

## Controle de Formação Baseado em Espaço Nulo com Possibilidade de Alteração de Líder

Valentim Ernandes-Neto\* Alexandre S. Brandão\*\*  
Mario Sarcinelli-Filho\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: valentimernandes@hotmail.com e mario.sarcinelli@ufes.br).

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, MG (e-mail: alexandre.brandao@ufv.br)

---

**Abstract:** This work discusses the implementation and experimentation of a control system designed to guide a multi-robot formation of one aerial and three ground robots, in a trajectory tracking task. The implementation considers three partial formations of two robots, each one associated to a virtual structure, a straight line in the 3D space with its own formation controller. Two of the partial line formations are homogeneous formations of two ground vehicles, and the third one is a heterogeneous formation, involving a ground and an aerial vehicles. All the partial formations have the same reference for position, which is one of the ground vehicles. This also allows to discuss what would happen if this ground vehicle, the reference for all the line formations and thus for the whole formation, presents a failure during an escorting mission. The result is that the designed control system is effectively able to accomplish the mission, even upon a failure of the reference robot, which is experimentally validated.

**Resumo:** Este trabalho discute a implementação de um sistema de controle projetado para guiar uma formação multirrobôs, composta por um robô aéreo e três terrestres, em uma tarefa de rastreamento de trajetória. São consideradas três formações parciais de dois robôs, cada uma associada a uma estrutura virtual em forma de linha reta no espaço 3D, com seu próprio controlador de formação. Duas das formações parciais são formações homogêneas, com dois veículos terrestres, e a terceira é uma formação heterogênea, envolvendo um veículo terrestre e um aéreo. Todas as formações parciais possuem a mesma referência de posição, que é um dos veículos terrestres. Isto permite também discutir o que aconteceria se este veículo terrestre, referência para todas as formações, portanto para toda a formação, apresentasse uma falha, considerando uma missão de escolta. O resultado é que o sistema de controle projetado é efetivo no cumprimento da missão, mesmo em caso de falha do robô de referência, o que é validado por resultados experimentais.

*Keywords:* Formation control; Mobile robotics; Multi-agent systems; Null Space-Based Control; Trajectory-tracking.

*Palavras-chaves:* Controle de formação; Robótica móvel; Sistemas multirrobôs; Controle baseado em espaço nulo; Rastreamento de trajetória.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Através da combinação de diferentes características individuais de um grupo heterogêneo de robôs é possível maximizar suas vantagens individuais e minimizar suas restrições. Afinal, múltiplos robôs trabalhando cooperativamente são capazes de realizar uma tarefa de forma mais eficiente, robusta e rápida (Zhang et al., 2018). Como contraponto ao uso de agentes individuais para realizar uma determi-

\* Estudo financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, através de uma bolsa de estudos concedida ao primeiro autor, pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, agência de fomento do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, pela FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo e pela FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

nada tarefa, em muitos casos a coordenação de um grupo de agentes autônomos para atingir um objetivo comum oferece vários benefícios, como robustez, flexibilidade, escalabilidade, adaptabilidade, menores custos de operação e manutenção. O objetivo principal do controle cooperativo multiagente é projetar um protocolo ou algoritmo de controle adequado utilizando apenas interações locais entre agentes vizinhos, de forma que uma tarefa desejada possa ser realizada ou um comportamento coletivo possa ser alcançado (Ge et al., 2018).

Neste contexto, surgiu o termo controle de formação, referindo-se ao controle coordenado de um grupo de robôs, denominado um sistema multirrobôs. Formações heterogêneas, compostas por diferentes tipos de agentes (aéreos, terrestres, aquáticos), são um bom exemplo da capacidade de integrar as vantagens individuais de cada robô para mi-

nimizar os aspectos frágeis. A alta mobilidade dos veículos aéreos não tripulados (VANT) permite que trabalhem em ambientes de difícil acesso e tenham uma visão mais ampla da área de trabalho. Já os veículos terrestres não tripulados (VTNT) têm muito mais autonomia, maior capacidade de carga e robustez. Assim, com a integração correta desses robôs, algumas tarefas podem ser melhor realizadas, como o transporte de materiais perigosos em locais de difícil acesso (Saska et al., 2016; Yuan et al., 2019), busca e resgate de vítimas em áreas de destroços ou ruínas (Beck et al., 2016; Baranzadeh and Savkin, 2017) e missões de escolta/emboçada (Antonelli et al., 2008).

O controle de formações de robôs é um tema amplamente difundido e discutido, por sua aplicabilidade, vantagens e desvantagens. Algumas técnicas de controle amplamente conhecidas podem ser adotadas, tais como o controle baseado em comportamento (Rossi et al., 2018; Lee and Chwa, 2018), a abordagem de estrutura virtual (Zhou et al., 2018) e o esquema de seguimento de líderes (Desai et al., 1998; Brandão et al., 2009).

O princípio básico da estratégia de estrutura virtual, adotada neste trabalho e em (Abbasi et al., 2017; Rabelo et al., 2021), consiste em considerar a forma geométrica associada à formação, no caso deste trabalho a linha reta que une os dois robôs em cada formação, e os robôs se movem de forma a minimizar os erros de forma e, em paralelo, para alcançar uma determinada postura ou trajetória de referência dada à formação. Tal estratégia pode ser implementada para estruturas fixas ou para estruturas que variam ao longo do tempo, como em (Low, 2014) e (Low, 2016), respectivamente.

Em geral, para cumprir uma tarefa atribuída à formação algumas subtarefas devem ser realizadas. Por exemplo, no caso de seguimento de trajetória por uma formação podemos destacar a subtarefa de manter a forma da formação, a subtarefa de mover a formação para assegurar o seguimento da trajetória e mesmo desviar-se de obstáculos imprevistos. Dependendo da situação, algumas subtarefas devem ter prioridade maior que outras, gerando um esquema de controle hierárquico. Se a rigidez da formação for obrigatória para a aplicação, por exemplo, a maior prioridade será atribuída ao controle da forma da estrutura, seguida da evasão de obstáculos, e, por fim, o controle da posição da estrutura. Por outro lado, se a flexibilidade for permitida, a sequência de prioridades deve ser, da mais alta para a mais baixa, a evasão de obstáculos, o controle da posição da formação e, por fim, o controle da forma da estrutura. Neste contexto, o controle baseado em espaço nulo é altamente aplicável (Antonelli et al., 2010; Rosales et al., 2016), pois é uma técnica capaz de particionar a tarefa principal criando objetivos distintos, correspondentes a tarefas conflitantes, sendo as tarefas de menor prioridade executadas apenas quando elas não entram em conflito com aquelas de maior prioridade. Um sinal de controle correspondente a cada subtarefa é gerado, e então combinados em um único, que será enviado aos robôs da formação.

O presente trabalho propõe um controle centralizado de uma formação heterogênea rígida, composta por três VTNTs e um VANT, utilizando a técnica de espaço nulo em conexão com uma estrutura virtual, tolerante a falhas

por troca e/ou emulação da unidade central. A metodologia adotada é genérica o suficiente para acomodar uma formação homogênea de dois VTNTs ou dois VANTs. A tarefa principal a ser realizada é o rastreamento de uma trajetória na forma de uma curva lemniscata, cujas frequências variam ao longo do tempo, para melhor excitar os controladores dos robôs.

O objetivo principal não é propor uma nova estratégia para o controle da formação, mas avaliar a possibilidade de definir prioridades na execução de uma tarefa principal. Paralelamente, estuda-se o comportamento do controlador de formação em situações problemáticas, como a falha de algum robô. Duas subtarefas são definidas, a saber, controlar a forma e a posição da formação, nesta ordem de prioridade. Apesar de estar fora do escopo deste trabalho, a estratégia adotada é capaz de incorporar outras subtarefas, desde que tenham as prioridades associadas a elas.

Para tratar de tais tópicos, o artigo é dividido, daqui em diante, em cinco seções, começando com a Seção 2, que descreve a formação e as variáveis envolvidas. Na sequência, a Seção 3 discute alguns aspectos do controle baseado em espaço nulo, caracterizando as subtarefas de controle de forma e posição. A seguir, a Seção 4 apresenta a metodologia adotada para realizar o experimento, seguida da Seção 5, na qual os resultados obtidos são expostos e analisados. Finalmente, a Seção 6 destaca as principais conclusões deste artigo e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2. A FORMAÇÃO LINHA NO ESPAÇO 3D

Dois agentes compõem a formação mais simples possível, uma linha. Neste trabalho, uma formação linha no espaço 3D é introduzida para lidar com uma formação heterogênea. Para uma melhor generalização, são usados três veículos terrestres tipo uniciclo modelo Pioneer 3-DX e um quadricóptero Parrot AR.Drone 2.0 (Figura 1). Matematicamente, cada formação é definida por suas variáveis de formação  $\mathbf{q}_p = [x \ y \ z]^T$ , que fornece a posição, no sistema de coordenadas global, e as variáveis de forma, que caracterizam sua aparência, dadas por  $\mathbf{q}_s = [\rho \ \alpha \ \beta]^T$ . Tais variáveis são a distância entre os dois robôs,  $\rho$ , e os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ , obtidos considerando as projeções de  $\rho$  nos planos  $XZ$  e  $YZ$ , respectivamente.

Por sua vez, conhecendo a posição 3D,  $\mathbf{h}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$  dos robôs, podemos descrever a formação de uma linha em termos de sua posição e forma. Portanto, existe uma transformação direta  $g$  que relaciona as variáveis do robô  $\mathbf{x} = [\mathbf{h}_1^T \ \mathbf{h}_2^T]^T$  e as de formação  $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_p^T \ \mathbf{q}_s^T]^T$ , dadas por  $\mathbf{q} = g(\mathbf{x})$ , onde

$$x = x_1, \quad y = y_1, \quad z = z_1, \quad (1a)$$

$$\rho = \|\mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_2\|, \quad (1b)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{x_2 - x_1}{\rho} \right), \quad (1c)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{y_2 - y_1}{\rho} \right). \quad (1d)$$

Além disso, há uma transformação inversa capaz de determinar a posição dos robôs quando as variáveis de formação são fornecidas, dada por

$$\mathbf{x} = g^{-1}(\tilde{\mathbf{q}}), \quad (2)$$

onde

$$x_1 = x, \quad y_1 = y, \quad z_1 = z \quad (3a)$$

$$x_2 = x_F + \rho \sin \alpha \quad (3b)$$

$$y_2 = y_F + \rho \sin \beta \quad (3c)$$

$$z_2 = z_F + \rho \sqrt{1 - \sin^2 \alpha - \sin^2 \beta}. \quad (3d)$$

Em ambas as transformações, os subscritos indicam a identificação do robô na formação, não importando se o agente é um VTNT ou VANT. Ou seja, a caracterização vale para qualquer formação de dois robôs.

Uma vez conhecidas as posições dos dois robôs, determina-se a configuração atual da formação,  $\mathbf{q}$ , que é comparada com a desejada,  $\mathbf{q}_d$ , o que permite determinar como cada robô deve se mover para reduzir o erro de formação  $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$ .

Tomando a primeira derivada de (2), obtém-se a relação de velocidade entre os robôs e a formação, dada por

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}}, \quad \text{com } \mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{x}} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}, \quad (4)$$

onde  $\mathbf{J}(\cdot)$  é a matriz Jacobiana.

O resultado de (4) pode ser considerado como o modelo cinemático da formação tipo linha, representado por

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\boldsymbol{\eta}, \quad (5)$$

onde  $\boldsymbol{\eta}$  é o sinal de controle da formação. Logo, assumindo

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{J}^{-1}[\dot{\tilde{\mathbf{q}}}_d + \mathbf{K} \tanh(\mathbf{L}\tilde{\mathbf{q}})], \quad (6)$$

em malha fechada tem-se

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{K} \tanh(\mathbf{L}\tilde{\mathbf{q}}) = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Dado que  $\mathbf{K}$  e  $\mathbf{L}$  são matrizes de ganho definidas positivas, então  $\tilde{\mathbf{q}} \rightarrow \mathbf{0}$  para  $t \rightarrow \infty$ , e as variáveis de formação convergem para os valores desejados.

Em (Brandão and Sarcinelli-Filho, 2016) o Esquema de Controle Multicamadas (MLCS) é aplicado para uma formação de  $n$ -robôs e tal conceito é expandido para guiar várias formações triangulares de VANTs de forma generalizada, ao invés de apenas uma formação triangular, tal como em Rosales et al. (2016). O MLCS possui um

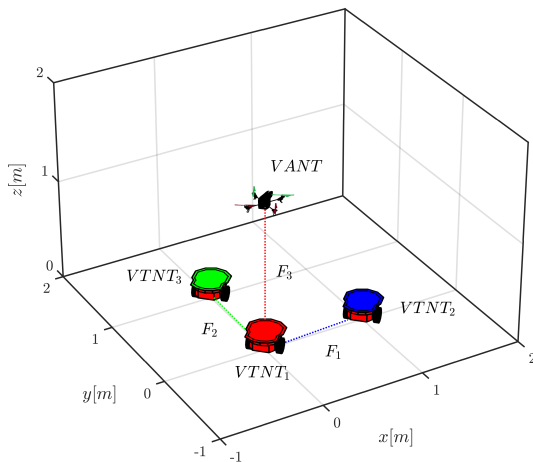


Figura 1. A caracterização da formação completa, composta por três VTNTs e um VANT.

conjunto de módulos independentes, cada um lidando com uma parte específica do controle de formação. Dito de outra forma, esta abordagem trata cada módulo como uma sub-formação, que juntas compõem toda a formação. Esta mesma abordagem baseada em MLCS é aplicada neste trabalho, onde a formação base é uma estrutura virtual caracterizada por uma linha reta no espaço 3D.

### 3. O CONTROLE BASEADO EM ESPAÇO NULO

A técnica de espaço nulo pode ser considerada uma forma analítica de implementar a arquitetura de subsunção, em particular quando se trata de sistemas multirrobôs. Ela permite dividir uma tarefa em um conjunto de subtarefas de diferentes prioridades, executando as subtarefas de menor prioridade somente quando não conflitam com as de maior prioridade (Antonelli et al., 2010; Rosales et al., 2016). Usando esta abordagem, uma determinada subtarefa recebe a prioridade mais baixa quando é projetada no espaço nulo da tarefa que tem a prioridade imediatamente acima. No caso de duas subtarefas, o caso aqui abordado, a subtarefa de menor prioridade é projetada no espaço nulo da subtarefa de maior prioridade. Em particular, o espaço nulo está associado a uma matriz Jacobiana, conforme detalhado em Antonelli et al. (2010). Neste caso,

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p(\mathbf{x}) \\ \mathbf{J}_s(\mathbf{x}) \end{bmatrix}, \quad \text{com } \mathbf{J}_p, \mathbf{J}_s \in \mathbb{R}^{3 \times 6}. \quad (8)$$

Para controlar a formação da linha aqui considerada as duas subtarefas consideradas são o controle da forma e da posição da formação. Assim, deve-se propor

$$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}_s + (\mathbf{I}_{6 \times 6} - \mathbf{J}_s^\# \mathbf{J}_s) \boldsymbol{\eta}_p, \quad (9)$$

para dar a mais alta prioridade ao controle da forma de formação, ou

$$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}_p + (\mathbf{I}_{6 \times 6} - \mathbf{J}_p^\# \mathbf{J}_p) \boldsymbol{\eta}_s, \quad (10)$$

para dar a mais alta prioridade ao controle da posição da formação. Neste caso,

$$\boldsymbol{\eta}_s = \mathbf{J}_s^\# (\dot{\tilde{\mathbf{q}}}_{sd} + \mathbf{K}_1 \tanh(\mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{q}}_s)) \quad \text{e}$$

$$\boldsymbol{\eta}_p = \mathbf{J}_p^\# (\dot{\tilde{\mathbf{q}}}_{pd} + \mathbf{K}_2 \tanh(\mathbf{L}_2 \tilde{\mathbf{p}}_p)),$$

onde  $\mathbf{K}_i$  e  $\mathbf{L}_i$  são matrizes de ganho definidas positivas.

### 4. METODOLOGIA

Esta seção descreve os procedimentos adotados para executar os experimentos da Seção 5 e para obter esses dados.

#### 4.1 A estrutura da formação heterogênea

A formação completa envolve três formações linha, denotadas por  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ , conforme a Figura 1. Nesta figura pode-se perceber que os robôs VTNT<sub>1</sub> e VTNT<sub>2</sub> pertencem à formação  $F_1$ , VTNT<sub>1</sub> e VTNT<sub>3</sub> à formação linha  $F_2$ , e, finalmente, VTNT<sub>1</sub> e o VTNT<sub>2</sub> à formação linha  $F_3$ . O robô VTNT<sub>1</sub> está presente em todas as formações, e, portanto, pode-se assumir que ele é a referência para todos os outros, que devem manter uma forma específica em relação a ele. As variáveis de forma desejadas para cada formação são  $\mathbf{q}_{sd1} = [1 \text{ m } \pi/4 \text{ rad } \pi/4 \text{ rad}]^T$ ,  $\mathbf{q}_{sd2} = [1 \text{ m } \pi/4 \text{ rad } -\pi/4 \text{ rad}]^T$  e  $\mathbf{q}_{sd3} = [1, 5 \text{ m } 0 \text{ rad } 0 \text{ rad}]^T$ .

Note-se que cada formação pode ter sua própria ordem de prioridades. Porém, como o objetivo deste trabalho é uma missão de escolta, as três formações têm o controle de forma como a sub-tarefa de maior prioridade.

#### 4.2 A trajetória de referência

A missão para toda a formação (os quatro robôs) é um rastreamento de trajetória, com o VANT decolando e pousando em uma plataforma em alguns dos VTNTs. Inicialmente o VANT é comandado a decolar da plataforma no VTNT<sub>1</sub>, permanecendo pairando em 1.00m acima do solo. Após 5s, tempo suficiente para o quadrimotor se estabilizar no ar, inicia-se o rastreamento da trajetória

$$x_d = \sin 4\pi t_p, \quad y_d = \sin 8\pi t_p, \quad z_d = 0.0, \quad (11)$$

com  $t_p(t) = 3\left(\frac{t}{100}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{100}\right)^3$ , para  $0s \leq t \leq 100s$ .

A peculiaridade de tal parametrização é variar a frequência associada à trajetória ao longo do tempo, de forma que as velocidades de referência iniciem em zero e aumentem suavemente, até atingir o máximo. A partir daí elas diminuem, na mesma proporção, e, ao final de 100s, voltam a ser zero.

#### 4.3 Uma situação realística: a falha do VTNT

Aos 65s um sinal de controle é enviado ao robô VTNT<sub>1</sub>, fazendo-o parar, simulando uma possível falha (em um caso real poderia ser uma falha de comunicação, um desligamento de energia, impossibilidade de movimento, etc.). Percebendo que tal robô parou de responder, um robô virtual assume seu lugar na formação, para ser a referência aos demais VTNTs. No entanto, para a formação  $F_3$  (a formação VTNT-VANT), uma vez que o VANT precisa pousar em qualquer um dos VTNTs no final da missão, a estratégia deve ser diferente. Assim, para a formação  $F_3$  altera-se o VTNT<sub>1</sub> para o próximo VTNT ativo, neste caso o VTNT<sub>2</sub>. Então, a referência de posição para  $F_3$  deixa de ser a de (11) e passa a ser a mesma referência enviada para VTNT<sub>2</sub>, calculada pelo controlador de  $F_1$ .

A ideia é bastante simples: se o VTNT parado pertence a mais de uma formação, um robô virtual assume o seu lugar em caso de falha. Além disso, se tal VTNT fizer parte de uma formação VANT-VTNT, o VANT deve manter a forma em relação ao VTNT que sucede aquele que parou de se mover.

Aos 95s é iniciado o procedimento de aproximação do VANT até o VTNT<sub>2</sub>, para pouso sobre este. Este procedimento consiste em reduzir o valor de  $\rho_d$  de 1,5m para 0,5m, reduzindo a distância entre os dois robôs. Aos 98s assume-se que o VANT já pousou e o VTNT<sub>2</sub> continua se movendo, com velocidade decrescente, até parar, aos 100s.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui são discutidos resultados experimentais obtidos para o controlador baseado em espaço nulo com prioridade de forma para uma missão de rastreamento de trajetória por uma formação heterogênea de três Pioneer 3-DX e um AR.Drone 2.0. As informações sobre suas posições e orientações são fornecidas por meio do sistema de captura de movimento *OptiTrack*, configurado com quatro câmeras, integrado à unidade de controle central. Uma comunicação

Wi-Fi compartilha dados entre os robôs e a unidade de controle central. Uma plataforma de pouso é instalada no topo de cada VTNT, para permitir que o VANT decole e pouse em alguns deles. Simula-se, também, a falha de um dos VTNTs, para e verificar se neste caso a tarefa principal ainda pode ser realizada.

Como a maior prioridade é manter a forma, se o robô pertencente a todas as formações falhar, os demais robôs tendem a manter a forma desejada em relação a ele, interrompendo seus movimentos. Por isso, a estratégia de troca de líder é bastante importante, garantindo a continuidade do movimento da formação.

Para uma melhor compreensão do experimento, o leitor também é incentivado a assistir o vídeo disponível em <https://youtu.be/Lyp0swdJ3E0>. Outros casos também são introduzidos no vídeo, como o caso da realização da tarefa sem falha nos VTNTs, e um experimento em que o VANT muda seu ângulo de guinada para seguir a orientação do VTNT a ele associado. Nesta seção, porém, trata-se apenas do caso em que a referência para o ângulo de guinada do VANT é fixada em zero.

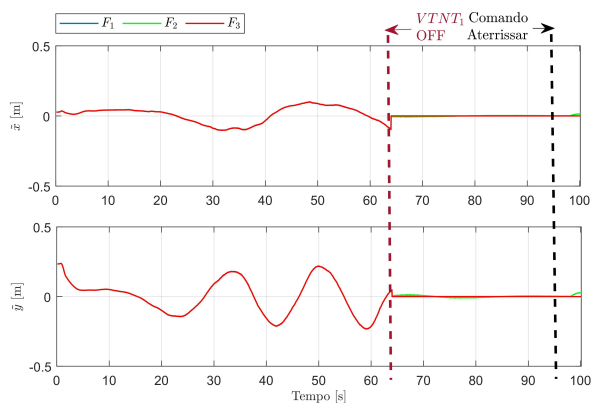
Para uma melhor interpretação, as cores dos gráficos e figuras apresentadas que correspondem aos robôs terrestres são vermelho, azul e verde, enquanto laranja representa o robô aéreo.

A tarefa principal consiste em rastrear a trajetória lemniscata de (11). Também, mesmo que algum dos robôs sofra algum dano permanente, os demais devem continuar executando a tarefa principal. Na Figura 2 é possível verificar o desempenho de cada uma das três formações quanto aos erros de posição e forma. Como esperado, o controlador atenua os erros de forma melhor do que os de posição. O erro  $\tilde{y}$  é superior em termos de valores de magnitude e número de oscilações, em comparação com  $\tilde{x}$ , devido às características intrínsecas da trajetória de referência, para a qual a frequência associada ao eixo- $y$  é o dobro da associada ao eixo- $x$ .

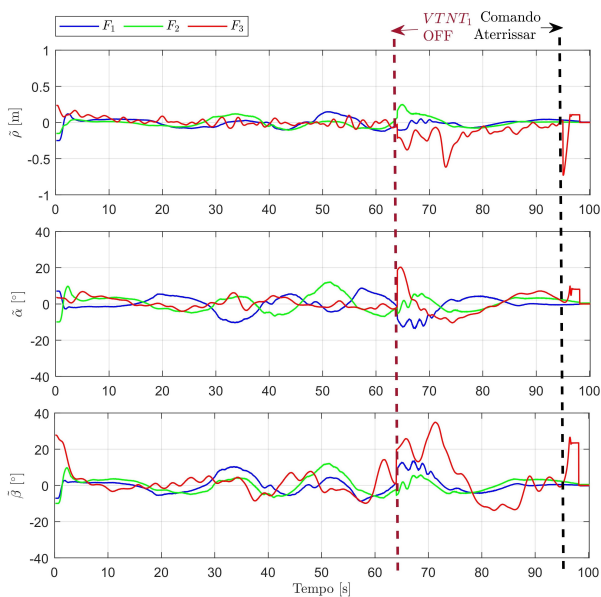
Após a falha do VTNT<sub>1</sub> o erro de posição para todas as formações vai a zero, pelo fato de poder atingir e seguir instantaneamente a referência desejada.

Em uma situação normal, como antes do instante de tempo 65s, os erros de forma são bastante baixos, ficando abaixo de 10° para os ângulos e abaixo de 0,15m para a distância  $\rho$ . Alguns picos maiores ocorrem nas variáveis de forma após VTNT<sub>1</sub> parar, principalmente por causa das variáveis do VANT. Observe-se que, diferentemente dos outros robôs, cujas posições desejadas são fornecidas a partir do robô virtual, para o VANT as variáveis de referência vêm de VTNT<sub>2</sub>. Assim, o erro aumenta durante o regime transitório, pois o VANT agora está relacionado a outro VTNT.

Após a simulação de uma falha, aproximadamente aos 15s, os erros de forma convergem para zero novamente, significando que o VANT começou a voar acima do VTNT<sub>2</sub>, novamente rastreamento a trajetória. O procedimento de pouso é concluído muito rapidamente, devido à rápida convergência de  $\tilde{\rho}$  para zero após um passo negativo de 1m.



(a) Erros nas variáveis de posição.



(b) Erros nas variáveis de forma.

Figura 2. Erros nos experimentos.

A trajetória efetivamente percorrida pelos três VTNTs ao longo do experimento é mostrada na Figura 3. Percebe-se que a tarefa é realizada com pequenos erros, e que mesmo após a falha de um dos VTNTs a tarefa principal foi realizada com sucesso.

Observe-se que na Figura 3 sob a trajetória vermelha há uma perturbação na linha pontilhada vermelha, o que acontece porque VTNT<sub>1</sub> está parado mas seu controlador continua calculando suas posições de referência.

O comportamento dos demais robôs, em azul e verde, pode ser melhor compreendido analisando a Figura 4, em que se pode notar um transitório após a falha, com oscilações nas velocidades linear e angular. Em apenas 5s tais variações param, significando que os VTNTs reais conseguiram alcançar o robô virtual que substituiu o VTNT<sub>1</sub>, que tinha as velocidades de referência (em vermelho) fixadas em zero.

A falha do robô e o processo de troca podem ser melhor analisados na Figura 5, onde tais casos são destacados. Após uma volta completa, a trajetória de referência começa a desacelerar gradualmente e o VANT continua mantendo a forma de formação desejada em relação ao VTNT vermelho (ver Figura 5a). Quando o VTNT vermelho

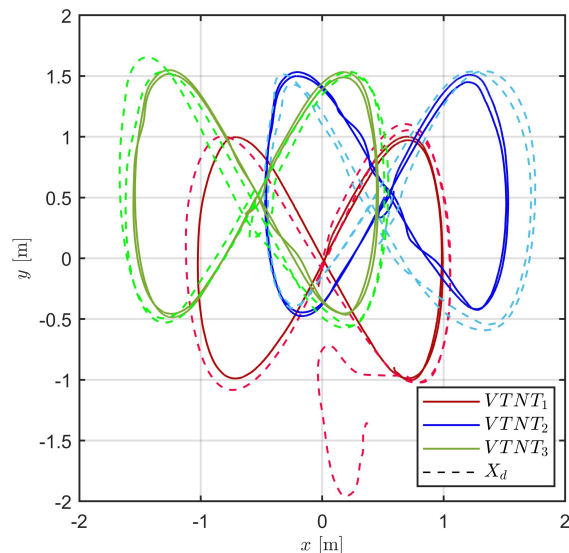


Figura 3. Trajetória percorrida pelos robôs terrestres.

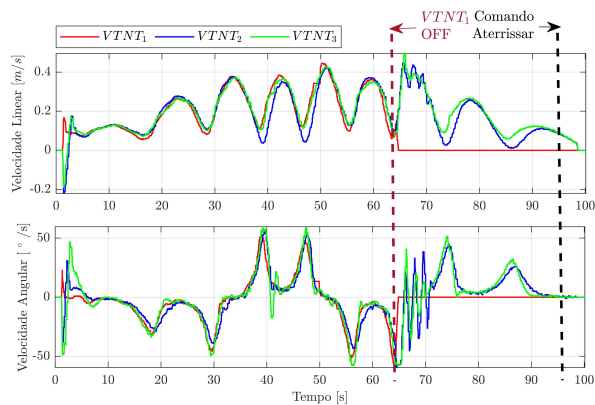


Figura 4. Sinais de controle dos VTNTs.

para (simulando uma falha), aos 65s, o robô azul passa imediatamente a ser a referência de forma para o VANT. A partir do momento em que o controlador de formação de  $F_3$  começa a fazer referência ao novo líder para gerar as referências para o VANT, a trajetória torna-se rosa na Figura 5b. Perto do instante 100s o procedimento de pouso começa, e o VANT pousa no VTNT<sub>2</sub>.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo é discutida uma estratégia de controle baseada em espaço nulo para uma formação de três VTNTs e um VANT, incluindo a possibilidade de uma falha do VTNT. Os controladores de cada formação parcial (três formações de dois robôs cada, duas VTNT-VTNT e uma VTNT-VANT) tiveram a prioridade manter a forma de cada formação, e realizaram o rastreamento de uma trajetória tipo lemniscata. Os resultados experimentais aqui discutidos corroboram a estrutura de controle proposta. Os principais aspectos validados experimentalmente são os pequenos erros nas variáveis de forma, a confiabilidade diante de mudanças bruscas de referência e a garantia de que a tarefa principal continue sendo executada na presença de falhas.

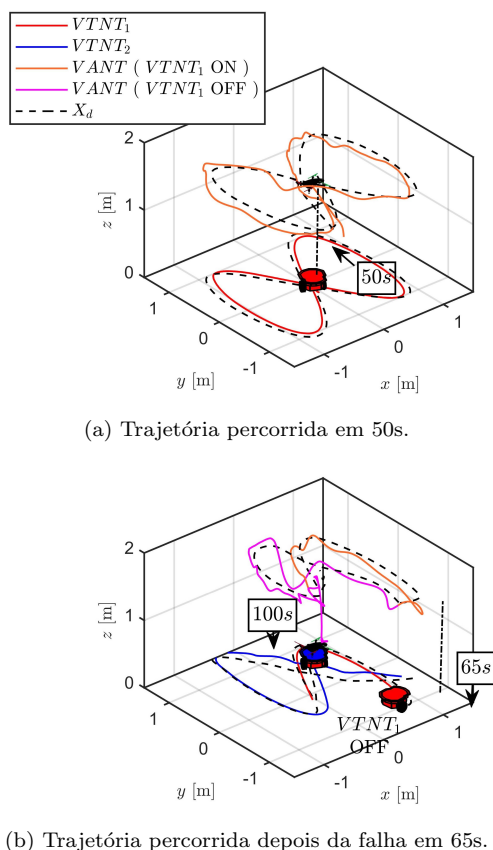


Figura 5. Trajetória percorrida pelo VANT e seu VTNT de referência.

Como trabalhos futuros será implementada uma estratégia para evitar obstáculos, a ser incorporada ao controlador baseado em espaço nulo como uma terceira sub-tarefa. Outro objetivo é adicionar um segundo VANT a toda a formação, criando uma formação VANT-VANT, para assim validar a generalidade da modelagem de formação tipo linha no espaço 3D.

## REFERÊNCIAS

- Abbasi, Y., Moosavian, S.A.A., and Novinzadeh, A.B. (2017). Formation control of aerial robots using virtual structure and new fuzzy-based self-tuning synchronization. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 39(12), 1906–1919.
- Antonelli, G., Arrichiello, F., and Chiaverini, S. (2008). The entrapment/escorting mission. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 15(1), 22–29. doi:10.1109/M-RA.2007.914932.
- Antonelli, G., Arrichiello, F., and Chiaverini, S. (2010). The nsb control: a behavior-based approach for multi-robot systems. *Paladyn*, 1(1), 48–56.
- Baranzadeh, A. and Savkin, A.V. (2017). A distributed control algorithm for area search by a multi-robot team. *Robotica*, 35(6), 1452–1472.
- Beck, Z., Teacy, L., Rogers, A., and Jennings, N.R. (2016). Online planning for collaborative search and rescue by heterogeneous robot teams. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems*, 1024–1033. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- Brandão, A.S. and Sarcinelli-Filho, M. (2016). On the guidance of multiple uav using a centralized formation control scheme and delaunay triangulation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 84(1-4), 397–413.
- Brandão, A.S., Sarcinelli-Filho, M., Carelli, R., and Bastos-Filho, T.F. (2009). Decentralized control of leader-follower formations of mobile robots with obstacle avoidance. In *2009 IEEE International Conference on Mechatronics*, 1–6. Malaga, Spain.
- Desai, J.P., Ostrowski, J., and Kumar, V. (1998). Controlling formations of multiple mobile robots. In *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 4, 2864–2869. IEEE.
- Ge, X., Han, Q.L., Ding, D., Zhang, X.M., and Ning, B. (2018). A survey on recent advances in distributed sampled-data cooperative control of multi-agent systems. *Neurocomputing*, 275, 1684 – 1701. doi:https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.10.008.
- Lee, G. and Chwa, D. (2018). Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance. *Intelligent Service Robotics*, 11(1), 127–138. doi:10.1007/s11370-017-0240-y.
- Low, C.B. (2014). A flexible virtual structure formation keeping control design for nonholonomic mobile robots with low-level control systems, with experiments. In *Intelligent Control (ISIC), 2014 IEEE International Symposium on*, 1576–1582. IEEE.
- Low, C.B. (2016). An analysis on flexible formations of nonholonomic mobile robots: Motion planning and control perspectives. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 306–313. IEEE.
- Rabelo, M.F.S., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2021). Landing a uav on static or moving platforms using a formation controller. *IEEE Systems Journal*, 15(1), 37–45. doi:10.1109/JSYST.2020.2975139.
- Rosales, C., Leica, P., Sarcinelli-Filho, M., Scaglia, G., and Carelli, R. (2016). 3d formation control of autonomous vehicles based on null-space. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 84(1-4), 453–467.
- Rossi, F., Bandyopadhyay, S., Wolf, M., and Pavone, M. (2018). Review of multi-agent algorithms for collective behavior: a structural taxonomy. *IFAC-PapersOnLine*, 51(12), 112–117. doi:10.1016/j.ifacol.2018.07.097.
- Saska, M., Vonásek, V., Chudoba, J., Thomas, J., Loianno, G., and Kumar, V. (2016). Swarm distribution and deployment for cooperative surveillance by micro-aerial vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 84(1-4), 469–492.
- Yuan, C., Liu, Z., and Zhang, Y. (2019). Learning-based smoke detection for unmanned aerial vehicles applied to forest fire surveillance. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93(1), 337–349. doi:10.1007/s10846-018-0803-y.
- Zhang, H., Li, D., and He, Y. (2018). Multi-robot cooperation strategy in game environment using deep reinforcement learning. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 886–891. doi: 10.1109/ROBIO.2018.8665165.
- Zhou, D., Wang, Z., and Schwager, M. (2018). Agile coordination and assistive collision avoidance for quadrotor swarms using virtual structures. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(4), 916–923. doi:10.1109/TRO.2018.2857477.