

João Vítor Rodrigues de Vasconcelos

# **Formação em Linhas aplicando o Controle Multicamadas**

Viçosa, MG

2018

João Vítor Rodrigues de Vasconcelos

## **Formação em Linhas aplicando o Controle Multicamadas**

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 490 – 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

2018

João Vítor Rodrigues de Vasconcelos

## **Formação em Linhas aplicando o Controle Multicamadas**

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 490 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em    de    de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão**  
Orientador

---

**Prof. Marcos Felipe Santos Rabelo**  
Convidado 1

---

**M.Sc. André Luis Carvalho Mendes**  
Convidado 2

Viçosa, MG  
2018

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

A Universidade Federal de Viçosa, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança do mérito e ética aqui presentes

Aos meus ídolos, meus pais Júlio e Luciana, obrigado pelo amor incondicional e pelo exemplo de vida.

Também sou grato aos meus avós Conceição e João (in memoriam), Lica (in memoriam) e Zico, que me ensinaram valores importantes e contribuíram com a minha educação.

Não posso deixar de agradecer a minha namorada Gisele, que esteve sempre ao meu lado me incentivando.

Sou grato a todos os professores e funcionários, principalmente os do Departamento de Engenharia Elétrica, por auxiliarem em minha vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. Alexandre pela oportunidade e apoio, aos amigos João Paulo e Diego pela grande ajuda durante a realização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*“Um livro é a prova de que os homens são capazes de fazer magia.”*  
*(Carl Sagan)*

# Resumo

Este artigo apresenta uma estratégia para guiar vários robôs em uma estrutura virtual adaptável. O Esquema de Controle Multicamada (MLCS) é aqui implementado para guiar vários robôs durante o rastreamento de trajetória e as tarefas de posicionamento. Neste trabalho, os robôs são divididos em conjuntos de dois agentes para estabelecer a formação de várias estruturas de linha, que são controladas individualmente. A proposta é validada numericamente. Primeiro, dois robôs em formação de linha realizam tarefas de posicionamento e seguem uma trajetória circular. Na sequência, cinco robôs geram um polígono regular, que deve seguir uma referência em linha reta. O conceito de formação de linhas pode ser expandido para robôs  $n$ , apenas estabelecendo e reorganizando o novo polígono regular, em uma estrutura rígida e fechada.

**Palavras-chaves:** Robótica; Móvel; Formação; Estrutura de Linha; Controle; Multicamadas.

# Lista de ilustrações

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – O Esquema de Controle Multicamadas . . . . .  | 10 |
| Figura 2 – Estrutura de Formação em linha . . . . .  | 12 |
| Figura 3 – Dois robôs começam em uma posição aleatória e se movem em direção<br>a uma formação de linha. . . . .       | 16 |
| Figura 4 – Erro de posição para tarefa de posicionamento de dois robôs. . . . .  | 17 |
| Figura 5 – Cinco robôs que começam em uma posição aleatória e se movem em<br>direção a uma formação poligonal. . . . . | 17 |
| Figura 6 – Erro de posição para tarefa de posicionamento de cinco robôs. . . . .                                       | 18 |
| Figura 7 – Simulação de uma trajetória de estrutura de linha com dois robôs. . . . .                                   | 19 |
| Figura 8 – Simulação de uma trajetória de estrutura de linha com dois robôs. . . . .                                   | 20 |
| Figura 9 – Seis robôs em formação seguindo uma trajetória de linha reta. . . . .                                       | 20 |
| Figura 10 – Simulação de uma trajetória de estrutura de linha com dois robôs. . . . .                                  | 21 |

# Sumário

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .                         | <b>8</b>  |
| <b>2</b>   | <b>O ESQUEMA DE CONTROLE MULTICAMADAS</b> . . . . . | <b>10</b> |
| <b>3</b>   | <b>A CAMADA DE CONTROLE DE FORMAÇÃO</b> . . . . .   | <b>12</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Cinemática Direta e Inversa</b> . . . . .        | <b>12</b> |
| <b>3.2</b> | <b>O Controle de Formação</b> . . . . .             | <b>14</b> |
| <b>3.3</b> | <b>O Controle do Robô</b> . . . . .                 | <b>14</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .             | <b>16</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .               | <b>22</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .                        | <b>23</b> |

# 1 Introdução

Nos últimos anos, pesquisas sobre robôs móveis receberam atenção significativa da comunidade científica, especialmente quando se trata de sistemas de navegação cooperativa. Comumente um grupo de robôs, trabalhando de forma coordenada, é capaz de executar tarefas impossíveis para apenas um robô de uma maneira muito mais eficiente (WAN; LU; FAN, 2017), por exemplo, inspecionar uma grande área, missões de busca e salvamento, mapeamento e transporte de carga.

Para realizar as tarefas designadas, os robôs devem manter sua formação durante o período de execução, então o desafio tem sido controlar vários robôs e mantê-los em formação. Além disso, existem várias estratégias de controle diferentes, geralmente classificadas como: líder-seguidor, estrutura virtual ou baseada em comportamento (PENGHAO; ZHIYONG, 2016). Na estratégia líder-seguidor, o robô líder recebe as informações de controle necessárias para guiar os robôs seguidores. O líder também é responsável por planejar a trajetória que os outros robôs devem seguir. A desvantagem dessa estratégia está no fato de que, se o robô líder falhar, os seguidores também falharão, o que pode quebrar a formação. A estratégia de estrutura virtual é útil quando a formação de robôs deve formar uma figura geométrica no plano cartesiano. Este valor pode variar no tempo durante a execução da tarefa (WANG et al., 2017). Nessa estratégia, não há líder nem seguidor e os robôs se movem como um único corpo rígido. Por fim, a estratégia baseada em comportamento é usada quando os robôs precisam tomar decisões com base no ambiente, como evitar um obstáculo ou manter uma formação.

Em (CHEN; BAOLI, 2015) é implementada uma estratégia baseada em controle de estrutura virtual, transformando o problema de controle de formação em um problema de rastreamento de trajetória, no qual cada robô deve seguir um ponto pré-definido dentro da estrutura, construindo a formação.

Em (LOW, 2015) o conceito de controle de formação flexível é aplicado em uma estratégia de controle líder-seguidor para alcançar o controle de separação curvilínea longitudinal e lateral para os robôs móveis rastreados considerados sem a necessidade de uma trajetória de formação pré-planejada, dependendo apenas do baixo nível do sistema de controle dos robôs.

O problema do controle da formação também pode ser abordado com estratégias baseadas no consenso, que são formas de estratégias baseadas no comportamento. Neste tipo de estratégia, um grupo de robôs em comunicação deve atingir um objetivo comum, determinado por consenso, ponderando a decisão de cada robô na formação. Em (OLFATI-SABER; FAX; MURRAY, 2007) os algoritmos de consenso são estudados com a aplicação

em controle de formação, a fim de obter uma concordância rápida entre todos os agentes da formação e possibilitar o aumento do desempenho de um pelotão autoorganizado.

A arquitetura de controle é comumente implementada de maneira centralizada ou descentralizada. Na arquitetura centralizada, uma unidade central é responsável por reunir as informações de velocidade e postura de cada robô na formação e enviar o sinal de controle para toda a formação, resolvendo o problema de navegação (BRANDAO et al., 2014a). Na arquitetura descentralizada, não há necessidade de uma unidade centralizada, pois os robôs geram seu próprio sinal de controle com base em seus sensores, a fim de manter a formação e cumprir a tarefa.

Na estratégia de estrutura virtual, a estratégia centralizada possui algumas vantagens técnicas, como menor necessidade de processamento *on-board* em robôs e a possibilidade de obter uma solução ótima para o problema de controle, já que o agente centralizador possui a informação de todos os robôs (PACHECO et al., 2018).

Em um trabalho anterior (RAMPINELLI et al., 2009), o Esquema de Controle Multicamadas (MLCS) é definido e apresentado como uma estratégia de estrutura virtual composta por módulos independentes que juntos realizam o controle de formação. Esta estratégia foi inicialmente implementada para uma formação triangular única (BRANDAO et al., 2009) e posteriormente estendida para  $n$ -robôs, dividindo a nova estrutura em várias formações triangulares (RAMPINELLI et al., 2010) (MAS; KITTS, 2010).

Neste artigo, propomos uma nova abordagem para o MLCS melhorar sua capacidade. Agora, os  $n$ -robôs geram um polígono regular adaptável, dividido em  $n$  formações de estrutura de linha. Para consegui-lo, este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 descreve brevemente a MLCS adotada para guiar dois robôs terrestres e sua generalização para  $n$ -robôs. A seção 3 apresenta a descrição da formação, a fim de formalizar a camada de controle da formação. As seções 4 e 5 apresentam resultados de simulação que validam a proposta, bem como algumas discussões relevantes sobre elas e as principais conclusões sobre o trabalho.

## 2 O Esquema de Controle Multicamadas

Esta seção discute brevemente o Esquema de Controle Multicamadas que foi proposto em (RAMPINELLI et al., 2009) para guiar uma formação de três robôs terrestres e estendido em (BRANDAO et al., 2009) para guiar n-robôs em formação. O diagrama MLCS é mostrado na Fig. 1, nota-se que a Camada Controle de Formação, recebe informações da Camada Planejador Offline sendo realimentada pela Camada Ambiente. As informações recebidas são referentes a posição e velocidade da formação desejada, aplica-se a transformada inversa para a posição e a matriz jacobiana inversa para a velocidade, encontrando assim a posição e a velocidade de referência para cada robô. As matrizes resultantes são repassadas para a Camada do Robô, onde acontece a comunicação entre os valores de controle e os robôs. Cada robô recebe a informação e efetua o movimento proposto pelo controle, mantendo contato com a Camada Ambiente, para efetuar novos cálculos dos controladores caso, encontre algum obstáculo a ser desviado.

Em (BRANDAO et al., 2014b), o conceito MLCS foi novamente expandido para guiar a formação de MUAVs (*Multiple Unmanned Aerial Vehicles*) usando a Triangulação de Delaunay. Neste artigo, o MLCS é usado para guiar uma formação poligonal contendo n-robôs usando uma formação de estrutura virtual em forma de linha.

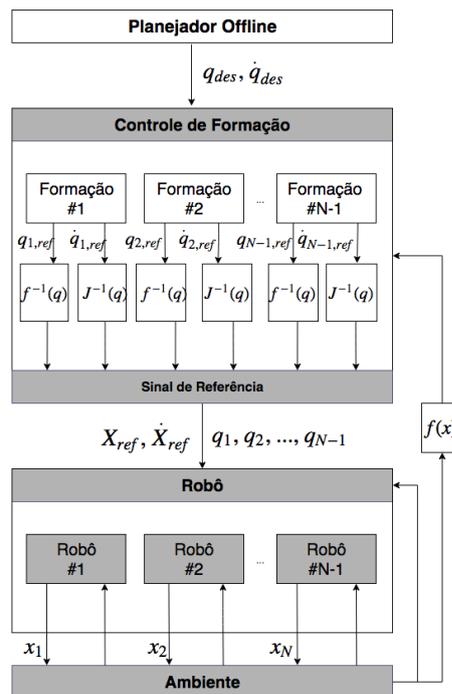


Figura 1 – O Esquema de Controle Multicamadas

O MLCS é composto por quatro camadas de controle. A camada Planejador Offline é responsável por definir os robôs e as posições iniciais de formação, assim como gerar a trajetória desejada e sua velocidade. A Camada de Controle de Formação é responsável por receber a trajetória desejada e gerar o sinal de controle, que é enviado posteriormente aos robôs para que eles possam manter a formação com o mínimo de erro de posição. Esta camada controla as estratégias de rastreamento e posicionamento da trajetória da formação. A Camada de Robô contém todas as características cinemáticas e dinâmicas dos robôs, bem como sua estratégia de navegação individual, como evitar obstáculos, módulos de compensação dinâmica, entre outros. Por fim, a Camada Ambiente representa o ambiente no qual o robô está operando (BRANDAO et al., 2014a).

É importante mencionar que o MLCS é independente entre camadas e módulos vertical e horizontalmente, o que significa que novas camadas podem ser adicionadas para aprimorar a estratégia de controle. A estrutura de controle cresce toda vez que um robô é adicionado à formação [11]. Alguns blocos adicionais, como  $J^{-1}(\mathbf{q})$  e  $f^{-1}(\mathbf{q})$ , mostrados na Figura 1, são necessários para completar a estratégia de controle. Estes blocos representam a matriz inversa do jacobiano e a transformação cinemática inversa, respectivamente.

### 3 A camada de controle de formação

Esta seção apresenta a Camada de Controle de Formação para uma formação centralizada, considerando, inicialmente, dois robôs em uma formação de linha virtual, como mostrado na Fig. 2. As coordenadas de formação são dadas por  $\mathbf{P}_F = [x_f \ y_f \ h_f \ \beta_f]^T$ , onde  $(x_f, y_f)$  representa o ponto no primeiro robô da linha virtual conectando os robôs,  $h_f$  é a distância do primeiro ao segundo robô e  $\beta_f$  é o ângulo de inclinação em relação ao eixo  $x$ . Por outro lado, as coordenadas dos robôs são dadas por  $\mathbf{P}_R = [x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2]^T$ , onde  $(x_1, y_1)$  e  $(x_2, y_2)$  representam as coordenadas do robô 1 e do robô 2, respectivamente.

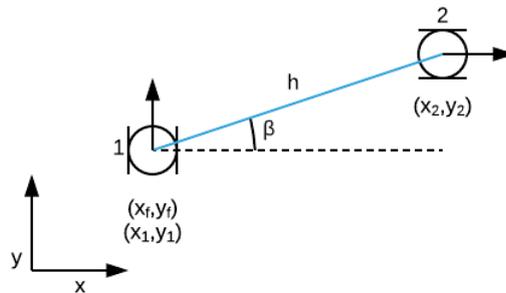


Figura 2 – Estrutura de Formação em linha

#### 3.1 Cinemática Direta e Inversa

As coordenadas de formação  $\mathbf{P}_F$  podem ser expressas em termos das posições dos robôs  $\mathbf{P}_R$  através da cinemática direta

$$\mathbf{P}_F = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ h_f \\ \beta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\ \arctan \left[ \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \right] \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

enquanto as posições dos robôs podem ser expressas em termos de  $\mathbf{P}_F$ , de acordo com

$$\mathbf{P}_R = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ x_f + h_f \cos \beta_f \\ y_f + h_f \sin \beta_f \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

que representa a cinemática inversa.

Considerando  $\mathbf{q} = [\mathbf{P}_F]^T$  e  $\mathbf{h} = [\mathbf{P}_R]^T$  podemos obter a relação entre  $\dot{\mathbf{q}}$  e  $\dot{\mathbf{h}}$ , dada por  $\dot{\mathbf{q}} = J(\mathbf{h})\dot{\mathbf{h}}$  e  $\dot{\mathbf{h}} = J^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ , onde  $\mathbf{J}$  é a matriz Jacobiana e  $\mathbf{J}^{-1}$  é o inverso da matriz Jacobiana, dada por

$$\mathbf{J}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cos(\beta_f) & -h_f \sin(\beta_f) \\ 0 & 1 & \sin(\beta_f) & h_f \cos(\beta_f) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Este conceito pode ser expandido para  $n$ -robôs de acordo com

$$\mathbf{P}_{F_n} = \begin{bmatrix} x_{f_1} & x_{f_2} & \cdots & x_{f_{n-1}} \\ y_{f_1} & y_{f_2} & \cdots & y_{f_{n-1}} \\ h_{f_1} & h_{f_2} & \cdots & h_{f_{n-1}} \\ \beta_{f_1} & \beta_{f_2} & \cdots & \beta_{f_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

e a formação da linha  $i$  é dada por

$$\begin{cases} x_{f_i} = x_{f_{i-1}} + h_{f_{i-1}} \cos \beta_{f_{i-1}} \\ y_{f_i} = y_{f_{i-1}} + h_{f_{i-1}} \sin \beta_{f_{i-1}} \\ h_{f_i} = h_{f_{i-1}} \\ \beta_{f_i} = \beta_{f_{i-1}} \end{cases} \quad (3.5)$$

para um ângulo de formação constante. Em contraste, para uma representação de polígono regular, o ângulo de formação de (3.5) é dado por

$$\beta_{f_i} = \frac{2\pi(i-1)}{n} \quad (3.6)$$

Finalmente, a matriz inversa de Jacobiano para a formação de  $n$ -robots é descrita por

$$\mathbf{J}^{-1} = [\mathbf{J}_1^{-1} \quad \mathbf{J}_2^{-1} \quad \cdots \quad \mathbf{J}_{n-1}^{-1}] \quad (3.7)$$

sendo

$$\mathbf{J}_i^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cos(\beta_{f_i}) & -h_{f_i} \sin(\beta_{f_i}) \\ 0 & 1 & \sin(\beta_{f_i}) & h_{f_i} \cos(\beta_{f_i}) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

para a formação  $i$ .

## 3.2 O Controle de Formação

A camada de planejamento de trajetória recebe o número  $n$  de robôs, suas posições iniciais, a formação desejada e a trajetória a ser seguida. Então as posições iniciais informadas pelo planejador formam  $n - 1$  estruturas de linha virtuais e a trajetória a ser seguida é calculada. É possível implementar nesta camada uma estratégia de evitar obstáculos, por exemplo.

Na Camada de Controle de Formação, o polígono regular de  $n$  vértices é dividido em  $n - 1$  formações de linha, de modo que o MLCS pode ser aplicado usando as equações deduzidas para dois robôs em formação de linha. Esta camada recebe a formação desejada  $\mathbf{q}_{des}$  da camada superior e a variação de tempo desejada da posição  $\dot{\mathbf{q}}_{des}$ , depois aplica a inversa da matriz jacobiana para gerar a velocidade de referência para os robôs,  $\dot{\mathbf{x}}_{ref} = J^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ . Definindo o erro de posição de formação como  $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{des} - \mathbf{q}$ , a lei de controle pode ser expressa por

$$\dot{\mathbf{q}}_{ref} = \dot{\mathbf{q}}_{des} + \kappa\tilde{\mathbf{q}} \quad (3.9)$$

onde  $\kappa$  é uma matriz diagonal que representa o ganho proporcional.

A camada do robô é responsável por receber o sinal de controle de formação, por enviá-los aos robôs e, em seguida, por guiar cada robô até a posição desejada.

## 3.3 O Controle do Robô

A Camada de Controle do Robô, possui um controlador proposto de trajetória em coordenadas cartesianas que teve sua estabilidade analisada pelo sentido de Lyapunov. É necessário, portanto, que a função candidata de Lyapunov seja definida positiva e sua derivada seja definida negativa. Assim, o controlador proposto faz com que sua derivada seja definida negativa.

A seguir apresenta-se tal proposta e análise de controlador em coordenadas cartesianas no sentido de Lyapunov

Dada a equação a seguir como função candidata e Lyapunov

$$V(\tilde{x}, \tilde{y}) = \frac{1}{2}\tilde{x}^2 + \frac{1}{2}\tilde{y}^2 > 0 \quad (3.10)$$

A Equação (3.10) é uma função globalmente ilimitada de classe  $C^2$  e definida positiva.

Tomando a primeira derivada temporal de  $V$ , tem-se

$$\dot{V}(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{x}\dot{\tilde{x}} + \tilde{y}\dot{\tilde{y}} \quad (3.11)$$

sabe-se que

$$\tilde{x} = x_d - x, \quad \tilde{y} = y_d - y \quad (3.12)$$

então

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x}_d - \dot{x}, \quad \dot{\tilde{y}} = \dot{y}_d - \dot{y} \quad (3.13)$$

Substituindo em (3.11), a Equação (3.13)), obtem-se

$$\dot{V}(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{x}(\dot{x}_d - \dot{x}) + \tilde{y}(\dot{y}_d - \dot{y}) \quad (3.14)$$

dado,

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -a \sin \psi \\ \sin \psi & a \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} = \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (3.15)$$

substituindo em (3.14), a Equação (3.15) e escrevendo em notação matricial, onde  $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{x}_d = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix}$  e  $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix}$ , temos

$$\dot{V}(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{\mathbf{x}}(\dot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{K}\mathbf{u}) \quad (3.16)$$

Propondo um controlador e analisano sua estabilidade

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1}(\dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{G}\mathbf{A}) \quad (3.17)$$

onde  $\mathbf{A} = [\tanh(k_a \tilde{x}) \quad \tanh(k_b \tilde{y})]^T$ ,  $\mathbf{G}$  é uma matriz diagonal definida positiva e  $k_a, k_b \in R_+$ .

Substituindo em (3.16), a Equação (3.17), tem-se

$$\dot{V}(\tilde{x}, \tilde{y}) = -\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{G}\mathbf{A} < 0 \quad (3.18)$$

Ou seja, a derivada da função candidata de Lyapunov é definida negativa. Logo  $[\tilde{x} \quad \tilde{y}]^T \in L_\infty^n \cap L_2^n$ , e, portanto, garante-se que  $[\tilde{x} \quad \tilde{y}]^T \rightarrow [0 \quad 0]^T$  para  $t \rightarrow \infty$ , assintoticamente.

## 4 Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados de quatro simulações usando o controlador de trajetória MLCS proposto. O objetivo principal é demonstrar a estabilidade dos robôs quando em formação com outro robô ou com  $n$ -robôs.

A primeira simulação consiste em dois robôs que começam em uma posição aleatória e se movem em direção a uma formação de linha como mostrado na Fig. 3. Na Fig. 4 pode-se notar que o maior erro ocorre no eixo- $y$  devido a sua posição inicial. Além disso, quando os robôs atingem a formação desejada, o erro tende a zero. O tempo para atingir a posição de formação desejada é de cerca de cinco segundos.

Na segunda simulação, cinco robôs iniciam em uma posição aleatória e se movem em direção a uma formação de polígonos, como mostrado na Fig. 5. A Fig. 6 mostra o erro de posição de formação no plano- $xy$ . Os robôs gastam cerca de seis segundos para alcançar a posição de formação desejada.

A terceira simulação consiste em dois robôs em uma formação de estrutura de linha.

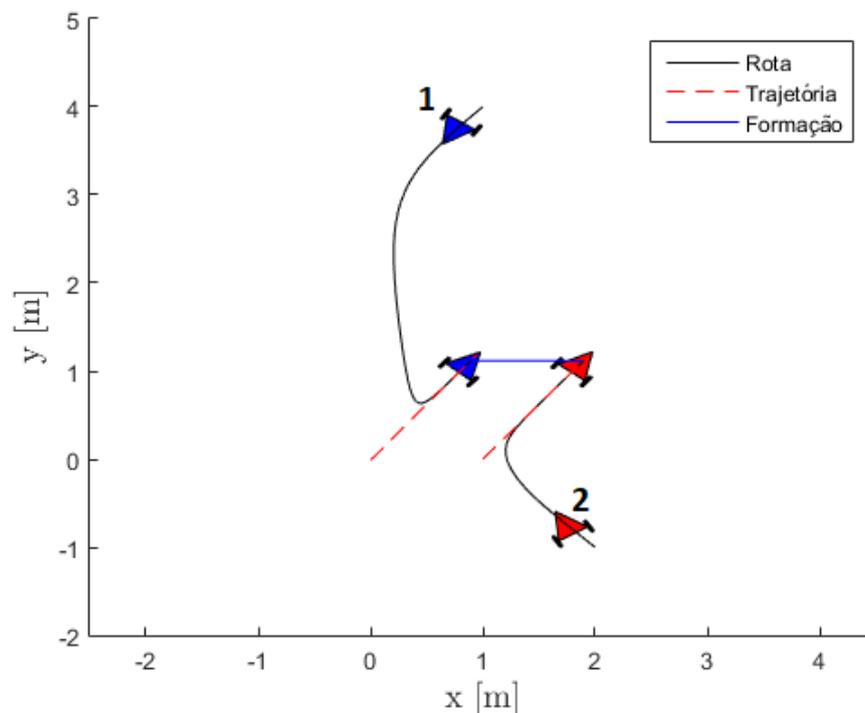


Figura 3 – Dois robôs começam em uma posição aleatória e se movem em direção a uma formação de linha.

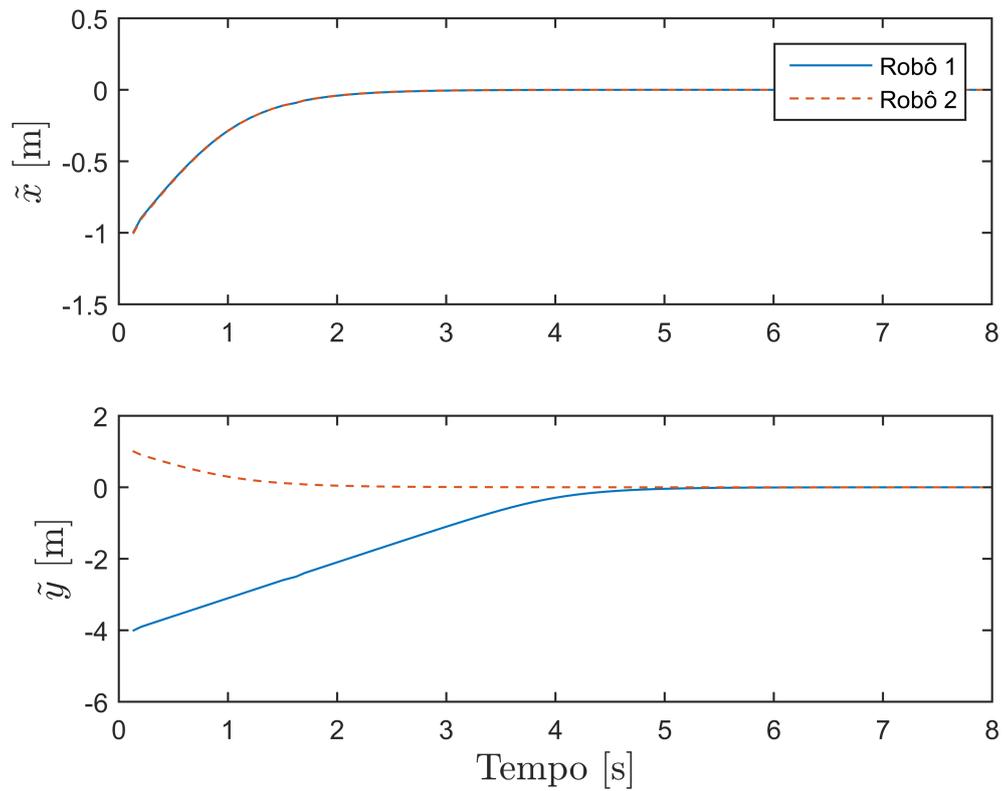


Figura 4 – Erro de posição para tarefa de posicionamento de dois robôs.

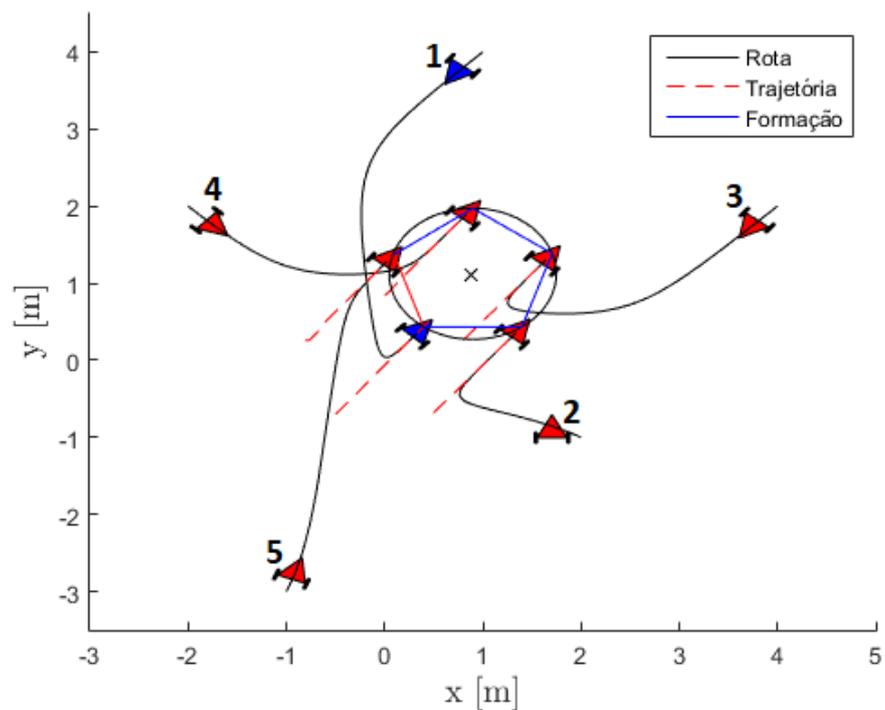


Figura 5 – Cinco robôs que começam em uma posição aleatória e se movem em direção a uma formação poligonal.

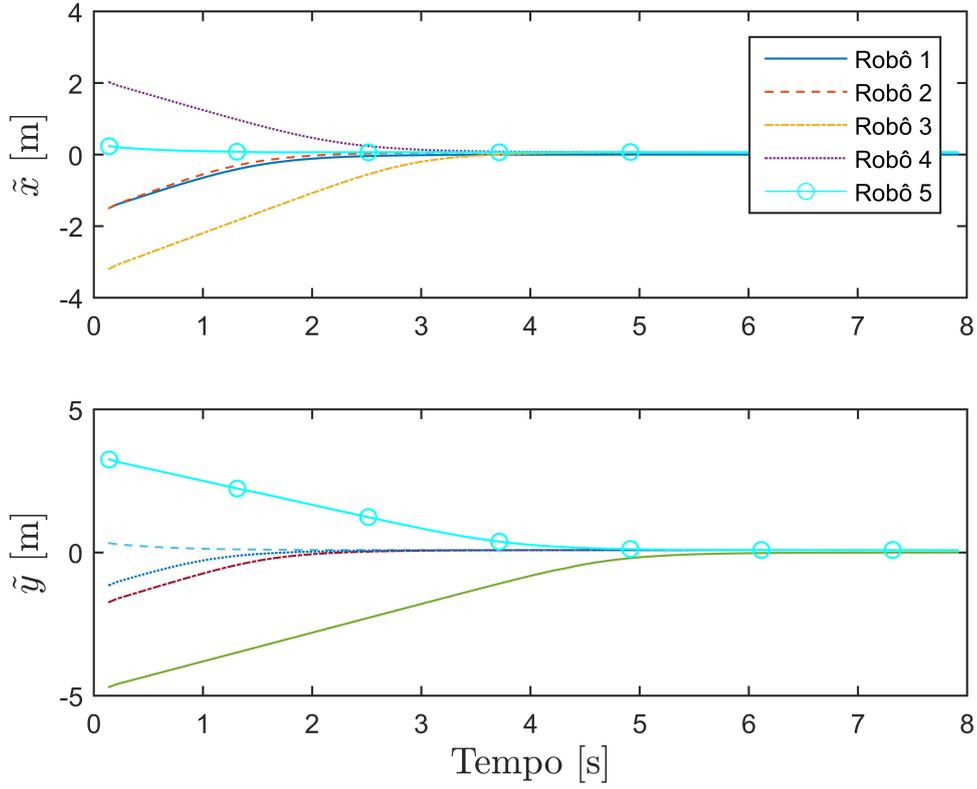


Figura 6 – Erro de posição para tarefa de posicionamento de cinco robôs.

A trajetória desejada é um círculo descrito por

$$\begin{bmatrix} x_{f_d} \\ y_{f_d} \\ h_{f_d} \\ \beta_{f_d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 + 2 \cos(0.067\pi t) \\ 2 \sin(0.067\pi t) \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

e a postura de formação durante a simulação é  $\mathbf{q} = [0,5 \ 0,5 \ 1 \ 0]^T$ . Os resultados da simulação são mostrados na Fig. 7, e na Fig. 8 são apresentados os erros da simulação, é possível notar que a curva do erro começa com valor máximo de 2 metros, e estabiliza em 3 segundos alcançando o erro zero.

A quarta simulação consiste em seis robôs em uma formação hexagonal. Esta estrutura é dividida em cinco formações, seguindo uma trajetória de linhas descrita por

$$\begin{bmatrix} x_{f_d} \\ y_{f_d} \\ h_{f_d} \\ \beta_{f_d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,12t \\ 0,15t \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

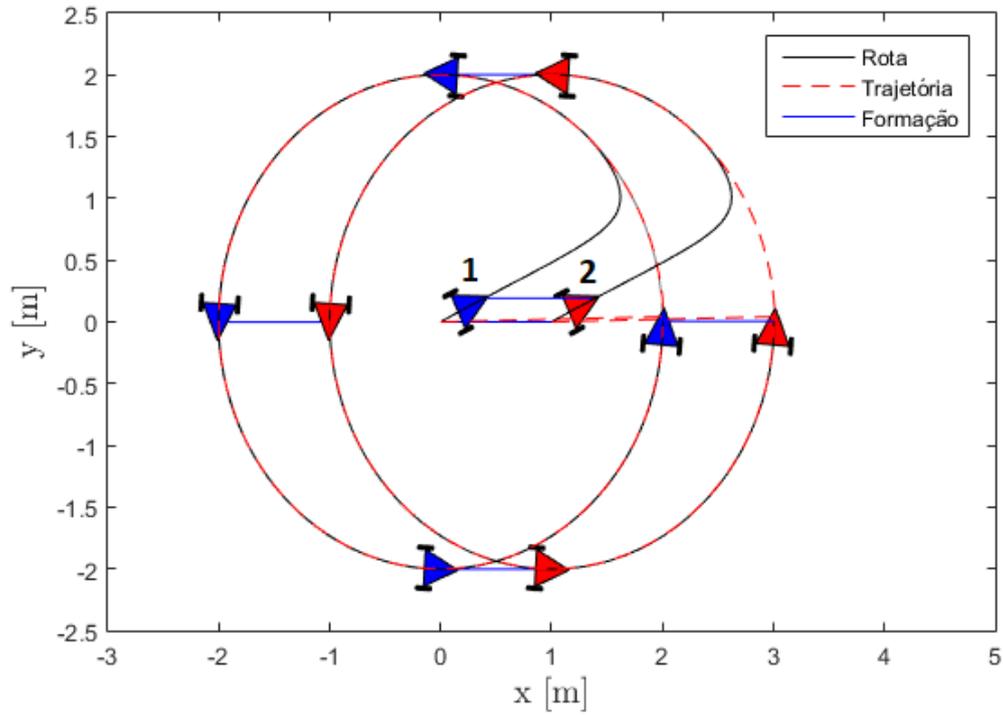


Figura 7 – Simulação de uma trajetória de estrutura de linha com dois robôs.

e a postura inicial durante a simulação é descrita em

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0,75 & 0,75 & 0 & -0,75 \\ -0,866 & -0,433 & 0,433 & 0,866 & 0,433 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 60 & 120 & 180 & 240 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Os resultados da simulação são mostrados na Fig. 9, e o erro da simulação pode ser visto na Fig. 10, é possível notar que em toda simulação o erro de todos os robôs foi bem próximo de zero.

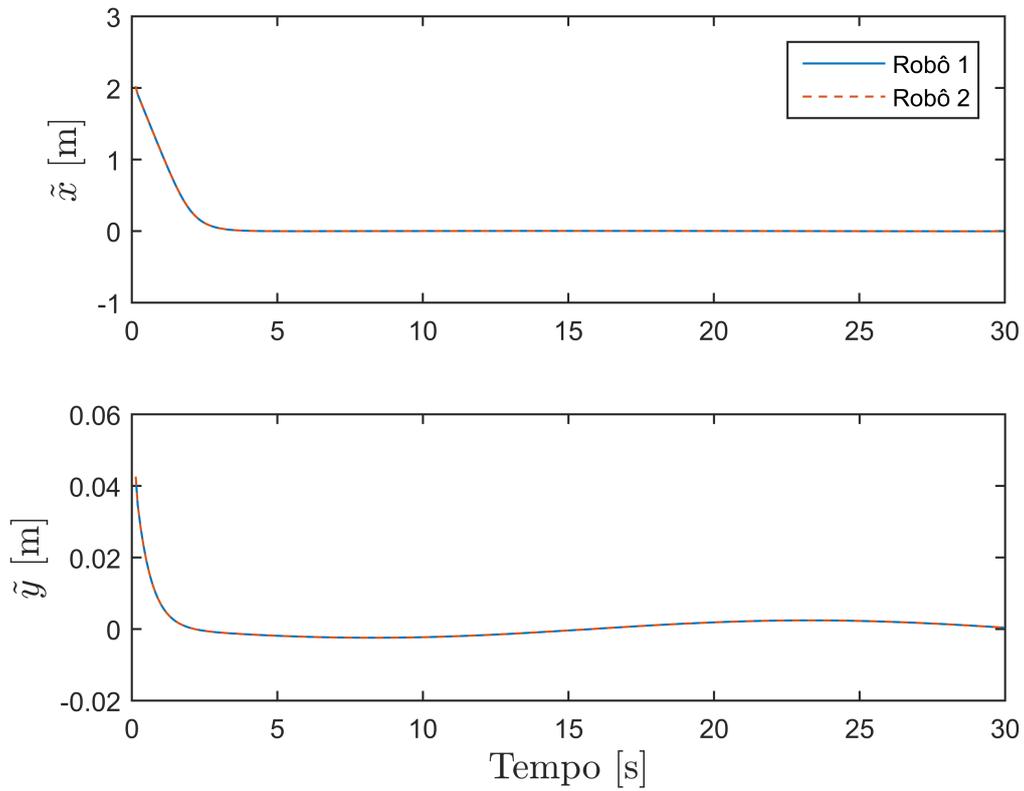


Figura 8 – Simulação de uma trajetória de estrutura de linha com dois robôs.

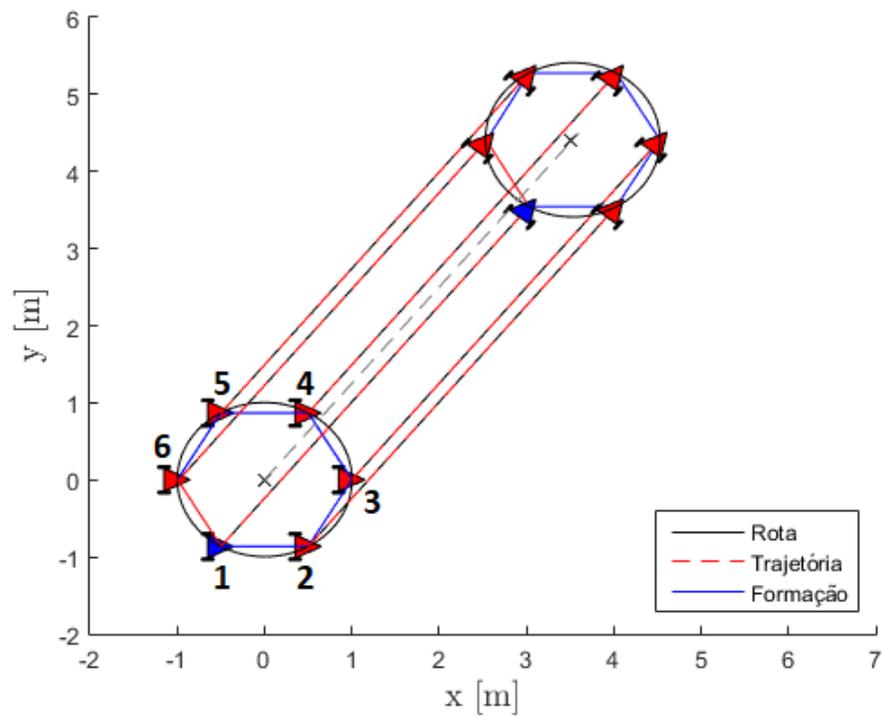


Figura 9 – Seis robôs em formação seguindo uma trajetória de linha reta.

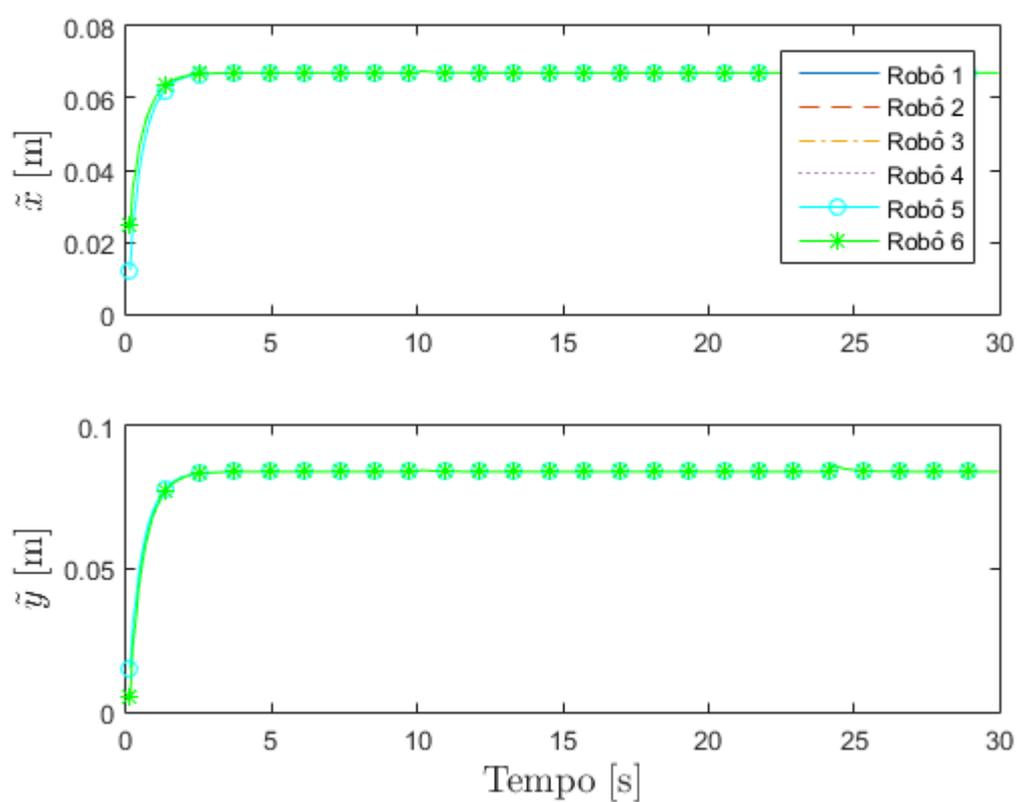


Figura 10 – Simulação de uma trajetória de estrutura de linha com dois robôs.

## 5 Considerações Finais

Este artigo apresentou uma estratégia de controle de formação para guiar múltiplos robôs em formação para realizar tarefas de rastreamento de posicionamento e trajetória. A estratégia é estabelecida pela implementação do Esquema de Controle de Multicamadas, considerando  $n$  robôs em  $n - 1$  formações de linha para criar uma representação poligonal. O controle é implementado pela primeira vez para dois robôs e depois estendido para  $n$  robôs. A estratégia é simulada para controlar três diferentes configurações de formação em tarefas de rastreamento e rastreamento de trajetória e os resultados validam a proposta.

Este trabalho demonstra a vantagem do MLCS no controle de múltiplos robôs. Assumindo que um robô pertence à formação de duas linhas simultaneamente, seus sinais de controle são ponderados de acordo com a formação à qual ele pertence, considerando os sinais de controle de posição, ângulo e velocidade gerados pelos controladores associados a essas formações de linha. Tal estratégia pode ser considerada como uma espécie de fusão de sinais de controle, levando em conta toda a formação.

Em relação ao Esquema de Controle Multicamadas com 3 robôs em formação triangular, utiliza-se de uma matriz jacobiana  $6 \times 6$  onde para cada robô adicionado à formação é acrescentado um jacobiano de mesma dimensão nos cálculos de controle. Contudo, esta pesquisa retorna uma formação em estrutura de linha com 2 robôs, utilizando uma matriz jacobiana  $4 \times 4$  em que para cada robô adicionado à formação é acrescentado um jacobiano de mesma dimensão que facilita os cálculos de controle, melhorando o desempenho da simulação.

Os próximos passos desta pesquisa são incluir estratégias de prevenção de obstáculos coletivos no caso de tarefas de transporte de carga, ou módulo de prevenção individual para cada robô, no caso de missões de busca e salvamento, e inspeção em grandes áreas. Além disso, um controle de rearranjo de formação pode ser incluído para tarefas onde há a necessidade de deslocar individualmente qualquer um ou todos os robôs em formação. Além disso, um algoritmo de otimização pode ser incluído na Camada de Planejamento, para reorganizar a seqüência dos robôs com base na posição desejada na formação, a fim de minimizar o risco de colisão intra-formação durante o estabelecimento da formação. Finalmente, em trabalhos futuros, experimentos serão realizados para validar o controle de formação em ambientes reais.

# Referências

- BRANDAO, A. S. et al. A multi-layer control scheme for a centralized uav formation. *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, FL*, p. 1181–1187, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.
- BRANDAO, A. S. et al. Multiple uav guidance using the multi-layer control scheme and delaunay triangulation. *2014 Joint Conference on Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol, Sao Carlos*, p. 113–117, 2014. Citado na página 10.
- BRANDAO, A. S. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with adaptative dynamic compensation. *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Mechatronics. Malaga, Spain*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.
- CHEN, L.; BAOLI, M. A nonlinear formation control of wheeled mobile robots with virtual structure approach. *2015 34th Chinese Control Conference (CCC), Hangzhou*, p. 1080–1085, 2015. Citado na página 8.
- LOW, C. B. A flexible leader-follower formation tracking control design for nonholonomic tracked mobile robots with low-level velocities control systems. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Las Palmas*, p. 2424–2431, 2015. Citado na página 8.
- MAS, I.; KITTS, C. Centralized and decentralized multi-robot control methods using the cluster space control framework. *Proceedings of the 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Montreal, Canada*, p. 115–122, 2010. Citado na página 9.
- OLFATI-SABER, R.; FAX, J. A.; MURRAY, R. M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 1, p. 215–233, 2007. Citado na página 8.
- PACHECO, G. V. et al. Control signal weighting for robot formation. *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon*, p. 111–116, 2018. Citado na página 9.
- PENGHAO, W.; ZHIYONG, G. Leader-follower formation control of multi-robot systems using the dynamic surface approach. *2016 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu*, p. 7757–7762, 2016. Citado na página 8.
- RAMPINELLI, V. et al. Embedding obstacle avoidance in the control of a flexible multi-robot formation. *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), IEEE*, p. 1846–1851, 2010. Citado na página 9.
- RAMPINELLI, V. T. L. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with obstacle avoidance. *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Robotics, ICAR'09. Munich, Germany*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.
- WAN, S.; LU, J.; FAN, P. Semi-centralized control for multi robot formation. *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering. Shanghai, China: IEEE*, p. 29–31, 2017. Citado na página 8.

---

WANG, Z. et al. Time-varying formation control for mobile robots: Algorithms and experiments. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing*, p. 7239–7244, 2017. Citado na página 8.