

CONTROLE DE FORMAÇÃO E RASTREAMENTO DE TRAJETÓRIA DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS UTILIZANDO ADRC MODIFICADO E FUNÇÃO POTENCIAL

THIAGO DOS SANTOS MELO*, JOSIEL ALVES GOUVÊA*, ALESSANDRO ROSA LOPES ZACHI†

**Coordenação de Engenharia e Controle e Automação - CEFET-RJ/Campus Nova Iguaçu
Estrada de Adrianópolis, 1317
Nova Iguaçu, RJ*

†*Programa de Engenharia Elétrica - CEFET-RJ/Campus Maracanã
Avenida Maracanã, 229
Rio de Janeiro, RJ*

Emails: thiago.melo@aluno.cefet-rj.br, josiel.gouvea@cefet-rj.br,
alessandro.zachi@cefet-rj.br

Abstract— This paper presents a strategy for controlling the formation and tracking of a multi-agent system, formed by four quadrotors, with uncertain dynamics and subject to external disturbances. The technique called Modified ADRC, an extension of the ADRC control technique (Active Disturbance Rejection Control) is applied in a cascade strategy that is responsible for tracking without the need for accurate knowledge of the gain of control. The formation strategy uses the approaches of virtual leaders and potential function, guaranteeing the final geometric formation of the quadrotors team and avoiding collisions between them. Computer simulation results are presented to verify the performance of the proposed strategy.

Keywords— Unmanned aerial vehicle (UAV), Formation control, Trajectory tracking, Modified ADRC, Potential function.

Resumo— Este artigo apresenta uma estratégia para o controle de formação e rastreamento de trajetória de um sistema multiagente, formado por quatro quadricópteros, com dinâmica incerta e sujeitos a distúrbios externos. A técnica de controle denominada ADRC Modificado, uma extensão da técnica de controle ADRC (*Active Disturbance Rejection Control*), é aplicada em uma estratégia em cascata que é responsável por garantir o rastreamento de trajetória sem a necessidade do conhecimento exato do ganho de controle. A estratégia de formação utiliza as abordagens de líderes virtuais e função potencial, garantindo a formação geométrica final do grupo de quadricópteros e evitando colisões entre os mesmos. Resultados de simulações computacionais são apresentados para verificar o desempenho da estratégia proposta.

Palavras-chave— Veículo aéreo não tripulado (VANT), Controle de formação, Rastreamento de trajetória, ADRC Modificado, Função potencial.

1 Introdução

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) do tipo multirrotor, especialmente os quadricópteros, tornaram-se populares como plataformas robóticas devido à sua simplicidade mecânica e adequação para uso em ambientes internos e externos, sendo utilizados em diversas aplicações práticas de engenharia. Aplicações específicas incluem busca e salvamento, vigilância, comunicação e monitoramento de tráfego (Viana et al., 2015). Em muitas dessas aplicações, a tarefa pode ser desempenhada de forma mais eficiente se houver um trabalho cooperativo entre vários veículos. No entanto, para desempenhar um tarefa em cooperação, é necessário que os veículos alcancem uma formação no espaço apropriada à mesma. Portanto, devem ser então utilizadas estratégias de controle de formação.

Na literatura, diversas estratégias abordam o controle de formação de VANTs, dentre as quais pode-se citar as baseadas em estruturas virtuais (Viana et al., 2015), consenso (Zhang et al., 2019), líder virtual e função potencial (Silva, 2012; Lv et al., 2018). Essas estratégias podem ser imple-

mentadas de forma centralizada, quando há uma "autoridade" central controlando toda a formação, ou descentralizada, quando cada agente calcula o seu controle com base somente nas posições dos seus vizinhos. Portanto, as estratégias descentralizadas dão maior escalabilidade, ou seja, permitem um número maior de agentes na formação. Além disso, em muitas aplicações práticas, como transporte de cargas e pulverização de pesticidas em plantações, os parâmetros dinâmicos variam devido à variação da massa. Portanto, um dos desafios na área de controle é garantir a robustez, tanto em relação às incertezas nos parâmetros dinâmicos do sistema, quanto em relação aos distúrbios externos. Neste cenário, pode-se encontrar estratégias de controle adaptativo (Wang and Liu, 2017), controle por modos deslizantes (Lee et al., 2009) e ADRC (Ding and Wang, 2018). No entanto, o controlador adaptativo apresenta pouca robustez aos distúrbios externos e dinâmicas não modeladas, e o controle por modos deslizantes apresenta componentes de alta frequência no sinal de controle (*chattering*). Além disso, ambas são estratégias de controle não lineares. Já

a estratégia ADRC proposta em Ding and Wang (2018), embora seja linear e robusta aos distúrbios externos e às dinâmicas não modeladas, apresenta pouca robustez às incertezas no ganho de controle, que é fortemente dependente da variação na massa e momento de inércia, no caso dos quadrrrotores.

Neste artigo, propõe-se uma estratégia para o controle de formação descentralizado de um sistema multiagente formado por quadrrrotores com parâmetros dinâmicos incertos e sujeitos à distúrbios externos. Esta estratégia baseia-se em funções potenciais e líderes virtuais para gerar uma trajetória de referência para cada quadrrrotor, que utiliza uma estrutura em cascata, semelhante à implementada em Santos et al. (2018). Esta estrutura consiste em dividir o modelo dinâmico dos quadrrrotores em um subsistema rotacional em série com um subsistema translacional, utilizando, para cada um desses subsistemas, um controlador linear, denominado ADRC Modificado (Zachi et al., 2019). Este controlador, uma extensão do controlador ADRC (Gao, Hu and Jiang, 2001), apresenta todas as características do ADRC padrão, além de boa robustez à variação no ganho de controle, pois promove uma alteração na estrutura entrada/saída da planta, tornando o ganho de controle unitário. Além disso, por ser uma técnica linear, possui menor custo computacional e maior facilidade de implementação quando comparada às técnicas de controle adaptativas não-lineares.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 é apresentado o modelo dinâmico de um quadrrrotor e define-se o problema de controle de formação. A Seção 3 apresenta o controlador ADRC Modificado e sua aplicação em plantas de ordem n . Na seção 4 é apresentada a lei de controle cinemático e a estratégia em cascata. Os resultados obtidos nas simulações computacionais são apresentados na Seção 5. A Seção 6 apresenta as conclusões finais do artigo.

2 Formulação do Problema

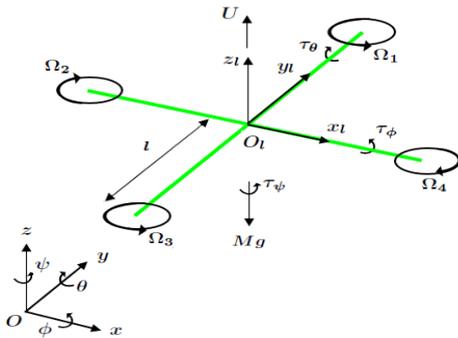


Figura 1: Sistemas de coordenadas: referencial inercial O e referencial O_l fixo no quadrrrotor. Adaptado (Ding and Wang, 2018; Lima, 2015).

Neste trabalho, é proposta uma estratégia de controle de formação e rastreamento de trajetória de N quadrrrotores, ilustrados na Figura 1 e descritos, para cada quadrrrotor i , pelo sistema de equações dinâmicas de segunda ordem

$$\begin{cases} \ddot{x}_i = \frac{1}{M} (\sin(\theta_i) \cos(\phi_i) \cos(\psi_i) + \sin(\phi_i) \sin(\psi_i)) U_i \\ \ddot{y}_i = \frac{1}{M} (\sin(\theta_i) \cos(\phi_i) \sin(\psi_i) - \sin(\phi_i) \cos(\psi_i)) U_i \\ \ddot{z}_i = -g + \frac{1}{M} (\cos(\phi_i) \cos(\theta_i)) U_i \\ \ddot{\phi}_i = J_r \dot{\theta}_i \frac{\Omega_{1i} + \Omega_{3i} - \Omega_{2i} - \Omega_{4i}}{I_{xx}} + \frac{I_{xx} - I_{zz}}{I_{yy}} \dot{\psi}_i \dot{\phi}_i + \frac{\tau_{\phi i}}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta}_i = J_r \dot{\phi}_i \frac{-\Omega_{1i} - \Omega_{3i} + \Omega_{2i} + \Omega_{4i}}{I_{yy}} + \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\psi}_i \dot{\phi}_i + \frac{\tau_{\theta i}}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi}_i = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\psi}_i \dot{\phi}_i + \frac{\tau_{\psi i}}{I_{zz}} \end{cases} \quad (1)$$

onde $r_i^T = [x_i, y_i, z_i]$ é o vetor de posição do centro de massa e $\xi_i^T = [\phi_i, \theta_i, \psi_i]$ é o vetor de orientação (ângulos de Euler), ambos com relação ao sistema de coordenadas inercial O ; M é a massa total do quadrrrotor; J_r é momento de inércia do rotor em torno do próprio eixo de rotação; I_{xx} , I_{yy} e I_{zz} são os momentos de inércia em torno de cada eixo; g é a aceleração da gravidade; l é a distância entre o centro de massa e os rotores; U_i , $\tau_{\phi i}$, $\tau_{\theta i}$ e $\tau_{\psi i}$ são, respectivamente, a força total de empuxo, o torque de rolagem, o torque de arfagem e o torque de guinada e estão relacionados com as velocidades angulares Ω_{ki} ($k = 1, 2, 3, 4$) dos rotores como

$$\begin{aligned} U_i &= f_t \sum_{k=1}^4 \Omega_{ki}^2, \\ \tau_{\phi i} &= f_l l (\Omega_{2i}^2 - \Omega_{4i}^2), \\ \tau_{\theta i} &= f_l l (\Omega_{3i}^2 - \Omega_{1i}^2), \\ \tau_{\psi i} &= f_d (-\Omega_{1i}^2 - \Omega_{2i}^2 + \Omega_{3i}^2 + \Omega_{4i}^2) \end{aligned} \quad (2)$$

sendo f_d o fator de arrasto das hélices e f_t o fator de empuxo dos rotores. Todos os parâmetros estão no SI. Além disso, o modelo dinâmico definido por (1) considera as premissas apresentadas em Lima (2015) e pode ser obtido através das formulações de Euler-Lagrange ou de Newton-Euler.

Define-se a troca de informações entre os agentes da formação como um grafo, onde os N agentes são representados como vértices de um grafo $G = \{V, E\}$, $V := \{v_1 \dots v_N\}$ é o conjunto de vértices que representam os agentes e $E \subseteq V \times V$ o conjunto de arestas que definem a relação de vizinhança entre os agentes. Seja \mathcal{N}_i uma coleção de vizinhos de um agente i , isto é, um conjunto de componentes da formação que tem comunicação direta com o agente i . A informação disponível para o agente i no controle são os estados do agente i e agente j para $j \in \mathcal{N}_i$. Um caminho de

tamanho r de i para j é uma sequência de $r + 1$ vértices distintos começando com i e terminado com j tal que vértices consecutivos sejam vizinhos. Se há um caminho entre qualquer dois vértices de um grafo G , então G é definido como conectado. O grafo é não direcionado se a comunicação entre os agentes vizinhos é bidirecional. Define-se então os seguintes objetivos para o controle de formação (Lima et al., 2014; Fried et al., 2019):

- o grupo deve convergir para uma configuração desejada e seguir uma trajetória pré-definida;
- colisões entre os agentes devem ser evitadas.

Portanto, propõe-se a seguinte estratégia:

1. para m agentes, definem-se líderes virtuais responsáveis por gerar a trajetória rastreada pela formação;
2. todos os N agentes devem interagir somente com seus vizinhos para convergir para a formação desejada, obtendo-se uma estratégia de controle descentralizada;
3. a convergência para a formação desejada é obtida quando uma função potencial artificial é minimizada.

A função potencial artificial utilizada é definida como:

$$J_i = \sum_{i,j \in \mathcal{N}_i}^N J_{ij} (\|r_{ij}\|), \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

onde $r_{ij} = r_i - r_j$ é a posição relativa entre os agentes i e j e J_{ij} é definida como a seguir:

Definição 1 *A função potencial saturada e deslocada J_{ij} é uma função não-negativa e diferenciável da distância entre os agentes i e j tal que*

1. $J_{ij} \rightarrow \infty$ quando $\|r_{ij}\| \rightarrow c$, onde $c > 0$;
2. J_{ij} alcança seu único mínimo quando os agentes i e j estão localizados na posição relativa desejada r_{dij} , com $r_{dij} > c$;
3. $\nabla_{r_i} J_{ij} (\|r_{ij}\|) = 0$ se $\|r_{ij}\| \geq R_s$, onde $R_s > r_{dij}$.

Note que $J_{ij} > 0$ define a distância desejada entre os agentes, c define uma região de colisão em torno de cada agente i , e R_s é a região de vizinhança, que define uma região limitada de comunicação para cada agente, o que permite um controle descentralizado (Gouvêa et al., 2010).

Na próxima seção, será apresentado o controlador ADRC Modificado.

3 ADRC Modificado

Seja um sistema dinâmico (planta) de ordem n descrito por

$$y^{(n)} = \underbrace{a^T Y + g(t)}_{f(t)} + bu(t), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a &= [-a_0, -a_1, \dots, -a_{(n-1)}]^T, \\ Y(t) &= [y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}]^T, \\ g(t) &= d(t) + h(t) \end{aligned} \quad (5)$$

onde $y(t) \in \mathbb{R}$ é a saída do sistema, $u(t) \in \mathbb{R}$ é a entrada, $d(t) \in \mathbb{R}$ é o distúrbio externo, $a \in \mathbb{R}^n$ denota os parâmetros constantes do sistema, os quais podem ser positivos, negativos ou nulos, $Y \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados, $b \in \mathbb{R}$ é uma constante denominada ganho de controle e $h(t) \in \mathbb{R}$ representa a função não-linear do sistema. A equação (4) pode ser considerada um integrador de ordem n , com entrada $u(t)$, saída $y(t)$ e um distúrbio de entrada $f(t)$ denominado distúrbio generalizado (Han, 1998; Gao, Huang and Han, 2001; Han, 2009). Nesta formulação, definindo $e(t) = y(t) - y^*(t)$ como o erro de saída, em Gao, Hu and Jiang (2001) é proposta a estratégia ADRC, que consiste na lei de controle estabilizante descrita por

$$\begin{aligned} u(t) &= \left(\frac{1}{b}\right) [-\lambda^T \hat{\sigma} + y^{(n)*}], \\ \lambda &:= [1, \lambda_{(n-1)}, \dots, \lambda_0]^T, \\ \hat{\sigma} &:= [\hat{f}(t), \hat{e}^{(n-1)}, \dots, \hat{e}, \hat{e}]^T \end{aligned} \quad (6)$$

onde $y^*(t) \in \mathbb{R}$ é o sinal de referência, as constantes reais $\lambda_{(n-1)} \dots \lambda_0$ são os coeficientes de um polinômio (mônico) *Hurwitz* de ordem n e $\hat{\sigma}$ é o vetor de estados estimados por um Estimador de Ordem Estendida (ESO - *Extended State Observer*). No entanto, é necessário o conhecimento exato do ganho b para o método ser aplicado. Para superar essa limitação, em Zachi et al. (2019) é proposta uma extensão do ADRC, denominada ADRC Modificado. Para abordar esta estratégia de controle, considere as seguintes hipóteses:

- Hipótese 1: O sinal de distúrbio $d(t)$ e a função não-linear $h(t)$ são ambos limitados e têm derivadas de primeira ordem limitadas $\forall t$, ou seja, $H > |h(t)|$, $D > |d(t)|$, $\bar{H} > |\dot{h}(t)|$, $\bar{D} > |\dot{d}(t)|$ onde H, D, \bar{H} e \bar{D} , são constantes reais positivas conhecidas.
- Hipótese 2: Os parâmetros da planta $a_0, \dots, a_{(n-1)}$ e o ganho de controle b são incertos, mas possuem limite superior e inferior dado por constantes conhecidas $a_M > |a_i|$, ($i = 0, \dots, n - 1$) e $b_m < |b|$ com $a_M > 0 \in \mathbb{R}$ e $b > 0 \in \mathbb{R}$.
- Hipótese 3: A trajetória de referência $y^*(t)$ e suas derivadas de ordem superiores são funções uniformemente limitadas $\forall t$.

O ADRC Modificado promove uma mudança estrutural da planta. Para isso, é introduzida uma constante de projeto de ganho ajustável $\beta = K_0 \text{sign}(b)$, onde $K_0 > 0 \in \mathbb{R}$ e $\text{sign}(b)$ assume os valores $+1$ ou -1 , em série com o erro de saída da

planta e um filtro linear estável $Q_0(s)$ em paralelo com a mesma, como mostrado na Figura 2.

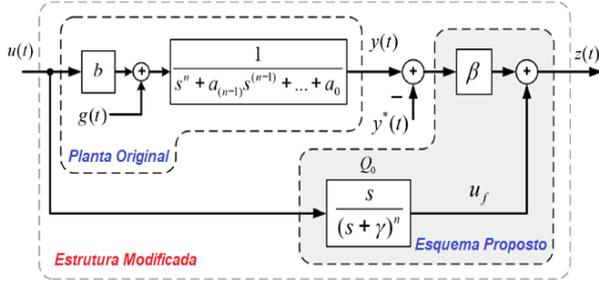


Figura 2: Planta modificada.
Adaptado (Zachi et al., 2019).

Com esta modificação, a constante de projeto positiva $\gamma \in \mathbb{R}$ é escolhida de forma que $(s+\gamma)^n = s^n + \alpha_{(n-1)}s^{(n-1)} + \dots + \alpha_0$ resulte em um polinômio estável. Baseado na configuração da Figura 2, o novo erro de saída é escrito como,

$$z(t) = \beta e(t) + u_f(t), \quad (7)$$

$$e(t) = y(t) - y^*(t), \quad (8)$$

$$u_f^{(n)} = -\alpha^T \sigma_u + \dot{u}, \quad (9)$$

$$\alpha = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{(n-1)}]^T, \quad (10)$$

$$\sigma_u = [u_f, \dot{u}_f, \dots, u_f^{(n-1)}]^T. \quad (11)$$

Derivando (7) n vezes, a dinâmica do novo erro de saída $z(t)$, com $b_p = \beta b$, será dada por

$$z^{(n)} = \beta \underbrace{[a^T Y + g(t) + bu(t) - y^{(n)*}]_{e^{(n)}}}_{e^{(n)}} + u_f^{(n)}, \quad (12)$$

$$z^{(n)} = \beta [a^T Y + g(t) - y^{(n)*}] - \alpha^T \sigma_u + b_p u(t) + \dot{u}(t). \quad (13)$$

Isolando u_f de (7), tem-se que

$$u_f^{(i)} = z^{(i)} - \beta e^{(i)}, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (14)$$

Definindo o vetor de erro de rastreamento da saída como

$$e_p = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n)}]^T \quad (15)$$

então, substituindo (14) em (13), e utilizando (15) e (10), obtém-se

$$z^{(n)} + \alpha^T Z(t) = \beta [a^T Y + g(t) - y^{(n)*}] + \beta \alpha^T e_p + b_p u(t) + \dot{u}(t), \quad (16)$$

$$Z(t) = [z, \dot{z}, \dots, z^{(n-1)}]^T. \quad (17)$$

Escrevendo a nova descrição da planta utilizando a abordagem do ADRC, define-se uma nova função distúrbio generalizado $\Omega(t)$ como

$$\Omega = \beta [a^T Y + g(t) - y^{(n)*}] + \beta \alpha^T e_p + b_p u(t). \quad (18)$$

Então, (16) reduz-se a

$$z^{(n)} + \alpha^T Z(t) = \Omega(t) + \dot{u}(t). \quad (19)$$

Portanto, o problema original de rastreamento de saída associado com o erro $e(t)$, é agora redefinido

em termos da nova saída $z(t)$. A nova entrada de controle \dot{u} tem coeficiente unitário, e, portanto, não é necessário o conhecimento exato de b . Desde que $\Omega(t)$ não é mensurável, projeta-se um ESO para estimá-lo.

3.1 Projeto do Estimador de Ordem Estendida

A partir de (19), defina as seguintes variáveis de estado

$$\zeta(t) = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{(n+1)}]^T = [z(t), \dot{z}(t), \dots, \Omega(t)]^T. \quad (20)$$

Assumindo que $\Omega(t)$ é diferenciável, a representação estendida em espaço de estado da planta (19) é descrita por

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = A_m \zeta + B_\zeta \dot{u} + \Gamma \dot{\Omega}(t), \\ z(t) = C \zeta. \end{cases} \quad (21)$$

com

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & \vdots & -\alpha_{(n-1)} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$B_\zeta = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0]^T, \quad \Gamma = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T,$$

$$C = [1 \ 0 \ \dots \ 0].$$

O par (A_m, C) em (21) e (22), o qual resulta do formalismo do ADRC Modificado, tem a propriedade de observabilidade. Logo, o ESO pode ser projetado como

$$\begin{cases} \dot{\hat{\zeta}} = A_m \hat{\zeta} + B_\zeta \dot{u} + L e_z, \\ \hat{z}(t) = C \hat{\zeta}. \end{cases} \quad (23)$$

onde $\hat{z}(t) \in \mathbb{R}$ é a estimativa da saída $z(t)$, $e_z = (z - \hat{z})$ é a estimativa do erro de estimação da saída e $L = [L_1 L_2 \dots L_{(n+1)}]^T \in \mathbb{R}^{(n+1)}$ é o vetor de ganhos ajustáveis do estimador, definido como

$$\det[sI - (A_m - LC)] = (s + w_o)^{(n+1)} \quad (24)$$

sendo $L_1 L_2 \dots L_{(n+1)}$ os coeficientes do polinômio $(s + w_o)^{(n+1)} = s^{(n+1)} + L_1 s^n + \dots + L_{(n+1)}$ (25)

onde $s = -w_o$, ($w_o > 0$) é a largura de banda do estimador. A estimativa do erro do ESO é definida como

$$e_\zeta = \zeta - \hat{\zeta}, \quad (26)$$

e a dinâmica do erro de estimação pode ser calculada de (21)-(23), resultando em

$$\begin{cases} \dot{e}_\zeta = (A_m - LC)e_\zeta + \Gamma \dot{\Omega}(t), \\ e_z = C e_\zeta. \end{cases} \quad (27)$$

3.2 Projeto do Controle

Pela nova descrição da planta (19), observa-se que a parte homogênea é estável ($\Omega(t) + \dot{u} = 0$). Assim,

para compensar o distúrbio $\Omega(t)$, forçando o novo erro de saída $z(t)$ tender para zero, propõe-se a lei de controle

$$\dot{u} = -\hat{\zeta}_{(n+1)} \quad (28)$$

onde $\hat{\zeta}(t)$ é a estimativa do distúrbio generalizado $\Omega(t)$.

A análise da estabilidade do sistema em malha fechada após a mudança estrutural aplicada na planta é demonstrada em (Zachi et al., 2019). Na próxima seção, será apresentada uma lei de controle de formação baseada no gradiente descendente da função potencial e em uma estratégia de controle em cascata.

4 Controle de Formação de VANTs

Considere, inicialmente, um sistema multiagente formado por N agentes e m líderes virtuais. O modelo cinemático dos agentes é descrito por

$$\dot{r}_{di} = u_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (29)$$

onde $u_i \in \mathbb{R}^3$ é a ação de controle e $r_{di}^T = [x_{di}, y_{di}, z_{di}]$ é o vetor de posição desejada do i -ésimo agente.

Em Leonard and Fiorelli (2001) é proposta uma lei de controle de formação baseada no gradiente de uma função potencial. Neste trabalho, é utilizada a mesma lei de controle de formação, que é descrita por:

$$u_i = -k_i \nabla_{r_i} J_i + \dot{r}_{li}, \quad i = 1, \dots, m \quad (30)$$

$$u_i = -k_i \nabla_{r_i} J_i, \quad i = m + 1, \dots, N \quad (31)$$

onde \dot{r}_{li} é a velocidade do i -ésimo líder virtual, $k_i > 0$ é um parâmetro de controle e $\nabla_{r_i} J_i$ é o gradiente da função $J_i(x_i, y_i, z_i)$ definido por

$$\nabla_{r_i} J_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_i}{\partial x_i} & \frac{\partial J_i}{\partial y_i} & \frac{\partial J_i}{\partial z_i} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Portanto, o problema de formação e rastreamento de quadricópteros será resolvido se os mesmos rastreamem, para cada quadricóptero i , suas respectivas trajetórias de referência r_{di} geradas pelo modelo cinemático (29) com as leis de controle (30) e (31). Para esse fim, utiliza-se a estratégia de controle em cascata da Figura 3. Note que o controlador ADRC modificado da malha externa recebe a trajetória de referência r_{di} e a posição r_i , calculando os sinais de controle $\xi_{di}^T = [\phi_{di}, \theta_{di}, \psi_{di}]$ (ângulos de Euler desejados) e U_i para o modelo dinâmico translacional. No entanto, somente U_i pode ser aplicado diretamente neste. Assim, utiliza-se outro ADRC modificado na malha interna, que tem como entradas ξ_i e ξ_{di} e, como saída, o vetor de torques de controle τ_i ,

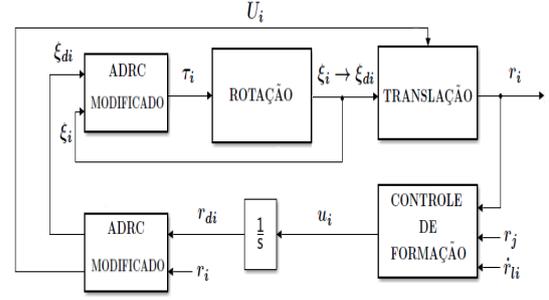


Figura 3: Estratégia de controle.

tal que $\xi_i \rightarrow \xi_{di}$. Desta forma, o modelo dinâmico do quadricóptero comporta-se como se fosse descrito apenas pela parte translacional.

Vale ressaltar que, para implementar a estratégia em cascata, é projetado um ADRC modificado para cada equação de segunda ordem de (1), onde o acoplamento entre estas é considerado um distúrbio externo e/ou gera uma variação no ganho de controle. Além disso, o controle do subsistema rotacional deve ser projetado de forma que este tenha uma resposta dinâmica mais rápida que a do subsistema translacional. Embora neste trabalho não tenha sido implementada uma análise de estabilidade rigorosa da estratégia em cascata com o ADRC modificado, essa condição nas velocidades das respostas dinâmicas é intuitiva e mostrou-se, por simulações, suficiente para a estabilidade do sistema em malha fechada se os ADRCs modificados forem projetados para gerar leis de controle estabilizantes para os seus respectivos subsistemas.

5 Resultados de Simulações

As simulações foram desenvolvidas no *software* MATLAB/Simulink[®] considerando uma equipe formada por quatro quadricópteros.

Para atingir os objetivos do controle, utiliza-se a seguinte função potencial:

$$J_{ij} = \log(\|r_{ij}\| - c) + \frac{a_2}{\|r_{ij}\| - c} - a_1(\|r_{ij}\| - c)$$

com

$$a_1 = \frac{1}{r_{dij} - 2c + R_s}, \quad a_2 = \frac{(r_{dij})(R_s - c)}{r_{dij} - 2c + R_s}$$

onde $r_{dij} = 1.5 \text{ m}$, $c = 0.45 \text{ m}$ e $R_s = 20 \text{ m}$.

Os ganhos de controle do modelo (1) são escolhidos como: $b_x = (1/M)(\cos(\psi_i)\cos(\phi_i))U_i$, $b_y = -(1/M)(\cos(\psi_i))U_i$, $b_z = (1/M)(\cos(\phi_i)\cos(\theta_i))$, $b_\phi = 1/I_{xx}$, $b_\theta = 1/I_{yy}$ e $b_\psi = 1/I_{zz}$. Portanto, observa-se que os ganhos de controle dependem da massa e dos momentos de inércia, parâmetros que são incertos, o que justifica a aplicação do método ADRC Modificado. Os parâmetros de sintonia do ADRC Modificado do subsistema translacional são $\gamma_{(x,y)} = 2.1$, $\gamma_{(z)} = 5$,

$K_0(x,y) = 0.5$, $K_0(z) = 34$, $\omega_o(x,y,z) = 1000$ e $\gamma(\phi,\theta,\psi) = 5$, $K_0(\phi,\theta,\psi) = 1$, $\omega_o(\phi,\theta,\psi) = 5000$ para o subsistema rotacional. Para o controle de formação e rastreamento cinemático, os parâmetros são $k_i(x,y) = 7.5$ e $k_i(z) = 1.5$. Os parâmetros M , I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} , J_r , l , f_t e f_d são os mesmos de Viana et al. (2016). Com base nos parâmetros físicos dos quadrrrotores, considerou-se as seguintes restrições para os sinais de controle: $0 \leq U_i \leq 35$, $|\tau_{(\phi,\theta)_i}| \leq 1.5$ e $|\tau_{\psi_i}| \leq 0.5$ (Lima, 2015).

O grafo de comunicação entre os agentes da formação está ilustrado na Figura 4. Note que o grafo é não direcionado entre os agentes 1 e 2 e também entre os agentes 3 e 4. O grafo é direcionado dos agentes 1 e 2 para os agentes 3 e 4. Os agentes 1 e 2 seguem líderes virtuais e a interação entre eles é para evitar colisões.

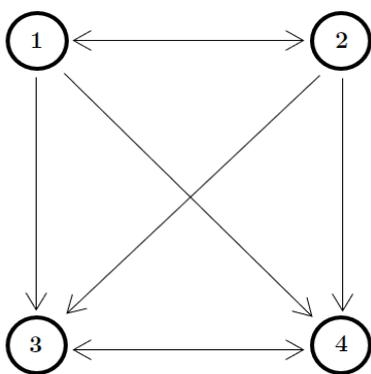


Figura 4: Grafo de comunicação.

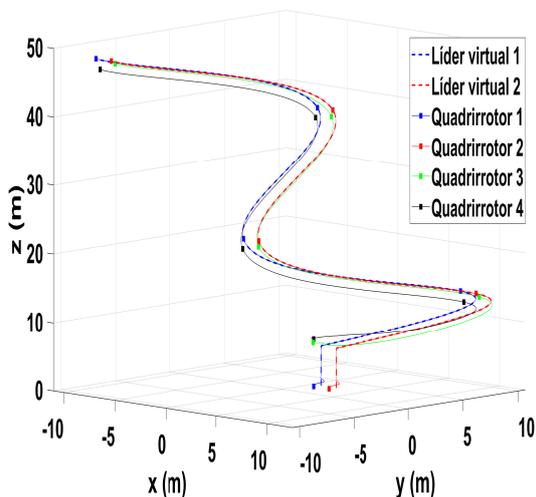


Figura 5: Formação.

As condições iniciais $[x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \psi_i]$ definidas para o grupo de quadrrrotores são $[1, 2, 0.1, 0, 0, 0.5]$, $[2.5, 2, 0.1, 0, 0, 0.5]$, $[2, 1, 7, 0, 0, 0.5]$ e $[1, 2, 7, 0, 0, 0.5]$ e o objetivo é a formação rastrear dois líderes virtuais com as trajetórias definidas por: $x_1^* = 2.8$, $x_2^* = 1.3$, $y_1^* = y_2^* = 2.4$, $z_1^* = z_2^* = 0.2 + 0.58t$ ($t < 10s$) e $x_1^* =$

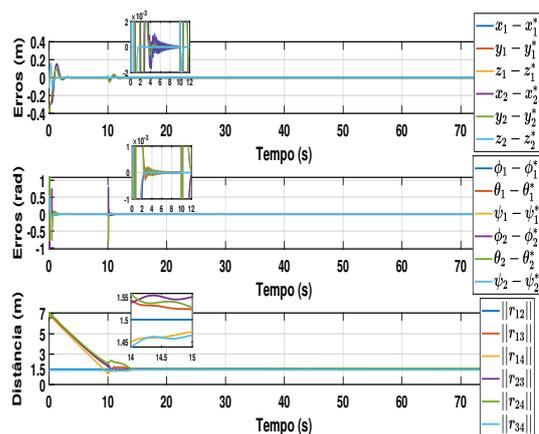


Figura 6: Erros e distância entre agentes.

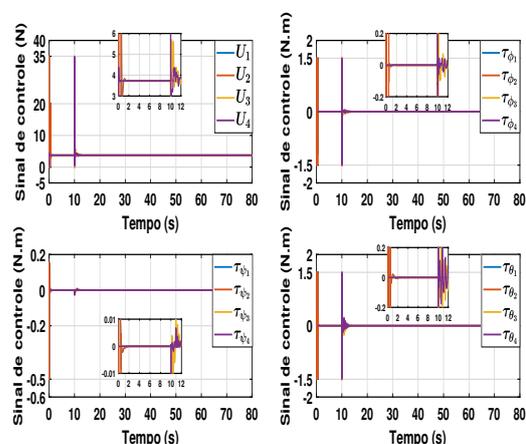


Figura 7: Sinais de controle.

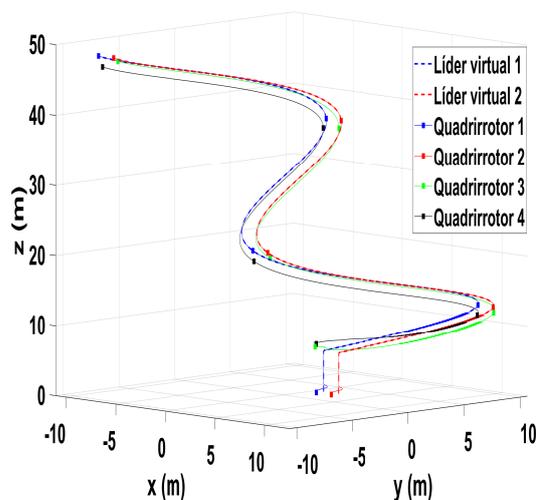


Figura 8: Formação com parâmetros incertos e distúrbios.

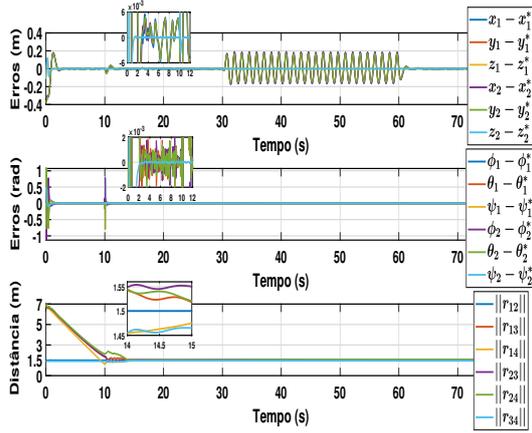


Figura 9: Erros e distância entre agentes com parâmetros incertos e distúrbios.

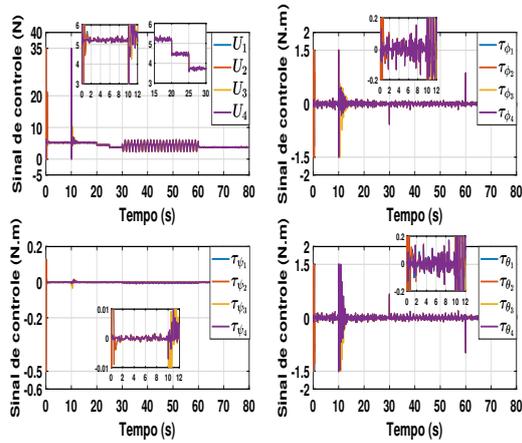


Figura 10: Sinais de controle com parâmetros incertos e distúrbios.

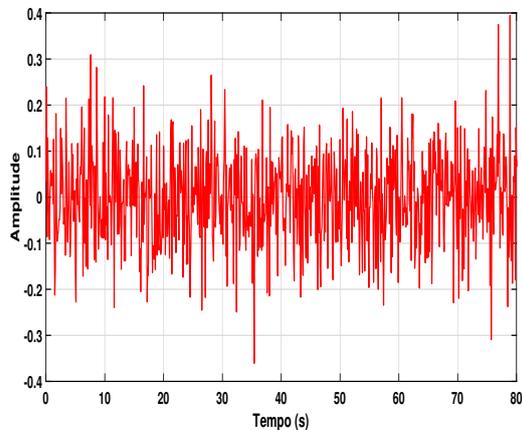


Figura 11: Ruído branco na entrada do sistema.

$2.8 + 11\sin(\eta t)$, $x_2^* = 1.3 + 11\sin(\eta t)$, $y_1^* = y_2^* = 2.4 + 10\sin(2\eta t)$, $z_1^* = z_2^* = 5 + 0.1t$ ($t \geq 10s$), onde $\eta = 0.012$. Também, $\psi_1^* = \psi_2^* = 0$ em todo tempo.

Os quadricópteros 3 e 4 não seguem líderes virtuais e são responsáveis por manter a formação com os outros dois. Pode ser observado da Figura 5 que os quadricópteros se movem em formação no espaço. Na Figura 6, os erros de rastreamento convergem para zero e não há colisões, $\|r_{ij}\| > 0$ em todo tempo, mas observa-se um erro residual na distância desejada entre os agentes. A formação é alcançada em, aproximadamente, 15 s. Na Figura 7, os sinais de controle estão dentro dos limites estabelecidos. Por fim, testase a robustez da estratégia de controle considerando as mesmos parâmetros iniciais e objetivos. Uma carga com massa de $0.4M$ é adicionada em cada quadricóptero e sofre decréscimo de 50% em $t = 20$ s e $t = 25$ s, provocando a variação dos parâmetros M, I_{xx}, I_{yy} e I_{zz} . O sistema multiagente é submetido à distúrbios externos $d_{(x,y,z)} = 1.2\sin(5t)N$ e $d_{(\phi,\theta,\psi)} = 0.05\sin(5t)N.m$ nas forças e momentos aerodinâmicos, respectivamente, entre o intervalo de tempo de 30s a 60s (Wang and Liu, 2017; Lima, 2015). Também, considera-se a presença de ruído branco, mostrado na Figura 11, na entrada do sistema. O ruído é considerado como parte do distúrbio generalizado, que é estimado pelo ESO. Na Figura 9, observa-se um acréscimo nos erros de rastreamento, mas as amplitudes desses erros não afetam de forma significativa os rastreamentos de trajetória e colisões são evitadas. A Figura 10 mostra os sinais de controle destacando U_i nos instantes onde ocorrem as variações de massa do sistema. O sistema multiagente mantém a formação como apresentado na Figura 8, o que demonstra o bom desempenho e robustez do controlador em atenuar as perturbações externas consideradas.

Em uma aplicação prática, é importante observar o valor ω_o selecionado. Quanto maior o valor de ω_o , maior será o valor do vetor L (ganhos do observador), e estes multiplicam a diferença entre a saída do sistema, z , e a saída do estimador de estados, \hat{z} , conforme equação (23). A saída real do sistema está relacionada com a saída z , como na equação (7), e é lida por um sensor, que possui um ruído associado. Logo, para ganhos muito elevados do observador, o ruído proveniente do sensor será realimentado e amplificado, o que pode comprometer o desempenho do controle. Sendo assim, a implementação da técnica ADRC Modificado, assim como a técnica ADRC tradicional, é indicada para plantas com sensores de realimentação de boa qualidade, ou seja, baixo ruído (Nardi, 2016).

6 Conclusões Finais

O presente artigo abordou o controle de formação e rastreamento de quadricópteros sujeitos à variações nos parâmetros dinâmicos e à distúrbios externos, onde utilizou-se o controlador ADRC Modificado em uma estrutura de controle em cascata. A estratégia de formação utilizando líderes virtuais é baseada em uma função potencial que permitiu um controle descentralizado e evitou colisões entre os quadricópteros. O desempenho e eficácia do esquema de controle proposto foi apresentado através de simulações computacionais. Como proposta de trabalho futuro, pretende-se obter resultados experimentais.

Referências

- Ding, L. and Wang, Z. (2018). A robust control for an aerial robot quadrotor under wind gusts, *Journal of Robotics* pp. 1–8.
- Fried, J., Lizarralde, F. and Gouvea, J. A. (2019). Trajectory tracking and pose regulation of a group of mobile robots based on potential fields and virtual leaders, *American Control Conference (ACC)*, pp. 4665–4670.
- Gao, Z., Hu, S. and Jiang, F. (2001). A novel motion control design approach based on active disturbance rejection, *Proc. IEEE Conference on Decision and Control* **5**: 4877–4882.
- Gao, Z., Huang, Y. and Han, J. (2001). An alternative paradigm for control system design, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on* **5**: 4578–4585.
- Gouvêa, J. A., Pereira, A. R., Liu, H. and Lizarralde, F. (2010). Adaptive formation control of dynamic nonholonomic systems using potential functions, *American Control Conference*, pp. 230–235.
- Han, J. (1998). Auto-disturbance rejection control and its applications, *Control and decision* **13**: 19–23.
- Han, J. (2009). From pid to active disturbance rejection control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **56**: 0–906.
- Lee, D., Kim, H. J. and Sastry, S. (2009). Feedback linearization vs adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter, *International Journal of Control, Automation and Systems*, pp. 419–428.
- Leonard, N. E. and Fiorelli, E. (2001). Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups, *IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 2968–2873.
- Lima, A., Gouvea, J. A., Lizarralde, F. and Hsu, L. (2014). Trajectory tracking, pose regulation and adaptive formation control of a group of nonholonomic mobile robots, *IFAC Proceedings* **47**: 5709–5714.
- Lima, G. V. (2015). Modelagem dinâmica e controle para navegação de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadricóptero, *Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia*.
- Lv, Y., Yang, X., Yang, Y., Pan, S. and Xin, C. (2018). Formation control of uavs based on artificial potential field, *MATEC Web of Conferences* **189**: 10018.
- Nardi, M. B. (2016). Implementação do controle adrc (active disturbance rejection control) no acionamento de motores síncronos de ímãs permanentes aplicados em máquinas de tração de elevadores, *Dissertação de mestrado, Universidade Católica do Rio Grande do Sul*.
- Santos, J. C. C. d., Silva, F. L. e., Zachi, A. R. L. and Gouvêa, J. A. (2018). Rastreamento de trajetória em veículos aéreos não tripulados utilizando um controlador com rejeição ativa de distúrbios, *Congresso Brasileiro de Automação*.
- Silva, H. R. D. d. (2012). Formation control for unmanned aerial vehicles, *ISR and Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon*.
- Viana, I. B., Prado, I. A. A., Santos, D. A. d. and Goes, L. C. S. (2015). Formation flight control of multirotor helicopters with collision avoidance, *IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, pp. 757–764.
- Viana, I. B., Santana, L., Santos, D. A. d. and Goes, L. C. S. (2016). Experimental validation of a trajectory tracking control using the ar.drone quadrotor, *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*.
- Wang, R. and Liu, J. (2017). Adaptive formation control of quadrotor unmanned aerial vehicles with bounded control thrust, *Chinese Journal of Aeronautics* **30**: 807–817.
- Zachi, A. R., Correia, C. A. M., A. Filho, J. L. and Gouvêa, J. A. (2019). Robust disturbance rejection controller for systems with uncertain parameters, *IET Control Theory and Applications* **13**: 1995–2007.
- Zhang, X., Gao, J., Zhang, W., Zeng, T. and Ye, L. (2019). Formation control for multiple quadrotor aircraft via fixed-time consensus algorithm, *Mathematical Problems in Engineering* pp. 1–11.