

CONTROLE DE ATITUDE E POSIÇÃO DE UM QUADRIRROTOR: APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE CONSENSO

VINÍCIUS RODRIGUES DONATO*, BERNARDO ORDOÑEZ†

*UFBA - Escola Politécnica
DEE - LAC - Laboratório de Automação e Controle
Salvador, Bahia, Brasil

Emails: viniciusrdonato@gmail.com, bordonez@ufba.br

Abstract— This paper presents both attitude and position controls for the quadrotor. The control problem is addressed by the LQR control to the stabilization of the vehicle (attitude problem) and tracking a reference trajectory (position problem). In the context of coordination of vehicles, we use the theory of consensus algorithms to generate and control the reference trajectories for each quadrotor (rendezvous problem). The results obtained by simulation are presented and a discussion about the performance for the attitude and position controls of the quadrotor is presented.

Keywords— Quadrotor, Attitude and position control, LQR, Consensus Algorithms.

Resumo— Neste trabalho é estudado o problema de controle de atitude e posição de um quadrrorotor. Os problemas de controle são abordados mediante projeto de controladores LQR com ação integral com o objetivo de possibilitar tanto a estabilização do veículo (problema de atitude) como o seguimento de uma trajetória de referência (problema de posição). Ainda, no contexto da coordenação de veículos, utiliza-se a teoria de consenso para gerar e controlar as trajetórias de referência para cada quadrrorotor de modo a resolver o problema de "rendezvous". Os resultados obtidos em simulador computacional são apresentados e faz-se uma discussão acerca do desempenho obtido para os controles de atitude e posição do quadrrorotor.

Palavras-chave— Quadrrorotor, Controles de atitude e posição, LQR, Algoritmos de Consenso.

1 Introdução

A utilização de VANTs (Veículos aéreos não tripulados), apesar da inicial aplicação militar, vai muito além deste uso exclusivo, em que as utilidades incluem desde o uso recreativo até os estudos acadêmicos e industriais. A diversidade no emprego de VANTs para tarefas foi possível devido aos avanços tecnológicos ocorridos na área de controle cooperativo, microeletrônica e instrumentação, fomentados pelo compromisso com praticidade e segurança. Dentre essas tarefas, destaca-se o monitoramento de áreas protegidas ou restritas e missões de busca e resgate efetuadas por VANTs com câmeras, sensores termais, dentre outros dispositivos. Essas operações tornam-se mais eficientes quando realizadas por grupos coordenados, os quais alcançam o objetivo comum por meio do compartilhamento de informação, condição básica para o sucesso da missão (Schurr et al., 2005), (Pizetta et al., 2016). O crescente aperfeiçoamento da cooperação e a redução das dimensões dos veículos aponta para um futuro onde tais missões poderão ser realizadas por verdadeiros "enxames" de VANTs autônomos.

Neste artigo, o objetivo principal é abordar o problema de estabilização do quadrrorotor sob a perspectiva do problema de consenso (as trajetórias de consenso definem a referência para os ângulos de estabilização). Ressalta-se que o quadrrorotor é um sistema instável e subatuado, o que torna o problema mais desafiante, em que cada veículo, de forma descentralizada, deve seguir a trajetória mediante estratégia de controle locais.

Definição do problema 1: a estabilização do quadrrorotor caracteriza-se pelo controle estável dos ângulos de Euler, que orientam o veículo no espaço tridimensional.

Definição do problema 2: O problema de consenso para um grupo de veículos caracteriza-se pelo compartilhamento de informação para o cálculo de trajetórias de referência (eixos x , y e z), de forma a atingir um objetivo comum do grupo.

Essa abordagem conjunta na solução dos problemas 1 e 2 é o diferencial da estratégia proposta e do posterior estudo, em que analisa-se como controlar a trajetória de consenso pode implicar no controle local de estabilização do VANT.

O crescente interesse na aplicação de VANTs motivou a realização de diversos trabalhos, dentre os quais destacam-se: (Ordóñez, 2013), que detalhou o movimento do quadrrorotor e a modelagem matemática do sistema que foi adotada nesse trabalho; (Sá, 2012), que apresentou uma alternativa para relacionar os sinais de controle e as velocidades dos rotores; (Sacramento, 2014), que esclareceu o comportamento instável do sistema e desenvolveu estratégias para o controle de atitude; (Adir e Stoica, 2012), que solucionou o problema do desacoplamento das equações da dinâmica do sistema e (Ordóñez, 2013; Ren e Beard, 2008; Ordóñez et al., 2014), que abordou o problema do consenso a partir de diferentes tipos de algoritmos de consenso.

O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 1 contextualiza-se o uso de VANTs e define-se os problemas; na Seção 2, apresenta-se o

modelo matemático do quadrrorotor; na Seção 3, são desenvolvidas as estratégias de controle, com as etapas de projeto e os resultados obtidos com os controladores de altitude, atitude e posição do quadrrorotor; na Seção 4, resolve-se o problema do consenso para grupos de veículos a partir da geração das trajetórias de referência; na Seção 5, apresenta-se as conclusões do trabalho e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

2 O quadrrorotor

O modelo de quadrrorotor é mostrado na Figura 1. A orientação é obtida pela rotação dos ângulos ϕ , θ e ψ , com referência no centro do veículo, que é móvel em relação ao sistema referencial inercial.

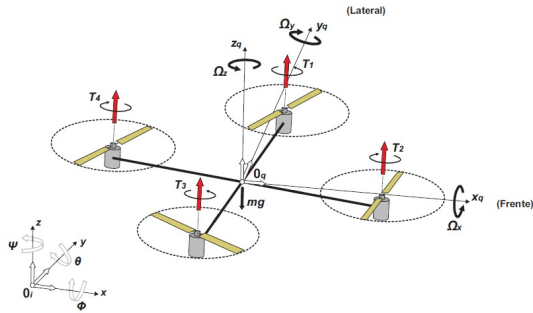


Figura 1: O quadrrorotor e eixos de referências.

2.1 Modelo dinâmico

As equações dinâmicas, representando as forças e torques aplicados no veículo, são:

$$\begin{aligned} T - F_{aero} - F_{grav} &= m \cdot \ddot{V} + \Omega \times (m \cdot V) \\ \tau - \tau_{aero} &= J \ddot{\Omega} + \Omega \times (J \cdot \Omega), \end{aligned} \quad (1)$$

em que m representa a massa do quadrrorotor; $J \in R^{3 \times 3}$, a matriz de inércia; F_{aero} , a força de reação aerodinâmica; F_{grav} , a força de reação gravitacional; τ , o vetor momento; τ_{aero} , o torque de reação aerodinâmica, T o vetor total de empuxo; V e Ω são os vetores de velocidades lineares e angulares, respectivamente.

Este modelo de seis graus de liberdade para a dinâmica do quadrrorotor é formado por equações não lineares. Porém, admitindo-se uma condição de baixas perturbações, tem-se que as equações que descrevem a dinâmica, como mostrado em (Adir e Stoica, 2012), podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= g u_x & \ddot{\phi} &= \frac{1}{J_x} U_\phi \\ \ddot{y} &= g u_y & \ddot{\theta} &= \frac{1}{J_y} U_\theta \\ \ddot{z} &= u_z & \ddot{\psi} &= \frac{1}{J_z} U_\psi, \end{aligned} \quad (2)$$

em que x , y e z são as coordenadas no espaço; ϕ , θ e ψ são os ângulos de Euler; g é a aceleração

da gravidade; U_ϕ , U_θ e U_ψ são as componentes de torque relativas a ϕ , θ e ψ , respectivamente e u_x , u_y e u_z são definidas como:

$$\begin{aligned} u_x &= \cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi) \\ u_y &= \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi) \\ u_z &= -g + \cos(\phi) \cos(\theta) \frac{1}{m} U_z, \end{aligned} \quad (3)$$

em que, u_x e u_y variáveis de controle consideradas comandos virtuais que rotacionam o vetor empuxo, de componente vertical U_z , para que a translação $x - y$ seja alcançada. Se u_x , u_y e ψ são conhecidos, é possível determinar as referências dos ângulos ϕ_d (arfagem) e θ_d (guinada) por:

$$\begin{aligned} \phi_d &= \arcsen(\sin(\psi) u_x - \cos(\psi) u_y) \\ \theta_d &= \arcsen\left(\frac{\cos(\psi) u_x + \sin(\psi) u_y}{\cos(\phi_d)}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Esses ângulos serão usados como referência para o controlador de atitude, como observado na Figura 2. A entrada U_z pode ser determinada em função da variável de controle u_z por:

$$U_z = m \left(\frac{u_z + g}{\cos(\phi) \cos(\theta)} \right). \quad (5)$$

Assim, tem-se um sistema de quatro entradas (U_ϕ , U_θ , U_ψ e U_z) e seis saídas (as posições x , y e z e os ângulos de Euler ϕ , θ e ψ), o que caracteriza um sistema subatuado.

3 Estratégias de Controle - Atitude e Posição

Na estratégia utilizada, o sistema é subdividido em três subsistemas: altitude (eixo z), posição (eixos x e y) e atitude (ângulos de Euler). Para cada subsistema são elaboradas estratégias de controle com abordagem via LQR com ação integral. O esquema geral pode ser observado na Figura 2.

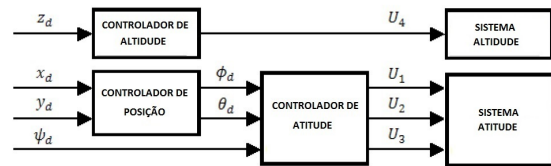


Figura 2: Esquema geral do controlador e planta para o modelo do quadrrorotor

3.1 Projeto dos Controladores

A utilização do controlador LQR baseia-se na simplicidade de implementação aliada à condição de performance em relação a uma certa medida de desempenho (critério ótimo), no caso, a energia do sinal de controle, que é minimizada por uma função de custo aplicando-se fatores de peso determinados pela Regra de Bryson e pela solução da equação de Ricatti (Domingues, 2009).

Para o projeto do controlador, foi considerado o modelo do quadrrorotor no espaço de estados definindo-se os estados $\mathbf{x}_z = [z \ \dot{z}]^T$ e entrada u_z para o subsistema altitude; $\mathbf{x}_{xy} = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y}]^T$ e $\mathbf{u}_{xy} = [u_x \ u_y]^T$ para o subsistema posição e $\mathbf{x}_a = [\phi \ \dot{\phi} \ \theta \ \dot{\theta} \ \psi \ \dot{\psi}]^T$, $\mathbf{u}_a = [U_1 \ U_2 \ U_3]^T$ para o subsistema atitude. Os controladores LQR de posição e atitude foram projetados com a introdução de uma entrada de referência com realimentação completa de estados, de modo a se obter erro de rastreamento nulo para uma entrada do tipo degrau (Gene F. Franklin e Emami-naeini, 2013) e seus ganhos de realimentação foram calculados, respectivamente, como:

$$\mathbf{K}_{xy} = \begin{bmatrix} 0,25 & 0,42 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,76 & 0,53 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_a = \begin{bmatrix} 12,25 & 4,49 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12,25 & 4,49 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 37,42 & 14,18 \end{bmatrix}.$$

Para o controle de altitude, o método escolhido foi o do controlador integral, uma vez que o LQR com entrada de referência é insuficiente para o seguimento de trajetória com erro nulo (Ren e Beard, 2008). Os polos do sistema em malha fechada foram escolhidos como $(-1 \pm j\sqrt{3}, -5 \text{ e } -6)$, de modo a garantir estabilidade, resultando nos seguintes ganhos de realimentação:

$$\mathbf{K}_0 = [13,91 \quad 6,20] \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_1 = [12,16 \quad 2,18].$$

3.2 Simulação do Controlador

O sistema controlador e quadrrorotor foi implementado no ambiente Simulink do MATLAB. A simulação para o seguimento de uma trajetória pode ser observada nas Figuras 3 e 4, em que a linha tracejada representa a referência e a linha cheia representa a variável respectiva.

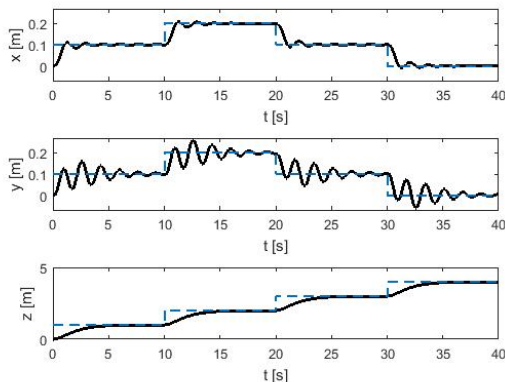


Figura 3: Seguimento de trajetória de referência para as saídas x , y e z do quadrrorotor

O controle mesclando a estratégia LQR para as posições e ângulos, com ação integral na malha,

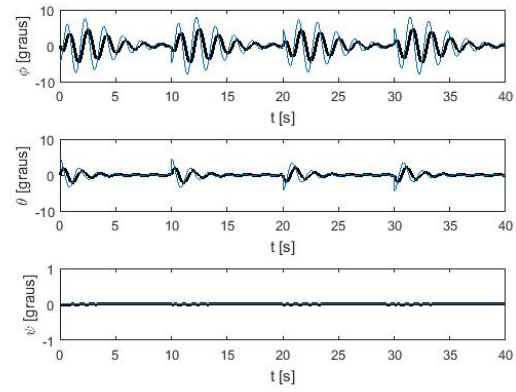


Figura 4: Seguimento de trajetória de referência para os ângulos ϕ , θ e ψ do quadrrorotor

mostrou-se eficiente para estabilizar o quadrrorotor e seguir uma referência nos eixos x e y , apesar das limitações de desempenho para um sistema que é subatuado. Um dos motivos da abordagem via consenso é estudar como o cálculo da trajetória pode influenciar no controle de atitude.

4 Teoria de Consenso

Para a solução do **Problema 1** foi projetado o controlador LQR com ação integral para seguimento de uma trajetória. O próximo objetivo é gerar as trajetórias de consenso para cada veículo, e para tal, "compartilhar informação é uma condição necessária para cooperação" (Ren e Beard, 2008). No contexto de cooperação, esse trabalho abordará uma solução para problema de rendezvous (encontro dos integrantes da equipe em um ponto comum) através da negociação entre os VANTS.

A troca de informação no consenso está relacionada à concretização de uma variável de coordenação, denominada "estado da informação", em que a ideia básica é impor dinâmicas similares sobre esses *estados da informação*. Essa variável (ξ) representa aqui a posição de cada VANT no espaço e seu compartilhamento entre os integrantes da equipe é a base para o cálculo das trajetórias de referência via algoritmos de consenso.

4.1 Consenso - estado de referência constante

Para um estado de referência ξ_r constante e ξ modelado por uma dinâmica de primeira ordem, o consenso é dado por (Ren e Beard, 2008):

$$\dot{\xi}_i = - \sum_{j=1}^n a_{ij}(\xi_i - \xi_j) - a_{i(n+1)}(\xi_i - \xi_r), \quad (8)$$

em que $\xi_i \in \mathfrak{R}^m$ é o estado da informação do veículo i e a_{ij} é a entrada (i, j) da matriz de adjacência $A_{n+1} \in \mathfrak{R}^{n \times (n+1)}$ com $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n+1$ sendo n o número de veículos do grupo. Se $a_{ij} > 0$, há comunicação entre os veículos i e j , e diz-se que esses veículos são "vizinhos";

se $a_{ij} = 0$, os veículos i e j não se comunicam. A consequência direta da eq. (8) é que ξ_i do veículo i é direcionado no sentido do *estados da informação* dos seus vizinhos.

A troca de informação tem papel chave na teoria de consenso, e para modelar a topologia de comunicação faz-se uso da teoria de grafos. Será utilizado o conceito de grafo orientado, ou Dígrafo, considerando assim o fluxo da informação como unidirecional. Seja um dígrafo orientado de ordem n representado por $G_n = (\nu_n, \varepsilon_n)$, considerando o conjunto de nós $\nu_n = \{v_1, \dots, v_n\}$ e o conjunto de arestas $\varepsilon_n \subseteq \nu_n \times \nu_n$. Os nós pertencem a um conjunto finito definido por $\Gamma = 1, \dots, n$. As arestas do dígrafo G_n são denotadas por $e_{ij} = (v_i, v_j)$. O conjunto de vizinhos de um nó v_i definido por $N_i = \{v_j \in \nu : (v_i, v_j) \in \varepsilon_n\}$ para $j = 1, \dots, n$.

Caminho orientado: Um caminho orientado é um dígrafo $G_n = (\nu_n, \varepsilon_n)$ na forma $\nu_n = \{v_1, \dots, v_n\}$ e $\varepsilon_n = \{(v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_{n-1}, v_n)\}$ em que os nós são diferentes. Os nós v_1 e v_n são conectados por G_n mediante uma sequência orientada de arestas em ε_n . De forma mais geral, tem-se $(v_i, v_{i+1}) \in \varepsilon_n$, para qualquer $i = 1, 2, \dots, n-1$.

Árvore orientada: Uma árvore orientada τ_G é um dígrafo G_n conexo (existe um caminho orientado entre qualquer dois de seus nós $v_i \in \nu$ e $v_j \in \nu$ para $i, j = 1, \dots, n$) sem a ocorrência de ciclos.

Uma árvore de extensão orientada é o subconjunto de arestas de um dígrafo que forma uma árvore orientada contendo todos os nós. Desta forma, tem-se que $\tau_G = \{\nu_\tau, \varepsilon_\tau\}$ é uma árvore de extensão de G_n , se τ_G é uma árvore orientada e ainda $\nu_\tau = \nu$. Logo, com base nas definições acima, tem-se o seguinte teorema.

Teorema 4.1: Seja a matriz A_{n+1} constante, o problema de consenso para um estado de referência constante é resolvido com (8) se e somente se o grafo orientado G_{n+1} tem uma árvore de extensão (Ren e Beard, 2008).

Nas simulações foram consideradas as topologias de comunicação mostradas na Figura 5, além de uma discretização de primeira ordem para o estado da informação com $\xi[k+1] = \xi[k] + \delta_T u_i$, em que $u_i = \xi_i$ conforme eq. (8) e δ_T é o valor da discretização no tempo ($\delta_T = 0,5s$).

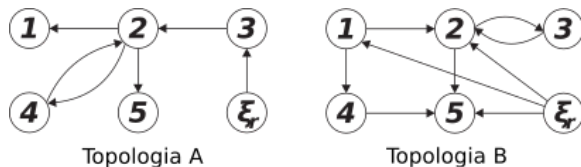
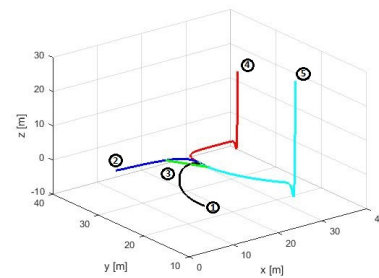


Figura 5: Topologias A e B de comunicação.

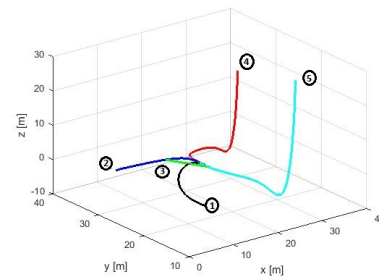
Como pode ser observado nos grafos da topologias da Figura 5, a condição para o Teorema 4.1 é satisfeita, isto é, existe uma árvore de extensão associada ao grafo G_{n+1} . Para os elementos (i, j) , na eq. (8) diferentes de zero, há fluxo de infor-

mação do veículo i para o j e quanto maior seu valor, maior também o peso dessa interação, o que influencia a taxa de convergência do consenso no grupo.

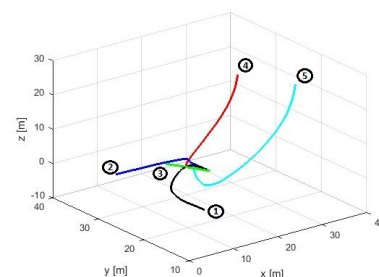
As condições iniciais foram definidas como: $\xi_1(0) = [7, 3, 13, 7, 0]$, $\xi_2(0) = [5, 6, 31, 6, 0]$, $\xi_3(0) = [15, 9, 30, 7, 0]$, $\xi_4(0) = [32, 4, 31, 20]$ e $\xi_5(0) = [27, 2, 13, 2, 30]$. Na simulação considerouse uma referência constante como $x_r = 20$, $y_r = 25$ e $z_r = 0$ (a altura final foi escolhida como nula de modo a simular o resgate de um veículo no solo) e os valores dos coeficientes da matriz de adjacência $a_{ij} = 0, 0,1, 0, 1$ e 1 de modo a estudar sua influência no consenso. Os resultados são apresentados na Figura 6.



(a) $a_{ij} = 0,01$



(b) $a_{ij} = 0,1$



(c) $a_{ij} = 1$

Figura 6: Consenso para referência constante utilizando a topologia A da Figura 5.

4.2 Análise dos Resultados

Segundo os resultados mostrados nos gráficos e tabelas, o aumento do valor dos coeficientes a_{ij} faz com que o consenso seja atingido de forma mais rápida. Para $a_{ij} = 0,1$, topologia A, tem-se que o consenso é atingido em aproximadamente 60 se-

Tabela 1: Integral dos erros - Topologia A

	IE_x	IE_y	IE_ϕ	IE_θ	IE_U
$a_{ij} = 0,001$					
$Quad_1$	42,68	27,86	9,49	2,11	403,67
$Quad_2$	55,01	10,59	3,61	2,70	249,54
$Quad_3$	14,63	10,54	3,59	0,72	184,75
$Quad_4$	47,17	8,82	3,01	2,31	1314,51
$Quad_5$	29,34	28,67	9,76	1,44	1983,11
$a_{ij} = 0,01$					
$Quad_1$	42,96	27,66	9,30	2,15	422,22
$Quad_2$	54,19	10,58	3,60	2,53	260,34
$Quad_3$	14,57	10,42	3,49	0,70	190,93
$Quad_4$	46,61	8,88	3,03	2,19	1378,75
$Quad_5$	28,94	28,45	9,58	1,44	2081,30
$a_{ij} = 0,1$					
$Quad_1$	45,74	26,23	5,10	3,56	516,06
$Quad_2$	45,92	10,55	3,51	2,88	307,68
$Quad_3$	14,02	9,17	2,18	1,30	290,96
$Quad_4$	40,94	9,59	3,49	2,26	1599,70
$Quad_5$	25,63	26,91	5,26	1,63	2414,65

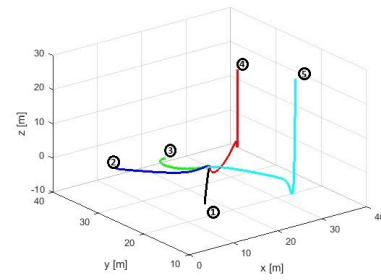
Tabela 2: Integral dos erros - Topologia B

	IE_x	IE_y	IE_ϕ	IE_θ	IE_U
$a_{ij} = 0,001$					
$Quad_1$	45,31	20,89	7,11	2,23	326,40
$Quad_2$	48,69	13,57	4,60	2,38	267,44
$Quad_3$	20,55	10,77	3,67	1,01	186,78
$Quad_4$	55,45	19,76	6,72	2,72	1324,49
$Quad_5$	34,69	22,30	7,56	1,70	1975,89
$a_{ij} = 0,01$					
$Quad_1$	45,14	20,65	6,93	2,19	358,46
$Quad_2$	48,18	13,06	4,45	2,92	399,89
$Quad_3$	20,70	10,82	3,71	0,98	208,22
$Quad_4$	55,15	19,65	6,56	2,69	1703,14
$Quad_5$	34,34	21,55	6,70	2,35	2558,30
$a_{ij} = 0,1$					
$Quad_1$	43,43	18,77	3,77	1,97	358,56
$Quad_2$	43,11	13,86	5,18	4,95	413,59
$Quad_3$	23,27	11,57	3,89	4,79	418,92
$Quad_4$	53,26	19,81	3,52	1,80	1670,38
$Quad_5$	31,37	29,22	7,24	5,93	2512,88

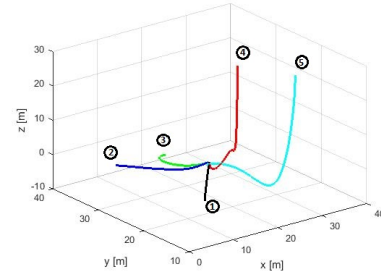
gundos. Já para $a_{ij} = 1$, topologia A, tem-se um consenso muito mais rápido, em pouco menos de 10 segundos, fruto de um controle mais agressivo (pelos valores das tabelas nota-se um incremento do IE_U médio). O consenso mais rápido torna as trajetórias mais otimizadas, entretanto, exige mais do sistema (gasto de energia) e pode gerar sobresinais demasiados e num caso extremo, instabilidade. É importante destacar que a abordagem de consenso realizada neste trabalho desprezou a ocorrência de colisões entre os integrantes do grupo durante a missão e no ponto de encontro.

4.3 Consenso - estado de referência variante no tempo

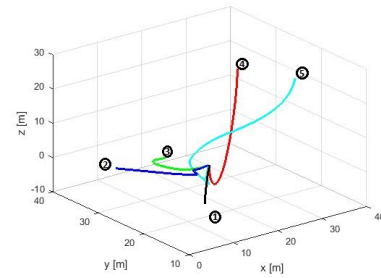
No caso anterior, a referência era um ponto fixo no espaço (missão de busca e resgate), porém a referência pode ter um caráter variante no tempo, como no caso de uma missão onde os veículos do grupo devam seguir um veículo líder. Para esse caso, é necessário um novo equacionamento, o qual considera a derivada do sinal de referência, devido à natureza do problema de seguimento de trajetó-



(a) $a_{ij} = 0,01$



(b) $a_{ij} = 0,1$



(c) $a_{ij} = 1$

Figura 7: Consenso para referência constante utilizando a topologia B da Figura 5.

ria. Seja o seguinte algoritmo:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i = & \frac{1}{\eta_i(t)} \sum_{j=1}^n a_{ij} [\dot{\xi}_j - \gamma_i(\xi_i - \xi_j)] + \\ & + \frac{1}{\eta_i(t)} a_{i(n+1)} [\dot{\xi}_r - \gamma_i(\xi_i - \xi_r)] \end{aligned} \quad (9)$$

em que a_{ij} , com $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n+1$ é a entrada (i, j) da matriz adjacência, γ_i é uma constante positiva e $\eta_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$. Assim, cada entrada de controle depende de ξ e das derivadas de ξ dos veículos vizinhos e da referência (Ren e Beard, 2008).

Na implementação considerou-se a topologia da Figura 8, e os estados iniciais dos veículos foram definidos como $\xi_1(0) = [6 \ 18 \ 0]$, $\xi_2(0) = [17 \ 20 \ 0]$, $\xi_3(0) = [8 \ 6 \ 0]$ e $\xi_r(0) = [0 \ 0 \ 0]$. Para os testes, o valor dos coeficientes da matriz de adjacência foram mantidos como $a_{ij} = 1$, uma vez que a variação do mesmo não alterou de forma notável o desempenho do grupo. O valor de γ_i , entretanto, alterou de forma significativa a rapidez

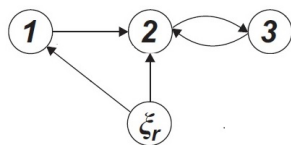


Figura 8: topologia de comunicação para consenso com estado de referência variante no tempo.

do consenso e seus valores foram escolhidos como $\gamma_i = 0,01, 0,1$ e 1 . Os resultados estão representados nas Figuras 8, 9 e 10, onde a trajetória do veículo líder é mostrada em linha tracejada.

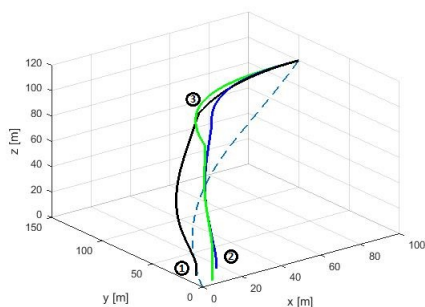


Figura 9: Consenso para referência variante no tempo - Topologia da Figura 8 e $\gamma_{ij} = 0,01$.

4.4 Análise dos Resultados

Examinando os resultados é possível perceber que os três veículos chegam ao consenso seguindo a trajetória do veículo líder. Conforme o valor de γ_i aumenta, o consenso é atingido de forma mais rápida e as trajetórias dos veículos 1, 2 e 3 tornam-se mais otimizadas. Do mesmo modo que no caso da referência constante, um consenso mais rápido irá exigir sinais de controle mais elevados, o que pode ser um fator limitante para aplicações práticas. Sinais de controle muito elevados podem resultar em um gasto de energia demasiado ou mesmo instabilidade para a planta. Sendo assim, o projetista deve avaliar cada caso e escolher o valor de γ_i que melhor se adequa a seu propósito.

5 Conclusões

No artigo foi projetado um controle para o quadricóptero com intuito de resolver os problemas de posição e atitude dos veículos, ressaltando a subatuação (seis variáveis de saída com quatro atuações). A partir da análise dos resultados, os controladores LQR com ação integral cumpriram o papel de estabilizar o quadricóptero e seguir uma trajetória de referência. No contexto dos algoritmos de consenso, utilizou-se essa abordagem para gerar as trajetórias de referência, constantes e variantes no tempo, para cada veículo.

Como trabalhos futuros, além da direta implementação da estratégia em quadricópteros, sugere-

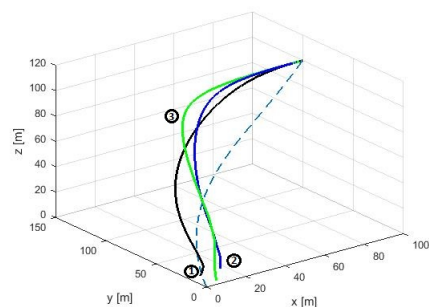


Figura 10: Consenso para referência variante no tempo- Topologia da Figura 8 e $\gamma_{ij} = 1$.

se a extensão do trabalho para topologias variantes no tempo, falhas no compartilhamento de mensagens para o consenso e a utilização de estratégia de otimização para gerar as trajetórias de consenso com dinâmicas de ordem superior para o estado da informação.

Referências

- Adir, V. G. e Stoica, A. M. (2012). Integral LQR control of a star-shaped octocopter, *Incas Bulletin* 4: 3 – 18.
- Correia, F., Ordonez, B., Cerqueira, J., Almeida, L. e Moreno, U. (2014). Controle de veículos autônomos em formação com seguimento de referência utilizando consenso e rhc, *Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte, MG, pp. 3445 – 3452.
- Domingues, J. (2009). *Quadrotor Prototyp*, Universidade Tecnica de Lisboa.
- Gene F. Franklin, J. D. P. e Emami-naeini, A. (2013). *Sistemas de Controle para Engenharia*, Bookman.
- Murray, R. M. (2007). Recent research in cooperative control of multivehicle systems, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 129: 571 – 584.
- Ordonez, B. (2013). *Estratégia de controle cooperativo baseado em consenso para um grupo multi-veículos*, Tese de doutorado em Engenharia de Sistemas e Controle - UFSC.
- Ordonez, B., Moreno, U. F., Cerqueira, J. e Almeida, L. (2014). Generation of trajectories using predictive control for tracking consensus with sensing, *Procedia Computer Science, Elsevier* 10: 1094 – 1099.
- Pizetta, I., Brandao, A. e Filho, M. S. (2016). Cooperative quadrotors carrying a suspended load, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, PISCATAWAY, NJ, EUA, pp. 1049 – 1055.
- Ren, W. e Beard, R. (2008). *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control - Theory and Applications*, Springer.
- Ren, W., Beard, R. W. e Atkins, E. M. (2007). Information consensus in multivehicle cooperative control, *IEEE control systems magazine* pp. 71 – 82.
- Sá, R. (2012). *Construção, Modelagem Dinâmica e Controle PID para Estabilidade de um Veículo Aéreo não Tripulado do tipo Quadricóptero*, Dissertação de Mestrado em Teleinformática - UFC.
- Sacramento, L. S. (2014). *Estudo de Veículo Aéreo (VANT) do Tipo Quadricóptero: Modelagem e Síntese de Controle*, TFG - Engenharia Elétrica UFBA.
- Schurr, N., Okamoto, S., Maheswaran, R., Scerri, P. e Tambe, M. (2005). *Evolution of a Teamwork Model*, Cognitive Modeling and Multi-Agent Interactions, Cambridge University Press, USA.