

# CONTROLE LÍDER-SEGUIDOR DE UMA FORMAÇÃO VANT-VTNT

ALEXANDRE S. BRANDÃO\*, IGOR H. B. PIZETTA†, MARIO SARCEINELLI FILHO†, RICARDO CARELLI‡

\**Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas  
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, Brasil*

†*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória – ES, Brasil*

‡*Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina*

Emails: alexandre.brandao@ufv.br, igorpizetta@gmail.com, mario.sarcinelli@ele.ufes.br,  
rcarelli@inaut.unsj.edu.ar

**Abstract**— This paper proposes a controller to guide a leader-follower formation involving a UAV (the follower) and a UGV (the leader) to accomplish positioning and trajectory tracking missions. The asymptotic stability of the closed-loop system is proven, and experimental results are presented and discussed, validating the proposed controller.

**Keywords**— Leader-follower formations, Formation control, UAV, Aerial/autonomous robotics.

**Resumo**— Este artigo propõe um controlador para a navegação de uma formação líder-seguidor envolvendo um VANT (seguidor) e um VTNT (líder), no cumprimento de missões de posicionamento e seguimento de trajetória. A estabilidade assintótica do sistema em malha fechada é provada, e resultados experimentais são apresentados e discutidos, validando o controlador proposto.

**Palavras-chave**— Formações líder-seguidor, Controle de formação, VANT, Robótica aérea/autônoma.

## 1 Introdução

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) é crescente, tanto em aplicações militares quanto civis, tais como inspeção em ambientes hostis, manutenção de infraestruturas e agricultura de precisão (Hsieh et al., 2007; Kendoul et al., 2010). Nesses casos, o uso de um VANT é vantajoso, devido à sua mobilidade tridimensional, quando comparado ao uso de um ou vários veículos terrestres não tripulados (VTNTs). Entretanto, nada impede que tais veículos trabalhem de forma cooperativa. Afinal, é fato que algumas tarefas são executadas de forma mais eficiente por um grupo de robôs do que por um só robô altamente especializado. Inspeção e vigilância de grandes áreas (Hougen et al., 2000; Chaimowicz and Kumar, 2004; Hsieh et al., 2007), localização e desarmamento de minas terrestres (MacArthur et al., 2005), missões de busca e resgate (Jennings et al., 1997), missões de escolta e acompanhamento (Antonelli et al., 2008), dentre outras, são exemplos deste tipo de tarefa. No caso específico de uma cooperação VANT-VTNT, um VANT pode usar sua cota vertical para observar uma grande área em menos tempo, enquanto um VTNT pode observar um ponto específico da cena com mais eficiência, aproximando-se de tal ponto (Grocholsky et al., 2006; Duan and Liu, 2010).

Para tratar do controle coordenado de formação, três abordagens são apresentadas na literatura, para conduzir os membros da formação mantendo uma forma geométrica predeterminada. São elas: formação líder-seguidor, método de

estruturas virtuais e método baseado em comportamentos. Selecionada a técnica a ser utilizada para estabelecer a formação, é necessário definir a estrutura de controle a ser utilizada, que pode ser centralizada (existe um agente responsável por concentrar todas as informações do grupo) ou descentralizada (cada robô é responsável por analisar o ambiente e determinar seus sinais de controle para se manter em formação).

No que diz respeito à cooperação VANT-VTNTs, em (MacArthur et al., 2005) um sistema multi-robôs visa estender a capacidade de sensoriamento de VTNTs combinada à capacidade de percepção do ambiente quando um VANT é acrescentado à formação. Nesse caso, o VANT agregado ao grupo leva consigo equipamentos sensoriais, tais como câmara estéreo, GPS e bússola digital. As informações obtidas são enviadas a uma base de controle, que distribui os dados para os robôs em terra. Estes dados são essenciais para a geração de mapas de caminhos e a localização e isolamento de áreas onde se simula a presença de minas terrestres. Comumente, um sistema de visão computacional a bordo do VANT auxilia a localização dos robôs em terra e a determinação da posição do veículo aéreo em relação a eles.

Em (Michael et al., 2007) é proposto um controle descentralizado de um grupo de robôs móveis terrestres e um veículo aéreo não tripulado. O time de VTNTs deve se formar segundo uma estrutura elipsoidal, cujos estados (posição, orientação e focos) são computados a partir da posição relativa de cada ente, bem como observados pelo sistema de visão a bordo do

VANT. Imagens aéreas são enviadas aos VTNTs para realimentação do controle de formação.

Considerando alguns trabalhos de sistemas cooperativos, em (Frietsch et al., 2008) um VANT segue um pelotão de VTNTs através de um controlador servo visual e um sistema de coordenadas georreferenciadas é utilizado para estimar a postura dos VTNTs. Em (Grocholsky et al., 2006) uma tarefa de busca, identificação e localização de um alvo é proposta, utilizando uma formação heterogênea composta por aeronaves e veículos terrestres trabalhando de forma descentralizada. Já em (Duan and Liu, 2010) missões táticas em campos de batalha utilizando múltiplos robôs heterogêneos são sugeridas, enfatizando a baixa capacidade de localizar e manipular padrões a nível terrestre por um VANT, e a debilidade de deslocamento rápido de um VTNT entre obstáculos. Em contraste, os autores destacam a eficiência no cumprimento da missão, quando o compartilhamento de informação entre múltiplos VANTs/VTNTs é realizado.

Neste contexto, este trabalho trata do controle de formação centralizado de um VANT e um VTNT na configuração líder-seguidor, tendo por base odometria tridimensional como método de obtenção da informação sensorial necessária para a manutenção da formação.

## 2 Controle de Formação de um VANT e um VTNT

Esta seção propõe um esquema de controle centralizado para uma formação líder-seguidor envolvendo um VANT e um VTNT. Nessa proposta o VANT (nomeado como seguidor) deve buscar dinamicamente o robô terrestre (rotulado como líder) e manter uma distância predefinida em relação a ele. Comumente, o VANT utiliza somente as informações do ambiente que o circunda, as quais são obtidas através dos sensores levados a bordo. Entretanto, nesse trabalho as informações de posicionamento global dos veículos serão determinadas pela unidade centralizadora de informação, a qual receberá os dados de odometria dos veículos envolvidos na formação. Dessa forma, torna-se possível o cálculo da distância relativa entre eles.

Nesse tipo de estratégia, o robô terrestre deve executar uma missão preestabelecida, sendo ele guiado localmente por um controlador cinemático, enquanto o veículo aéreo é estabilizado e guiado à posição desejada (para manutenção da formação) pelo controlador dinâmico proposto em (Brandão et al., 2012).

### 2.1 Modelo Cinemático do VANT e do VTNT

Considerando um VANT posicionado a uma distância qualquer com respeito ao sistema car-

tesiano global  $\langle g \rangle$ , seu movimento é governado pela ação combinada de três velocidades lineares  $u_{hx}$ ,  $u_{hy}$ ,  $u_{hz}$  definidas pela regra da mão direita no referencial do VANT  $\langle h \rangle$ , e uma velocidade angular  $\omega_h$ , como mostrado na Figura 1.

Cada velocidade linear aponta para um eixo do sistema de referências da aeronave  $\langle h \rangle$ .  $u_{hz}$  sempre aponta para cima, na mesma direção do eixo  $z$ , enquanto  $u_{hx}$  e  $u_{hy}$  apontam na direção frontal e lateral esquerda, respectivamente. A velocidade angular  $\omega_h$  rotaciona o referencial  $\langle h \rangle$  em torno do eixo  $z_h$ , no sentido anti-horário, considerando uma vista de topo. Dessa forma, em uma forma similar àquela mostrada em (Salinas et al., 2010), as equações cinemáticas que envolvem a posição e orientação de guinada de um VANT (nesse caso, ilustrado por um helicóptero miniatura) são descritas por

$$\begin{aligned}\dot{x}_h &= u_{hx} \cos \psi_h - u_{hy} \sin \psi_h, \\ \dot{y}_h &= u_{hx} \sin \psi_h + u_{hy} \cos \psi_h, \\ \dot{z}_h &= u_{hz}, \\ \dot{\psi}_h &= \omega_h,\end{aligned}\quad (1)$$

onde  $x_h$ ,  $y_h$ ,  $z_h$  e  $\psi_h$  são todas medidas com respeito ao sistema de referência inercial  $\langle g \rangle$  (o ponto de interesse para o controle é o próprio centro de gravidade da aeronave).

Note-se que as variáveis de postura e velocidades da aeronave recebem o subscrito  $h$ , para indicar que se trata de uma aeronave, i.e.,  $\mathbf{x}_h$  e  $\dot{\mathbf{x}}_h$ , no intuito de diferenciar da postura e velocidade de um veículo terrestre, daqui em diante representadas por  $\mathbf{x}_r$  e  $\dot{\mathbf{x}}_r$ , respectivamente.

Assumindo um caso geral em que o robô líder também é um veículo aéreo, seu modelo cinemático pode ser definido de forma similar a (1). Nesse caso, a estrutura da formação referenciada em  $\langle g \rangle$  pode ser expressa pelas distâncias entre os robôs nos três eixos ortogonais  $x_{rh} = x_r - x_h$ ,  $y_{rh} = y_r - y_h$ , e  $z_{rh} = z_r - z_h$ , e pelo erro de orientação de guinada  $\psi_{rh} = \psi_r - \psi_h$ . Logo, o modelo cinemático de formação, em coordenadas cartesianas, é dado por

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x}_{rh} \\ \dot{y}_{rh} \\ \dot{z}_{rh} \\ \dot{\psi}_{rh} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -c_{\psi_h} & s_{\psi_h} & 0 & 0 \\ -s_{\psi_h} & -c_{\psi_h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{hx} \\ u_{hy} \\ u_{hz} \\ \omega_h \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} u_{rx}c_{\psi_r} - u_{ry}s_{\psi_r} - a_{rx}\omega_r s_{\psi_r} - a_{ry}\omega_r c_{\psi_r} \\ u_{rx}s_{\psi_r} + u_{ry}c_{\psi_r} + a_{rx}\omega_r c_{\psi_r} - a_{ry}\omega_r s_{\psi_r} \\ u_{rz} \\ \omega_r \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (2)$$

Assumindo que o líder da formação é um veículo terrestre, o controle de formação passa a ser um caso particular de (2), conforme ilustrado na Figura 1. Considerando um robô móvel do tipo unicycle, seu modelo cinemático é dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_r & -a_{rx} \sin \psi_r \\ \sin \psi_r & a_{rx} \cos \psi_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{rx} \\ \omega_r \end{bmatrix}, \quad (3)$$

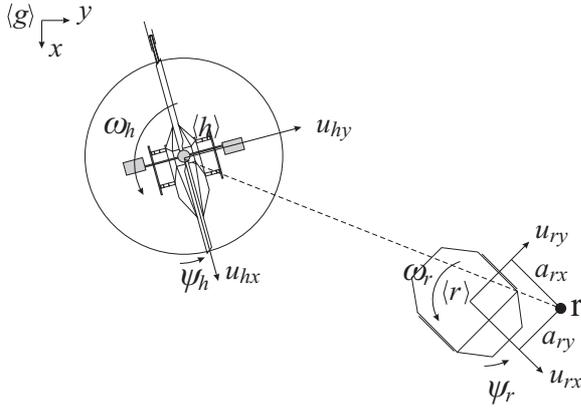


Figura 1: Esquema de controle líder-seguidor (vista de topo).

onde  $u_{rx}$  e  $\omega_r$  são, respectivamente, as velocidades linear e angular,  $\mathbf{r} = [x_r \ y_r]^T$  é um vetor contendo as coordenadas do ponto de interesse, representadas em  $\langle r \rangle$ ,  $\psi_r$  é sua orientação e  $a_{rx}$  é a distância perpendicular do ponto de interesse (ponto de controle) para o ponto no meio do eixo virtual que une as rodas do robô terrestre. Para o caso abordado, tem-se que as velocidades lateral  $u_{ry}$  e normal  $u_{rz}$  são iguais a zero, assim como o deslocamento lateral do ponto de controle  $a_{ry}$ , simplificando o problema de controle.

**Nota 1** Ao descrever um sistema líder-seguidor conforme (2), um controlador de posicionamento e seguimento de trajetória pode ser proposto para qualquer configuração de veículos, que apresentem ou não restrições holonômicas no espaço 2-D ou 3-D, ou seja, a equação descreve um caso geral usando tal estratégia de cooperação.

## 2.2 Esquema de Formação Líder-Seguidor

Para propor um controlador de alto nível baseado em cinemática inversa, escreve-se (2) como

$$\dot{\mathbf{x}}_{rh} = f(\mathbf{x}_h)\mathbf{u}_h + \mu(\mathbf{x}_r, \dot{\mathbf{x}}_r), \quad (4)$$

onde  $\mathbf{x}_{rh} = [x_{rh} \ y_{rh} \ z_{rh} \ \psi_{rh}]^T$  é o vetor de formação e  $\mathbf{u}_h = [u_{hx} \ u_{hy} \ u_{hz} \ \omega_h]^T$  é a velocidade de referência enviada ao VANT em seu próprio sistema de referência  $\langle h \rangle$ , a fim de que ele alcance e estabeleça a formação desejada.

Na sequência, adotando o sinal de controle

$$\mathbf{u}_h = f^{-1}(\mathbf{x}_h)(\boldsymbol{\eta}_{rh} - \mu(\mathbf{x}_r, \dot{\mathbf{x}}_r)), \quad (5)$$

onde  $\boldsymbol{\eta}_{rh} = \dot{\mathbf{x}}_{rh_d} + \boldsymbol{\kappa}_1 \tanh \boldsymbol{\kappa}_2 \tilde{\mathbf{x}}_{rh}$ , e  $\boldsymbol{\kappa}_1$  e  $\boldsymbol{\kappa}_2$  são matrizes de ganho diagonais definidas positivas, e  $\tilde{\mathbf{x}}_{rh} = \mathbf{x}_{rh_d} - \mathbf{x}_{rh}$  é o erro de formação, tem-se a equação de malha fechada dada por

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_{rh} + \boldsymbol{\kappa}_1 \tanh \boldsymbol{\kappa}_2 \tilde{\mathbf{x}}_{rh} = 0. \quad (6)$$

Sabendo que o controlador do VANT é proposto com base no sistema de referência inercial

$\langle g \rangle$ , (2) é aplicada em  $\mathbf{u}_h$  para representá-lo em tal sistema de referência. Após obter as velocidades lineares e angular do VANT representadas no referencial inercial, essas podem ser integradas para determinar a postura desejada  $\mathbf{X}_{h_d}$  da aeronave. A Figura 2 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle proposto. Note-se que o sobrescrito esquerdo indica o sistema de referência correspondente.

## 2.3 Análise da Estabilidade do Sistema

A fim de analisar a estabilidade do sistema de malha fechada correspondente ao controle de formação líder-seguidor através da teoria de Lyapunov, a função candidata

$$V(\tilde{\mathbf{x}}_{rh}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}_{rh}^T \tilde{\mathbf{x}}_{rh} > 0 \quad (7)$$

é proposta. Tomando sua primeira derivada temporal e usando (6), tem-se que

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{x}}_{rh}) = -\tilde{\mathbf{x}}_{rh}^T \boldsymbol{\kappa}_1 \tanh \boldsymbol{\kappa}_2 \tilde{\mathbf{x}}_{rh} < 0, \quad (8)$$

o que indica uma convergência assintótica dos erros nas variáveis de estado para o ponto de equilíbrio atrativo, i.e.,  $\tilde{\mathbf{x}}_{rh} \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$ . Em outras palavras, as variáveis de formação assumem os valores desejados assintoticamente, enquanto a navegação cooperativa é executada.

**Nota 2** Para realização de uma navegação cooperativa descrita por (2) utilizando o controlador proposto em (5), é necessário obter as velocidades do robô líder durante a navegação em formação. Caso isto não seja possível, o robô seguidor (nesse caso, o VANT) será “arrastado” pelos erros de formação, para que o objetivo de controle seja cumprido. Entretanto, como a proposta aqui apresentada é uma estratégia de controle centralizada, tais velocidades podem ser transmitidas para a estação de controle da aeronave. Por sua vez, caso uma estratégia de controle de formação descentralizada esteja sendo usada, tais velocidades devem ser estimadas, utilizando, por exemplo, técnicas de visão computacional e homografia.

**Nota 3** As velocidades longitudinal, lateral, normal e angular do robô líder podem ser estimadas a partir de (2), caso se conheça a evolução temporal das variáveis de formação e a velocidade do robô seguidor (nesse caso, o VANT).

**Nota 4** É importante enfatizar que a formação líder-seguidor é um sistema de múltiplos períodos de amostragem. Em outras palavras, o tempo de resposta relativo à dinâmica do VANT é menor que o do robô terrestre. Neste sentido, o controlador de voo deve ser capaz de manter a estabilização do veículo até que uma nova referência de controle seja dada. Ressaltando que as

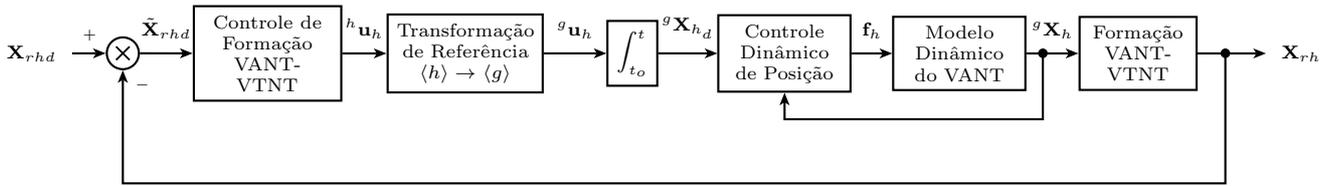


Figura 2: Diagrama de blocos do esquema de controle líder-seguidor envolvendo um VANT e um VTNT.

referências do controle de formação líder-seguidor são dadas em intervalos de tempo referentes ao maior dentre os tempos de resposta dos robôs incluídos na formação.

### 3 Resultados e Discussão

A validação experimental da estratégia de formação líder-seguidor é realizada utilizando o robô móvel Pioneer 3-DX (guiado pelo controlador proposto em (Brandão et al., 2013)) e um quadrimotor ArDrone Parrot (o seguidor). Para determinação da postura corrente dos veículos, utilizou-se odometria, uma vez que nenhum sistema de posicionamento global estava disponível para a realização dos experimentos. Dessa forma, para o caso do robô móvel as velocidades linear e angular foram integradas levando em consideração o modelo cinemático do veículo. Uma estratégia similar foi adotada para o veículo aéreo, tendo em mente que seu modelo cinemático apresenta três velocidades lineares e uma angular.

Nos experimentos realizados, e descritos na sequência, a formação desejada é igual a  $\mathbf{x}_{rhd} = [0 \ 0 \ -0.5]^T m$ , durante toda missão de seguimento. Tais valores foram adotados em função das limitações de espaço físico para a realização dos experimentos. Nos gráficos de visualização dos resultados, linhas azuis se referem ao robô terrestre, enquanto linhas vermelhas se referem à aeronave. Quanto aos ícones correspondentes aos robôs, eles são plotados a cada 15s.

A primeira tarefa consiste no acompanhamento do robô terrestre em uma tarefa de posicionamento, para demonstrar que a estratégia de controle proposta é capaz de realizar tanto tarefas de rastreamento de trajetórias como de posicionamento. Assim, a missão dada ao robô terrestre visa levá-lo de uma posição inicial, coincidente com o sistema de referência inercial, a um alvo localizado nas coordenadas  $x_{rd} = 2m$ ,  $y_{rd} = 1.5m$  e  $z_{rd} = 0m$ . A Figura 3(a) ilustra o posicionamento dos robôs durante os primeiros 60s de experimento. Note-se que, apesar de algumas oscilações, o VANT segue o VTNT, durante o cumprimento de seu objetivo de controle, de forma assintótica, apresentando erros de seguimento inferiores a 0.2m, conforme ilustrado na Figura 3(c).

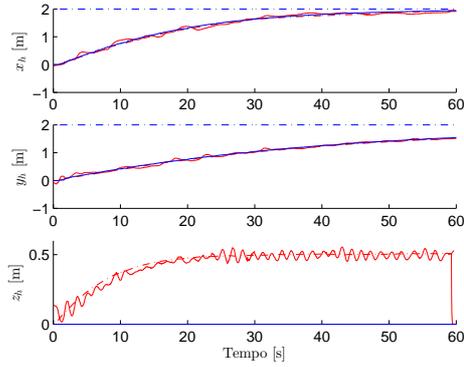
A Figura 3(b) destaca a orientação dos veículos durante o experimento. Nela se observa as variações dos ângulos de arfagem e rolagem da aeronave, necessárias para a realização das manobras de deslocamento longitudinal e lateral, respectivamente, visando o cumprimento da missão de seguimento. Conforme esperado, o veículo terrestre não apresenta qualquer variação em tais ângulos, uma vez que seu deslocamento se dá em uma superfície plana. Por sua vez, ao observar o ângulo de guinada de ambos veículos, percebe-se uma reorientação do robô terrestre para que seja possível alcançar o alvo, enquanto a aeronave realiza a missão mantendo seu ângulo de guinada igual a zero. Isto foi imposto, nesta missão, com o intuito de demonstrar a atuação direta da variável de guinada, em contraste com a restrição não holonômica apresentada pelo robô terrestre. No VANT adotado, é possível estabelecer uma referência de guinada sem que seja necessário alterar a rota de navegação.

O segundo experimento consiste no seguimento de uma referência circular, dada por

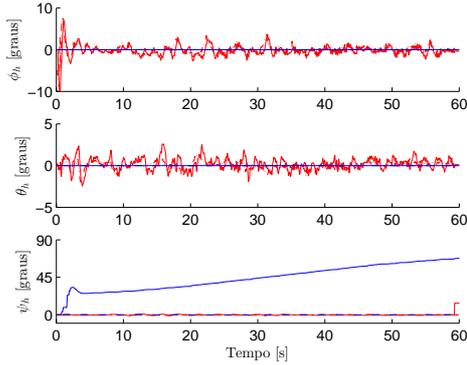
$$x_{rd} = \cos(0.05t), y_{rd} = \sin(0.05t).$$

A referência de guinada é obtida diretamente pela configuração do veículo, ou seja, como o robô terrestre é do tipo uniclo, sua orientação será tangencial à trajetória. Note-se que a trajetória de referência é dada somente ao robô terrestre, pois a missão do veículo aéreo é segui-lo, mantendo uma distância predefinida.

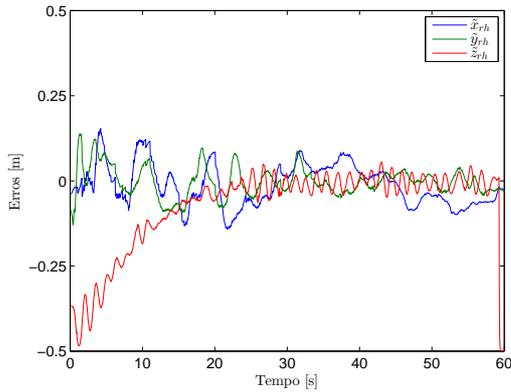
A Figura 4(a) ilustra o deslocamento dos veículos no espaço cartesiano durante a realização da tarefa. Note-se que o VTNT alcança a referência por volta de 30s, e a partir daí mantém o seguimento. Por sua vez, o VANT, desconhecendo a referência de navegação dada ao VTNT, tem por missão estabelecer a formação. Assim, nos primeiros 30s de experimento ele está afastado da referência dada ao veículo terrestre, porém está cumprindo a sua missão, que é reduzir os erros de seguimento mostrados na Figura 4(c). Os erros de deslocamento lateral e longitudinal podem ser observados em ambas figuras, onde se verificam erros com amplitudes inferiores a 0.25m. Nessas figuras também se verifica a variação da altitude da aeronave, para que a missão de seguimento de trajetória seja completamente realizada.



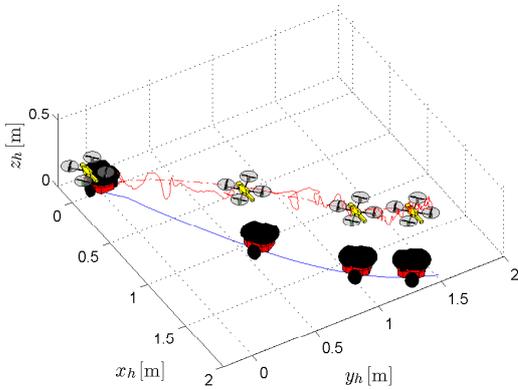
(a) Posição.



(b) Orientação.



(c) Erros de Formação



(d) Caminho percorrido em 3-D.

Figura 3: Missão de posicionamento.

Em adição, uma visualização tridimensional dos caminhos percorridos durante o experimento é mostrada na Figura 4(d).

Assim como no experimento anterior, a referência de guinada dada à aeronave é igual a zero, o que pode ser observado na Figura 4(b), onde também é possível visualizar a comportamento da orientação do VTNT e os ângulos de arfagem e guinada da aeronave durante a missão de voo.

A última missão de voo apresentada nesta seção é um seguimento de uma trajetória de referência em forma de oito. A diferença em relação aos experimentos anteriores está na referência de guinada da aeronave, que deve seguir a do robô terrestre, ou seja, deve ser tangencial à curva. Esta missão apresenta um maior grau de complexidade, em virtude da excitação dinâmica provocada pela curva, que impõe variações de velocidade em amplitude e sentido.

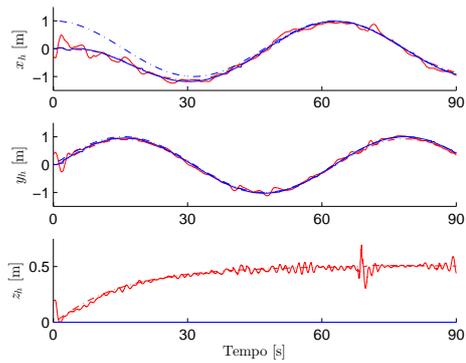
A Figura 5(d) ilustra o caminho percorrido pelos veículos durante a tarefa. É possível verificar que eles seguem a tendência da curva, mesmo verificando que a aeronave apresenta erros de seguimento da ordem de  $0.25m$  (ver Figura 5(c)). O pontos críticos de seguimento são os picos e vales do deslocamento lateral  $y$ , pois o VTNT praticamente detém o seu movimento para se reorientar e seguir a trajetória. Nesses instantes, como o controlador de seguimento também é baseado em velocidade (tendência de movimento), o VANT tende a ultrapassar o VTNT, gerando erros de seguimento. Na sequência, após se reorientar, o VTNT acelera e, conseqüentemente, o VANT é deixado para trás. Contudo, é possível verificar na Figura 5(a) que o perfil da trajetória é seguido por ambos veículos.

Por fim, a Figura 5(b) ilustra a orientação dos veículos. Em especial, nesse experimento, deve-se observar o comportamento do ângulo de guinada do VTNT e do VANT. Nos primeiros 80s a aeronave consegue seguir a orientação do robô terrestre, o que não ocorre no instante da descontinuidade negativa. Contudo, a aeronave não se desestabiliza e segue na busca pela referência, como ocorre na parte final do experimento.

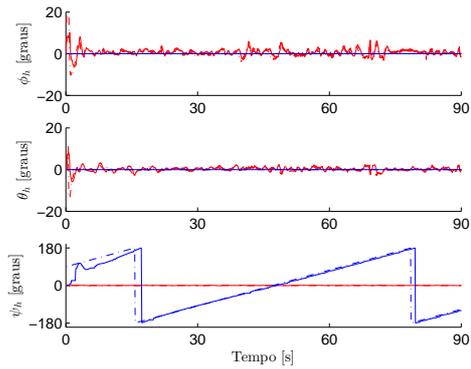
#### 4 Considerações Finais

Este artigo apresentou um esquema de controle centralizado para uma formação líder-seguidor de um VANT e um VTNT, para o cumprimento de missões de posicionamento e de seguimento de trajetória. O modelo cinemático da formação e a análise de estabilidade no sentido de Lyapunov são apresentados, assim como resultados de experimentos, que validam a proposta nas missões supracitadas.

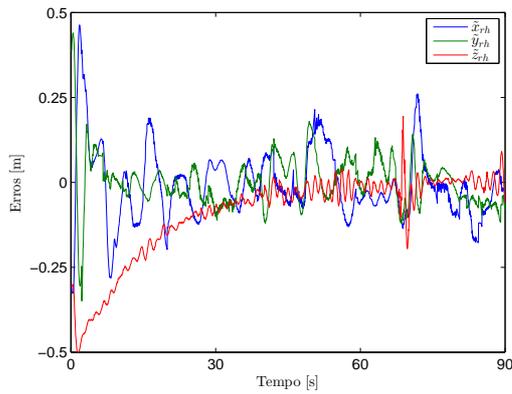
No esquema de controle proposto, a informação de velocidade dos veículos envolvidos é essencial para o cálculo dos sinais de controle



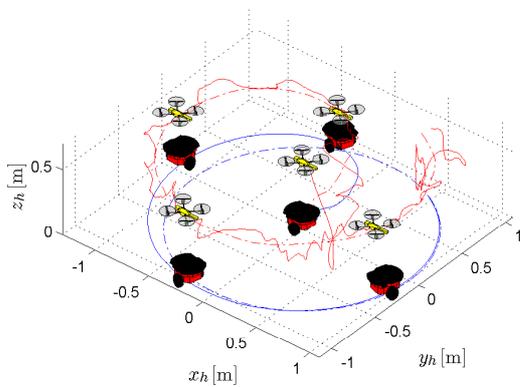
(a) Posição.



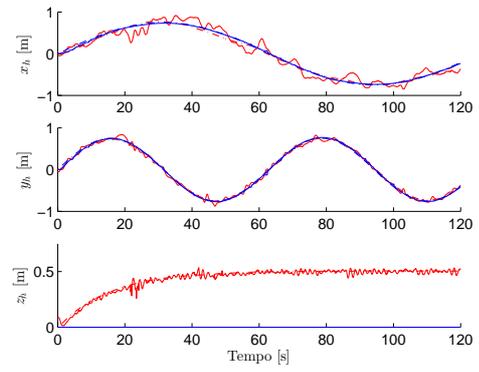
(b) Orientação.



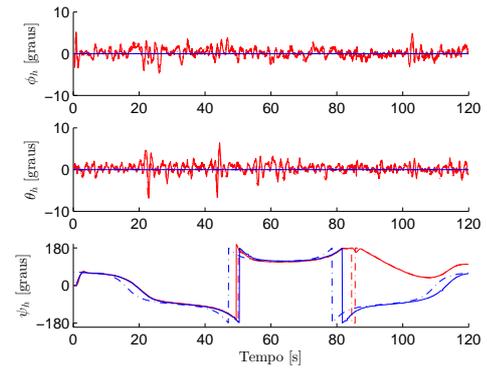
(c) Erros de formação.



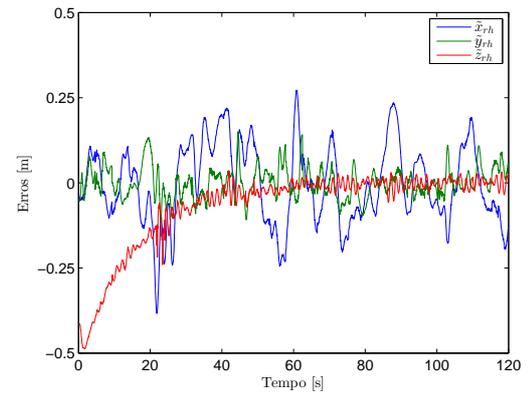
(d) Caminho percorrido em 3-D.



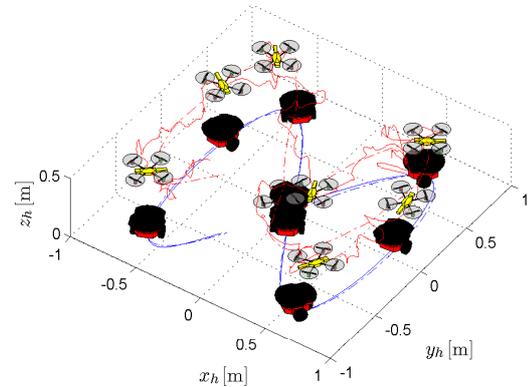
(a) Posição.



(b) Orientação.



(c) Erros de formação.



(d) Caminho percorrido em 3-D.

Figura 4: Seguimento de trajetória circular.

Figura 5: Seguimento de trajetória em forma de8.

enviados ao VANT, pela estação em terra. Afinal, caso a informação da velocidade do VTNT não seja fornecida ao controle centralizado, a aeronave seria “arrastada” pelo robô terrestre. Em outras palavras, o VANT somente iria se deslocar para alcançar o VTNT quando houvesse grandes valores de erro de formação. Assim sendo, em termos de controle, a estratégia proposta poderia ser analisada no sentido de se propor uma estrutura de controle baseada unicamente em velocidades, pois, para um controle de formação líder-seguidor, o veículo seguidor não necessita saber diretamente a posição daquele que dita a rota. Entretanto, é necessário saber a velocidade de deslocamento do líder (a qual pode ser estimada) e a posição relativa entre eles (a qual por ser determinada por um sistema sensorial a bordo do seguidor).

Em adição, dada a indisponibilidade de um sistema de posicionamento global, para o caso da proposta de controle apresentada, uma estratégia de posicionamento relativo poderia ser utilizada para determinação da posição do veículo aéreo em função da posição corrente do veículo terrestre e das variáveis desejadas de formação. Em outras palavras, um sistema de visão artificial, por exemplo, poderia ser utilizado para localização de padrões localizados sobre a plataforma móvel terrestre, e assim definir sua posição relativa.

Por fim, vale comentar que a estratégia de controle proposta pode ser aplicada para um sistema líder-seguidor entre dois VANTs, já que o sistema foi proposto para um caso geral de deslocamento tridimensional de dois veículos.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (processo 473.185/2012-1) e à CAPES, do Brasil, e à SPU, da Argentina, pelo suporte financeiro à realização desse projeto. Dr. Sarcinelli Filho também agradece o apoio financeiro adicional da FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo ao projeto. Dr. Brandão também agradece à Universidade Federal de Viçosa e à FAPEMIG, por viabilizarem sua participação neste trabalho.

### Referências

- Antonelli, G., Arrichiello, F. and Chiaverini, S. (2008). The Entrapment/Escorting Mission, *IEEE Robotics & Automation Magazine* **15**(1): 22–29.
- Brandão, A. S., Pizetta, I. H. B., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2012). Modelagem e controle não linear subatuado de um quad-rotor: Parte 2, *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática*, SBA, Campina Grande, PB, pp. 3102–3109.
- Brandão, A. S., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2013). An analytical approach to avoid obstacles in mobile robot navigation, *International Journal of Advanced Robotic Systems* .
- Chaimowicz, L. and Kumar, V. (2004). Aerial shepherds: Coordination among uavs and swarms of robots, *Proceedings of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*, Springer, Toulouse, France.
- Duan, H. and Liu, S. (2010). Unmanned air/ground vehicles heterogeneous cooperative techniques: Current status and prospects, *Science China, Technological Sciences* **53**(5): 1349–1355.
- Frietsch, N., Meister, O., Schlaile, C. and Trommer, G. F. (2008). Teaming of an ugv with a vtoluav in urban environments, *Proceedings of the IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, IEEE, Monterey, CA, pp. 1278–1285.
- Grocholsky, B., Keller, J., Kumar, R. V. and Pappas, G. J. (2006). Cooperative air and ground surveillance, *IEEE Robotics and Automation Magazine* **13**(3): 16–25.
- Hougen, D., Benjaafar, S., J.C., B., Budenske, J., Dvoraktt, M., Gini, M., French, H., Krantz, D., Li, P., Malver, F., Nelson, B., Papanikolopoulos, N., Rybski, P., Stoeter, S., Voyles, R. and Yesin, K. (2000). A miniature robotic system for reconnaissance and surveillance, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, San Francisco, California, USA, pp. 501–507.
- Hsieh, M. A., Chaimowicz, L., Cowley, A., Grocholsky, B., Keller, J. F., Kumar, V., Taylor, C. J., Endo, Y., Arkin, R. C., Jung, B., Wolf, D. F., Sukhatme, G. and MacKenzie, D. C. (2007). Adaptive teams of autonomous aerial and ground robots for situational awareness, *Journal of Field Robotics* **24**(11-12): 991–1014.
- Jennings, J. S., Whelan, G. and Evans, W. F. (1997). Cooperative search and rescue with a team of mobile robots, *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Robotics*, IEEE, Monterey, CA, USA, pp. 193–200.
- Kendoul, F., Yu, Z. and Nonami, K. (2010). Guidance and nonlinear control system for autonomous flight of minirotorcraft unmanned aerial vehicles, *Journal of Field Robotics* **27**(3): 311–334.
- MacArthur, E., MacArthur, D. and Crane, C. (2005). Use of cooperative unmanned air and ground vehicles for detection and disposal of mines, *Proceedings of the VI Intelligent Systems in Design and Manufacturing*, Vol. 5999, SPIE, Boston, MA, pp. 94–101.
- Michael, N., Fink, J. and Kumar, V. (2007). Controlling a team of ground robots via an aerial robot, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, San Diego, CA, USA, pp. 965–970.
- Salinas, L., Slawński, E., Mut, V. and Sebastián, J. M. (2010). Teleoperation and control of mini-helicopters: A case study, *Robots de Exteriores*, Centro de Automática y Robótica CSIC-UPM, Madrid, España, pp. 247–267.