

JOÃO PAULO AMORIM BARBOSA

**ESTRATÉGIA DE RECONFIGURAÇÃO EM
UMA NAVEGAÇÃO MULTIRROBÔS**

VIÇOSA, MG

2019

JOÃO PAULO AMORIM BARBOSA

ESTRATÉGIA DE RECONFIGURAÇÃO EM UMA NAVEGAÇÃO MULTIRROBÔS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão

VIÇOSA, MG

2019


JOÃO PAULO AMORIM BARBOSA

**ESTRATÉGIA DE RECONFIGURAÇÃO EM UMA NAVEGAÇÃO
DE MULTIRROBÔS**

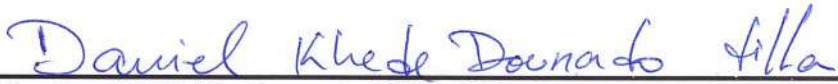
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 29 de novembro de 2019.

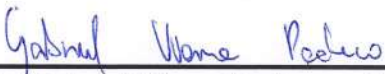
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



M.Sc. Daniel Khéde Dourado Villa - Membro
Universidade Federal do Espírito Santo



B.Sc. Gabriel Viana Pacheco - Membro
Universidade Federal de Viçosa

À minha Vó Mainha. Há 16 anos ela se foi e deixou um vazio jamais preenchido.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me permitir viver tantas experiências enriquecedoras durante a graduação.

Aos meus pais, Kátia e Fernando, por sempre acreditarem em mim, por serem sempre minha inspiração e meu porto seguro.

À minha namorada Marcelle, minha maior incentivadora, agradeço por me apresentar a UFV e por caminhar ao meu lado durante toda essa jornada.

Aos amigos que fiz durante a graduação, obrigado pelos sorrisos e por tornarem mais leves os momentos difíceis.

Ao professor Alexandre Brandão, agradeço pelo apoio na realização deste trabalho, por ter sido o meu mentor durante toda a graduação e pelos sábios conselhos. Agora posso comprar o PS4.

À UFV, agradeço por me permitir a realização de um sonho e por ser o alicerce da minha formação profissional.

*“Escolha sempre o caminho que pareça o melhor, ainda que seja o mais difícil;
o hábito brevemente o tornará fácil e agradável.”
(Pitágoras)*

Resumo

Este trabalho apresenta uma estratégia de reconfiguração para formações em estrutura virtual contendo N -robôs. O controle de formação é implementado utilizando o Esquema de Controle Multi-Camadas (ECMC) na realização de missões de seguimento de trajetória. O padrão geométrico da formação adotado é um polígono com N vértices, inscrito em um círculo de raio predefinido. O ECMC divide o grupo em $(N - 2)$ formações triangulares e cada uma é guiada individualmente, mantendo uma distância fixa do baricentro do polígono. A estratégia de reconfiguração é executada quando ocorre a falha em um dos robôs, que sai da formação. Um novo polígono é calculado e os robôs remanescentes devem se reposicionar nos novos vértices. Quando o robô perdido retorna à formação, o polígono inicial é recalculado e a formação original é recomposta. A estratégia proposta é testada em uma formação com 5 robôs, simulando a falha e a recuperação em instantes de tempo predefinidos. Por fim, resultados de simulação validam a proposta e são apresentados direcionamentos para trabalhos futuros.

Palavras-chaves: Navegação cooperativa; Esquema de Controle Multi-Camadas; Sistemas Multi-agentes; Sistemas Multirrobôs; Rearranjo de formação.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de fluxo do Esquema de Controle Multi-Camadas.	13
Figura 2 – Formação triangular e suas variáveis de estado.	15
Figura 3 – Parâmetros da formação triangular	16
Figura 4 – Formações triangulares dentro do polígono regular.	18
Figura 5 – Sequência de execução da estratégia de reconfiguração de formação. . .	21
Figura 6 – Formação estabelecida ao início da navegação.	23
Figura 7 – Formação reconfigurada após a falha de R_4	23
Figura 8 – Formação original reestabelecida após a recuperação de R_4	23
Figura 9 – Erros de seguimento de trajetória	24
Figura 10 – Erros de posicionamento dos robôs	24
Figura 11 – Diagrama de Fluxo da estratégia	29

Lista de abreviaturas e siglas

VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
ECMC	Esquema de Controle Multi-Camadas
ID	Identificação do Robô

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
2	ESQUEMA DE CONTROLE MULTI-CAMADAS	13
2.1	Camada Planejador	14
2.2	Camada Controle de Formação	14
2.3	Camada Robô	19
3	A ESTRATÉGIA DE RECONFIGURAÇÃO DE FORMAÇÃO	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
	REFERÊNCIAS	26
	APÊNDICES	28
	APÊNDICE A – DIAGRAMA DE FLUXO DA ESTRATÉGIA	29

1 Introdução

A navegação cooperativa de veículos aéreos não tripulados (VANTs) tem sido um assunto recorrente nos estudos de robótica móvel na última década. O crescente interesse nessa área de pesquisa se deve ao grande potencial de aplicações, tanto civis quanto militares, para a robótica móvel. Naturalmente, controlar um único veículo é mais simples, se comparado ao controle de múltiplos veículos navegando em formação. A complexidade do controle de formação está no fato de que além da interação com o ambiente, presente no controle de navegação individual, os elementos devem, também, interagir entre si. Entretanto, para determinadas tarefas é mais vantajoso o uso de múltiplos veículos agindo de forma cooperativa para tornar a execução mais rápida e eficiente. Além disso, algumas tarefas são impossíveis de se realizar com apenas um robô, ou se tornam inviáveis, como é o caso da inspeção de grandes áreas, das operações de busca e resgate e do transporte de cargas.

Como exemplo das aplicações do controle de navegação cooperativa, é apresentada em [MELLINGER et al. \(2013\)](#) uma tarefa de transporte de carga, em que o objeto a ser transportado tem dimensões que tornam impossível a realização por apenas um robô, sendo necessária a cooperação de múltiplos agentes para o cumprimento do objetivo final. Numa missão de edificação coletiva ([LINDSEY; MELLINGER; KUMAR, 2012](#)), uma equipe de veículos aéreos não tripulados deve transportar e montar os elementos da estrutura. Nesse caso, os veículos são capazes de transportar individualmente os elementos estruturais, porém o trabalho em equipe minimiza o tempo de execução da tarefa. Em [MAZA et al. \(2010\)](#), é empregada a cooperação para inspeção de grandes áreas em aplicações para segurança pública, com múltiplos VANTs dividindo entre si a área a ser monitorada.

O controle de navegação de robôs em formação pode ser abordado de maneiras distintas, entretanto, a maioria pode ser incluída em pelo menos uma das três estratégias de formação seguintes: líder-seguidor, estrutura virtual e navegação comportamental.

Na estratégia líder-seguidor, o robô denominado líder é responsável por guiar o grupo ou fornecer informações importantes para os outros robôs, denominados seguidores. Na estrutura virtual, os robôs estabelecem um padrão geométrico, que pode se mover no espaço. Finalmente, quando os robôs devem se mover de acordo com um conjunto de missões predefinidas (que são selecionadas dependendo do cenário), uma estratégia comportamental é geralmente adotada.

O problema do controle de formação pode também ser abordado por estratégias baseadas em consenso, em que um grupo de robôs se comunicando deve atingir um objetivo em comum. Em [Liu et al. \(2017\)](#), é proposta uma estratégia de controle descentralizada,

utilizando a teoria de consenso para alcançar a reconfiguração da formação de topologia fixa. A estratégia é baseada em uma estrutura virtual triangular incorporada à teoria de consenso. Os robôs, controlados individualmente, devem alcançar a formação desejada, saindo das posições iniciais com velocidades distintas. A partir do momento em que a formação é estabelecida, uma velocidade de navegação é definida por consenso, assim os robôs são capazes de manter a formação.

Em [MERCADO, CASTRO e LOZANO \(2013\)](#), é apresentada uma aplicação para a estrutura líder-seguidor, em que uma estratégia de rastreamento de trajetória para uma formação de VANTs é realizada no plano horizontal. Uma estratégia baseada em estrutura virtual é implementada em [REZAEI e ABDOLLAHI \(2011\)](#) para guiar um conjunto de VANTs de asas fixas, com distâncias predefinidas de um líder virtual (nesse caso, uma estrutura piramidal rígida). Os VANTs são controlados de forma descentralizada, com uma estratégia de controle de sincronização responsável por minimizar falhas de atuadores e, assim, aumentar a robustez do sistema.

Em trabalhos anteriores ([BRANDÃO et al., 2009](#)) e ([RAMPINELLI et al., 2009](#)), foi apresentado o Esquema de Controle Multi-Camadas (ECMC), uma estrutura de controle composta por módulos independentes que juntos realizam o controle total da formação. Inicialmente, o ECMC foi implementado para guiar uma formação de robôs terrestres. Posteriormente, em [BRANDÃO et al. \(2014a\)](#), foi proposta uma estratégia utilizando o ECMC para guiar um grupo de três VANTs em formação, adotando uma estrutura virtual triangular e, em [BRANDÃO et al. \(2014b\)](#), visando aumentar a aplicabilidade do ECMC, este conceito foi expandido para uma formação contendo N -robôs.

Existem, na literatura, diversos trabalhos abordando o controle de navegação cooperativa baseados nas estruturas de controle citadas, porém, poucos focam no problema de reconfiguração da formação. Em [Zhu, Ling e He \(2018\)](#), é apresentada uma estratégia de controle baseada em uma estrutura Líder-seguidor para guiar hierarquicamente um grupo de VANTs de asas fixas em tarefas de seguimento de trajetória. A estrutura hierárquica é dividida em três níveis. O primeiro é o Comandante, capaz de comandar e controlar toda a formação de acordo com o plano de voo definido e manter comunicação com a unidade central de controle em terra. Em seguida, os Líderes Virtuais, que são pontos virtuais distribuídos ao longo da formação em um padrão "V", a uma distância relativa do Comandante, e que servem de referência para os Seguidores (último nível hierárquico), os quais devem alcançar estes pontos para estabelecer a navegação. A reconfiguração se dá quando duas formações se unem, obtendo um único "V" e redistribuindo os Líderes Virtuais.

Neste trabalho, é proposta uma estratégia de reconfiguração e adaptação da formação utilizando o ECMC. Tal estratégia é baseada em uma estrutura virtual poligonal contendo N -robôs. Adota-se inicialmente uma estrutura triangular composta por três robôs,

depois a estratégia é expandida para formações poligonais contendo N -robôs ($N > 3$), decompostas em $N - 2$ formações triangulares. Dessa forma, o polígono gerado conecta todos os agentes da formação em grupos de três. Quando ocorre a perda de um dos agentes do grupo durante a navegação, a estratégia é capaz de reconfigurar a estrutura virtual com base na quantidade de robôs ativos remanescentes na formação. Finalmente, quando o agente perdido é recuperado, a estratégia prevê a recomposição da formação original.

O trabalho é dividido nos seguintes capítulos: o Capítulo 2 traz uma breve descrição do ECMC utilizado para guiar uma formação triangular e a expansão do conceito para uma formação contendo N -robôs. O Capítulo 3 apresenta a estratégia proposta para a reconfiguração e a adaptação da formação durante a navegação. O Capítulo 4 apresenta resultados de simulações e, por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

2 Esquema de Controle Multi-Camadas

Este capítulo apresenta uma breve descrição do ECMC, originalmente proposto por Rampinelli et al. (2009) para guiar uma formação de robôs terrestres. O Esquema foi aprimorado em trabalhos subsequentes, aplicado em controle de formações de veículos não tripulados considerando diferentes estratégias (BRANDÃO et al., 2014b) (PACHECO, 2018.). O Esquema, ilustrado na Figura 1, apresenta módulos e camadas independentes que lidam com cada parte específica do problema de controle de formação, como a definição das posturas desejadas dos robôs, o padrão geométrico da formação, a geração da trajetória a ser seguida e o estabelecimento do sinal de controle para cada robô.

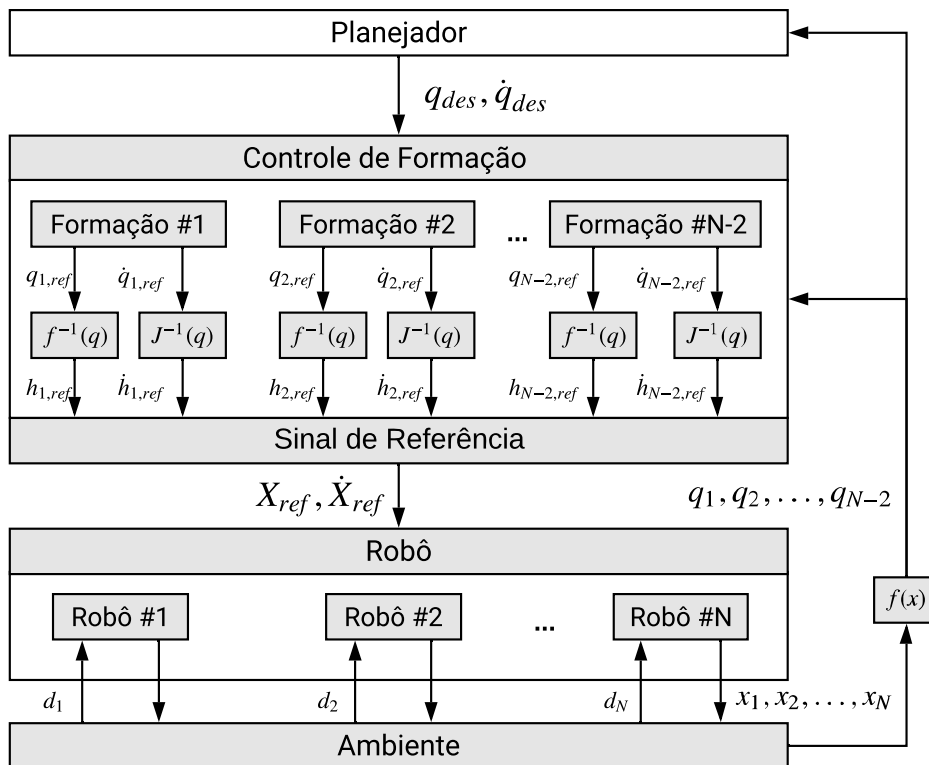


Figura 1 – Diagrama de fluxo do Esquema de Controle Multi-Camadas.

O Esquema de controle possui três camadas principais. A primeira é a camada *Planejador Offline*, responsável por definir as condições iniciais da formação e por gerar o caminho desejado para a navegação. Na sequência, tem-se a *Camada Controle de Formação*, que é responsável por fornecer os sinais de controle para os robôs. Essa camada compreende as estratégias de posicionamento e rastreamento de trajetórias. Em seguida, a *Camada Robô*, na qual são incluídas as características cinemáticas e dinâmicas dos robôs, bem como suas estratégias de navegação individuais (se existirem), como o desvio de obstáculos. O ECMC possui independência entre as camadas e os módulos, apresentando uma flexibilidade

que permite utilizar ou não determinadas camadas ou módulos (BRANDÃO et al., 2015). As três camadas principais são detalhadas nas seções seguintes deste capítulo.

Neste trabalho, visando aumentar a aplicabilidade do ECMC, é proposta uma estratégia de navegação cooperativa capaz de reconfigurar o padrão geométrico da formação durante a navegação, simulando a situação em que ocorre uma falha em um dos robôs em formação.

2.1 Camada Planejador

A Camada Planejador é responsável por definir a postura¹ inicial dos robôs, as formações triangulares e a tarefa a ser realizada. Inicialmente, as posições e orientações iniciais dos robôs são definidas pelo usuário. Em seguida, a tarefa é determinada, podendo ser seguimento de caminho, trajetória, ou posicionamento. Após isso, as posturas desejadas são definidas, de forma a obter uma estrutura virtual antes de iniciar a navegação. O grupo de N -robôs é dividido em subgrupos contendo três robôs cada, de modo a gerar $(N - 2)$ formações triangulares.

Nesta camada podem ser implementados diversos módulos, como o algoritmo de otimização das distâncias percorridas pelos robôs, desenvolvido e proposto em BRANDÃO et al. (2014b), e aplicado no presente trabalho, visando evitar o cruzamento de trajetórias e a possível colisão dos robôs enquanto estabelecem a formação.

Especificamente na estratégia proposta neste trabalho, na camada Planejador será definido o conceito de Robô Ativo, que tem como objetivo conservar a identificação (ID) de cada robô ao longo da navegação e será utilizado na definição dos triângulos gerados após a reconfiguração da formação, na Camada Controle de Formação.

2.2 Camada Controle de Formação

Esta seção apresenta a camada de controle para uma formação, considerando múltiplos VANTs descrevendo uma estrutura virtual poligonal no espaço cartesiano. O polígono regular que descreve a formação é determinado pelo número de agentes no grupo, de modo que cada um ocupa um vértice, sendo inscrito em uma circunferência de raio previamente definido pelo usuário. Internamente ao polígono, os robôs são divididos em grupos de três, estabelecendo formações triangulares em que um robô pode pertencer a mais de um triângulo.

¹ Entende-se por *postura* do robô o conjunto de variáveis que o representam como um elemento no espaço cartesiano, ou seja, as coordenadas x , y e z , e suas respectivas orientações angulares em relação aos três eixos.

A construção do polígono é dada pela solução da equação da raiz n -ésima de um número complexo (CHAVES, 2013). Seja um número complexo Z tal que $Z = |Z|(\cos \theta + j.\text{sen}\theta)$. As raízes n -ésimas de Z são todos os números complexos $\omega = |\omega|(\cos \alpha + j.\text{sen}\alpha)$, de modo que $\omega^n = Z$ para $n > 1$, ou seja, todo número ω que satisfaça

$$[|\omega|(\cos \alpha + j.\text{sen}\alpha)]^n = |Z|(\cos \theta + j.\text{sen}\theta). \quad (2.1)$$

Resolvendo a equação (2.1) para ω , temos a seguinte equação

$$\omega_k = \sqrt[n]{|Z|} \cdot \left[\cos \left(\frac{\theta}{n} + k \frac{2\pi}{n} \right) + i.\text{sen} \left(\frac{\theta}{n} + k \frac{2\pi}{n} \right) \right], \quad (2.2)$$

em que ω_k representa uma raiz distinta de Z , com $n = 1, 2, \dots, N$.

Geometricamente, as raízes são os vértices do polígono regular de N lados. Logo, conhecendo uma delas, é possível obter as demais raízes e, dessa forma, determinar os vértices do polígono.

As variáveis de estado usadas para representar cada formação triangular são mostradas na Figura 2. A postura da formação é definida por $\mathbf{P}_F = [x_F \ y_F \ z_F \ \phi_F \ \theta_F \ \psi_F]^T$ e a forma triangular é dada por $\mathbf{S}_F = [p_F \ q_F \ r_F]^T$, que representa a distância entre R_1 e R_2 , a distância entre R_2 e R_3 , e o ângulo $R_1\widehat{R_2}R_3$, respectivamente. É importante mencionar que $(x_F \ y_F \ z_F)$ representa o centroide de cada triângulo. A postura do robô é definida por $\mathbf{X} = [\xi \ \eta]^T$, em que $\xi = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3$ corresponde à posição em relação ao referencial inercial $\langle g \rangle$, e $\eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T \in \mathbb{R}^3$ corresponde aos ângulos de rotação nos três eixos, no referencial do robô. A formação será representada por $\mathbf{q} = [\mathbf{P}_F \ \mathbf{S}_F]^T$ e a posição dos robôs por $\xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3]^T$. Neste trabalho, a orientação dos robôs não será considerada, portanto $\mathbf{h} = \xi$.

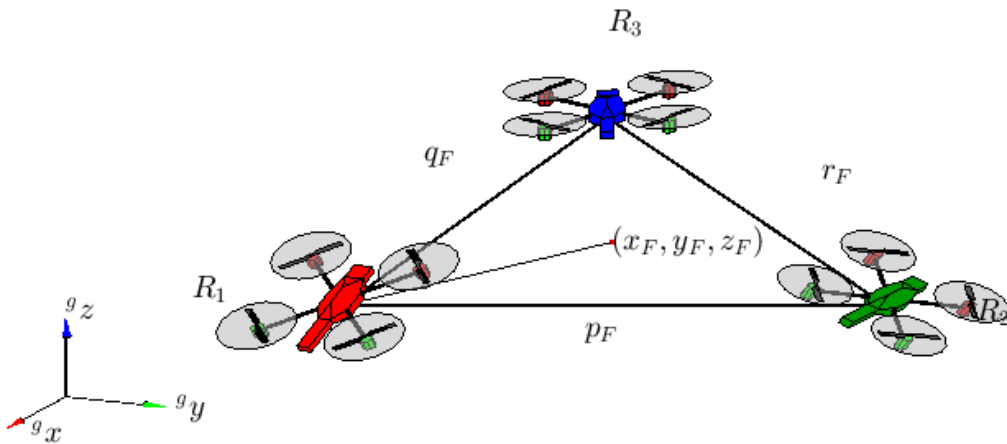


Figura 2 – Formação triangular e suas variáveis de estado.

Antes de introduzir a lei de controle da formação, é necessário expressar a relação

entre a postura da formação e as posições dos robôs. Para isso, se faz necessário analisar os parâmetros do triângulo apresentado na Figura 3.

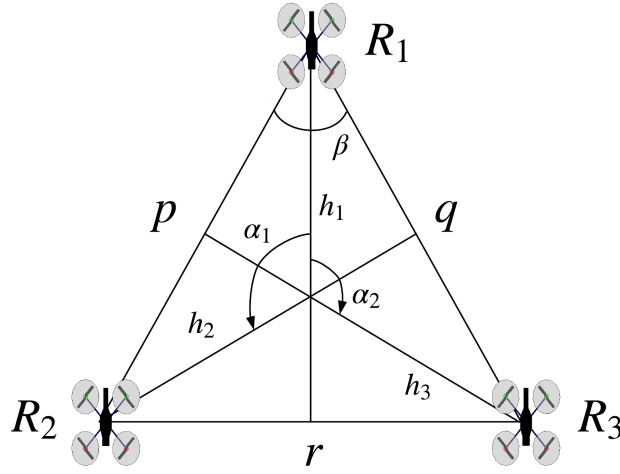


Figura 3 – Parâmetros da formação triangular

A transformação cinemática direta representa as variáveis de formação em função das posturas dos robôs, e é dada por

$$\mathbf{P}_F = \begin{bmatrix} \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \\ \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \\ \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \\ \arctan\left(\frac{2z_1 - z_2 - z_3}{2y_1 - y_2 - y_3}\right) \\ -\arctan\left(\frac{2z_1 - z_2 - z_3}{2x_1 - x_2 - x_3}\right) \\ \arctan\left(\frac{2y_1 - y_2 - y_3}{2x_1 - x_2 - x_3}\right) \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

$$\mathbf{S}_F = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\ \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2} \\ \arccos\left(\frac{p_F^2 + q_F^2 + r_F^2}{2p_F q_F}\right) \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

em que $r_F = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2}$.

Por sua vez, a transformação cinemática inversa, que representa as posições dos

robôs em função da postura da formação, é dada por

$$\xi = \begin{bmatrix} \mathcal{R} \begin{bmatrix} \frac{2}{3}h_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{bmatrix} \\ \mathcal{R} \begin{bmatrix} \frac{2}{3}h_2 \cos(\alpha_1) \\ \frac{2}{3}h_2 \sin(\alpha_2) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{bmatrix} \\ \mathcal{R} \begin{bmatrix} \frac{2}{3}h_3 \cos(\alpha_2) \\ -\frac{2}{3}h_3 \sin(\alpha_2) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

em que

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi \\ s_\psi c_\theta & s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}$$

e

$$\begin{bmatrix} r_F \\ h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{p_F^2 + q_F^2 - 2p_F q_F \cos(\beta_F)} \\ \sqrt{\frac{1}{2}(p_F^2 + q_F^2 - \frac{1}{2}r_F^2)} \\ \sqrt{\frac{1}{2}(r_F^2 + p_F^2 - \frac{1}{2}q_F^2)} \\ \sqrt{\frac{1}{2}(q_F^2 + r_F^2 - \frac{1}{2}p_F^2)} \\ \arccos \frac{4(h_1^2 + h_2^2) - 9p_F^2}{8h_1 h_2} \\ \arccos \frac{4(h_1^2 + h_3^2) - 9q_F^2}{8h_1 h_3} \end{bmatrix}.$$

Do triângulo da Figura 3, é possível inferir que h_1 é a distância entre R_1 e o ponto central do segmento $\overline{R_2 R_3}$, h_2 é a distância entre R_2 e o ponto central do segmento $\overline{R_1 R_3}$, e h_3 é a distância entre R_3 e o ponto central do segmento $\overline{R_1 R_2}$, todas passando por (x_F, y_F, z_F) . Vale notar também que α_1 é o ângulo entre os segmentos h_1 e h_2 , e α_2 o ângulo entre os segmentos h_1 e h_3 .

Para calcular a lei de controle é necessário relacionar as variáveis da formação e as variáveis dos robôs contidos na formação. Dessa forma, são definidas as transformações direta e inversa como $\mathbf{q} = f(\mathbf{h})$ e $\mathbf{h} = f^{-1}(\mathbf{q})$, respectivamente. Tomando a primeira

derivada das transformações cinemáticas direta e inversa, obtém-se a relação entre as velocidades $\dot{\mathbf{q}}$ e $\dot{\mathbf{h}}$, dadas por $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{h})\dot{\mathbf{h}}$ e $\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$, em que \mathbf{J} é a matriz Jacobiana.

A camada Controle de Formação recebe da camada superior a postura e a forma desejadas da formação $\mathbf{q}_d = [\mathbf{P}_{F_d} \mathbf{S}_{F_d}]^T$ e suas variações desejadas $\dot{\mathbf{q}}_d = [\dot{\mathbf{P}}_{F_d} \dot{\mathbf{S}}_{F_d}]^T$. Assim são geradas as referências de variação temporal de postura e forma $\dot{\mathbf{q}}_r = [\dot{\mathbf{P}}_{F_r} \dot{\mathbf{S}}_{F_r}]^T$, em que os índices d e r representam os sinais desejado e de referência, respectivamente. Definindo o erro de formação como $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$, a lei de controle de formação proposta é dada por

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \dot{\mathbf{q}}_d + \kappa\tilde{\mathbf{q}}, \quad (2.6)$$

em que κ é uma matriz de ganho diagonal positiva definida.

Generalizando esta representação para N -robôs, sempre que um agente for adicionado à formação, um novo triângulo é definido de acordo com a sequência direta R_i, R_{i+1}, R_{i+2} , em que $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Assim, um polígono regular com N vértices ($N > 3$) pode ser decomposto em $(N - 2)$ formações triangulares, de modo que o controle da formação de N -robôs pode ser feito utilizando os mesmos parâmetros definidos para três robôs, sendo cada formação triangular guiada individualmente pelo ECMC. O polígono é representado por sua postura $\mathbf{P}'_{\mathbf{F}} = [x'_F \ y'_F \ z'_F \ \phi'_F \ \theta'_F \ \psi'_F]^T$.

É importante ressaltar que as coordenadas do centroide do polígono não se alteram durante a reconfiguração da formação. Apesar de o polígono sofrer alterações de forma durante o processo, independente do número de vértices, ele está inscrito em uma circunferência de raio fixo. Assim, a formação completa será representada por $\mathbf{q} = [\mathbf{P}_{\mathbf{F}} \mathbf{S}_{\mathbf{F}}]^T$ e a trajetória será definida para $\mathbf{P}'_{\mathbf{F}}$. A Figura 4 apresenta um exemplo de configuração de formação contendo 5 robôs. As formações triangulares F_1, F_2 e F_3 são representadas, respectivamente, pelos triângulos de cores azul, vermelho e amarelo.

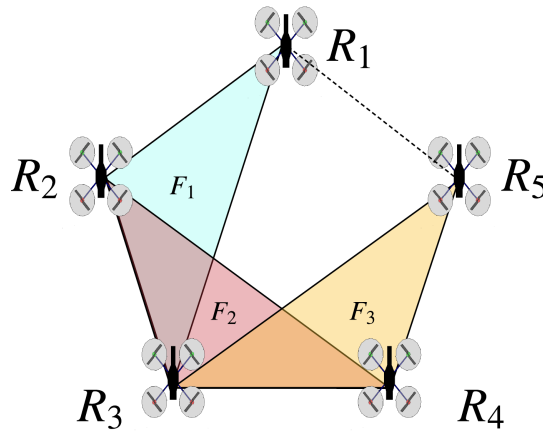


Figura 4 – Formações triangulares dentro do polígono regular.

2.3 Camada Robô

A Camada Robô é responsável por guiar individualmente os robôs utilizando o sinal de controle proveniente da Camada Controle de Formação. Nesta camada são incluídas as características cinemáticas e dinâmicas do VANT, de modo a definir sua postura no espaço 3-D. Além disso, podem ser incluídas estratégias de navegação individuais dos robôs, se existirem, como evasão de obstáculos, compensação dinâmica, entre outras. Neste trabalho serão simulados os modelos cinemáticos e dinâmicos do quadricóptero *ArDrone Parrot 2.0*.

3 A Estratégia de Reconfiguração de Formação

Ao declarar os robôs presentes na formação, cada um recebe um ID único de 1 a N . A partir da quantidade de robôs no grupo, é construído o vetor \mathbf{R}_A , que representa os robôs ativos na formação. Sendo \mathbf{R}_A um vetor de entradas binárias, o valor 1 significa que o ID do robô correspondente àquele elemento está ativo e, em contrapartida, uma entrada nula no vetor representa um robô com falha. Em seguida, é obtido, a partir de \mathbf{R}_A , o vetor de índices dos robôs ativos, $\mathbf{ID}_{1 \times (N-m)}$, em que m representa o número de robôs com falha. Assume-se que, ao início da navegação todos os robôs estão em plenas condições de funcionamento e comunicação, ou seja, todos os robôs estão ativos. Dessa forma, inicialmente é considerado $m = 0$, e as condições iniciais de \mathbf{R}_A e \mathbf{ID} são definidas como:

$$\mathbf{R}_{A1 \times N} = [1 \ 1 \ \dots \ 1] \quad (3.1)$$

$$\mathbf{ID}_{1 \times N} = [1 \ 2 \ \dots \ N] \quad (3.2)$$

Após definir as coordenadas desejadas para a formação, os robôs devem sair de uma posição inicial definida pelo usuário e atingir a posição desejada na formação, previamente definida na Camada Planejador. Uma vez estabelecida a formação, inicia-se a navegação, definindo uma trajetória para o centro geométrico do polígono e, a partir das relações calculadas entre as variáveis da formação e as variáveis dos robôs, o grupo segue a trajetória determinada. A Camada Controle de Formação é responsável por guiar o grupo e manter a formação.

Durante a navegação, o controle de formação verifica constantemente o estado do vetor \mathbf{R}_A . Seja \mathbf{S} a soma dos elementos de \mathbf{R}_A . O valor máximo que \mathbf{S} pode assumir é N , portanto, se $\mathbf{S} = N$, significa que todos os robôs estão ativos. Se um robô apresenta falha, o algoritmo identifica o ID deste robô e atribui o valor zero ao elemento correspondente no vetor \mathbf{R}_A , dessa forma, $\mathbf{S} < N$. Assim, a falha é detectada e, em seguida, o vetor \mathbf{ID} é atualizado com base nos índices ativos, resultando num vetor de dimensões $1 \times (N - m)$. Dessa forma, o polígono é recalculado, utilizando novamente a Equação 2.2, substituindo n por $N - m$. Isso implica em novas formações triangulares e os robôs remanescentes devem assumir as posições desejadas na nova formação.

Quando o robô perdido se recupera da falha, ele deve ser inserido novamente no grupo, de modo a reestabelecer a formação original. Assim, quando o sistema indica que o robô está novamente ativo, é atribuído o valor 1 ao elemento do vetor \mathbf{R}_A correspondente

a seu ID. Em seguida, o vetor \mathbf{ID} é novamente atualizada, retornando à sua dimensão original. O padrão geométrico da formação é, então, recalculado, fazendo $n = N$ na Equação (2.2), e os robôs devem alcançar as posições desejadas, retornando à forma inicial. Antes de ser inserido na formação, o robô recuperado deve aguardar para que a formação seja recalculada, retornando ao polígono original e só assim robô é autorizado a retomar sua posição na formação. Assim, a formação original é reestabelecida e mantida até o final da navegação.

Vale notar que o vetor \mathbf{R}_A mantém a mesma dimensão durante todo o processo de reconfiguração e reestabelecimento da formação, ao passo que o vetor \mathbf{ID} altera seu tamanho de acordo com o número de robôs ativos em formação. Os vetores \mathbf{R}_A e \mathbf{ID} são os dois elementos principais da estratégia, pois fornecem as informações necessárias para a adaptação da forma do polígono ao longo da navegação.

A Figura 5 representa a sequência de execução da estratégia de reconfiguração aplicada numa formação contendo cinco robôs. O sentido indicado pelas setas azuis considera, inicialmente, a formação estabelecida e em navegação 5(a). A falha do robô R_5 é simulada em 5(b). Neste instante, o polígono é recalculado, considerando os robôs remanescentes, e a formação é reconfigurada em 5(c). No caso da recuperação do robô R_5 , a sequência é executada no sentido das setas vermelhas. Após a indicação de reativação de R_5 , o polígono é novamente recalculado, voltando à forma original e recompondo, assim, a formação inicial.

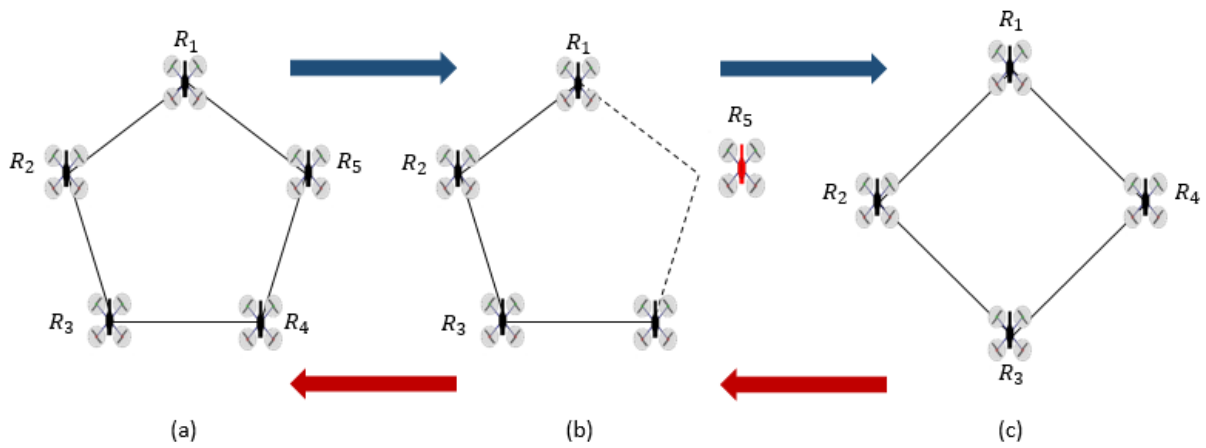


Figura 5 – Sequência de execução da estratégia de reconfiguração de formação.

O diagrama de fluxo completo da estratégia pode ser encontrado no Apêndice A. É importante mencionar que para efeitos de simulação (teste e validação da proposta), as situações de falha e recuperação serão induzidas, ocorrendo em instantes de tempo predefinidos durante a navegação.

4 Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados de simulação da implementação da estratégia proposta em uma missão de rastreamento de trajetória. O objetivo principal é demonstrar a capacidade da estratégia em rearranjar e manter a formação durante a navegação, nas situações de perda e recuperação de um dos agentes do grupo.

A simulação considera uma formação contendo 4 robôs e a trajetória desejada para o centroide do polígono é definida como uma linha reta ao longo do eixo x , dada por

$$\begin{bmatrix} x_{Fd} \\ y_{Fd} \\ z_{Fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Após estabelecer a formação, o grupo inicia a navegação, seguindo a trajetória desejada. No instante de tempo $t = 30s$ a falha é simulada no robô R_4 . A evolução do grupo durante a navegação é apresentada nas Figuras 6 a 8. A primeira figura mostra a formação inicial estabelecida ao início da navegação. Na sequência, é apresentada a formação reconfigurada, após a ocorrência da falha do robô R_4 . Por fim, a Figura 8 mostra a formação original reestabelecida, após a recuperação do robô. O vídeo contendo a simulação completa pode ser encontrado no *link* <<https://youtu.be/gxFGLKxeBCU>>

Percebe-se, na Figura 7, a execução da estratégia de reconfiguração, com o reposicionamento dos robôs na nova formação e as formações triangulares contemplando apenas os robôs ativos. Na sequência, a Figura 8 mostra a execução do sentido inverso da estratégia, recompondo a formação original, que é mantida até o final da navegação.

Os erros de seguimento de trajetória são apresentados na Figura 9, em que cada linha representa uma formação. Pode-se observar que os erros de seguimento absoluto nos eixos y e z são muito pequenos, se comparados ao eixo x . Isto ocorre devido à referência da trajetória dada à formação, ou seja, não há deslocamento no eixo y , assim, os robôs mantêm a referência, uma vez que atingem a formação desejada.

Vale observar também a dinâmica da formação ao longo do tempo. No início tem-se 2 formações triangulares. Em $t = 30s$, é simulada a falha em R_4 , portanto, este deixa de fazer parte do grupo de robôs ativos. Nesse instante, o grupo passa a ter apenas uma formação triangular e os robôs devem se reposicionar na nova formação. É possível observar um aumento no erro de formação, pois um novo polígono é calculado, porém, a formação tende à estabilidade após alcançar a referência, como pode-se observar na Figura 9.

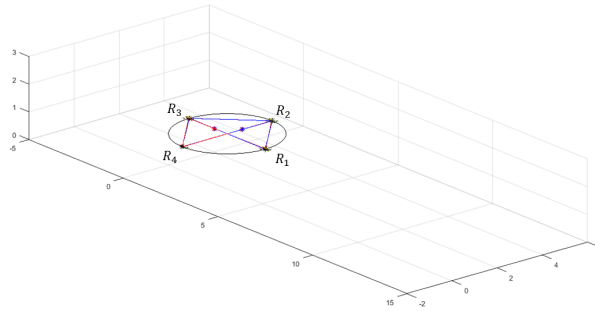


Figura 6 – Formação estabelecida ao início da navegação.

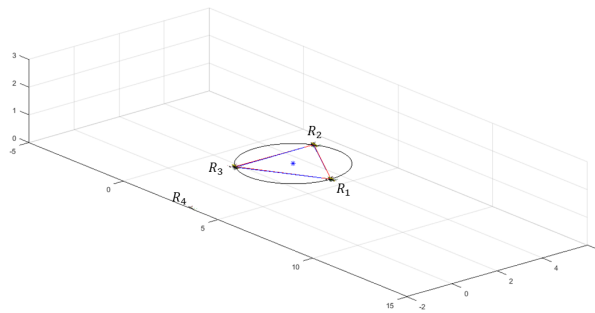


Figura 7 – Formação reconfigurada após a falha de R_4 .

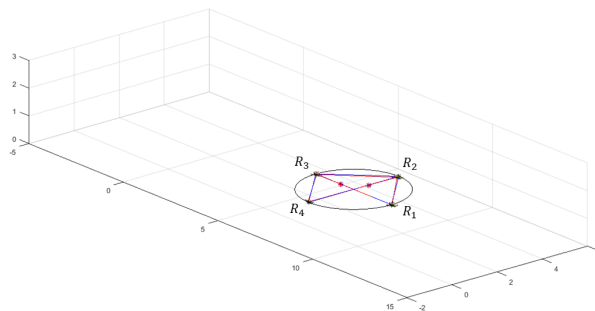


Figura 8 – Formação original reestabelecida após a recuperação de R_4 .

Quando o robô R_5 é recuperado, em $t = 60s$, a formação original começa a ser recomposta, passando a ter novamente 3 formações triangulares. É possível observar novamente um aumento do erro de formação, em especial no eixo z da formação F_3 , representada pela linha amarela. Isso se deve ao fato de R_5 (pertencente à formação F_3) ter descido até $z = 0$ em decorrência da falha. Uma vez recuperado, ele retorna à formação

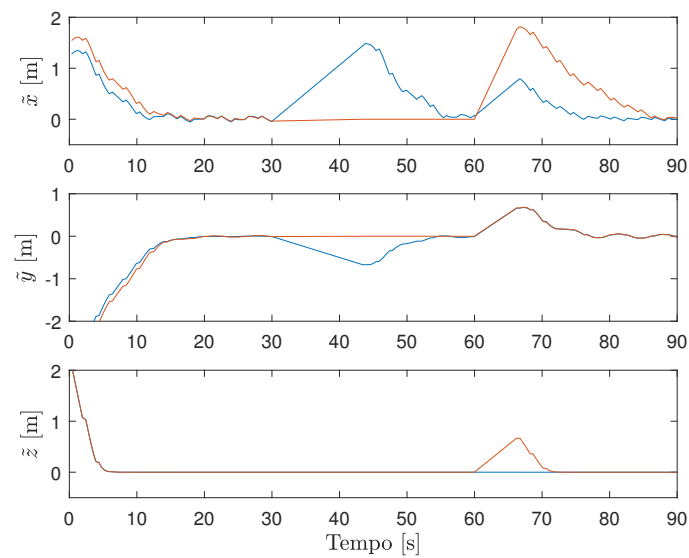


Figura 9 – Erros de seguimento de trajetória

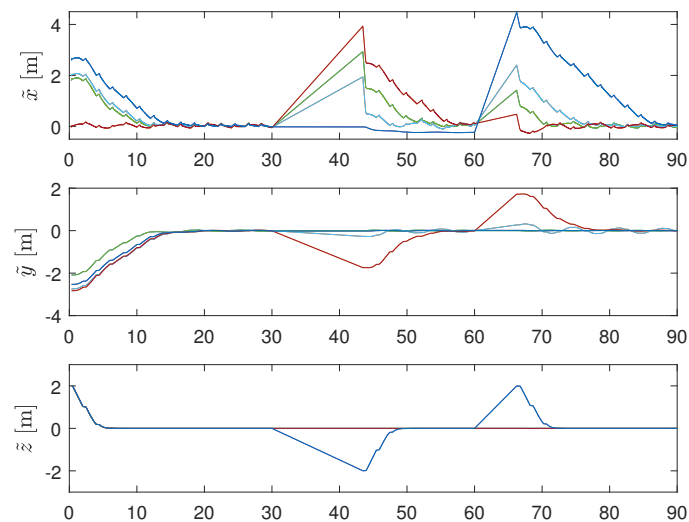


Figura 10 – Erros de posicionamento dos robôs

e o grupo tende a manter a forma desejada.

Por fim, a Figura 10 mostra o erro de posicionamento dos robôs durante a simulação. É possível observar que, nos instantes de tempo $t = 30s$ e $t = 60s$, em que ocorrem os eventos de reconfiguração da formação, há um aumento no erro de posicionamento dos robôs. Isso ocorre porque a reconfiguração envolve todos os agentes em formação, demandando o reposicionamento de cada um, no entanto, como pode ser observado na Figura 9, a formação tende a se estabilizar após atingir a referência. Além disso, o comportamento do robô R_5 ao longo da simulação pode ser facilmente percebido, representado pela linha verde.

5 Considerações Finais

Este trabalho apresenta uma estratégia de reconfiguração de formação utilizando o Esquema de Controle Multi-Camadas em formações com N -robôs móveis. Os robôs são divididos em $(N - 2)$ formações triangulares dentro de um polígono de N vértices. A estratégia de reconfiguração é implementada e validada, o que é evidenciado pelos resultados de simulação.

Os resultados de simulação mostram que a estratégia proposta é capaz de reconfigurar e manter a formação durante a navegação. Além disso, a estratégia pode ser implementada em conjunto com um módulo de evasão de obstáculos, no caso em que um dos robôs precisa se desprender da formação em decorrência do desvio de um obstáculo e retornar à formação após a manobra.

A próxima etapa desta pesquisa é implementar a flutuação do ID, para permitir a simulação da falha em dois ou mais robôs simultaneamente sem a restrição do ID fixo. Além disso, pode-se incorporar uma estratégia de desvio de obstáculos capaz de guiar com segurança toda a formação em um ambiente semiestruturado contendo obstáculos predefinidos. Por fim, a implementação de um sistema de comunicação permitirá verificar resultados com voos reais, utilizando, no mínimo, quatro VANTs.

Referências

- BRANDÃO, A. S. et al. A multi-layer control scheme for a centralized uav formation. In: IEEE. *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.], 2014. p. 1181–1187. Citado na página 11.
- BRANDÃO, A. S. et al. Multiple uav guidance using the multi-layer control scheme and delaunay triangulation. In: IEEE. *2014 Joint Conference on Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol*. [S.l.], 2014. p. 113–117. Citado 3 vezes nas páginas 11, 13 e 14.
- BRANDÃO, A. S. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with adaptive dynamic compensation. In: IEEE. *5th International Conference on Mechatronics*. [S.l.], 2009. Citado na página 11.
- BRANDÃO, A. S. et al. The multilayer control scheme: A strategy to guide n-robots formations with obstacle avoidance. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, v. 26, n. 3, p. 021–214, 2015. Citado na página 14.
- CHAVES, M. S. *Números Complexos: História, Teoria e Prática*. Belém: Biblioteca Virtual, 2013. Citado na página 15.
- LINDSEY, Q.; MELLINGER, D.; KUMAR, V. Construction with quadrotors teams. *Autonomous Robots*, p. 323–336, 2012. Citado na página 10.
- LIU, L. et al. Distributed cooperative control for uav swarm formation reconfiguration based on consensus theory. *International Conference on Robotics and Automation Engineering*, 2017. Citado na página 10.
- MAZA, I. et al. Experimental results in multi-uav coordination for disaster management and civil security applications. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, p. 563–585, 2010. Citado na página 10.
- MELLINGER, D. et al. Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, v. 83, p. 545–558, 2013. Citado na página 10.
- MERCADO, D. A.; CASTRO, R.; LOZANO, R. Quadrotors flight formation control using a leader-follower approach. In: *2013 European Control Conference (ECC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3858–3863. Citado na página 11.
- PACHECO, G. V. Navegação cooperativa de robôs móveis com formações triangulares. *Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Viçosa. Monografia*, 2018. Citado na página 13.
- RAMPINELLI, V. T. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with obstacle avoidance. In: IEEE. *Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009. International Conference on*. [S.l.], 2009. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.

REZAEE, H.; ABDOLLAHI, F. A synchronization strategy for three-dimensional decentralized formation control of unmanned aircrafts. In: IEEE. *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011)*. [S.l.], 2011. p. 462–467. Citado na página 11.

ZHU, T.; LING, H.; HE, W. A cooperative control approach of uav autonomous formation and reconfiguration. In: IEEE. *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. [S.l.], 2018. Citado na página 11.

Apêndices

APÊNDICE A – Diagrama de fluxo da estratégia

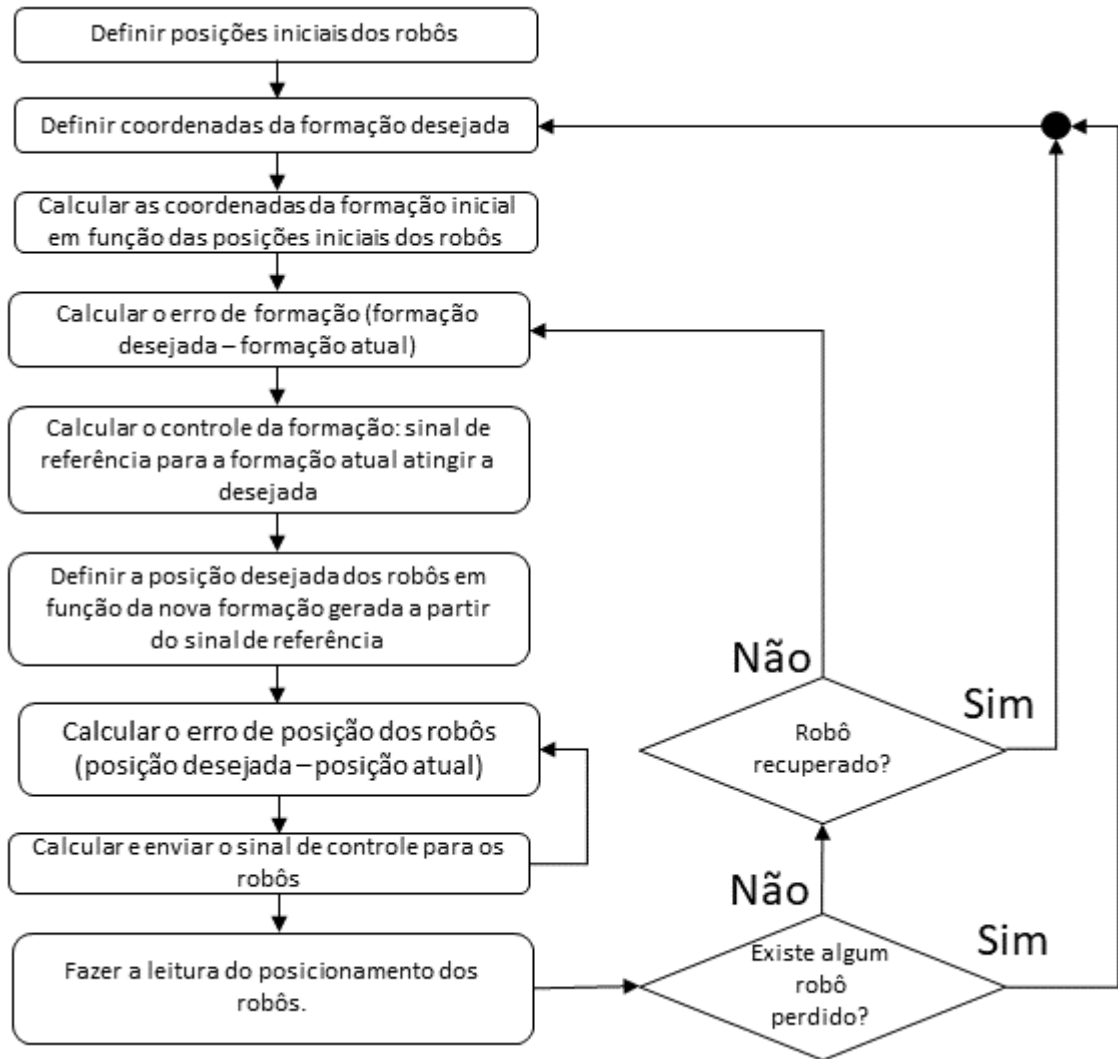


Figura 11 – Diagrama de Fluxo da estratégia