero. A arquitetura proposta combina o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), a otimalidade de um Regulador Linear Quadrático (LQR) para o controle de altitude e a robustez de um controlador adaptativo robusto por modelo de referência (RMRAC) para a malha de atitude (LEI; LI; CHEN, 2019). O objetivo é desenvolver e avaliar, por meio de simulações, a eficácia e a robustez desta estratégia de controle em cenários desafiadores, que incluem a presença de distúrbios externos e variações paramétricas abruptas no modelo da planta.

2. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em três etapas principais: a modelagem matemática do quadricóptero, o projeto da arquitetura de controle em cascata e a configuração das simulações para validação.

A dinâmica do veículo foi descrita utilizando as leis de Newton-Euler, com base em dois sistemas de coordenadas: um referencial inercial fixo e um referencial do corpo fixo ao centro de massa do quadricóptero. O estado do sistema é representado por um vetor de 12 variáveis, incluindo posição, ângulos de Euler, e velocidades lineares e angulares. A dinâmica completa do quadricóptero é representada pela função vetorial não linear $f(x, U)$, onde $\dot{x} = f(x, U)$. A função é composta por quatro blocos de equações que descrevem a cinemática e a dinâmica do veículo:

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\eta} \\ \dot{v}_B \\ \dot{\Omega}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(\eta)v_B \\ W(\eta)\Omega_B \\ \frac{1}{m}F_B - \Omega_B \times v_B \\ J^{-1}(\tau_c - \Omega_B \times (J\Omega_B)) \end{bmatrix}.$$

O modelo não linear resultante, que captura o acoplamento entre a translação e a rotação, é complexo para o projeto direto de controladores. Portanto, o sistema

foi linearizado em torno do ponto de equilíbrio de voo pairado (*hovering*), resultando em um modelo em espaço de estados linear do tipo $\dot{x} = Ax + Bu$, onde as matrizes Jacobianas A e B são obtidas e utilizadas para o projeto de controladores lineares.

A estratégia de controle explora a separação das escalas de tempo da dinâmica do veículo, utilizando uma estrutura em cascata com duas malhas principais:

- **Malha Externa (Posição):** Controladores PID geram os ângulos de atitude desejados (ϕ_d, θ_d) e a velocidade vertical de referência ($w_{B,ref}$) a partir do erro de trajetória. Controladores Proporcionais (P) geram as velocidades angulares de referência ($p_{ref}, q_{ref}, r_{ref}$) com base no erro de atitude.
- **Malha Interna (Atitude):** Um controlador LQR, projetado com base no modelo linearizado, é responsável por gerar o comando de empuxo total (T) para controlar a altitude. Para o controle das taxas angulares (p, q, r), foi implementado um Controlador Adaptativo Robusto por Modelo de Referência (RMRAC) (EVALD et al., 2022).

O projeto do controlador LQR baseou-se na minimização de uma função de custo quadrática de horizonte infinito, dada por:

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt .$$

O RMRAC, por sua vez, ajusta os parâmetros de um controlador em tempo real para que a resposta da planta (y_m) se aproxime da resposta de um modelo de referência desejado, $y_m = W_m(s)r$, onde:

$$W_m(s) = \frac{b_m}{s + a_m} .$$

A lei de controle geral é linear em relação aos parâmetros adaptativos θ é $u = \theta^T \omega$, onde ω é o vetor de regressores. A robustez do algoritmo é garantida pela lei de adaptação baseada no método do gradiente, que utiliza um erro aumentado ϵ , um sinal majorante m^2 para assegurar a limitação de todos os sinais e evitar instabilidades e um termo de vazamento σ para evitar o desvio de parâmetros:

$$\dot{\theta}(t) = -\sigma(t)\Gamma\theta(t) - \frac{\Gamma\zeta(t)\epsilon(t)sgn(\rho^*)}{m^2(t)} .$$

Esta abordagem permite que o controlador se ajuste a incertezas e variações na dinâmica da planta, mantendo o desempenho desejado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A arquitetura de controle foi avaliada em simulações no MATLAB, utilizando dois cenários: seguimento de uma trajetória retangular com um distúrbio de atitude aplicado em $t = 10$ s, e uma trajetória circular com oscilação vertical, sujeita a um distúrbio de atitude em $t \approx 6,7$ s e uma duplicação instantânea da massa do veículo em $t \approx 13,3$ s.

Os resultados demonstraram o alto desempenho e a robustez do controlador RMRAC na malha interna. Na Figura 1a, observa-se que as velocidades angulares reais (p, q, r) seguiram com alta precisão as saídas do modelo de referência geradas pela malha externa durante a trajetória retangular. Mesmo no instante da aplicação do distúrbio ($t = 10$ s), o controlador reagiu de forma rápida e eficaz, rejeitando a perturbação com um erro mínimo e sem oscilações residuais, evidenciando sua capacidade de adaptação. A Figura 1b mostra, em um ambiente tridimensional (3D), a referência e a trajetória atual do quadricóptero.

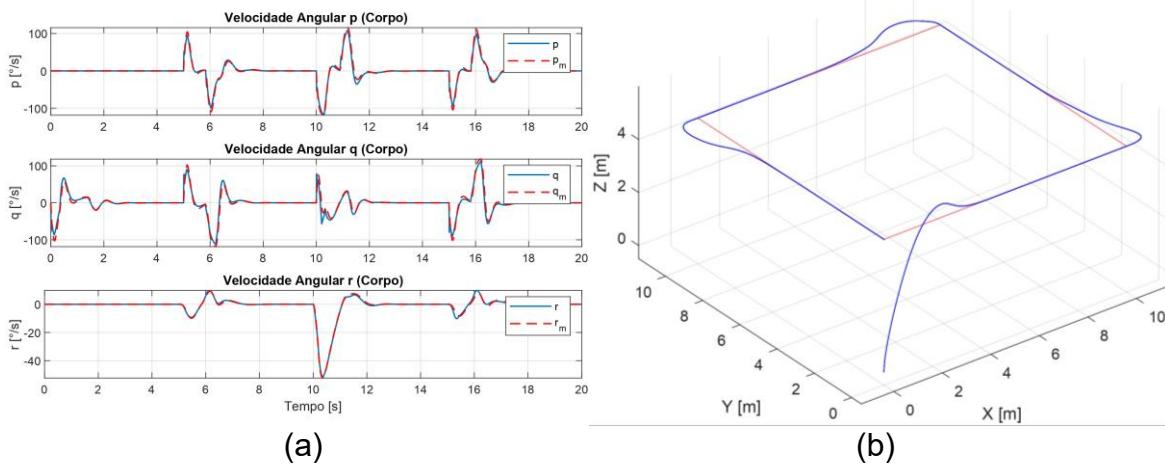


Figura 1: (a) resposta das velocidades angulares (p, q, r) e (b) trajetória e sua referência em 3D do quadricóptero na trajetória retangular.

A robustez do sistema de controle foi ainda mais testada no cenário da trajetória circular, que incluiu não apenas um distúrbio, mas também uma severa variação paramétrica com a duplicação da massa do quadricóptero. A Figura 2 ilustra que, apesar desses desafios, o drone foi capaz de seguir a trajetória de referência com grande precisão. O controlador adaptativo ajustou-se à nova dinâmica da planta, garantindo que a estabilidade e o desempenho do rastreamento fossem mantidos sem desvios significativos. Este resultado valida a eficácia da arquitetura proposta para operar em condições não ideais e imprevisíveis.

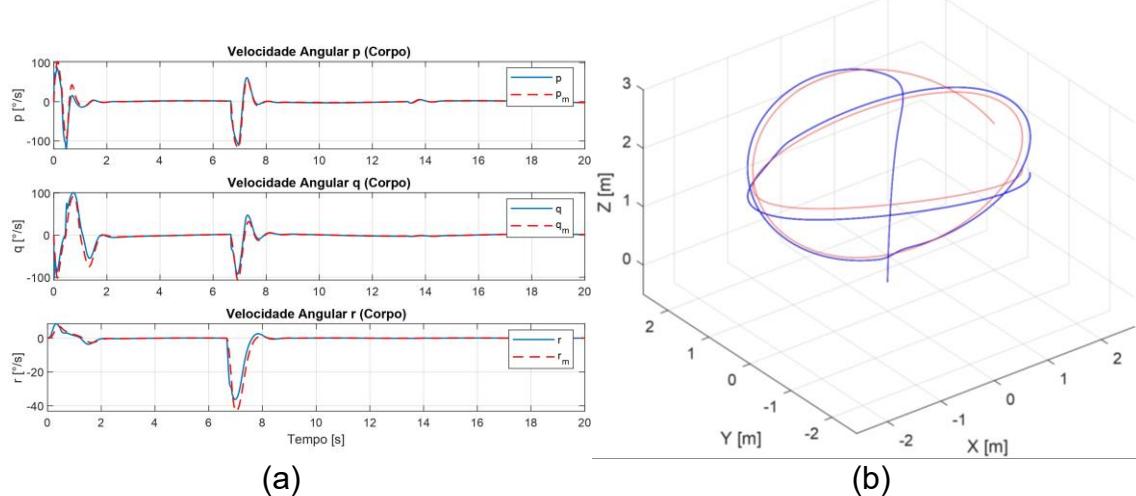


Figura 2: (a) resposta das velocidades angulares (p, q, r) e (b) trajetória e sua referência em 3D do quadricóptero na trajetória circular.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou com sucesso o projeto e a validação de uma arquitetura de controle em cascata, combinando LQR para o controle de altitude e RMRAC para o controle de atitude de um quadricóptero. As simulações realizadas em cenários desafiadores validaram a capacidade da estrutura de controle em manter a estabilidade e a precisão do rastreamento de trajetória.

O controlador RMRAC mostrou-se altamente eficaz na rejeição de distúrbios externos e na adaptação a variações paramétricas abruptas e significativas, como a duplicação da massa do veículo. A abordagem garantiu um seguimento preciso das referências de velocidade angular, o que se traduziu em um excelente desempenho no rastreamento da trajetória global. Conclui-se que a estratégia proposta é uma solução robusta e viável para o controle de quadricópteros, capaz de lidar com as incertezas inerentes à operação em ambientes reais. Como trabalhos futuros, sugere-se a validação experimental do controlador em uma plataforma física.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EVALD, P. J. D. O.; HOLLWEG, G. V.; TAMBARA, R. V.; GRÜNDLING, H. A. Lyapunov stability analysis of a robust model reference adaptive PI controller for systems with matched and unmatched dynamics. **Journal of the Franklin Institute**, v. 359, n. 13, p. 6659-6689, 2022.

HOFFMANN, G. M.; HUANG, H.; WASLANDER, S. L.; TOMLIN, C. J. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: theory and experiment. In: **AIAA GUIDANCE, NAVIGATION, AND CONTROL CONFERENCE**, Hilton Head, 2007. Proceedings... Reston: AIAA, 2007.

LEI, W.; LI, C.; CHEN, M. Z. Q. Robust adaptive tracking control for quadrotors by combining pi and self-tuning regulator. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 27, n. 6, p. 2663-2671, 2019.

SABATINO, F. **Quadrotor control: modeling, non-linear control design, and simulation**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology.

YAACOUB, J.-P.; NOURA, H.; SALMAN, O.; CHEHAB, A. Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations. **Internet of Things**, v. 11, 2020.