

# Sistema Multiagente para Formação e Sincronização Utilizando Drones

Denis F. Sousa de Sá\* João Viana F. Neto\*\*

\* *Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Maranhão, MA, (e-mail: denis.fss@ufma.br).*

\*\* *Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Maranhão, MA, (e-mail: vianafonseca@gmail.com)*

---

**Abstract:** The application of multiagent theory to autonomous aerial vehicles, based on models, is presented in this article. The concepts of multi-agent systems as well as the mathematical models of interactions between agents, defined as protocols are presented. These protocols are applied so that Drones or agents can move autonomously, aiming to avoid collisions, following a leader and obtaining a spatial geometric formation. This process occurs due to the synchronization between agents. Thus, multi-agent application is evaluated through simulations using linearized and non-linearized models of the Drone.

**Resumo:** A aplicação da teoria multiagente aos veículos aéreos autônomos, baseada em modelos, é apresentada neste artigo. Os conceitos de sistemas multiagentes assim como os modelos matemáticos das interações entre os agentes, definidos como protocolos são apresentados. Esses protocolos são aplicados para que os Drones ou agentes possam se movimentar de forma autônoma, visando evitar colisões, seguindo um líder e obtendo uma formação geométrica espacial. Esse processo ocorre devido a sincronização entre os agentes. Assim, são avaliados através de simulações a aplicação multiagente utilizando modelos linearizados e não linearizados do Drone.

*Keywords:* Multiagent, Cooperative Control, Formation, Drone, Synchronization.

*Palavras-chaves:* Multiagente, Controle Cooperativo, Formação, Drone, Sincronização.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas multiagente têm ganhado destaque em pesquisas na área de controle, possuindo aplicações em redes de sensores, veículos autônomos, sistemas de comunicação, dentre outros. Como exemplo, em Yildirim et al. (2020), tem-se o estudo do comportamento multiagente onde o sistema é submetido a perturbações e suas propriedades são estudadas. Já em Colombo and Dimarogonas (2020), é estudado o problema viabilidade de movimento para sistemas multiagentes de controle com o objetivo de evitar colisões.

Abordagens do tipo multiagentes, tem forte impacto quando se fala em algoritmos e técnicas inteligentes, como em Wang et al. (2017) que os apresenta através de uma ótica de controle cooperativo no rastreamento e controle preditivo. Em Toader et al. (2019), a teoria multiagente é utilizada para tratar do problema de fluxo de pacientes em hospitais. Já em Mahmoud and Ahmad (2015), é utilizada no marketing inteligente e estratégico voltado para clientes. Em Majee et al. (2019) é tratado a necessidade de reconstruir objetos através de raio-x. Em Rodriguez-Seda and Stipanovic (2020), é proposto o aumento do grau de liberdade entre os agentes através da redução da região anticollisão e em Rossi et al. (2020) é proposto um sistema de planejamento para o movimento de veículos aéreos para o transporte de objetos.

Outra tecnologia importante, são os Drones. Seu uso tem tido destaque na agricultura, como em Potrino et al. (2018), onde são utilizados para dar suporte na identificação de parasitas ou em Budiharto et al. (2019), em que são utilizados para agricultura de precisão. Além disso, Drones têm sido utilizados para diversas finalidades, tendo como exemplo, soluções em transporte, como apresenta Huang et al. (2019).

Toda a lógica envolvendo o sistema multiagente é baseada na avaliação comportamental dos seres vivos F Lewis (2014), como bandos de pássaros, por exemplo. Os sistemas multiagentes podem ser tratados como um acoplamento entre sistemas dinâmicos, devendo atuar de forma harmônica em busca de um objetivo em comum.

Com base nesses fatos, e na importância do uso de Drones e a relevância das pesquisas de sistemas multiagentes, este trabalho tem por objetivo avaliar a convergência e formação a utilização dos conceitos da teoria multiagente associada a tecnologia de Drones e seus controladores internos, através do uso de protocolos que regem o comportamento entre os agentes (Drones), além do deslocamento para uma posição de referência. Além disso o protocolo de formação e liderança foi desenvolvido com base nas metodologias presentes nas bibliografias.

---

\* Agradecimento a UFMA, CAPES e PPGEE-UFMA

## 2. SISTEMAS MULTIAGENTES

Quando se pensa em Sistemas Multiagentes (SMA), remete-se tanto ao elemento fundamental (o agente) quanto a interação entre vários elementos (agentes e seus vizinhos). Sendo assim, um agente é um sistema com dinâmica própria que recebe informações e responde a estas de acordo com sua dinâmica. Já o SMA, parte de um conjunto de agentes, onde cada um recebe informações do ambiente e/ou de seus vizinhos e responde a tais informações de acordo com as leis que regem o determinado ambiente R H Bordini (2007). O comportamento do agente de acordo com F Lewis (2014) é baseado em leis, e as leis básicas são definidas pelas regras de Reynold's:

- (1) Evitar colisões com agentes vizinhos;
- (2) Velocidade correspondente: a velocidade de deslocamento está em acordo com a dos vizinhos;
- (3) Centralização do bando: manter uma proximidade ao vizinho.

A modelagem da interação entre os agentes é realizada através do conceito de Grafos, definidos como um conjunto de elementos unidos por arcos ou arestas usados para representar as interações entre os elementos que o compõe. Portanto, seguindo a notação proposta por F Lewis (2014), o grafo é definido por  $G = (V, E)$ , com  $V = [v_1, \dots, v_N]$ , sendo  $N$  o número de agentes ou nós e  $E$ , o conjunto de arestas ou arcos. Os elementos de  $E$  são compostos por pares  $(v_i, v_j)$ , representando o fluxo de informação que vai de  $v_j$  para  $v_i$ .

A vizinhança de um nó  $v_i$  é denotado por  $N_i = v_j : (v_i, v_j) \in E$ , ou seja, é o conjunto de nós pelo qual  $v_i$  compartilha informações. Essas informações possuem um grau de relevância, definida por  $a_{ij} > 0$  associado a uma aresta ou arco  $(v_i, v_j) \in E$ . O peso  $a_{ij}$  representa a força de interação do fluxo de informação entre os nós e a soma desses valores para um agente definido como grau de entrada dado por

$$d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}. \quad (1)$$

Portanto, dado um conjunto de agentes dispostos em um ambiente e com matriz de conectividade ou adjacência  $A = \{a_{ij}\}$ , a matriz representativa da dinâmica do Grafo é definida como Matriz Laplaciana  $L$ , que segundo F Lewis (2014), é dada por  $L = D - A$ , sendo  $D = \text{diag}(d_i)$ .

Com base nesse contexto e partindo dessas definições os protocolos que regem o comportamento em grupo dos agentes é apresentado.

### 3. PROTOCOLOS DE CONTROLE COOPERATIVO

Os Protocolos de Controle Cooperativo são vistos como um consenso entre os agentes, levando em consideração as variáveis de estado dos agentes, suas dinâmicas e as regras de Reynold's. Dessa forma, existem neste processo duas abordagens: a contínua e a discreta. No entanto, como o objetivo é aplicar tais procolos aos Drones, que são elementos controlados por sistemas embarcados microprocessados, então é apresentada uma abordagem discreta dos protocolos.

Dessa forma, com base em F Lewis (2014), são apresentados os protocolos do tipo simples e com formação e liderança.

#### 3.1 Protocolo Simples

O protocolo simples é composto pela conectividade entre o agente e seus vizinhos e tem como objetivo a centralização do grupo, levando-os à um ponto de convergência denominado de consenso. Essa centralização é diretamente proporcional ao grau de conectividade entre os elementos, portando, o protocolo é descrito na forma dada por

$$u_i(n) = c \sum_{j \in N_i/N_i^c} a_{ij} (x_j(n) - x_i(n)), \quad (2)$$

sendo,  $x_i$  o estado do agente,  $x_j$  o estado do agente vizinho e  $c$  o fator de acoplamento entre os agentes.

Este protocolo é o ponto de partida para que se possa elaborar protocolos de controle cooperativo mais complexos.

#### 3.2 Protocolo Liderança e Formação

Neste protocolo são incluídos dois conceitos: liderança e formação .

O primeiro conceito é o de liderança, introduzido através da variável  $x_o$ , podendo ser tanto o estado de um agente (líder) ou simplesmente uma referência. O grau de acoplamento em relação a essa liderança é dada pela constante de proporcionalidade  $k_p$ . Vale ressaltar que a referência de liderança  $x_o$  passa a ser o centro do movimento do grupo, ou seja, o estado de referência onde todos os agentes irão convergir.

O segundo conceito é implementado através da inclusão de *offsets* para os agentes, dado por  $\Delta_i$ . Esse parâmetro representa o quanto o agente  $x_i$  ficará deslocado em relação a  $x_o$ , ou seja, se o grupo segue uma dada trajetória, esse *offset* mantém o agente  $i$  deslocado de  $\Delta_i$  em relação ao esse centro do movimento. O estado do agente  $i$  será dado por  $x_o$  deslocado de  $\Delta_i$  ao final do processo de convergência/sincronização. O mesmo ocorre com os vizinhos  $j$ . A inclusão desses parâmetros permite que se possa impor uma dada formação ao grupo, como uma distribuição espacial pré definida.

Portando, dadas tais características, o protocolo para cada agente é dado por

$$u_i(n) = k_p [x_o(n) + \Delta_i - x_i(n)] + c \sum_j a_{ij} [(x_j(n) + \Delta_j) - (x_i(n) + \Delta_i)]. \quad (3)$$

Assim, vistos os protocolos e os conceitos envolvendo o SMA, é apresentado o objeto de estudo para o qual os protocolos são aplicados, ou seja, a dinâmica de um veículo aéreo quadrimotor.

### 4. DINÂMICA ANGULAR E ESPACIAL DO DRONE

A modelagem do Drone é realizada através das leis mecânicas de corpo rígido de Lagrange, relacionando suas

coordenadas inerciais aos ângulos de Euler, podendo ser controlado a partir da velocidade de rotação de seus quatro motores.

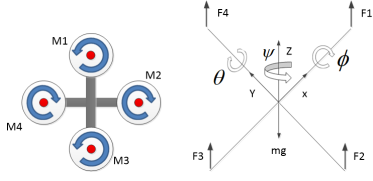


Figura 1. Representação de movimento do quadrimotor  
Fonte: Baseado em Bouabdallah et al. (2004).

Como apresenta a Fig. 1, o Drone se movimentará de acordo com a rotação de seus quatro motores  $[M1, M2, M3, M4]$ . Dessa forma, têm-se:

- Rotação a esquerda: os torques gerados por  $M2$  e  $M4$  são iguais e de maior intensidade que os torques de  $M1$  e  $M3$ , que também geram torques iguais entre si;
- Rotação a direita: de forma similar a rotação a esquerda, invertendo-se os dois motores com maior torque ( $M1$  e  $M3$ , passam a ter maior torque que  $M2$  e  $M4$ );
- Subir: todos os motores geram torque de intensidade iguais;
- Mover a direita: o torque de  $M4$  com maior intensidade,  $M1$  e  $M3$  iguais e menor que  $M4$ , e  $M2$ , sendo o de menor intensidade;
- Mover a esquerda: de forma similar ao movimento a direita, porém com  $M2$  tendo a maior intensidade e  $M4$  a menor.

Essa variação de torque entre os motores geram três rotações em relação aos eixos  $x, y$  e  $z$ , denominados de ângulos de Euler, representados por  $\phi, \theta$  e  $\psi$ .

#### 4.1 Modelo dinâmico

O modelo dinâmico para o Drone é desenvolvido com base nas premissas de movimento de rotação a direita, rotação a esquerda, subir, mover a direita e esquerda Bouabdallah et al. (2004); CARRILLO et al. (2013).

A dinâmica de rotação do corpo é obtida através dos ângulos  $\phi$  (*roll*),  $\theta$  (*pitch*) e  $\psi$  (*yaw*), que dependem dos momentos de inércia nos eixos  $-x, y, z$  e do torque gerado pelos atuadores, conforme apresentam as equações dadas por

$$\begin{aligned}\ddot{\phi} &= \dot{\theta}\dot{\psi} \left( \frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{J}{I_x} \dot{\theta}\Omega + \frac{l}{I_x} U_1 \\ \ddot{\theta} &= \dot{\phi}\dot{\psi} \left( \frac{I_z - I_x}{I_y} \right) + \frac{J}{I_y} \dot{\phi}\Omega + \frac{l}{I_y} U_2 \\ \ddot{\psi} &= \dot{\theta}\dot{\phi} \left( \frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{1}{I_z} U_3\end{aligned}\quad (4)$$

Cada dinâmica angular sofre influência seu respectivo torque, sendo  $U$  o empuxo,  $U_1$  causa rotação em torno do eixo  $-x$  ( $\phi$ ),  $U_2$ , rotação em torno do eixo  $-y$  ( $\theta$ ) e  $U_3$  em torno do eixo  $-z$  ( $\psi$ ), dados por

$$\begin{aligned}U_1 &= b (\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ U_2 &= b (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ U_3 &= d (\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2), \\ \Omega &= \Omega_2 + \Omega_4 - \Omega_1 - \Omega_3 \\ U &= b (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)\end{aligned}\quad (5)$$

sendo  $b$  o fator de empuxo,  $d$  o arrasto,  $l$  a distância entre os eixos de rotação de duas hélices opostas,  $I_x, I_y$  e  $I_z$  os momentos de inércia do corpo e  $J$  o momento de inércia da hélice. Os torques dependem das velocidade dos motores  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  e  $\Omega_4$ . Dessa forma, o modelo para as coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$ , em função do torque de empuxo e os ângulos de rotação, é dado por

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U}{m} \\ \ddot{y} &= (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U}{m} \\ \ddot{z} &= -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U}{m}\end{aligned}\quad (6)$$

Portanto, tem-se tanto o modelo translacional quanto o rotacional do Drone, que são necessários para aplicação dos protocolos.

#### 4.2 Drone para simulação

Para as simulações foram utilizados dados de um Drone real, de quatro motores obtidos de Teppo (2011) e são dados por:

$$\begin{aligned}m &= 0,468kg, l = 0,225m, I_{xx} = 4,856 \cdot 10^{-3}Nm, \\ I_{yy} &= 4,856 \cdot 10^{-3}Nm, I_{zz} = 8,801 \cdot 10^{-3}Nm, \\ b &= 2,98 \cdot 10^{-6}, d = 1,14 \cdot 10^{-7}, J = 6 \cdot 10^{-5}Nm.\end{aligned}$$

O objetivo é aplicar a teoria multiagente. Para isso, o Drone possui controladores básicos internos com o objetivo de estabilizar e controlar os ângulos de Euler. Dado isso, foram levantados controladores da família PID. Tais controladores foram calculados e projetados, porém, apenas serão apresentados os resultados, já que o foco trata da aplicação da teoria multiagente.

*Controle angular* Os ângulos de rotação são os principais responsáveis pelo deslocamento do corpo no espaço. Os controladores fornecem o torque necessário para que os ângulos de referencia sejam atingidos, através de  $U_1, U_2$  e  $U_3$ :

- Controle de  $\phi, \theta$  e  $\psi$ :

$$U_1 = \left( k_{p,\phi} e_\phi + k_{d,\phi} \dot{\phi} \right) \frac{I_x}{l}, \quad (7)$$

$$U_2 = \left( k_{p,\theta} e_\theta + k_{d,\theta} \dot{\theta} \right) \frac{I_y}{l}, \quad (8)$$

$$U_3 = \left( k_{p,\psi} e_\psi + k_{d,\psi} \dot{\psi} \right) I_z. \quad (9)$$

- Parâmetros de controle:

*Controle de Posição* O controle de posição, é realizado através do torque  $U$  e dos ângulos de Euler. O controle utilizando a variável  $U$  é chamado de estabilização do

Tabela 1. Parâmetros para os controladores das Eqs (7),(9) e (8)

Parâmetros de controle			
Em:	$K_p$	$K_i$	$K_d$
$\psi$	9,86	0	-6,28
$\theta$	22,2	0	-9,42
$\phi$	22,2	0	-9,42

quadrimotor. Através do controle direto desta variável é feito o controle de altitude, restando como graus de liberdade para o controle em  $x$  e  $y$ , os ângulos de Euler. Dessa forma o primeiro caso a ser estudado é o controle em  $z$ .

- Controle em Z

$$U = \frac{m(g + k_{p,z}e_z + k_{d,z}\dot{z})}{\cos\theta \cos\phi}. \quad (10)$$

- Controle em X

O controle em  $x$  é resultado da simplificação utilizando a Eq. (10), sendo dada por

$$m\ddot{x} = (u_z + mg) \left( \frac{\sin\psi \tan\phi}{\cos\theta} + \cos\psi \tan\theta \right). \quad (11)$$

Com base na simplificação em CARRILLO et al. (2013), a estratégia de controle em  $x$  é dada por

$$\ddot{x} = g \tan\theta, \quad (12)$$

sendo o controlador

$$\theta = k_{p,x}e_x + k_{d,x}\dot{x}. \quad (13)$$

- Controle em Y

Para equação dinâmica em  $y$ , o mesmo realizado para  $x$  é válido. Portanto, seja a dinâmica:

$$m\ddot{y} = (u_z + mg) \left( \sin\psi \tan\theta - \frac{\cos\psi \tan\phi}{\cos\theta} \right). \quad (14)$$

Portanto, sendo

$$\ddot{y} = -g \frac{\tan\phi}{\cos\theta}, \quad (15)$$

e considerando  $\theta$  pequeno, a dinâmica para  $y$  é diretamente proporcional a  $-\phi$ .

$$-\phi = k_{p,y}e_y + k_{d,y}\dot{y}. \quad (16)$$

- Parâmetros de controle:

Tabela 2. Parâmetros de controle das Eqs (10), (13) e (16)

Constantes de controle			
Em:	Kp	Ki	Kd
z	0,23	0	-0,33
x	0,23	0	-0,33
y	-0,23	0	0,33

## 5. AVALIAÇÃO DOS PROTOCOLO MULTIAGENTE

Nesta seção, são apresentadas as características do SMA utilizado e as equações de malha fechada utilizando, modelos linearizados para cada eixo de deslocamento do Drone.

### 5.1 Caracterização do SMA

A primeira etapa, é determinar o grafo. Portanto, é utilizado uma estrutura de rede dada pela Figura (2), considerando  $a_{i,j} = 1$ . Essa estrutura foi escolhida para os testes devido ser facilmente aplicável aos sistemas com líder e possuir aspecto similar a um bando de pássaros.

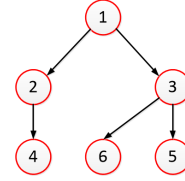


Figura 2. Gráfico de interação entre agentes  
Fonte: Reproduzida de F Lewis (2014)

As matrizes do sistema, descritas a seguir, servem para todos os testes apresentados:

- Matriz de conectividade e Laplaciana:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 5.2 Equações SMA em Malha Fechada

Seja um conjunto de agentes em um Grafo  $G = (V, E)$ , com matriz Laplaciana  $L$  e partindo do princípio que a dinâmica do agente é dada por

$$\dot{x}_i(k+1) = Wx_i(k) + Bu_i(k). \quad (17)$$

e sabendo que o Drone possui dinâmica diferente para os diferentes eixos de deslocamento, ou seja,  $(W_x, B_x)$ ,  $(W_y, B_y)$  e  $(W_z, B_z)$ , é aplicado um protocolo para cada eixo de deslocamento.

*Protocolo Simples* Sendo  $L$  a Matriz Laplaciana e  $K$  um vetor unitário de ordem igual ao número de estados do agente  $i$ , a generalização do protocolo simples para todos os agentes, sendo  $c$  o fator de acoplamento, é dado por

$$\begin{aligned} x(k+1) &= [I \otimes W_x - cL \otimes B_x K] x(k) \\ y(k+1) &= [I \otimes W_y - cL \otimes B_y K] y(k) \\ z(k+1) &= [I \otimes W_z - cL \otimes B_z K] z(k) \end{aligned} \quad (18)$$

Este protocolo é obtido a partir da aplicação da Eq. (17) em (2), e da expansão para todos os agentes com  $x = [x_1, \dots, x_N]^T$ , sendo  $N$  o número de agentes, visando avaliar a convergência dos agentes para um ponto de equilíbrio em comum.

*Protocolo liderança e formação* De forma similar ao protocolo simples, este protocolo proposto é resultado da substituição da Eq. (17) em (3), e da generalização para todos os agentes. Portanto, considerando cada eixo de deslocamento, a equação de malha fechada para este caso é dada por

$$\begin{aligned} x(k+1) = & \\ & [I \otimes W_x - cL \otimes B_x K - k_p I \otimes B_x K] x(k) + \\ & [k_p I \otimes B_x K + cL \otimes B_x K] \Delta_x + [k_p I \otimes B_x K] \bar{x}_o; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} y(k+1) = & \\ & [I \otimes W_y - cL \otimes B_y K - k_p I \otimes B_y K] y(k) + \\ & [k_p I \otimes B_y K + cL \otimes B_y K] \Delta_y + [k_p I \otimes B_y K] \bar{y}_o; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} z(k+1) = & \\ & [I \otimes W_z - cL \otimes B_z K - k_p I \otimes B_z K] z(k) + \\ & [k_p I \otimes B_z K + cL \otimes B_z K] \Delta_z + [k_p I \otimes B_z K] \bar{z}_o. \end{aligned} \quad (21)$$

### 5.3 Simulações Considerando Modelos Linearizados

O modelo de referência para o multiagente, para este caso, é baseado no modelo linearizado dadas as equações de controle. Portanto, são apresentados os modelos em  $x$ ,  $y$  e  $z$ , sendo  $T$  o período de amostragem.

- Modelo em X:

O modelo em  $x$ , assim como os demais, são baseadas nas equações de deslocamento, aproximadas e inclusas as equações de controle. Portanto, sabendo que  $\ddot{x} = g\theta$  e que  $\theta = k_{p,x}e_x + k_{d,x}\dot{x}$ , o modelo no espaço de estados discreto é descrito por

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 1 & T \\ -gTk_{p,x} & gTk_{d,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ gTk_{p,x} \end{bmatrix} x_{ref}(k) \end{aligned} \quad (22)$$

- Modelo em Y:

De forma similar a realizada em  $x$ , é apresentado diretamente o modelo dinâmico final, dado por

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_1(k+1) \\ y_2(k+1) \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 1 & T \\ gTk_{p,y} & -gTk_{d,y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ -gTk_{p,y} \end{bmatrix} y_{ref}(k) \end{aligned} \quad (23)$$

- Modelo em Z:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} z_1(k+1) \\ z_2(k+1) \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 1 & T \\ -k_{p,z}T/m & Tk_{d,z}/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ Tk_{p,x}/m \end{bmatrix} z_{ref}(k) \end{aligned} \quad (24)$$

- Simulação (Protocolo simples):

Este protocolo visa avaliar a convergência dos agentes para um ponto de equilíbrio em comum. Para tal, apresenta-se o resultado simulado com um fator de acoplamento  $c = 0,2$ ,  $K = [1, 1]$  e  $T = 0.02$  para todos os eixos e com posições iniciais aleatórias:

Como é possível observar na Fig. 3, existe uma convergência/centralização de todos os agentes envolvidos, ou seja, o

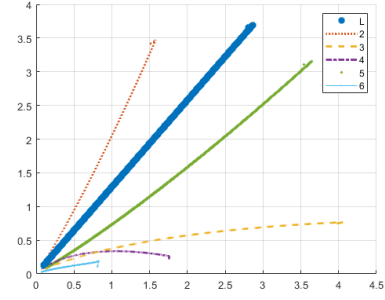


Figura 3. Drone linearizado com protocolo simples

protocolo cumpriu seu objetivo levando aproximadamente 80s para isso.

- Simulação (Protocolo com líder e formação):

Para a simulação foi utilizado  $c = 0,2$ ,  $K = [1, 1]$ ,  $k_p = 1$ ,  $T = 0,02$  para todos os eixos e  $(x_o, y_o, z_o) = (5, 5, 5)$  para que se obtenha uma formação similar a da Fig. 2, os  $\Delta_z$  foram ajustados para que todos os agentes tivessem a mesma altitude, ou seja,  $\Delta_z = [0; 0; 0; 0; 0; 0]$ . Em  $x$ , os agentes 2 e 4 deslocados de uma unidade a esquerda, 3 e 5 de uma unidade a direita e 6 centralizado, portanto  $\Delta_x = [0; -1; 1; -1; 1; 0]$ . Por fim, em  $y$ , o agente 1 sem distanciamento, 2 e 3 atrás em uma unidade e 4,5 e 6 atrás em duas unidades, resultando em  $\Delta_y = [0; -1; -1; -2; -2; -2]$ .

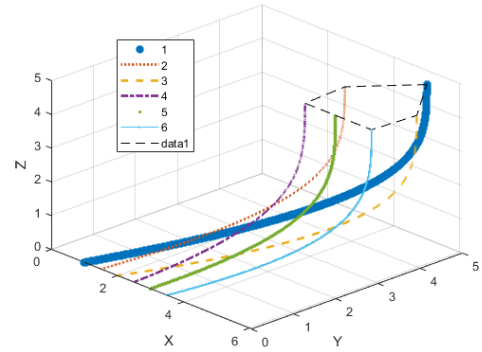


Figura 4. Drone linearizado com formação e liderança

O objetivo dessa simulação é justamente observar se o SMA consegue seguir uma liderança e uma formação baseada na Fig. 2, o que é facilmente observado na Fig. 4, onde a formação atinge a formação pré definida em aproximadamente 160s.

### 5.4 Simulações considerando modelos não linearizados

Para verificar uma melhor aplicação da teoria multiagente, foi desenvolvido uma visualização 2D por meio de *interface* gráfica e animação para a dada simulação. Nela, foram implementados os protocolos multiagente juntamente a dinâmica não linear do Drone e seus controladores internos, apresentadas anteriormente neste artigo.

A Figura 5 são as telas tiradas do início e do fim da simulação, respectivamente. É possível observar que o protocolo se comportou de forma esperada mesmo para

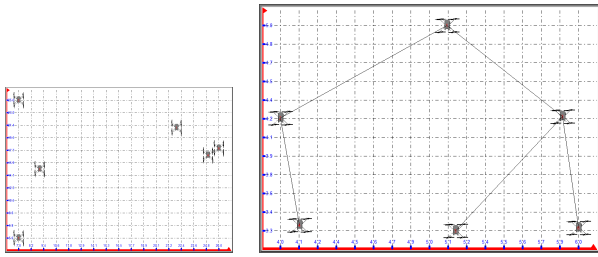


Figura 5. Simulação 2D tela inicial e final

uma simulação não linear, ou seja, atingindo a formação e o posicionamento de referência bem mais rápido que os casos linearizados, que ficou próximo a 20s.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a aplicação e desenvolvimento de protocolos de controle baseada na teoria multiagente com base nos modelos linearizados e não lineares de Drones, sendo avaliados a sincronização, capacidade de seguir uma liderança e formação espacial.

Foi apresentada a dinâmica do quadrimotor e, posteriormente foi utilizado os dados de um Drone real como objeto de referência para os testes das teorias apresentadas. Assim, dadas as leis de controle dos ângulos e de seu posicionamento, foram aplicadas as teorias de sistema multiagente.

Os modelos linearizados do Drone foram utilizados para determinar o sistema em malha fechada multiagente através de dois protocolos fundamentais: o simples, analisando a convergência e o protocolo com inclusão de liderança e formação que foi desenvolvido algebricamente.

No protocolo simples a convergência foi obtida, com os Drone se deslocando até atingir o ponto de convergência/sincronização. Já no protocolo com formação e liderança, tanto a formação desejada quanto o ponto de referência foram atingidos, sendo o protocolo simples mais lento.

Visando avaliar melhor o sistema multiagente, uma simulação com modelo não linear foi realizada para uma melhor visibilidade do sistema multiagente, onde uma visualização 2D foi desenvolvida para o protocolo com liderança e formação, obtendo-se similares aos linearizados, porém com uma melhor reação em termos temporais.

Visto todos os protocolos de controle, foram realizadas simulações obtendo-se resultados satisfatórios, abrindo uma boa perspectiva para futuras aplicações e desenvolvimentos teóricos.

## AGRADECIMENTOS

Universidade Federal do Maranhão, CAPES, PPGEE-UFMA

## REFERÊNCIAS

Bouabdallah, S., Noth, A., and Siegwart, R. (2004). Pid vs lq control techniques applied to an indoor micro quadrotor. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, volume 3, 2451–2456 vol.3.

- Budiharto, W., Chowanda, A., Gunawan, A.A.S., Irwansyah, E., and Suroso, J.S. (2019). A review and progress of research on autonomous drone in agriculture, delivering items and geographical information systems (gis). In *2019 2nd World Symposium on Communication Engineering (WSCE)*, 205–209.
- CARRILLO, G., LOPEZ, E., LOZANO, R., and PEGARD, C. (2013). *Quad-Rotor Control: Vision-based hovering and navigation*. Springer.
- Colombo, L.J. and Dimarogonas, D.V. (2020). Motion feasibility conditions for multiagent control systems on lie groups. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 7(1), 493–502.
- F Lewis, Z.H. (2014). *Cooperative Control of Multi-Agent Systems*.
- Huang, H., Savkin, A.V., and Huang, C. (2019). When drones take public transport: Towards low cost and large range parcel delivery\*. In *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, volume 1, 1657–1660.
- Mahmoud, M.A. and Ahmad, M.S. (2015). A self-adaptive customer-oriented framework for intelligent strategic marketing: A multi-agent system approach to website development for learning institutions. In *2015 International Symposium on Agents, Multi-Agent Systems and Robotics (ISAMSR)*, 1–5.
- Majee, S., Balke, T., Kemp, C.A.J., Buzzard, G.T., and Bouman, C.A. (2019). 4d x-ray ct reconstruction using multi-slice fusion. In *2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, 1–8.
- Pottrino, G., Palmieri, N., Antonello, V., and Serianni, A. (2018). Drones support in precision agriculture for fighting against parasites. In *2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 1–4.
- R H Bordini, J F Hubner, M.W. (2007). *Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason*. Wiley.
- Rodriguez-Seda, E.J. and Stipanovic, D.M. (2020). Cooperative avoidance control with velocity-based detection regions. *IEEE Control Systems Letters*, 4(2), 432–437. doi:10.1109/LCSYS.2019.2946232.
- Rossi, E., Tognon, M., Carli, R., Schenato, L., Cortés, J., and Franchi, A. (2020). Cooperative aerial load transportation via sampled communication. *IEEE Control Systems Letters*, 4(2), 277–282. doi:10.1109/LCSYS.2019.2924413.
- Teppo, L. (2011). *Modelling and control of Quadcopter*. Aalto University.
- Toader, C.G., Popescu, N., Teodorescu, I.A., Toader, A.D., and Busnatu, S. (2019). Patient flow control using multi-agent systems. In *2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*, 244–250.
- Wang, B., Chen, W., Wang, J., Zhang, B., Zhang, Z., Lin, H., and Ma, B. (2017). Optimal tracking cooperative control for multi-agent systems with periodic sampling via robust model predictive control approach. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 8385–8390.
- Yildirim, E., Sarsilmaz, S.B., Koru, A.T., and Yucelen, T. (2020). On control of multiagent systems in the presence of a misbehaving agent. *IEEE Control Systems Letters*, 4(2), 456–461. doi:10.1109/LCSYS.2019.2948133.