

Projeto e Validação Experimental de Controladores Baseados em Dados para um Sistema Aerodinâmico de Rotor Duplo

1st Juliano Ferreira Bentes
Engenharia de Controle e Automação
Instituto Federal do Amazonas
Manaus - AM, Brazil
2023001666@ifam.edu.br

2nd Hugo Alves Velozo
Departamento de Ensino Superior
Instituto Federal do Amazonas
Manaus - AM, Brazil
hugo.velozo@ifam.edu.br

Abstract—This paper investigates the practical application and experimental validation of two data-driven control techniques in a purpose-built twin-rotor aerodynamic system. The study explores a direct reference model control method with stability guarantees and an integral-action reference tracking control approach, both designed directly from experimental data. The main goal is to investigate the implementation of these control techniques in a real system. The hardware consists of a 2-DOF (degrees of freedom) aerodynamic testbed, brushless motors, high-resolution encoders, and an Arduino-based control unit. The results demonstrate the feasibility of stabilizing the system and achieving reference tracking using these data-driven methods designed with data collected from practical experiments.

Resumo—Este artigo investiga a aplicação prática e a validação experimental de duas técnicas de controle baseado em dados em um sistema aerodinâmico de rotor duplo construído para este fim. O estudo explora um método de controle direto por modelo de referência com garantias de estabilidade e uma abordagem de controle de rastreamento de referência com ação integral, ambos projetados diretamente a partir de dados experimentais. O objetivo principal é investigar a implementação destas técnicas de controle em um sistema real. O hardware consiste em uma bancada de testes aerodinâmica com 2-DOF (graus de liberdade), motores sem escovas, encoders de alta resolução e uma unidade de controle baseada em Arduino. Os resultados demonstram a viabilidade de estabilizar o sistema e alcançar o rastreamento de referência usando esses métodos baseados em dados projetados com dados coletados de experimentos práticos.

Index Terms—Controle baseado em dados; sistema aerodinâmico; Modelo de Referência; Ação Integrativa.

I. INTRODUCTION

O projeto de algoritmos de controle requer o conhecimento do comportamento dinâmico do sistema. A representação desse comportamento é usualmente realizada por meio de modelos matemáticos obtidos a partir dos princípios primordiais (como leis de Newton da mecânica ou leis de Kirchhoff dos circuitos), mas também pode ser alcançada por meio de dados experimentais. Quanto ao controle baseado em dados da dinâmica do sistema, existem dois métodos principais para projeto de controle: o método indireto que usa modelos

paramétricos obtidos por identificação para projetar o controlador; e o método direto que consiste em projetar um controle diretamente a partir de dados [1].

No contexto de sistemas lineares invariantes no tempo (LIT), em [2] foi apresentado um lema sobre persistência da excitação (mais tarde denominado lema fundamental de Willems) que estabelece condições para a existência de uma representação não paramétrica do comportamento de um sistema LIT. Com base neste lema, vários trabalhos foram desenvolvidos para projeto de algoritmos de controle diretamente dos dados para sistemas LIT: em [3], apresenta-se uma abordagem para calcular um sinal de controle LQR que contorna a etapa de identificação; em [4], propõem-se o algoritmo de controle preditivo habilitado por dados (DeePC) que calcula ações de controle ótimas em tempo real usando um número finito de amostras de dados sem utilizar modelos paramétricos; em [5], foram apresentadas desigualdades matriciais lineares (LMI) para solucionar problemas de controle baseados em dados em problemas de estabilização em realimentação, projeto de controle ótimo LQR e robustez para medições corrompidas por ruídos; em [6], uma abordagem MPC baseada em dados com garantia de estabilidade exponencial e robustez a ruído é proposta.

Já para lineares a parâmetros variantes (LPV), generalizações do lema fundamental de Willems são desenvolvidas para projeto de algoritmos de controle baseado em dados para sistemas LPV: em [7], uma abordagem de controle preditivo baseado em dados (DPC) para sistemas LPV capaz de garantir o rastreamento de referência é proposta como uma extensão do lema fundamental para uma classe de sistemas LPV; em [8], uma generalização do lema fundamental é desenvolvida para uma classe geral de sistemas LPV com capacidade de representar um subconjunto relativamente grande de sistemas não lineares; em [9]–[12], controladores são projetados diretamente de dados medidos de sistemas LPV.

Já para sistemas não lineares, conforme analisado em [13], existem diferentes métodos de controle baseado em dados a depender da classe de dinâmica não linear: aproximação

polinomial [14]–[16]; regressão do kernel [17], [18]; sistema quase-LPV [12] e [19]; operadores de Koopman [20]–[22] e linearização por realimentação [23]. Todas estas representações apresentam vantagens e limitações na representatividade de dinâmicas NL.

Apesar da grande quantidade de técnicas de controle baseado em dados para diferentes características de sistemas dinâmicos, a maioria dos métodos é validada por meio de simulações numéricas computacionais. Entretanto, os desafios da validação das técnicas em experimentos realizados em sistemas reais são pouco explorados. O presente artigo investiga a aplicação prática e a validação experimental de duas técnicas de controle baseado em dados aplicadas a um sistema aerodinâmico de rotor duplo: (1) método de controle direto baseado em dados por modelo de referência (*model-reference control*) com garantia de estabilidade [24]; (2) rastreamento de referência por meio de representação baseada em dados de malha fechada utilizando controlador com ação integral [25].

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção II, as fundamentações matemáticas dos métodos de controle baseado em dados utilizados são apresentadas; Na Seção III, o sistema aerodinâmico de duplo rotor construído para investigação da aplicação prática dos métodos de controles estudados; Na Seção IV, apresenta-se que os ganhos obtidos por meio de dados experimentais reais podem: (1) estabilizar o sistema com método de modelo de referência e (2) rastrear a referência com método com ação integral. Finalmente, na Seção V concluí os resultados deste artigo.

II. FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA DE CONTROLE BASEADO EM DADOS

A filosofia central do controle baseado em dados (CBD) reside na utilização direta de dados experimentais – tipicamente sequências de entradas e saídas (ou estados) coletadas da planta – para o projeto do controlador, contornando a necessidade de uma etapa explícita de modelagem. Esta abordagem tem ganhado interesse significativo, devido a atual grande disponibilidade de dados.

Muitas técnicas de CBD, especialmente para sistemas lineares invariantes no tempo (LTI), encontram um forte embasamento teórico no Lema Fundamental de Willems [2] e trabalhos subsequentes [3], [5]. Este lema demonstra que qualquer trajetória possível de um sistema LTI pode ser representada por uma combinação linear de trajetórias passadas, desde que os dados de entrada sejam suficientemente ricos, uma condição conhecida como persistência de excitação. A capacidade de representar o comportamento do sistema e, consequentemente, projetar controladores diretamente a partir de dados coletados, abre novas perspectivas para o desenvolvimento de estratégias de controle eficientes e robustas para uma vasta gama de aplicações. As subseções subsequentes detalharão as metodologias de CBD específicas empregadas neste trabalho para o controle do sistema aerodinâmico projetado.

A. Princípios de controle baseado em dados

Dado um sinal $s : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}^\sigma$, denota-se $s_{[k, k+T]}$, onde $k \in \mathbb{Z}$, $T \in \mathbb{N}$, a vetorização do sinal s no intervalo $[k, k+T] \cap \mathbb{Z}$, é dada por

$$s_{[k, k+T]} = \begin{bmatrix} s(k) \\ \vdots \\ s(k+T) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

A representação em matriz de Hankel associado ao sinal s é dada por:

$$S_{i,t,N} = \begin{bmatrix} s(i) & s(i+1) & \cdots & s(i+N-1) \\ s(i+1) & s(i+2) & \cdots & s(i+N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(i+t-1) & s(i+t) & \cdots & s(i+t+N-2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde $i \in \mathbb{Z}$ and $t, N \in \mathbb{N}$. O primeiro índice representa o instante em que a primeira amostra do sinal é capturada. O segundo indica a quantidade de amostras presentes em cada coluna, enquanto o terceiro corresponde ao número total de amostras do sinal em cada linha. Se a quantidade de amostras coletadas em cada instante for $t = 1$, então a matriz de Hankel pode ser reescrita como

$$S_{i,N} = [s(i) \quad s(i+1) \quad \cdots \quad s(i+N-1)]. \quad (3)$$

A fim de manter a simplicidade da abordagem, ao longo deste artigo, considera-se um sistema linear de tempo discreto controlável e observável representado por

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (4a)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (4b)$$

onde $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ e $y \in \mathbb{R}^p$.

Considere a persistente existência da sequência $u_{d,[0,T-1]}$ de ordem $t+n$ com $t = 1$. Notando que $T \geq (m+1)n+m$, o que é necessário para que a persistência da condição de excitação se mantenha. Pelo lema apresentado em [2],

$$\text{rank} \begin{bmatrix} U_{0,1,T} \\ X_{0,T} \end{bmatrix} = n + m. \quad (5)$$

Teorema 1 ([5]): Seja a condição em (5) satisfeita. Então, o sistema (4a) tem a seguinte representação baseada em dados equivalente:

$$x(k+1) = X_{1,T} \begin{bmatrix} U_{0,1,T} \\ X_{0,T} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} u(k) \\ x(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde

$$X_{1,T} = [x_d(1) \quad x_d(2) \quad \cdots \quad x_d(T)] \quad (7)$$

e $\dagger$ denota a inversa à direita.

Teorema 2 ([5]): Seja a condição em (5) satisfeita. Então, o sistema (4a) em malha-fechada com um realimentação de estado $u(k) = Kx(k)$ possui a seguinte representação equivalente baseada em dados:

$$x(k+1) = X_{1,T} G_K x(k) \quad (8)$$

onde G_K é uma matriz $T \times n$ satisfazendo

$$\begin{bmatrix} K \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{0,1,T} \\ X_{0,T} \end{bmatrix} G_K. \quad (9)$$

Em particular,

$$u(k) = U_{0,1,T} G_K x(k). \quad (10)$$

B. Controle por referência de Modelo direto Baseado em dados

Esta seção descreve uma abordagem de controle baseado em dados que visa projetar um controlador para que o comportamento de um sistema (planta) em malha fechada se assemelhe ao de um modelo de referência pré-especificado. A metodologia é extraída de [24] e adaptada para o contexto deste trabalho.

Considera-se uma planta linear e invariante no tempo (LTI) P , de ordem n e com m entradas, descrita em tempo discreto pelas equações de estado:

$$\mathcal{P} : \begin{cases} x^\circ(t+1) = Ax^\circ(t) + Bu(t) \\ x(t) = x^\circ(t) + v(t), \end{cases} \quad (11)$$

onde $x^\circ(t) \in \mathbb{R}^n$ é o estado verdadeiro no instante t , $u(t) \in \mathbb{R}^m$ é o sinal de controle, e $x(t) \in \mathbb{R}^n$ é o estado medido, possivelmente corrompido por ruído $v(t) \in \mathbb{R}^n$. Assume-se que as matrizes A e B da planta são desconhecidas.

O comportamento desejado para o sistema em malha fechada é especificado por um modelo de referência estável $\mathcal{M}$, dado por:

$$\mathcal{M} : x_d(t+1) = A_M x_d(t) + B_M r(t) \quad (12)$$

onde $x_d(t) \in \mathbb{R}^n$ é o estado desejado e $r(t) \in \mathbb{R}^n$ é o sinal de referência.

O objetivo do problema de casamento de modelo é encontrar uma lei de controle da forma

$$u(t) = K_x x(t) + K_r r(t), \quad (13)$$

onde $K_x \in \mathbb{R}^{m \times n}$ e $K_r \in \mathbb{R}^{m \times n}$ são as matrizes de ganho, tais que o sistema em malha fechada $(A + BK_x)$ seja estável e se aproxime de A_M , e BK_r se aproxime de B_M .

Uma condição fundamental para a representação do sistema a partir de dados é a persistência de excitação do sinal de entrada, que se traduz na seguinte hipótese de posto (premissa 1 em [24].):

$$\text{rank} \left(\begin{bmatrix} U_{0,T-1} \\ X_{0,T-1} \end{bmatrix} \right) = n + m \quad (14)$$

Esta condição garante que os dados são suficientemente ricos para capturar a dinâmica do sistema. Sob esta hipótese, e desconsiderando o termo de ruído para simplificação inicial (ou seja, $W_{0,T} = 0$ na formulação de Breschi et al.).

O problema de otimização (programa semi-definido – SDP) busca minimizar uma norma do erro de casamento, sujeito às restrições de consistência e à LMI de estabilidade (conforme Teorema 3 em [24].):

$$\begin{aligned} & \min_{Q^x, Q^r, P} \|X_{1,T} Q^x - A_M P\| + \lambda \|X_{1,T} Q^r - B_M P\| \\ & \text{sujeito a } X_{0,T-1} Q^x = P, \\ & X_{0,T-1} Q^r = 0_n, \\ & \begin{bmatrix} P & X_{1,T} Q^x \\ (X_{1,T} Q^x)' & P \end{bmatrix} > 0_{2n} \end{aligned} \quad (15)$$

Uma vez que Q^x , Q^r e P são encontradas pela solução deste SDP, os ganhos do controlador que estabiliza o sistema são obtidos por:

$$K_x = U_{0,T-1} Q^x P^{-1} \quad (16)$$

$$K_r = U_{0,T-1} Q^r P^{-1} \quad (17)$$

C. Controle Baseado em Dados para rastreamento de referência constante com Ação integral

Para aplicações onde se deseja que a saída de um sistema siga uma referência constante sem erro em regime estacionário, a inclusão de uma ação integral no controlador é uma estratégia clássica e eficaz. Esta seção detalha uma metodologia de controle baseado em dados, proposta por [25], que projeta um controlador com ação integral diretamente a partir de dados experimentais.

Considera-se um sistema linear discreto no tempo, com n estados, m entradas e p saídas, descrito por:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (18)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (19)$$

onde A , B e C são as matrizes do sistema, sendo A e B desconhecidas. O objetivo é fazer com que a saída $y(k)$ rastreie uma referência constante $r(k)$.

Para eliminar o erro de estado estacionário, define-se um estado integral $q(k) \in \mathbb{R}^p$ cuja dinâmica é dada por:

$$q(k+1) = q(k) + (y(k) - r(k)) \quad (20)$$

A lei de controle aplicada a este sistema aumentado é:

$$u(k) = Kx(k) + Hq(k) \quad (21)$$

onde $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ e $H \in \mathbb{R}^{m \times p}$ são as matrizes de ganho a serem projetadas. A estabilidade do sistema em malha fechada, descrito pela matriz $A_K = \begin{bmatrix} A + BK & BH \\ C & I_p \end{bmatrix}$, garante que o erro de rastreamento convirja para zero.

Uma condição crucial para a validade da representação baseada em dados é que a matriz de dados aumentada concatenada tenha posto completo (premissa 1 em [25].):

$$\text{rank} \left(\begin{bmatrix} U_- \\ X_- \\ Q_- \end{bmatrix} \right) = n + p + m \quad (22)$$

O projeto dos ganhos estabilizantes K e H é realizado encontrando-se uma matriz simétrica definida positiva $P \in \mathbb{R}^{(n+p) \times (n+p)}$ ($P > 0$) e uma matriz $S = G_I P \in \mathbb{R}^{T \times (n+p)}$ que satisfaçam as seguintes condições LMI (Teorema 2 em [25]):

$$\begin{bmatrix} P & \begin{bmatrix} X_+ \\ Q_+ \end{bmatrix} S \\ \left(\begin{bmatrix} X_+ \\ Q_+ \end{bmatrix} S \right)^T & P \end{bmatrix} > 0 \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} X_- \\ Q_- \end{bmatrix} S = P. \quad (24)$$

Então a ação de controle é dada por:

$$u(k) = U_{GI} \begin{bmatrix} x(k) \\ q(k) \end{bmatrix} \quad (25)$$

levando a saída $y(k)$ para referência constante onde $G_I = SP^{-1}$.

Uma vez que P e S são obtidas pela solução deste conjunto de LMIs, a matriz G_I é calculada como $G_I = SP^{-1}$. Os ganhos do controlador são então extraídos da relação $[K \ H] = U_{GI}$, ou seja:

$$[K \ H] = U_{GI} SP^{-1} \quad (26)$$

III. CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA AERODINÂMICO DE DUPLO ROTOR

O trabalho experimental deste artigo foi conduzido em um protótipo de um sistema aerodinâmico com dois grau de liberdade (2-DOF), especificamente projetado e montado para a validação de estratégias de controle avançadas. A plataforma, cujo arranjo completo é ilustrado na Fig. 1. O diagrama de corpo livre do sistema é apresentado em Fig. 2.



Fig. 1. Sistema aerodinâmico de duplo rotor construído para aplicação das técnicas de controle baseado em dados.

O sistema é representado por:

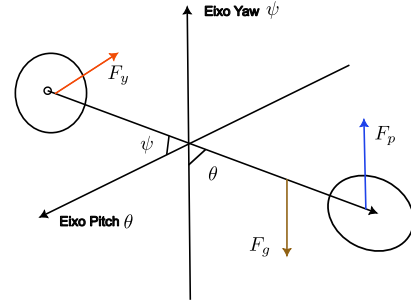


Fig. 2. Diagrama de corpo livre do sistema.

TABLE I
TABELA COM COMPONENTES USADO NA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA AERODINÂMICO DUPLO ROTOR.

Nome	Descrição	Qtd
Encoder	38S6G5-B-G24N 1000 P/R	2
Esc	Controlador de velocidade 30 A	2
Motor Brushless	Motor A2212 1000KV	2
Hélice	Hélice para aeromodelo	2
Arduino	Arduino Mega 2560	1

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k) \quad (27)$$

$$y(k) = Cx(k) + v(k) \quad (28)$$

onde $x \in \mathbb{R}^4, u \in \mathbb{R}^2, y \in \mathbb{R}^2$.

As variáveis de estados são as coordenadas generalizadas de inclinação: ângulo Yitch θ e ângulo Yaw ψ . Além dessas, as velocidades de inclinação: velocidade Pitch $\Delta\theta$ e velocidade Yaw $\Delta\psi$. As saídas são as inclinações θ e ψ .

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \Delta\theta \\ \psi \\ \Delta\psi \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$y = \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (30)$$

As ações de controle são os sinais de tensão em porcentagens para o motor em largura de pulso dado por

$$u = \begin{bmatrix} V_p \\ V_y \end{bmatrix} \quad (31)$$

O sistema de atuação, responsável por gerar o torque de controle, é composto por um motor brushless de 1000KV, que oferece uma alta relação de rotação por volt, acoplado a uma hélice. O controle preciso da velocidade deste motor é realizado por um Controlador Eletrônico de Velocidade (ESC) de 30A. O ESC é um componente crucial que interpreta um sinal de modulação por largura de pulso (PWM), enviado pela unidade de controle, e o converte na alimentação trifásica de alta corrente necessária para acionar o motor brushless de forma eficiente.

Para a medição da variável de estado primária, o ângulo de inclinação do braço (posição), foi empregado um encoder

rotativo de alta resolução, com 1000 pulsos por rotação (1000 PPR). A escolha de um sensor com esta resolução garante uma medição angular de alta precisão, o que é fundamental para o fechamento da malha de controle e para a qualidade da estimação dos estados. A velocidade angular, o segundo estado do sistema, não é medida diretamente, mas sim calculada em tempo real a partir da derivada numérica do sinal de posição, sendo que a alta resolução do encoder permite uma estimativa de velocidade de boa qualidade, com baixo ruído de quantização.

O controlador utilizado foi uma placa Arduino, que atua como a unidade de controle central. A placa é responsável por realizar todas as tarefas em tempo real: ler os pulsos do encoder para determinar a posição, calcular a velocidade, executar a lei de controle programada e gerar o sinal PWM correspondente para o ESC. Para garantir que o sistema de potência possa atender às demandas do motor, especialmente durante acelerações rápidas, todo o conjunto eletrônico é alimentado por uma fonte de alimentação externa de 12V com capacidade de 50A.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Ganhos dos Controladores e Coleta de Dados Iniciais

Para o projeto dos controladores baseados em dados, foi realizado um experimento inicial para coleta de dados de entrada-saída do helicóptero de 1-DOF. Foi aplicada a seguinte sequência de sinais de controle $u(k)$:

$$u = [13.2, 18.00, 25.00, 30.0, 34.0, 40.0, 43.00, 48.0, 53.0, 57.0, 60.0].$$

As respostas de posição e velocidade correspondentes, que compuseram o conjunto de 11 amostras utilizado para o cálculo de um dos conjuntos de ganhos, foram:

$$\begin{aligned} \theta &= [0.32, 0.24, 0.1, 0.0, -0.06, -0.24, \\ &\quad -0.4, -0.6, -0.82, -0.96, -1.1] \\ \Delta\theta &= [-0.22, -0.4, -0.26, -0.2, -0.24, -0.38, \\ &\quad -0.44, -0.4, -0.44, -0.38, -0.24] \end{aligned}$$

Para o Controle por Referência de Modelo Direto Baseado em Dados adaptado de [24] utilizando um conjunto de 11 amostras de dados, os seguintes ganhos foram obtidos:

$$K = [316,60 \quad 95,30], \quad (32)$$

$$K_r = [-1791,18 \quad -412,32] \quad (33)$$

Para o Controle Baseado em Dados para rastreamento de referência com ação integral os ganhos obtidos foram:

$$K = [94,13 \quad -40,57], \quad (34)$$

$$H = -3,27 \quad (35)$$

B. Análise de Desempenho Experimental

Os experimentos foram realizados considerando a variação somente da inclinação do ângulo Pitch (θ), ou seja, somente com 1-DOF. Para validar os ganhos obtidos com a técnica de controle por referência de modelo direto baseado em dados, foi realizado um teste experimental cujo objetivo era verificar se o sistema em malha fechada conseguiria replicar o comportamento de um modelo de referência pré-definido quando submetido a um sinal de referência em degrau. As respostas do sistema são ilustradas nas Figuras 3 e 4.

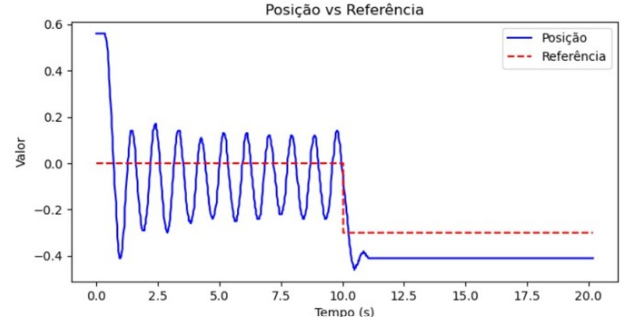


Fig. 3. Resposta do sistema em malha-fechada utilizando os ganhos 32 e 33 obtidos por meio da metodologia proposta em [24]

A avaliação inicial do controlador foi realizada através de um teste de regulação, com o objetivo de manter o sistema na referência nula. Como pode ser observado na Figura 3, o controlador conseguiu manter o sistema aerodinâmico em torno do ponto de equilíbrio, porém com um comportamento oscilatório persistente. Isso indica que a malha fechada, embora não seja instável nesta condição, possui um baixo fator de amortecimento.

Posteriormente, para avaliar a capacidade de rastreamento, foi aplicado um sinal de referência em degrau não nulo. Neste cenário, o sistema apresentou um comportamento instável, divergindo da referência. É crucial notar que a trajetória completa da divergência não é totalmente visível nos dados experimentais, pois o sinal de controle rapidamente atingiu seu limite máximo de atuação. Esta saturação do atuador, uma não-linearidade prática do sistema, impediu que a instabilidade crescesse de forma ilimitada, mas demonstrou a incapacidade do controlador linear projetado de realizar a tarefa de rastreamento sob as condições testadas.

A validação do controlador com ação integral foi realizada por meio de um teste de regulação. O objetivo era levar o helicóptero a uma posição de referência constante, e mantê-lo estável nesta posição. O desempenho do sistema neste teste é apresentado na Figura 4.

A Figura 4 demonstra que o controlador foi capaz de levar o sistema à referência desejada, eliminando o erro em estado estacionário, conforme esperado pela inclusão da ação integral. É importante notar que, dependendo do tempo de amostragem escolhido, foram observadas oscilações em torno do ponto de referência, um ponto que será discutido em detalhe na próxima seção.

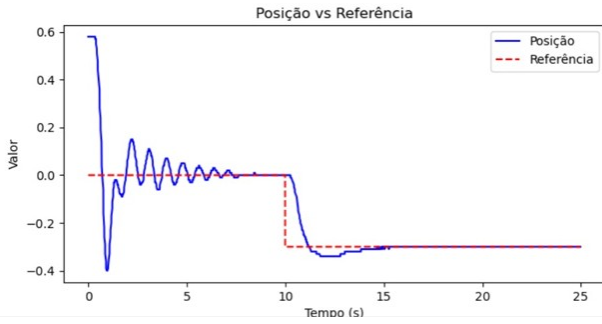


Fig. 4. Resposta do sistema em malha-fechada utilizando os ganhos 34 e 35 obtidos por meio da metodologia proposta em [25].

C. Discussão dos Fatores Críticos e Desafios Práticos

A etapa de coleta de dados mostrou-se fundamental e não trivial. Foi necessário realizar múltiplos testes experimentais até obter conjuntos de dados que permitissem o projeto de controladores com desempenho satisfatório. Observou-se que, mesmo quando condições teóricas de riqueza de dados, como as implícitas no Lema Fundamental de Willems, poderiam ser consideradas atendidas pelo comprimento e excitação dos dados, nem todos os conjuntos de dados resultaram em controladores com desempenho aceitáveis. Isso sugere que a qualidade intrínseca dos dados, sua capacidade de representar fielmente a dinâmica relevante para o controle e a possível presença de ruído ou não-linearidades não modeladas desempenham um papel crucial. Um ponto crítico na abordagem baseada em dados é a segurança durante a excitação inicial de sistemas desconhecidos. Excitar o sistema de maneira aleatória para garantir a riqueza dos dados pode ser perigoso, pois certos sistemas podem apresentar comportamentos instáveis ou perigosos se manipulados incorretamente.

O tempo de amostragem demonstrou ser um parâmetro crítico. Tentativas de utilizar tempos de amostragem significativamente diferentes dos tipicamente empregados em estudos acadêmicos com helicópteros de 1-DOF resultaram em desempenho insatisfatório. Especificamente para o controle de rastreamento com ação integral, um tempo de amostragem inadequado (provavelmente mais alto) levou a oscilações consideráveis do sistema em torno do ponto de referência. Por outro lado, observou-se que tempos de amostragem muito baixos podem fazer com que o termo acumulativo da ação integral cresça de forma excessivamente rápida, exercendo uma influência desproporcional e potencialmente desestabilizadora sobre a lei de controle. Diante da ausência de um método formal para a escolha do período de amostragem no contexto dessas técnicas aplicadas, optou-se por um valor próximo aos utilizados na literatura para sistemas similares, ajustado empiricamente após uma série de testes para encontrar aquele que apresentasse o melhor compromisso de desempenho.

A experiência prática indicou que um simples aumento na quantidade de dados coletados não necessariamente leva a um melhor desempenho do controlador. De fato, foi crucial não apenas o tamanho, mas a seleção das amostras específicas.

Diferentes segmentos de dados, ou dados coletados sob diferentes pequenas variações, podiam levar a controladores com desempenhos distintos. Isso reforça a ideia de que a qualidade e a representatividade da dinâmica do sistema dentro do conjunto de dados são mais importantes do que o volume bruto de dados, especialmente para as técnicas aqui empregadas que não possuem mecanismos explícitos de regularização robusta contra dados ruidosos ou espúrios.

Um aspecto importante que não foi profundamente explorado nos experimentos realizados é a robustez dos controladores projetados. As técnicas utilizadas neste trabalho, embora capazes de fornecer ganhos estabilizantes a partir de dados, não incorporam explicitamente mecanismos avançados para garantir robustez a variações paramétricas da planta ou a distúrbios não modelados, além da capacidade intrínseca da ação integral de lidar com distúrbios constantes. A literatura recente em controle baseado em dados tem dedicado atenção crescente a este tópico, buscando desenvolver abordagens que sejam inerentemente mais robustas.

O artigo investiga a aplicação e validação de duas técnicas de controle baseado em dados em um sistema aerodinâmico de rotor duplo. Os resultados obtidos demonstram que é possível obter ganhos de controlador que estabilizam o sistema e promovem o rastreamento de referência. No entanto, a implementação prática revelou desafios significativos. A coleta de dados se mostrou uma etapa fundamental e complexa, onde a qualidade e a representatividade dos dados foram mais cruciais do que a quantidade. A segurança durante a excitação inicial de um sistema desconhecido foi identificada como um ponto crítico. Além disso, o tempo de amostragem provou ser um parâmetro de ajuste crítico, com valores inadequados levando a oscilações ou instabilidade. A experiência indicou que nem todos os conjuntos de dados, mesmo que teoricamente ricos em informação, geravam controladores satisfatórios, sugerindo a forte influência de ruídos ou não-linearidades não modeladas. Por fim, aponta-se que a robustez dos controladores a variações paramétricas e distúrbios, um tópico em crescente atenção na literatura, não foi profundamente explorada nos experimentos realizados.

V. CONCLUSÃO

O presente artigo investigou a aplicação e validação de duas técnicas de controle baseado em dados em um sistema aerodinâmico de rotor duplo projetado para esta finalidade. Os resultados obtidos demonstram que é possível obter ganhos de controlador que estabilizam o sistema e realizem o rastreamento de referência. No entanto, a implementação prática revelou desafios significativos. A coleta de dados se mostrou uma etapa fundamental e complexa, onde a qualidade e a representatividade dos dados foram mais cruciais do que a quantidade. Além disso, o tempo de amostragem provou ser um parâmetro de ajuste crítico, com valores inadequados levando a oscilações ou instabilidade. A experiência indicou que nem todos os conjuntos de dados, mesmo que teoricamente ricos em informação, geravam controladores satisfatórios, sugerindo a forte influência de ruídos ou não-linearidades não modeladas.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é resultado do projeto de pesquisa e desenvolvimento ARANOUÁ financiado pela Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda (SEDA) nos termos da Lei Federal no 8.387/1991, de acordo com o art. 21 do Decreto no 10.521/2020. Agradecemos, também, ao Instituto Federal do Amazonas (IFAM) pelo suporte institucional e incentivo acadêmico para a realização deste trabalho.

REFERENCES

- [1] I. Markovsky, L. Huang, and F. Dörfler, "Data-driven control based on the behavioral approach: From theory to applications in power systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 43, no. 5, pp. 28–68, 2023.
- [2] J. C. Willems, P. Rapisarda, I. Markovsky, and B. L. De Moor, "A note on persistency of excitation," *Systems & Control Letters*, vol. 54, no. 4, pp. 325–329, 2005.
- [3] I. Markovsky and P. Rapisarda, "Data-driven simulation and control," *International Journal of Control*, vol. 81, no. 12, pp. 1946–1959, 2008.
- [4] J. Coulson, J. Lygeros, and F. Dörfler, "Data-enabled predictive control: In the shallows of the deepc," in *2019 18th European Control Conference (ECC)*. IEEE, 2019, pp. 307–312.
- [5] C. De Persis and P. Tesi, "Formulas for data-driven control: Stabilization, optimality, and robustness," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 3, pp. 909–924, 2019.
- [6] J. Berberich, J. Köhler, M. A. Müller, and F. Allgöwer, "Data-driven model predictive control with stability and robustness guarantees," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 66, no. 4, pp. 1702–1717, 2020.
- [7] H. J. Van Waarde, J. Eising, H. L. Trentelman, and M. K. Camlibel, "Data informativity: A new perspective on data-driven analysis and control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 11, pp. 4753–4768, 2020.
- [8] C. Verhoek, H. S. Abbas, R. Tóth, and S. Haesaert, "Data-driven predictive control for linear parameter-varying systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 8, pp. 101–108, 2021.
- [9] C. Verhoek, R. Tóth, S. Haesaert, and A. Koch, "Fundamental lemma for data-driven analysis of linear parameter-varying systems," in *2021 60th IEEE conference on decision and control (CDC)*. IEEE, 2021, pp. 5040–5046.
- [10] W. Jianhong, R. A. Ramirez-Mendoza, and W. Yanxiang, "Data driven strategy for linear parameter varying control design," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 70 068–70 077, 2022.
- [11] M. Mejari, A. Gupta, and D. Piga, "Data-driven computation of robust invariant sets and gain-scheduled controllers for linear parameter-varying systems," *IEEE Control Systems Letters*, vol. 7, pp. 3355–3360, 2023.
- [12] C. Verhoek, P. J. Koelewijn, S. Haesaert, and R. Tóth, "Direct data-driven state-feedback control of general nonlinear systems," in *2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE, 2023, pp. 3688–3693.
- [13] "Guarantees for data-driven control of nonlinear systems using semidefinite programming: A survey," *Annual Reviews in Control*, vol. 56, pp. 1367–15788, 2023.
- [14] M. Guo, C. De Persis, and P. Tesi, "Learning control for polynomial systems using sum of squares relaxations," in *2020 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2020, pp. 2436–2441.
- [15] R. Strässer, J. Berberich, and F. Allgöwer, "Data-driven control of nonlinear systems: Beyond polynomial dynamics," in *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2021, pp. 4344–4351.
- [16] M. Guo, C. De Persis, and P. Tesi, "Data-driven stabilization of nonlinear polynomial systems with noisy data," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 67, no. 8, pp. 4210–4217, 2022.
- [17] C. Fiedler, C. W. Scherer, and S. Trimpe, "Learning-enhanced robust controller synthesis with rigorous statistical and control-theoretic guarantees," in *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2021, pp. 5122–5129.
- [18] Z. Hu, C. De Persis, and P. Tesi, "Learning controllers from data via kernel-based interpolation," in *2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2023, pp. 8509–8514.
- [19] C. Verhoek, H. S. Abbas, and R. Tóth, "Direct data-driven l_pv control of nonlinear systems: An experimental result," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 2263–2268, 2023.
- [20] R. Strässer, J. Berberich, and F. Allgöwer, "Robust data-driven control for nonlinear systems using the koopman operator*," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 2257–2262, 2023.
- [21] X. Zhang, W. Pan, R. Scattolini, S. Yu, and X. Xu, "Robust tube-based model predictive control with koopman operators," *Automatica*, vol. 137, pp. 110–114, 2022.
- [22] M. Eyüboğlu, N. Powell, and A. Karimi, "Data-driven control synthesis using koopman operator: A robust approach," in *2024 American Control Conference (ACC)*, 2024, pp. 1879–1884.
- [23] M. Alsalti, V. G. Lopez, J. Berberich, F. Allgöwer, and M. A. Müller, "Data-driven nonlinear predictive control for feedback linearizable systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 617–624, 2023.
- [24] V. Breschi, C. D. Persis, S. Formentin, and P. Tesi, "Direct data-driven model-reference control with lyapunov stability guarantees," in *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2021, pp. 1456–1461.
- [25] A. Umar and J.-S. Kim, "Constant reference tracking in data-driven control," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 23, pp. 611–619, 2025.