

CARREGAMENTO COOPERATIVO DE CARGA UTILIZANDO QUADRIMOTORES

IGOR H. B. PIZETTA* ALEXANDRE S. BRANDÃO† MARIO SARCINELLI-FILHO‡

**Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo
Aracruz - ES, Brasil*

*†Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa
Viçosa - MG, Brasil*

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

Email: igor.pizetta@ifes.edu.br alexandre.brandao@ufv.br mario.sarcinelli@ele.ufes.br

Resumo— This work proposes the representation of the high level dynamic modelling of a formation of two quadrotor UAVs cooperatively carrying a suspended load. The two quadrotors are attached to the load by massless and stretchable cables, which can slack and taut. The cable is modeled as a high stiffness spring with a damping coefficient, according to the Hooke's law. A fictitious repulsion force is also introduced to minimize the risk of a collision between the UAVs during flight tasks. Finally, to deal with disturbance rejection caused by the load compensation and the cable tension variations, a nonlinear controller is proposed to guide the UAVs cooperatively during positioning and trajectory-tracking tasks, considering that the movement of the UAVs is restricted to the XZ -plane. Finally, simulated results are presented, in order to validate the proposal.

Palavras-chave— Quadrotors, Load, Transportation, Nonlinear Controller.

Palavras-chave— Este trabalho propõe a representação do modelo dinâmico de alto nível de uma formação de dois quadrimotores carregando uma carga suspensa em cooperação. A carga é fixada aos quadrimotores através de cabos elásticos e sem massa, que podem ficar tensionados ou não durante o cumprimento das tarefas de voo. O cabo é modelado como uma mola com alta rigidez elástica com coeficiente de amortecimento de acordo com as leis de Hooke. Uma força fictícia de repulsão é introduzida a fim de minimizar os riscos de colisão entre os veículos durante as tarefas de voo. Por fim, para lidar com a rejeição do d st rbio gerado pela compensação da carga, um controlador não linear é proposto para guiar os veículos cooperativamente em tarefas de posicionamento e seguimento de trajetória. Resultados simulados são apresentados para validar a proposta.

Palavras-chave— Quadrimotores, Carregamento, Carga, Controlador Não Linear.

1 Introdução

A alta aplicabilidade dos veículos aéreos não tripulados (VANTs) e o aumento de sua tecnologia associada tem causado um aumento significativo nas pesquisas utilizando este tipo de veículo nas últimas décadas. Apesar de serem veículos de difícil controle, sua mobilidade tridimensional, capacidade de voo estacionário, decolagem e pouso verticais os tornam uma plataforma de desenvolvimento propícia para a utilização em diversas aplicações, além daquelas associadas a veículos terrestres não tripulados. Estas aplicações envolvem segurança pública (Kanistras et al., 2015) (supervisão do espaço aéreo e tráfego urbano), gerenciamento de riscos naturais (Melita et al., 2015) (vulcões e tsunamis), gestão ambiental (Brust e Strimbu, 2015) (medição de poluição do ar e monitoramento de florestas), intervenção em ambientes hostis (Merino et al., 2015), manutenção de infraestruturas (Araar e Aouf, 2013) (linhas de transmissão e dutos de fluido e gás), agricultura de precisão (Rey et al., 2013), transporte de carga (Feng et al., 2015), dentre outros.

Dependendo da tarefa, é muito mais vantajoso a utilização de diversos veículos do que somente um especializado para completá-la. Executando a tarefa de forma cooperativa, os veículos podem não somente aumentar o desempenho

na tarefa como superar as limitações individuais. Por exemplo, uma área pode ser inspecionada em menor tempo utilizando um time de VANTs ou ainda, uma carga pesada, maior que a carga útil de cada um, pode ser levantada utilizando dois ou mais veículos. Em (Merino et al., 2015)   apresentada uma arquitetura de controle e decisão para times de veículos aéreos não tripulados para detecção, monitoramento e extinção de incêndios florestais. Um grupo é utilizado, ao invés de um único veículo, porque uma maior área pode ser inspecionada ao mesmo tempo e uma maior quantidade de sensores pode ser carregada.

Ao realizar uma tarefa de carregamento de carga, as oscilações geradas por ela geram dificuldades no controle do veículo, mesmo para pilotos experientes. A maioria deles considera preferível estabilizar o veículo e esperar que as oscilações se extingam. A distribuição do peso da carga com mais de um veículo é uma alternativa para controlar as oscilações angulares de maneira distinta. Neste caso, os ângulos são relativos aos cabos que estão conectados entre a carga e o VANT.

Uma aplicação similar pode ser vista em (Ollero, 2011), onde um helicóptero miniatura aut nomo é utilizado para transporte e entrega de kits de socorro em missões de busca e resgate. Ainda é apresentado um sistema multi-VANT composto por tr s helicópteros de pequeno

porte e uma carga pesada, a qual ultrapassa a carga útil de um veículo. Sensores de torque e força são utilizados para realimentar os laços de controle.

Ainda considerando transporte de carga, em (Feng et al., 2015) um VANT com uma carga pendurada é modelado como um sistema multi corpo conectado por um cabo sem massa e inelástico. O Lagrangiano é utilizado para obter a dinâmica do sistema e uma lei de controle quadrática é proposta para guiar a aeronave ao longo de missões de seguimento de trajetória, considerando massas e comprimentos de cabos distintos. Em (Guerrero et al., 2015), o IDA-PBC (Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control) é utilizado para executar tarefas de posicionamento rápido de carga com um mínimo de oscilação para o caso planar (XZ -plane). Nesta estratégia, o sinal de controle atinge a forma de energia e injeta o termo de amortecimento a fim de alcançar o objetivo de controle e minimizar as oscilações da carga, respectivamente, sem a necessidade de medição dos ângulos.

Em transporte de carga suspenso por cabos, existem algumas não linearidades que devem ser tomadas em conta. Por exemplo, após a decolagem, no momento quando a carga está para ser levantada do solo, o veículo sente a força de tração da carga, quando o cabo muda seu estado de frouxo para tensionado. Em contraste, quando o veículo perde altitude, o cabo momentaneamente fica frouxo. Este efeito pode ser observado quando múltiplos veículos estão carregando a mesma carga. Um controle geométrico não linear considerando o içamento da carga do solo e suas não linearidades é proposto em (Cruz et al., 2015). Por sua vez, em (Goodarzi et al., 2015) a não linearidade é considerada na flexibilidade do cabo durante transporte de carga. Os autores representam o cabo como um conjunto de ligações rígidas conectadas em série com uma carga pontual. Um controle geométrico assintoticamente estável é proposto para guiar o sistema VANT-Carga ao longo de tarefas de posicionamento, validado por simulações numéricas e experimentos.

Outra abordagem para o carregamento de carga é a utilização de garras, para captura da carga e seu carregamento próximo ao corpo do veículo conectado de forma rígida. Nesta abordagem, o momento de inércia do veículo aumenta, as respostas de guinada tornam-se mais lentas e os movimentos menos agressivos. Em (Mellinger et al., 2011), uma estratégia utilizando garras é apresentada com a estimação dos parâmetros de inércia. O VANT pode carregar diferentes cargas com diferentes características. Um controlador com trajetórias quasi-estacionárias é apresentado em simulações para o caso planar. Em continuação a este trabalho, uma tarefa de cooperação utilizando garras é apresentado em (Mellinger

et al., 2013; Lindsey et al., 2012). Experimentos mostram um grupo de MVANT (Micro Veículo Aéreo Não Tripulado) transportando cargas de diferentes tamanhos e formas e as conectando para formar cubos.

Neste contexto, este trabalho lida com o carregamento de carga de forma cooperativa. Em nossa proposta, dois quadrimotores são conectados a uma carga por cabos elásticos e sem massa. O cabo é modelado de tal forma que pode ficar frouxo ou esticado ao longo das manobras de voo, por exemplo, na decolagem ou quando apenas um veículo está suportando toda a massa da carga. O cabo é modelado como uma mola de alta rigidez com um coeficiente de amortecimento, de acordo com as leis de Hook. Em seu comportamento é considerada a estimação da perturbação. Em adição, uma força fictícia de repulsão foi introduzida a fim de minimizar o risco de colisão entre os VANTs durante deslocamentos laterais. Por fim, para lidar com a rejeição do distúrbio causado pela carga e pela variação de tração dos cabos, um controlador não linear é proposto para guiar o VANT de forma cooperativa durante tarefas de posicionamento e seguimento de trajetória. É importante ressaltar que este trabalho é uma sequência dos trabalhos publicados em (Beloti Pizetta et al., 2015a; Beloti Pizetta et al., 2015b), onde o VANT carrega uma carga suspensa por um cabo inelástico e rígido utilizando a plataforma AuRoRA, desenvolvida em (Pizetta et al., 2016), para lidar com experimentos e simulações.

Para dar detalhes sobre esse desenvolvimento, este trabalho é dividido nas seguintes seções: 2 apresenta uma visão geral do modelo da aeronave com a carga suspensa, considerando os efeitos da carga, enfatizando as variáveis de controle e os graus de liberdade disponíveis para o controle. Seguindo, é apresentado o modelo do VANT na forma subatuada, e proposto um controlador por linearização de realimentação para guiá-lo. Na sequência, o distúrbio é modelado considerando o efeito de estiramento dos cabos e da força de repulsão fictícia entre os veículos. Na seção 3 alguns resultados simulados e sua discussão são apresentados, a fim de validar a proposta, considerando tarefas de posicionamento e seguimento de trajetória. Por fim, a Seção 4 destaca as principais conclusões do trabalho.

2 O Modelo Dinâmico do Sistema Cooperativo de Carregamento de Carga

Esta seção introduz o modelo dinâmico dos veículos aéreos carregando uma carga suspensa de forma cooperativa. Nesta abordagem, o sistema é composto de uma carga conectada a dois VANTs por cabos sem massa e extensíveis. Supõe-se que o cabo é elástico, conectado ao centro de massa

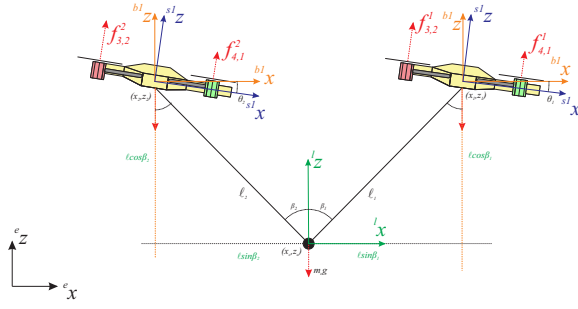


Figura 1: Sistema de referência adotado para o caso de dois quadrimotores carregando uma carga.

de cada quadrimotor e que a força de resistência do ar   desprez vel. A Figura 1 ilustra a tarefa a ser realizada, e também o sistema de referência adotado. O modelo dinâmico é descrito de acordo com as equações de Euler-Lagrange para os quadrimotores e a carga.

Neste trabalho, o modelo é baseado no quadrimotor AR.Drone, da Parrot Inc. Um importante detalhe é que os motores são alinhados com os eixos $^b x$ e $^b y$, porém rotacionados em 45° em torno do eixo $^b z$. Assim, manobras laterais ou longitudinais requerem a ação combinada de todos os quatro motores.

Considere o quadrimotor como um VANT no caso planar, com seus movimentos restritos ao plano $\mathbf{XZ}$, i.e., não há deslocamento no eixo y nem variações nos ângulos de rolagem (ϕ) e guinada (ψ). Neste veículo, as forças f_3 e f_2 atuam em conjunto para realizar os movimentos, assim como as forças f_4 e f_1 .

Dois veículos conectados por cabos, direta ou indiretamente, geram forças entre si, transmitidas pelo elo de ligação. Por exemplo, se os veículos tentarem voar em direções opostas no eixo x a força de traço associada aos cabos irá aumentar até a força de arrasto máxima do VANT, fazendo com que eles fiquem est ticos.

Para introduzir esta modelagem, é definida, primeiramente, a atitude de cada VANT no plano generalizado de coordenadas 2D, denominado por $^e \mathbf{q} = [^e \xi_i \ ^e \eta_i \ ^e \eta_c]^T$ com $i = 1, 2$. Note que não há movimento no eixo y , assim o vetor de coordenadas se torna $^e \xi_i = [x_i \ z_i]^T \in \mathbb{R}^2$ com $i = 1, 2$, correspondente aos deslocamentos normal e longitudinal, de acordo com o sistema de referência inercial $\langle e \rangle$, $^s \eta_i = \theta_i \in \mathbb{R}$ com $i = 1, 2$, corresponde apenas com os ângulos de arfagem, de acordo com o sistema de coordenadas espacial $\langle s \rangle$, $^b \eta = [\beta_1 \ \beta_2] \in \mathbb{R}$, corresponde ao ângulo da carga com respeito ao veículo da frente e o de tr s, respectivamente, ao seu próprio sistema de referência $\langle l \rangle$.

Existem dois cabos conectando a carga aos quadrimotores, havendo, então, duas forças de traço com a adição da força gravitacional, agindo na carga, como detalhado na Figura 2.

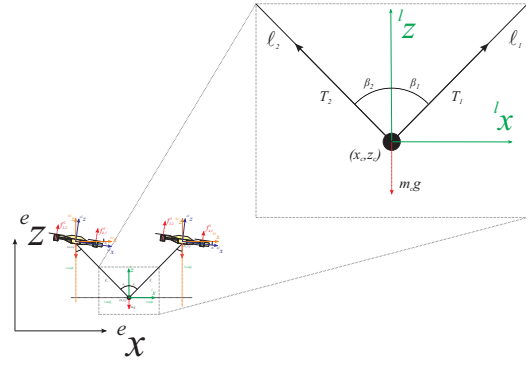


Figura 2: Detalhe das forças agindo na carga transportada pelos dois veículos aéreos.

O objetivo do controle   compensar a força gravitacional da carga $m_c g$, a qual é "sentida" através da força de traço T_1 e T_2 pelo quadrimotores. A dinâmica da carga pode ser descrita através de

$$m_c \ddot{x}_c = T_1 \sin \beta_1 + T_2 \sin \beta_2 \quad (1)$$

$$m_c \ddot{z}_c + m_c g = T_1 \cos \beta_1 + T_2 \cos \beta_2, \quad (2)$$

onde $^e \mathbf{q}_c = [x_c \ z_c]^T$ é a posição da carga no sistema referencial. No equilíbrio as forças de traço devem compensar a força gravitacional. Todavia, os VANTs devem impor uma força de traço em posições opostas, isto devido a compensação da força gravitacional e ao ângulo entre o veículo e a carga. Por outro lado, os VANTs irão balancear apenas a força gravitacional, e, como consequência, a força de traço tende a zero, assim os quadrimotores irão se aproximar um do outro.

2.1 O modelo do VANT

Considerando o esquema mostrado na Figura 1, a função Lagrangeano pode ser escrita como

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \dot{z}^2 - m g z + \frac{1}{2} I_{yy} \dot{\theta}^2, \quad (3)$$

onde m e I_{yy} são a massa e o momento de inércia do VANT.

Aplicando as restrições de Euler-Lagrange

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau},$$

obt m-se

$$\begin{bmatrix} m \ddot{x} \\ m \ddot{z} \\ I_{yy} \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ m g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \sin \theta \\ u \cos \theta \\ \tau_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_z \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

onde $u = \sum_{i=1}^4 f_i$ e $\tau_\theta = k(-f_1 + f_2 + f_3 - f_4)$ são os s nais de controle, sendo k a distância entre cada motor e o centro de gravidade do veículo. D_x e D_z ,

nesta modelagem, são as perturbações horizontais e normais causadas pelo efeito de traço da carga.

É importante ressaltar que o modelo do VANT (4)   o mesmo para os dois quadrimotores, em exceção pelo vetor de distúrbio, o qual é $\mathbf{D}_1 = [-T_1 \sin \beta_1 \quad -T_1 \cos \beta_1 \quad 0]^T$, para o veículo frontal, e $\mathbf{D}_2 = [T_2 \sin \beta_2 \quad -T_2 \cos \beta_2 \quad 0]^T$ para o veículo traseiro.

Sabendo que o quadrimotor é um sistema subatuado (Raffo et al., 2011; Brandão et al., 2014), i.e., há mais graus de liberdade que entradas de controle, algumas variáveis podem ser consideradas como ativas (ou diretamente atuadas), enquanto outras podem ser classificadas como passivas (ou não atuadas). Na representação atual, $\mathbf{q}_a = [z \quad \theta]^T$ e $\mathbf{q}_p = x$, onde o subscrito a e p se referem as variáveis ativas e passivas respectivamente.

Agora representando (4) na forma subatuada, obt m-se

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{pp} & \mathbf{M}_{pa} \\ \mathbf{M}_{ap} & \mathbf{M}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_p \\ \ddot{\mathbf{q}}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{E}_p \\ \mathbf{E}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

onde

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{pp} &= m \cos \theta, & \mathbf{M}_{pa} &= [-m \sin \theta \quad 0], \\ \mathbf{M}_{ap} &= \begin{bmatrix} m \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}, & \mathbf{M}_{aa} &= \begin{bmatrix} m \cos \theta & 0 \\ 0 & I_{yy} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

com

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_p &= -D_x \cos \theta - (mg - D_z) \sin \theta \\ \mathbf{E}_a &= \begin{bmatrix} -D_x \sin \theta + (mg - D_z) \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

2.2 O Controlador Não linear Subatuado

A partir de (5) tem-se

$$\mathbf{F} = \mathbf{M}_{ap} \ddot{\mathbf{q}}_p + \mathbf{M}_{aa} \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{E}_a, \quad (6)$$

$$0 = \mathbf{M}_{pp} \ddot{\mathbf{q}}_p + \mathbf{M}_{pa} \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{E}_p. \quad (7)$$

Substituindo (7) em (6), tem-se

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= -\mathbf{M}_{ap} \mathbf{M}_{pp}^{-1} (\mathbf{M}_{pa} \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{E}_p) + \mathbf{M}_{aa} \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{E}_a, \quad (8) \\ &= \underbrace{(\mathbf{M}_{aa} - \mathbf{M}_{ap} \mathbf{M}_{pp}^{-1} \mathbf{M}_{pa})}_{\bar{\mathbf{M}}_{aa}} \ddot{\mathbf{q}}_a + \underbrace{(\mathbf{E}_a - \mathbf{M}_{ap} \mathbf{M}_{pp}^{-1} \mathbf{E}_p)}_{\bar{\mathbf{E}}_a}. \end{aligned}$$

Agora, aplicando a realimentação por linearização parcial, pode-se propor a lei de controle dada por

$$\mathbf{F} = \bar{\mathbf{M}}_{aa} \eta_a + \bar{\mathbf{E}}_a, \quad (9)$$

onde $\eta_a = \ddot{\mathbf{q}}_{ad} + \mathbf{K}_{a1} \tanh(\mathbf{K}_{a2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}_a) + \mathbf{K}_{a3} \tanh(\mathbf{K}_{a4} \tilde{\mathbf{q}}_a)$, com $\mathbf{K}_{ai} \in \mathbb{R}^2$ sendo matrizes de ganho positiva definidas.

Portanto, a equação de malha fechada é dada por

$$\ddot{\tilde{\mathbf{q}}}_a + \mathbf{K}_{a1} \tanh(\mathbf{K}_{a2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}_a) + \mathbf{K}_{a3} \tanh(\mathbf{K}_{a4} \tilde{\mathbf{q}}_a) = \mathbf{0},$$

que garante que $\tilde{\mathbf{q}}$ e $\dot{\tilde{\mathbf{q}}}$ tendem a zero assintoticamente, quando $t \rightarrow \infty$, desde

$$\theta_d = \arctan \frac{\eta_{px}}{\eta_{az} + g}, \quad (10)$$

onde $\eta_{px} = \ddot{\mathbf{q}}_p d + \mathbf{K}_{p1} \tanh(\mathbf{K}_{p2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}_p) + \mathbf{K}_{p3} \tanh(\mathbf{K}_{p4} \tilde{\mathbf{q}}_p)$, com $\mathbf{K}_{pi} \in \mathbb{R}$ sendo ganhos positivos.

A demonstração completa da estabilidade do sistema no sentido de Lyapunov pode ser encontrada em (Brandao et al., 2013).

2.3 O efeito do alongamento

Algumas considerações sobre a tarefa de carregamento de carga devem ser consideradas quando existem mais de um veículo. Se um  nico VANT é capaz de elevar a carga e se movimentar, o sistema dinâmico se comporta como um pêndulo sub atuado (os trabalhos anteriores (Beloti Pizetta et al., 2015a; Beloti Pizetta et al., 2015b) lidam com este problema). Em contraste, se múltiplos VANTs estão movendo a carga, a traço do cabo causa distúrbios nos veículos. Assim, os distúrbios não são somente geradas pela compensação da massa da carga como têm também pelos deslocamentos dos outros veículos.

Comumente, durante o primeiro estágio da manobra de decolagem, a carga é posicionada ao solo na mesma altitude do veículo, então o cabo os conectando não está esticado. Desta forma o movimento da carga não pode ser descrito completamente por (1) e (2). Em outras palavras, se a distância entre VANT e carga   menor que o comprimento do cabo, a tensão é igual a zero (assumindo a premissa de um cabo sem massa). Caso contrário, a tensão é calculada com o objetivo de atingir o equilíbrio.

Considerando uma manobra de pairagem onde todos os elementos da Figura 1 são estabilizados, pode-se concluir que a carga está est tica e T_1 e T_2 atingiram o equilíbrio. Todavia, se ambos veículos elevam suas altitudes simultaneamente, a carga quase se move imediatamente para cima, isto devido à característica elástica dos cabos. Portanto, pode-se considerar que o efeito elástico (como mostrado na Figura 3) ocorre nos cabos neste instante, explicado pela inércia da carga.

Após apresentar esta consideração, as tensões dos cabos são dadas por

$$\begin{aligned} T_1 &= m_c g \frac{\sin \beta_2}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} + T_{\Delta 1}, \text{ if } \|\xi_1 - \mathbf{q}_c\| \geq l_1, \\ &= 0, \text{ otherwise.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_2 &= m_c g \frac{\sin \beta_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} + T_{\Delta 2}, \text{ if } \|\xi_2 - \mathbf{q}_c\| \geq l_2, \\ &= 0, \text{ otherwise,} \end{aligned}$$

onde $T_{\Delta i}$ representa o efeito elástico e é dado por

$$T_{\Delta i} = \alpha_{i1} \Delta l + \alpha_{i2} \frac{d}{dt} \Delta l, \text{ with } \alpha_{ij} \geq 0. \quad (11)$$

É importante mencionar que $\Delta l = \|\xi_i - \mathbf{q}_c\| - l_i$ e que $T_{\Delta i}$ induzem uma reação de tração amortecida no sistema.

2.4 A Força de Repulsão Fictícia entre os VANTS

Observando mais uma vez a Figura 1, se ambos quadrimotores se movem para a esquerda porém o veículo da direita move mais rápido que o da esquerda, eles poderão colidir durante a execução da tarefa. Esta situação pode ser evitada (ou superada) pela adição de algumas restrições de voo. Todavia, esta pode introduzir descontinuidades, que podem comprometer a tarefa de carregamento. Assim, é proposto introduzir uma força fictícia de repulsão entre os VANTS. A Figura 4 ilustra a ideia do campo e suas linhas de repulsão, como se fossem dois ímãs de campos magnéticos iguais. Pode-se observar que, quanto mais próximo os veículos, maior a força de repulsão.

A força de repulsão é aqui definida como

$$f_{ri} = (f_{\max} - f_{\min}) \frac{d_{\max} - d}{d_{\max} - d_{\min}} + f_{\min}, \quad (12)$$

onde $f_{\max}$ e $f_{\min}$ estabelece a força máxima e mínima, quando os veículos estão distantes $d_{\min}$ e $d_{\max}$ entre si. Na presente proposta, f_{ri} atua somente no eixo $^e x$, assim $d = \|x_1 - x_2\|$.

É importante mencionar que, se $d > d_{\max}$, então $f_{ri} = f_{\min}$, e isto implica que os veículos estão distantes o suficiente entre si. Em adição, se $d < d_{\min}$, então $f_{ri} = f_{\max}$, e isto representa um situação crítica de voo (possibilidade de colisão)

2.5 O Distúrbio Modelado

A partir de (4) obtém-se o vetor de perturbações $\mathbf{D}_i$, o qual pode ser modelado para ser aplicado na lei de controle (9).

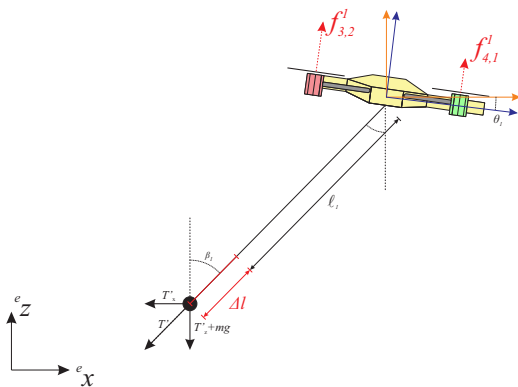


Figura 3: Efeito elástico causada pela tensão adicional nos cabos.

Neste caso, ele é dado por

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} T_1 \sin \beta_1 + f_{r1} \\ T_1 \cos \beta_1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ and } \mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} T_2 \sin \beta_2 + f_{r2} \\ T_2 \cos \beta_2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Note que $f_{r1} = -f_{r2}$, i.e., a força de repulsão são aplicadas em direções opostas.

Portanto, Pode-se confirmar que o controlador proposto é projetado para guiar o VANT mesmo na presença de perturbações, as quais são modeladas pelas tensões dos cabos VANT-Carga e pelas forças fictícias de repulsão agindo nos veículos.

3 Resultados

Os resultados foram obtidos utilizando a Plataforma AuRoRa para representar o modelo virtual dos VANTS, neste caso, o quadrimotor AR.Drone cujo modelo e controlador foram introduzidos nas seções anteriores.

A fim de demonstrar a eficácia da estratégia abordada utilizando força de repulsão e a eficácia do controlador proposto, esta seção apresenta duas simulações. A primeira é uma tarefa de posicionamento, a qual contempla as tarefas de pairamento e levantamento da carga, i.e., os quadrimotores são programados para atingir uma determinada altitude, porém, antes de atingi-la, a carga perde o contato com o solo, começando a afetar o movimento do sistema a partir deste momento. Uma segunda simulação é apresentada para demonstrar a necessidade do campo de rejeição para que os veículos mantenham uma distância segura entre si. Um vídeo das simulações pode ser visto no link <https://youtu.be/resPvYggpBs>.

A Figura 5 mostra o comportamento das variáveis do sistema x e z ao longo do tempo. Nos primeiros segundos os veículos devem realizar a tarefa de decolagem, atingindo a altura de $1m$. No início da tarefa a carga não induz nenhum efeito no sistema, contudo, aproximadamente no instante $7s$, os cabos ficam esticados e a carga começa a afetar os movimentos dos dois veículos, que podem ser vistos na figura. Ainda podem ser vistas oscilações angulares na Figura 6, que mostram o

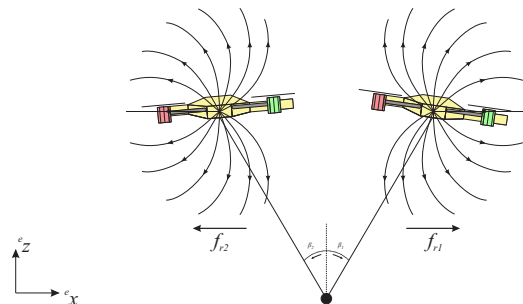


Figura 4: Repulsion forces adopted to prevent collisions involving the two UAVs.

esforço do controlador para rejeitar as perturbações criadas no momentos que os cabos saem do estado frouxo e passam a ficar esticados.

Um esforço extra realizado pelos veículos pode ser visto na Figura 7, apontando para direções opostas. Isto é pelo fato que, além da massa extra adicionado pela carga no sistema, existe a componente horizontal da tra  o, que mant m os ângulos maiores que um mínimo. Quanto maior os ângulos, maior a componente horizontal da força, assim, maior a força que os veículos aplicam entre si.

Os ângulos da carga dependem da distância dos veículos, com mostrado na Figura 8, que mostra sua evolução ao longo do tempo. No começo da simulação, tais ângulos são de 90° , porque os veículos e a carga estão no solo ($z = 0$), antes da decolagem, e depois, com o tempo, eles atingem um valor quase constante. A tensão e o comprimento dos cabos são apresentados na Figura 8, onde pode-se verificar que os cabos começam a ficar tensionados apenas após a decolagem, no mesmo momento quando o comprimento atinge aproximadamente $1m$, que é um comprimento pré determinado. Existe uma grande não linearidade neste ponto, e o controlador deve garantir a estabilidade do sistema. Esta grande descontinuidade implica em uma grande variação angular vista, previamente, na Figura 6.

Como mencionado anteriormente, os veículos devem manter uma distância segura entre si, e quanto maior esta distância, maior será a componente horizontal da força de traço, aumentando o esforço dos propulsores e o consumo de energia. De fato, deslocamentos laterais, devido a decomposição da força de traço, um veículo recebe uma

força que o empurra, ajudando seu movimento, enquanto que o outro recebe uma força que o puxa, dificultando seu movimento e tornando este veículo mais lento que o outro. Assim, os veículos vão se aproximar diminuindo o ângulo entre a carga, porém uma distância segura deve ser mantida entre eles, que é o propósito da força de repulsão. A Figura 9 mostra uma simulação onde o campo de repulsão foi desabilitado. Neste caso não somente o segundo VANT atinge a posição desejada antes que o primeiro, como a distância entre eles diminui consideravelmente, até atingir a distância de um veículo, significando uma possível colisão.

A última simulação mostra a performance do sistema em um seguimento de trajetória em formato de 8. A Figura 10 pode ser vista como a evolução temporal das variáveis de posição, onde a linha tracejada representa a posição desejada para os veículos. Como o objetivo do controle   rejeitar o d st rbio criado pela carga e não gui la, não há calor de referência para a carga.

A Figura 11 mostra as variações angulares dos veículos enquanto a Figura 13 mostra as variáveis

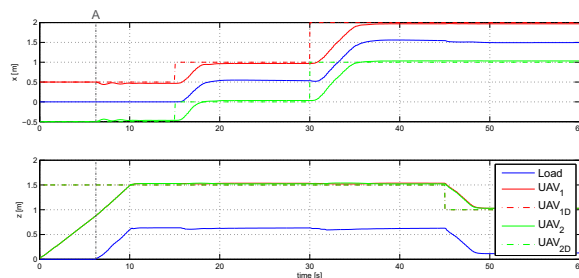


Figura 5: Variação das coordenadas.

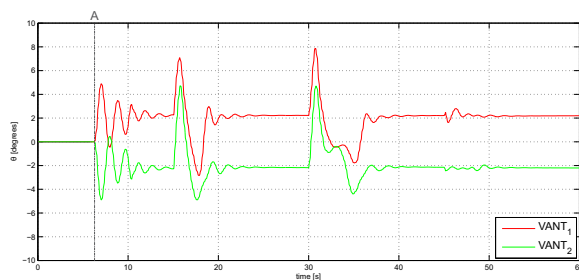


Figura 6: Variação angular dos veículos.

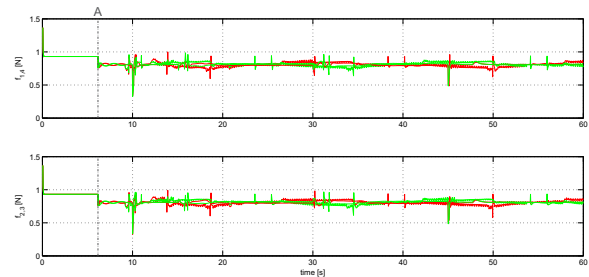


Figura 7: Forças geradas pelos propulsores dos veículos.

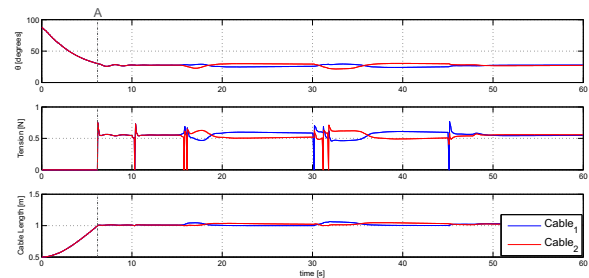


Figura 8: Variação das variáveis da carga.

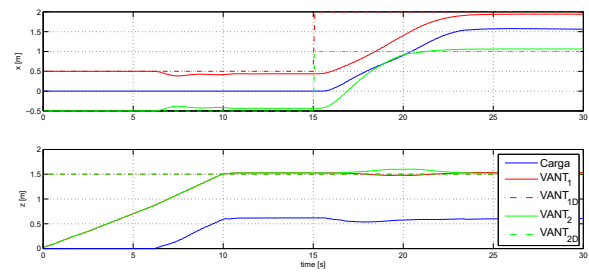


Figura 9: Variações de x e z sem o campo de rejeição.

relativas a carga. Pode-se notar uma maior oscilação no começo da trajetória. Quando muda-se a posição desejada de um ponto fixo para uma trajetória, o veículo sofre uma grande variação nos valores desejados, e assim, um maior esforço do controlador para mudar de posição, resultando em uma manobra mais agressiva a fim de seguir a trajetória. Após um certo tempo, os veículos seguem os valores desejados e seus movimentos e variações angulares se mantêm suaves. As variações no plano xz podem ser vistas na Figura 12, onde é claro a trajetória em formado de 8 e a proximidade da posição realizada com a posição desejada, indicando a eficácia do controlador proposto.

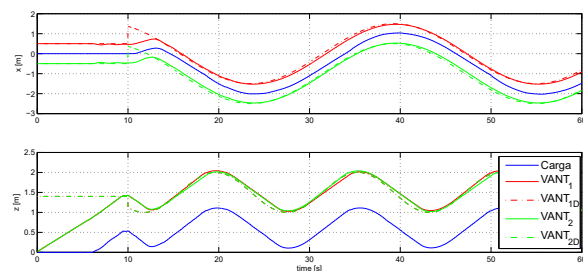


Figura 10: Variações das coordenadas.

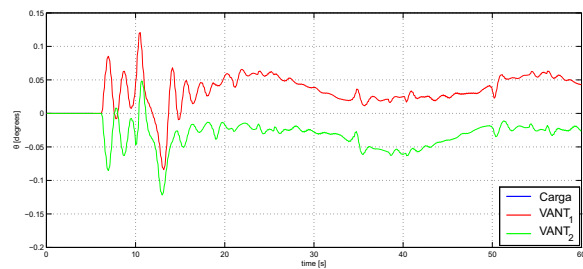


Figura 11: Variações angulares dos veículos.

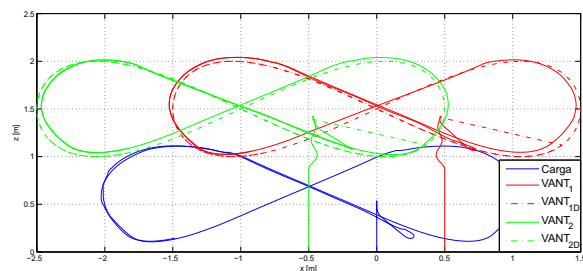


Figura 12: Variações das coordenadas no plano xz .

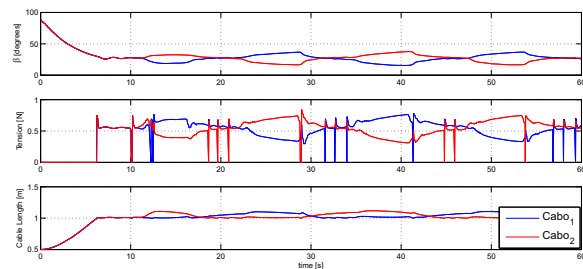


Figura 13: Variação das variáveis da carga.

4 Considerações Finais

O transporte de carga utilizando veículos aéreos não tripulados é útil e interessante em diversas aplicações. Neste trabalho o carregamento de carga de forma cooperativa foi considerada, onde dois veículos quadrimotores são conectados com uma carga através de cabos. Foi considerado o caso onde os cabos são elásticos, rígidos e sem massa. O modelo de extensão dos cabos também é considerado, e, devido à dinâmica do sistema, foi introduzida uma força de repulsão fictícia entre os dois VANTs a fim de manter uma distância segura entre eles. Para demonstrar a proposta, foram apresentados resultados simulados, enfatizando o efeito do esticamento dos cabos assim como a importância da consideração do campo de repulsão. Para tal, foram apresentadas tarefas de posicionamento e seguimento de trajetória.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e à FAPES – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, pelo financiamento concedido ao projeto. Os autores também agradecem ao Instituto Federal do Espírito Santo, à Universidade Federal de Viçosa e à Universidade Federal do Espírito Santo, pelo suporte dado à sua participação nessa pesquisa. Alexandre Brandão também agradece à FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais, e à Fumarbe – Fundação Arthur Bernardes, por apoiar sua participação no trabalho.

Referências

- Araar, O. e Aouf, N. (2013). Visual servoing of a quadrotor uav for the tracking of linear structured infrastructures, *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 3310–3315.
- Beloti Pizetta, I., Santos Brandao, A. e Sarcinelli-Filho, M. (2015a). Modelling and control of a pvtol quadrotor carrying a suspended load, *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on*, pp. 444–450.
- Beloti Pizetta, I., Santos Brandao, A. e Sarcinelli-Filho, M. (2015b). Modelling and control of a quadrotor carrying a suspended load, *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, pp. 249–257.
- Brandao, A. S., Carelli, R. et al. (2013). High-level underactuated nonlinear control for rotorcraft machines, *IEEE International*

- Conference on Mechatronics (ICM)*, IEEE, pp. 279–285.
- Brandão, A. S., Gandolfo, D., Sarcinelli-Filho, M. e Carelli, R. (2014). Pvtol maneuvers guided by a high-level nonlinear controller applied to a rotorcraft machine, *European Journal of Control* **20**(4): 172–179.
- Brust, M. e Strimbu, B. (2015). A networked swarm model for uav deployment in the assessment of forest environments, *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2015 IEEE Tenth International Conference on*, pp. 1–6.
- Cruz, P., Oishi, M. e Fierro, R. (2015). Lift of a cable-suspended load by a quadrotor: A hybrid system approach, *American Control Conference (ACC), 2015*, pp. 1887–1892.
- Feng, Y., Rabbath, C. A. e Su, C.-Y. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer Netherlands, Dordrecht, chapter Modeling of a Micro UAV with Slung Payload, pp. 1257–1272.
- Goodarzi, F. A., Lee, D. e Lee, T. (2015). Geometric control of a quadrotor uav transporting a payload connected via flexible cable, *International Journal of Control, Automation and Systems*.
- Guerrero, M., Mercado, D., Lozano, R. e Garcia, C. (2015). Ida-pbc methodology for a quadrotor uav transporting a cable-suspended payload, *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on*, pp. 470–476.
- Kanistras, K., Martins, G., Rutherford, M. J. e Valavanis, K. P. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer Netherlands, Dordrecht, chapter Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Traffic Monitoring, pp. 2643–2666.
- Lindsey, Q., Mellinger, D. e Kumar, V. (2012). Construction with quadrotor teams, *Autonomous Robots* **33**(3): 323–336.
- Melita, C. D., Longo, D., Muscato, G. e Giudice, G. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer Netherlands, Dordrecht, chapter Measurement and Exploration in Volcanic Environments, pp. 2667–2692.
- Mellinger, D., Lindsey, Q., Shomin, M. e Kumar, V. (2011). Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, pp. 2668–2673.
- Mellinger, D., Shomin, M., Michael, N. e Kumar, V. (2013). Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors, *Distributed autonomous robotic systems*, Springer, pp. 545–558.
- Merino, L., Martínez-de Dios, J. R. e Ollero, A. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer Netherlands, Dordrecht, chapter Cooperative Unmanned Aerial Systems for Fire Detection, Monitoring, and Extinguishing, pp. 2693–2722.
- Ollero, M. B. K. K. I. M. A. (2011). Autonomous transportation and deployment with aerial robots for search and rescue missions, *Journal of Field Robotics* **28**.
- Pizetta, I. H. B., Brandão, A. S. e Sarcinelli-Filho, M. (2016). A hardware-in-loop platform for rotary-wing unmanned aerial vehicles, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* (To appear).
- Raffo, G. V., Ortega, M. G. e Rubio, F. R. (2011). Path tracking of a uav via an underactuated control strategy, *European Journal of Control* **17**(2): 194 – 213.
- Rey, C., Martín, M. P., Lobo, A., Luna, I., Diago, M. P., Millan, B. e Tardáguila, J. (2013). *Precision agriculture '13*, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, chapter Multispectral imagery acquired from a UAV to assess the spatial variability of a Tempranillo vineyard, pp. 617–624.