

Towards a digital twin for cooperative load transportation involving multiple multirotor drones. *

P. Susbielle, * A. Namigtle-Jimenez, **
J.F. Guerrero-Castellanos, *** N. Marchand, *
N. Mendoza-Robles, *** S. Durand, **** J. Diaz-Tellez ***
R.A. Enriquez-Caldera **

* Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, GIPSA-lab, 38000 Grenoble, Francia

** Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Departamento de Electrónica, Tonantzintla, 72840 México

*** Benémerita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Facultad de Ciencias de la Electrónica, Puebla, 75592 México

**** Laboratorio ICube, INSA Estrasburgo, Universidad de Estrasburgo, CNRS, 67000 Estrasburgo, Francia

Abstract:

By merging digital twin strategies with cooperative multirotor drone systems for load transportation, we are expanding the boundaries of autonomous logistics. This paper delves into the intricacies of modeling and controlling multiple drones in a collaborative setting, with the ultimate goal of developing digital twins that can facilitate comprehensive simulation, analysis, and optimization of drone operations. The paper introduces a well-known control strategy to demonstrate how n agents can transport a point mass load or a rigid body load, considering the center of mass of the load. The i -th agent is assumed to have knowledge of the states of neighboring j -th agents. Newton's formalism with quaternion parameterization has been used to model the agents along with the load.

Keywords: UAVs, load transportation, digital twin, cooperative control.

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más digitalizado, la capacidad de replicar el comportamiento y las características de sistemas físicos en un entorno virtual ha revolucionado diversos sectores. Esta innovación, conocida como gemelo digital (*digital Twin*), permite a las organizaciones crear representaciones virtuales precisas de objetos, procesos y sistemas reales (Tao et al., 2022). Estas réplicas digitales no solo facilitan la simulación y el análisis, sino que también ofrecen una plataforma para optimizar el rendimiento y prever fallos potenciales antes de que ocurran en el mundo físico.

Por otro lado, la tecnología de los UAV's (*Unmanned Autonomous Vehicles*) ha avanzado significativamente en los últimos años, logrando aplicaciones desde la vigilancia y la fotografía aérea hasta el transporte de cargas útiles (Telli et al., 2023). Una de las innovaciones más prometedoras en este campo es el trabajo coordinado de dos o más sistemas multirotores para transportar objetos

pesados o voluminosos que un sólo vehículo no podría manejar de manera efectiva (Villa et al., 2020). Esta colaboración entre UAV's no solo maximiza la capacidad de carga, sino que también optimiza la estabilidad y el control durante el vuelo, permitiendo un transporte seguro y eficiente. El transporte colaborativo de carga entre agentes ha generado retos de gran magnitud debido a los desafíos técnicos y logísticos generados por la complejidad de la asignación de tareas (y que además permitan mantener una formación correcta), a la dificultad de establecer comunicación entre cada participante que garantice una rápida respuesta debido a cambios en el entorno y la implementación de algoritmos de control en sus diferentes modalidades (Tuci et al., 2018; Verginis and Dimarogonas, 2022; Javaid et al., 2023; Hameed et al., 2023). En el caso de los vehículos aéreos, particularmente los cuadrotoros, han existido retos debido a su naturaleza no lineal, a ser subactuados, etc. En el sentido del transporte de carga, se han presentado trabajos que van desde participaciones de agentes individuales (El Ferik et al., 2014; Pereira et al., 2016; Jiménez-Cano et al., 2022; Sun and Franchi, 2023)

* Autor por correspondencia email: alfredo.namigtle@inaoe.edu.mx

hasta grupales (Sreenath and Kumar, 2013; Tagliabue et al., 2017, 2019; Estevez et al., 2024).

Algunas investigaciones se han esforzado para encontrar la forma más efectiva, no solo de transportar cargas suspendidas sino también de manipularlas durante el vuelo, en donde los análisis van desde considerar cables hasta uno o mas brazos robóticos empotrados sobre el vehículo aéreo (Ruggiero et al., 2018; Ollero et al., 2021; Namigtle-Jimenez et al., 2023). En el ámbito de la carga de cuerpos rígidos, se busca que los agentes puedan asistir en la elevación, desplazamiento y colocación de objetos, mejorando la precisión, minimizando los efectos de alguna perturbación con el fin de ajustar su comportamiento y garantizando un entorno de trabajo seguro y eficiente. Sin embargo, es importante que antes de una implementación se puedan contar con modelos precisos que brinden información sobre la dinámica de estos cuadricópteros bajo un esquema de colaboración que describa la dinámica de la carga y sus efectos sobre los vehículos aéreos. La integración de gemelos digitales con drones colaborativos para el transporte de carga representa una de las innovaciones más prometedoras en el ámbito de la logística y la tecnología autónoma. En este artículo, se aborda una parte de un proyecto más general, que consiste en la integración de gemelos digitales para el estudio y desarrollo de drones colaborativos para el transporte de carga, y se presenta de la siguiente manera: el capítulo 2 aborda sobre la teoría de grafos, el capítulo 3 muestra los preliminares matemáticos sobre los cuadrotos y la carga suspendida. La explicación del control colaborativo se encuentra en el capítulo 4, mientras que los resultados en simulación y experimentales se analizan en el capítulo 5. Al finalizar, en el capítulo 6, se encuentran las conclusiones sobre los resultados reportados.

2. TEORÍA DE GRAFOS

La interacción de un sistema multiagente puede ser representada mediante grafos. La teoría de grafos es un recurso que permite definir la topología de comunicación entre los agentes y desde el punto de vista de control, permite establecer propiedades de estabilidad. Considere el grafo $\mathcal{G} = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}\}$ el cual consiste en un conjunto de vértices (o nodos) $\mathcal{V} = 1, \dots, N$ y enlaces \mathcal{E} . Si hay un enlace (i, j) entre los nodos i y j , entonces i y j se llaman adyacentes, es decir, $\mathcal{E} = (i, j) \in \mathcal{V} \times \mathcal{V} : i, j \text{ adyacente}$. \mathcal{G} es llamado no dirigido o bidireccional si $(i, j) \in \mathcal{E} \Leftrightarrow (j, i) \in \mathcal{E}$, en caso contrario el término asignado es grafo no dirigido. La matriz de adyacencia A esta definida por $a_{ij} = 1$ si i y j son adyacentes, y $a_{ij} = 0$ en caso contrario. Un camino desde i hasta j es una secuencia de diferentes nodos, iniciando desde i y terminando con j , de modo que cada par de nodos consecutivos es adyacente. Si hay un camino de i a j , entonces i y j son llamados conectados. Si todos los pares de nodos en \mathcal{G} son conectados y \mathcal{G} es no dirigido, entonces se habla de un grafo fuertemente conectado. Para grafos bidireccionales, el término *fuertemente* se omite. La matriz de grados D de \mathcal{G} es la matriz diagonal con elementos d_i igual a la

cardinalidad del conjunto vecino del nodo i , $N_i = \{j \in \mathcal{V} : (i, j) \in \mathcal{E}\}$. La matriz Laplaciana \mathcal{L} de \mathcal{G} es definida como $\mathcal{L} = D - A$.

En el contexto del control de sistemas multiagente, la configuración de consenso líder-seguidor tiene mucho interés práctico. En dicha configuración, un líder es representado por un nodo extra denotado $i = 0$ y la información se intercambia entre dicho nodo y sus nodos vecinos. Esta interacción se representa mediante el grafo $\bar{\mathcal{G}}$ el cual está conformado del grafo \mathcal{G} el nodo $i = 0$ y los arcos entre el líder y sus vecinos. Además, la interacción entre el líder y sus vecinos se representa mediante la matriz diagonal $\mathbf{G} = \text{diag}(g_1, \dots, g_N)$ con $g_i = 1$ si el i -ésimo nodo está conectado al líder y $g_i = 0$ en caso contrario.

Definición 2.1. (*Líder-seguidor*) La formación bajo el esquema líder seguidor de un sistema multiagente se lleva a cabo si, para cada uno de los agentes $i \in \{1, \dots, N\}$, existe un control distribuido estático $\mathbf{u}_i \in \chi^c \subset \mathbb{R}^n$ tal que el sistema en lazo cerrado satisfice

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_i(t) - (\mathbf{x}_0(t) + \Delta_i)\| = 0, \quad i = 1, \dots, N$$

para cualquier condición inicial $\mathbf{x}_i(0)$, $i = 0, 1, \dots, N$. Donde $\mathbf{x}_0 \in \chi \subset \mathbb{R}^n$ representa el vector de estado del líder y Δ_i representa la posición del i -ésimo nodo al centro de la formación.

3. MODELO DEL SISTEMA MULTI-VEHÍCULOS Y CARGA SUSPENDIDA

En esta sección se presenta un modelo general que describe el comportamiento de un conjunto de vehículos aéreos transportando una carga mediante cables. Se definen tres marcos de referencia principales: \mathbf{E}^L que se encuentra en el centro de masas de la carga, \mathbf{E}^i que representa el sistema de coordenadas cuyo centro corresponde al centro de masas del i -ésimo cuadricóptero y el marco de referencia \mathbf{E}^f , considerado inercial. La carga es considerada un cuerpo rígido con masa m_L y matriz de inercia \mathbf{J}_L .

Las Ecs. (1), (2) muestran la dinámica traslacional y rotacional respectivamente de los i -ésimos agentes, en este caso cuadrotos, conectados a un cuerpo rígido (ver Fig. 1).

$$\begin{aligned} \Sigma_{T_i} : & \begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{v}_i \\ m_i \dot{\mathbf{v}}_i = -m_i g \mathbf{e}_z^f + \mathbf{R}_i^f(\mathbf{Q}_i) T_{ei} \mathbf{e}_z^i - \mathbf{R}_L^f(\mathbf{Q}_L) \rho_i f_i \end{cases} (1) \\ \Sigma_{R_i} : & \begin{cases} \dot{\mathbf{Q}}_i = \frac{1}{2} \Xi(\mathbf{Q}_i) \Omega_i \\ \mathbf{J}_i \dot{\Omega}_i = -[\Omega_i^\times] \mathbf{J}_i \Omega_i + \Gamma_i \end{cases} (2) \end{aligned}$$

en donde $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^\top$ corresponde a la posición del i -ésimo agente respecto al marco de referencia \mathbf{E}^f , m_i es la masa del i -ésimo cuadricóptero, $g \mathbf{e}_z^f$ es la constante de gravedad, \mathbf{R}_i^f es la matriz de rotación de \mathbf{E}^i a \mathbf{E}^f asociado al cuaternión \mathbf{Q}_i , T_{ei} es la fuerza de empuje en dirección \mathbf{e}_z^i , \mathbf{R}_L^f corresponde a la matriz de rotación de la carga de \mathbf{E}^L a \mathbf{E}^f asociado al cuaternión \mathbf{Q}_L , ρ_i es la *attitude* del

i -ésimo cable suspendido y f_i es la tensión del cable del i -ésimo cuadrotor hacia la carga. La velocidad rotacional del i -ésimo agente está definida por Ω_i , mientras que $[\Omega_i^\times]$ corresponde a su matriz anti-simétrica, \mathbf{J}_i a la matriz inercial y Γ_i es el vector de par aplicado como señal de control.

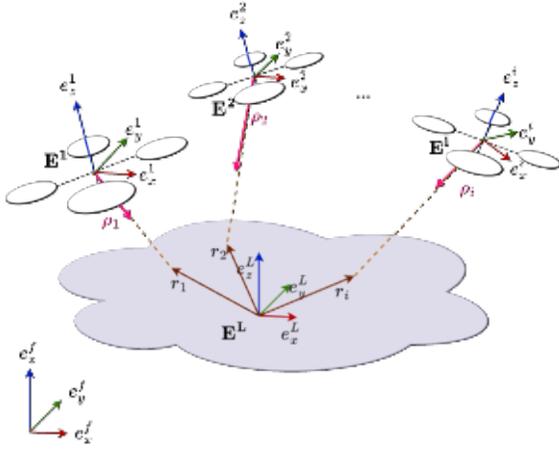


Fig. 1. Representación del i -ésimo agente conectado a un cuerpo rígido el cual cuenta con su marco de referencia \mathbf{E}^L coincidente con su CoM (Center of Mass). r_i corresponde a la distancia entre el CoM y el punto donde está sujetándose la carga.

Mientras que las Ecs. 3 y 4 definen la dinámica de traslación y rotación de la carga,

$$\Sigma_{T_L} : \begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_L = \mathbf{v}_L \\ m_L \dot{\mathbf{v}}_L = -m_L g \mathbf{e}_z^f + \sum_{i=1}^n \mathbf{R}_L^f(\mathbf{Q}_L) \rho_i f_i \end{cases} \quad (3)$$

$$\Sigma_{R_L} : \begin{cases} \dot{\mathbf{Q}}_L = \frac{1}{2} \Xi(\mathbf{Q}_L) \Omega_L \\ \mathbf{J}_L \dot{\Omega}_L = -[\Omega_L^\times] \mathbf{J}_L \Omega_L + \sum_{i=1}^n [\mathbf{r}_i^\times] \rho_i f_i + \Gamma_L \end{cases} \quad (4)$$

en donde $\mathbf{p}_L = [x_L, y_L, z_L]^\top$ es la posición de la carga con masa m_L vista desde el marco de referencia \mathbf{E}^f y \mathbf{Q}_L es el cuaternión correspondiente a la carga. La velocidad rotacional de la carga se define como Ω_L , \mathbf{J}_L es la matriz inercial y Γ_L se define como un término de disipación de energía. Además, la fuerza f_i transferida por los cables puede ser modelada como un resorte que actúa entre la posición del centro de masas del vehículo denotado por \mathbf{p}_i y la posición del punto en la carga a donde está anclado el cable, visto en \mathbf{E}^f , esto es

$$f_i = \begin{cases} k_c (\|\mathbf{L}_i\| - L_0) & \text{si } (\|\mathbf{L}_i\| - L_0) > 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (5)$$

donde $\mathbf{L}_i = \mathbf{p}_i - (\mathbf{p}_L + \mathbf{R}_L \mathbf{r}_i)$. Además, el vector normalizado que representa la orientación del cable está dado por $\rho_i = \mathbf{L}_i / \|\mathbf{L}_i\|$.

En el caso de que la carga sea considerada como una carga de masa puntual (ver Fig. 2), las ecuaciones de

movimiento se restringen a la dinámica de traslación dando como resultado

$$\Sigma_{T_L} : \begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_L = \mathbf{v}_L \\ m_L \dot{\mathbf{v}}_L = -m_L g \mathbf{e}_z^f + \sum_{i=1}^n \rho_i f_i \end{cases} \quad (6)$$

en donde la fuerza f_i transferida por los cables puede ser modelada como

$$f_i = \begin{cases} k_c (\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_L\| - L_i) & \text{si } (\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_L\| - L_i) > 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (7)$$

Además el vector de orientación del cable es $\rho_i = \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_L}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_L\|}$

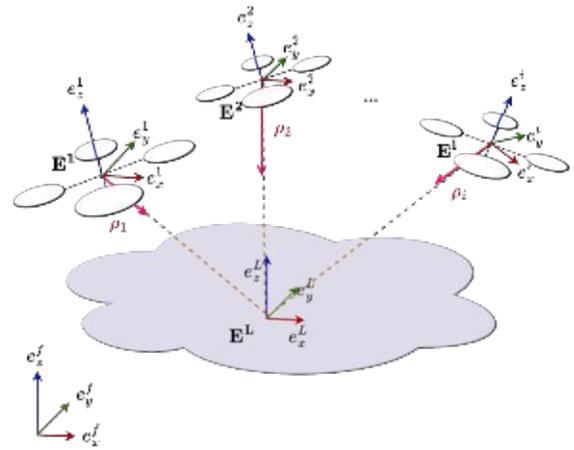


Fig. 2. Representación del i -ésimo agente conectado a una carga de masa puntual el cual cuenta con su marco de referencia \mathbf{E}^L coincidente con su CoM.

4. CONTROL COLABORATIVO

Con la finalidad de corroborar el modelo matemático del conjunto de cuadrotores transportando una carga, se adoptó un esquema de control colaborativo distribuido bajo el esquema líder seguidor (ver Fig. 3), el cual es ampliamente conocido en la literatura Ren and Beard (2008); Lewis et al. (2013).

Para ello, se consideran las ecuaciones de movimiento del los vehículos descritas en (1) y (2) y se define el siguiente vector de control

$$\mathbf{u}_i = -g \mathbf{e}_z^f + \frac{1}{m_i} \mathbf{R}_i(\mathbf{Q}_i) T_{e_i} \mathbf{e}_z^i - \frac{1}{m_i} \mathbf{R}_L^f(\mathbf{Q}_L) \rho_i f_i \quad (8)$$

Entonces, (1) se convierte en

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{v}_i, \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{u}_i \quad (9)$$

Observación 4.1. El vector \mathbf{u}_i es considerado un control virtual que será posteriormente diseñado y que representa un vector de aceleración deseada. Esto significa que la dirección del vector de empuje $T_{e_i} \mathbf{e}_z^i$ debe encontrarse alineada en todo momento con el vector \mathbf{u}_i . Por lo

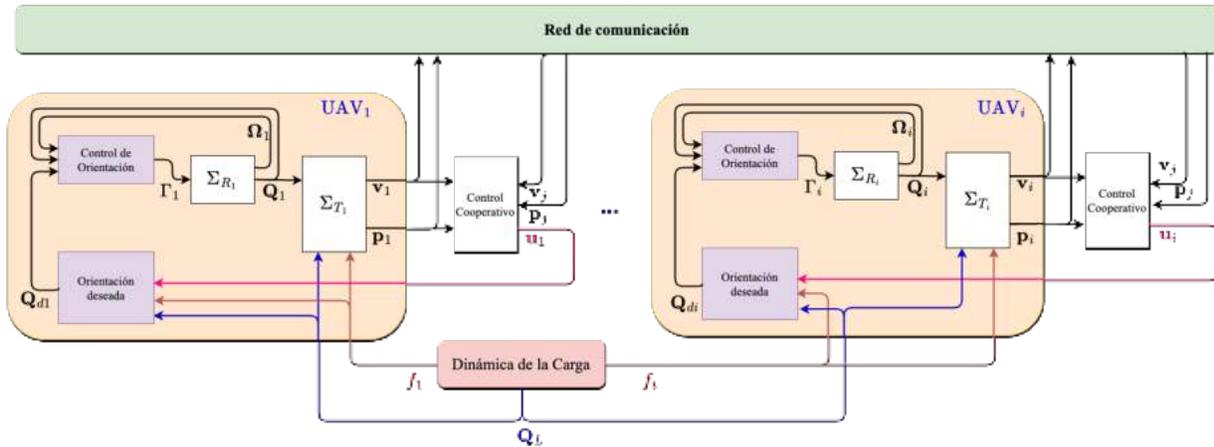


Fig. 3. Diagrama a bloques que representa la interacción de i -ésimos agentes y la carga. Se puede observar que cada agente cuenta con un control de orientación por cuaternión. Al mismo tiempo la orientación deseada del agente es generada en función de la dinámica de la carga y la señal u de control proveniente del control colaborativo. Existe una red de comunicación en donde cada agente comparte su velocidad y su posición con el fin de establecer un control colaborativo.

anterior, la matriz de rotación \mathbf{R}_i debe satisfacer la siguiente restricción

$$\mathbf{R}_i(\mathbf{Q}_i)\mathbf{e}_z^i = \frac{m_i\mathbf{u}_i + m_i g \mathbf{e}_z^f + \mathbf{R}_L^f(\mathbf{Q}_L)\boldsymbol{\rho}_i f_i}{\|m_i\mathbf{u}_i + m_i g \mathbf{e}_z^f + \mathbf{R}_L^f(\mathbf{Q}_L)\boldsymbol{\rho}_i f_i\|} \quad (10)$$

Una manera de encontrar el cuaternión de orientación \mathbf{Q}_i y en consecuencia la matriz $\mathbf{R}_i(\mathbf{Q}_i)$ es reportada en Abdessameud and Tayebi (2010).

Observación 4.2. Note que la matriz $\mathbf{R}_i(\mathbf{Q}_i)$ que satisface la restricción (10) representa una matriz de orientación deseada que se utiliza como referencia al control de orientación (attitude control) que han permite la estabilización de la dinámica rotacional dada por las ecuaciones (2). Un control que permite realizar dicha tarea y que es usado en el presente trabajo fue reportado en Guerrero-Castellanos et al. (2011).

El control cooperativo distribuido que resuelve el problema de formación con transporte de carga está dado por:

$$\mathbf{u}_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} -\mathbf{K}_p(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) - \mathbf{K}_d \mathbf{v}_i + (\boldsymbol{\Delta}_i - \boldsymbol{\Delta}_j) + g_i [\mathbf{K}_p(\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_i) + \mathbf{K}_d(\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_i)] \quad (11)$$

donde $\boldsymbol{\Delta}_i$ representa una localización deseada del i -ésimo vehículo con respecto a la posición de referencia \mathbf{p}_0 dictada por el líder, lo cual en consecuencia, permite establecer la formación.

La prueba de convergencia del protocolo (11) aplicado a un sistema como el dado por (9) puede ser consultado en Ren and Beard (2008); Lewis et al. (2013).

5. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos numéricamente y de forma experimental que han permitido

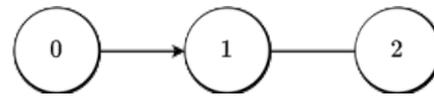


Fig. 4. Topología empleada para el control colaborativo.

validar al gemelo digital. Debido a la restricción de espacio, los resultados por ahora se acotan al transporte de una carga de masa puntual usando dos cuadricópteros, denotados de ahora en adelante como UAV₁ y UAV₂. El grafo no dirigido y conectado que define la topología de comunicación es el mostrado en la Fig. 4, donde el nodo 0, 1 y 2, corresponde al nodo virtual (generador de referencia), al UAV₁ y al UAV₂, respectivamente. Las posiciones de referencia dictadas por el líder se definen de la siguiente manera.

$$\begin{cases} \mathbf{p}_0 = [-1 \ 0 \ 1]^T & \text{para } 0 \text{ seg} \leq t < 60 \text{ seg} \\ \mathbf{p}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T & \text{para } 60 \text{ seg} \leq t < 90 \text{ seg} \\ \mathbf{p}_0 = [0 \ 1 \ 1]^T & \text{para } 90 \text{ seg} \leq t < 120 \text{ seg} \\ \mathbf{p}_0 = [-1 \ 1 \ 1]^T & \text{para } 120 \text{ seg} \leq t < 150 \text{ seg} \\ \mathbf{p}_0 = [-1 \ 0 \ 1]^T & \text{para } 150 \text{ seg} \leq t < 180 \text{ seg} \\ \mathbf{p}_0 = [0 \ 1 \ 1.5]^T & \text{para } 180 \text{ seg} \leq t < 210 \text{ seg} \\ \mathbf{p}_0 = [-1 \ 0 \ 1]^T & \text{para } 210 \text{ seg} \leq t < 240 \text{ seg} \\ \mathbf{p}_0 = [-1 \ 0 \ 0]^T & \text{para } 240 \text{ seg} \leq t < 280 \text{ seg} \end{cases}$$

con $\mathbf{v}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ en las maniobras. Además, la separación deseada entre vehículos está dada por $\boldsymbol{\Delta}_{ij} = [1 \ 0 \ 0]^T$, es decir, existe una separación en la dirección \mathbf{e}_x^f .

5.1 Resultados en simulación

Para la simulación numérica se consideraron dos vehículos similares y una carga de masa puntual, cuyos parámetros se muestran en la tabla 5.1. Las evolución de las posiciones en lazo cerrado usando (11) son mostradas

Table 1. Parámetros de simulación

| | Valor | Definición |
|-------|---|--|
| m_i | 0.536 kg | Masa del i -ésimo vehículo |
| m_L | 0.096 kg | Masa de la carga |
| l | 0.75 m | Longitud de la cuerda |
| J_i | $\begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 5.1 \times 10^{-5} \\ 0 & 5.1 \times 10^{-5} & 0.001 \end{bmatrix}$ | kg m^2 Matriz de inercia del i -ésimo UAV |

en las figuras 5 y 6. Estas posiciones corresponden al CoM de los cuadricópteros y de la carga, con respecto al marco de referencia E^f . De manera particular, en la Fig. (6), se muestra la evolución de las posiciones de los cuadricópteros y la carga, cuando se le aplica una perturbación a la carga en la dirección e_z y se puede observar que el control hace su trabajo compensando dicha perturbación y manteniendo la formación.

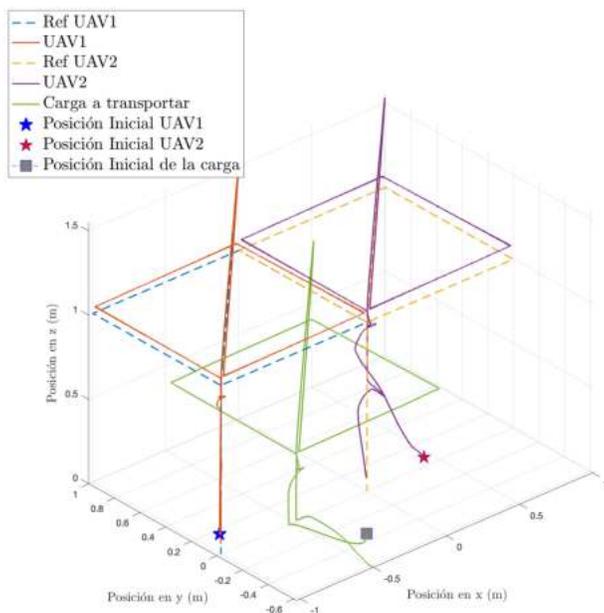


Fig. 5. Comportamiento de los cuadricópteros y carga siguiendo posiciones de referencia y sin perturbación

5.2 Resultados experimentales

Los resultados experimentales se llevaron a cabo en una plataforma experimental (ver Fig.(9)) desarrollada en GIPSA-Lab y adecuada al uso de un conjunto de cuadricópteros bajo un marco de colaboración entre el laboratorio GIPSA-Lab y la facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE) de la BUAP. Esta plataforma permite tener un entorno de pruebas avanzado, diseñado para

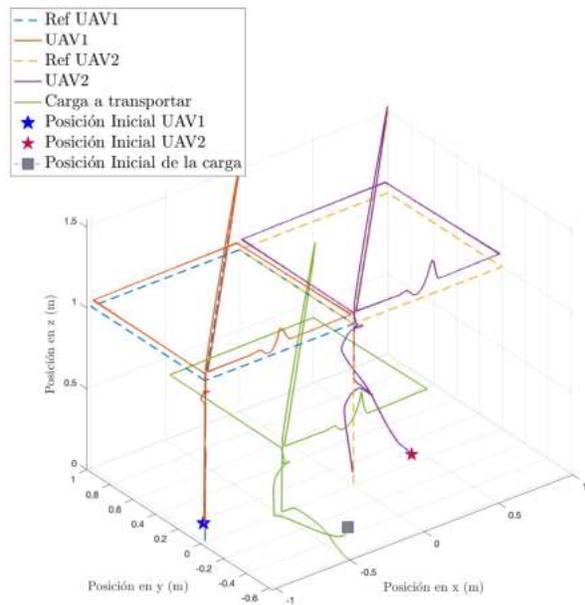


Fig. 6. Comportamiento de los cuadricópteros y carga siguiendo posiciones de referencia y con perturbación

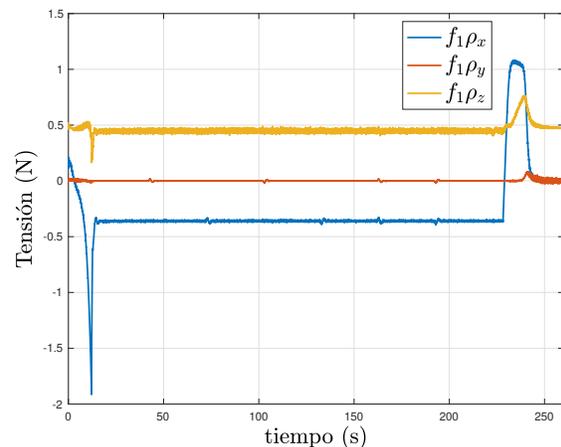


Fig. 7. Tensión en el cable del UAV₁ hacia la carga de masa puntual derivado de la maniobra de la Fig(5)

investigar y desarrollar tecnologías de control de drones y en conjunto con otra plataforma similar en la FCE-BUAP están permitiendo el desarrollo de los gemelos digitales. Existen tres componentes que conforman el ecosistema para la experimentación con drones, y estos se conectan mediante una red WiFi local. El primer elemento es el Sistema de Captura de Movimiento que consta de una serie de cámaras que detectan el movimiento de un cuerpo rígido (dron) a través de unas esferas reflectoras puestas en él; en este caso se usa el equipo que provee

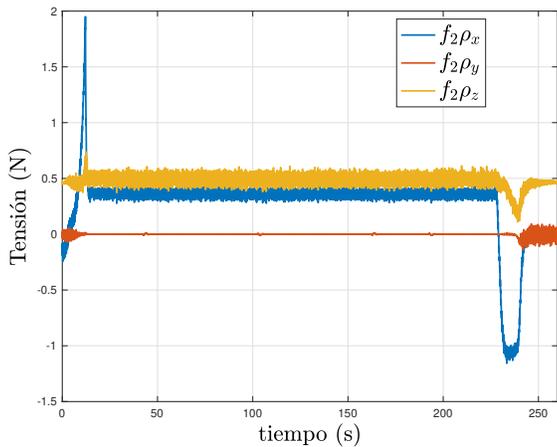


Fig. 8. Tensión en el cable del UAV₂ hacia la carga de masa puntual derivado de la maniobra de la Fig(5)

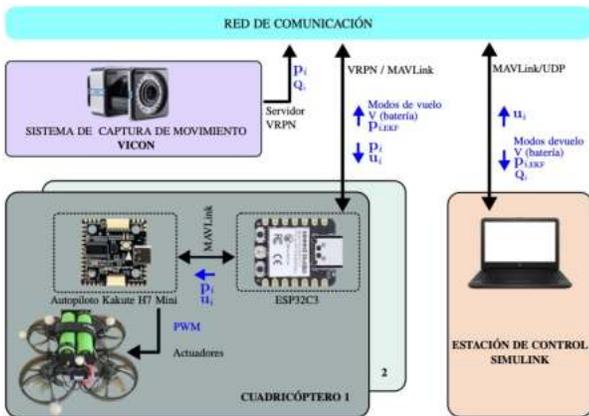


Fig. 9. Representación gráfica de la composición del sistema con la que se cuenta en GIPSA-Lab

VICON y estima la POSE (posición y orientación) global del dron. Enseguida está el Cuadricóptero que si bien pueden ser varios en el ecosistema, cada vehículo tiene asignada una dirección IP conectada a la red local a través del ESP32C3. Como núcleo contiene un autopiloto Kakute H7 Mini que ejecuta el control de actitud y gestiona el control de sus periféricos y actuadores. El autopiloto recibe la posición global (medida por VICON) y mejora dicha señal gracias a sus algoritmos internos, devolviéndola a la red de comunicación. Por último, la Estación de Control toma la telemetría del cuadricóptero y le devuelve la señal de control, comando que en el dron se interpreta como ángulos deseados y fuerza de empuje de los motores.

En la Fig. 10 se muestra los resultados de un experimento obtenidos durante una prueba de vuelo considerando el control (11) y probada previamente en simulación. Se puede apreciar la evolución de cada cuadricóptero durante la colaboración así como la posición de la carga sujeta por los cables a cada vehículo. Si bien, aquí se muestra un

solo experimento, el conjunto de experimentos y la gran cantidad de datos ha permitido al grupo de investigación validar y ajustar el modelo del sistema, que va desde las posiciones y velocidades lineales y angulares, hasta las corrientes y velocidades angulares en los motores y nivel de voltaje en baterías.

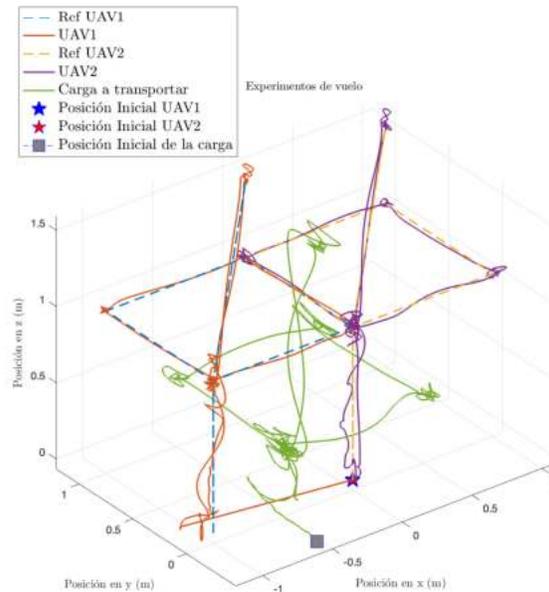


Fig. 10. Resultados experimentales que muestra la dinámica de dos drones transportando una carga de masa puntual.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El trabajo de investigación sobre control colaborativo utilizando drones y el modelado matemático de la dinámica de los vehículos y la carga transportada, así como el detalle de todos los subsistemas, que por restricciones de espacio no fue posible cubrir en este artículo, ha ofrecido a nuestro grupo una perspectiva innovadora en la implementación de sistemas de transporte y colaboración autónoma. El gemelo digital tiene la finalidad de servir como base para las pruebas futuras, tanto en control, comunicaciones, detección de fallas, sistema de almacenamiento energía, etc. A pesar de que en las pruebas prácticas se haya considerado a la carga como una masa puntual en lugar de un cuerpo rígido, los resultados obtenidos muestran un avance significativo en la comprensión y optimización de este tipo de sistemas. Se buscará más adelante hacer experimentos con diferentes tipos de carga, con diferente geometría y en consecuencia momento de inercia.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto franco-mexicano TOBACCO, financiado por FORDECYT-PRONACES a través de la cooperación conjunta SEP- CONAHCYT ANUIES-ECOS Nord program (MX-296702, FR-M18M02). De la misma manera, es parcialmente financiado por ROBOTEX 2.0, *The French Infrastructure in Robotics ROBOTEX* (EQUIPEX ANR-10-EQPX-44-01) y TIRREX (EQUIPEX+ ANR-21-ESRE-0015). Se agradece al *Institut National des Sciences Appliquées* (INSA) de Estrasburgo y al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) por el apoyo durante la ejecución de este trabajo.

REFERENCIAS

- Abdessameud, A. and Tayebi, A. (2010). Global trajectory tracking control of vtol-uavs without linear velocity measurements. *Automatica*, 46(6), 1053–1059. doi:<https://doi.org/10.1016/j.automatica.2010.03.010>.
- El Ferik, S., Ahmed, G., and Omar, H.M. (2014). Load swing control for an unmanned aerial vehicle with a slung load. In *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14)*, 1–9. IEEE.
- Estevez, J., Garate, G., Lopez-Guede, J.M., and Larrea, M. (2024). Review of aerial transportation of suspended-cable payloads with quadrotors. *Drones*, 8(2), 35.
- Guerrero-Castellanos, J.F., Marchand, N., Hably, A., Leseq, S., and Delamare, J. (2011). Bounded attitude control of rigid bodies: Real-time experimentation to a quadrotor mini-helicopter. *Control Engineering Practice*, 19(8), 790–797.
- Hameed, A., Ordys, A., Możaryn, J., and Sibilska-Mroziewicz, A. (2023). Control system design and methods for collaborative robots. *Applied Sciences*, 13(1), 675.
- Javaid, S., Saeed, N., Qadir, Z., Fahim, H., He, B., Song, H., and Bilal, M. (2023). Communication and control in collaborative uavs: Recent advances and future trends. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Jiménez-Cano, A.E., Sanalitra, D., Tognon, M., Franchi, A., and Cortés, J. (2022). Precise cable-suspended pick-and-place with an aerial multi-robot system: A proof of concept for novel robotics-based construction techniques. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 105(3), 68.
- Lewis, F.L., Zhang, H., Hengster-Movric, K., and Das, A. (2013). *Cooperative control of multi-agent systems: optimal and adaptive design approaches*. Springer Science & Business Media.
- Namigtle-Jimenez, A., Alvarez-Munoz, J., Diaz-Tellez, J., Enriquez-Caldera, R., Escareno, J., Durand, S., Marchand, N., and Guerrero-Castellanos, J. (2023). Clf-based control for aerial manipulation using multirotor uavs. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 940–947. IEEE.
- Ollero, A., Tognon, M., Suarez, A., Lee, D., and Franchi, A. (2021). Past, present, and future of aerial robotic manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(1), 626–645.
- Pereira, P.O., Herzog, M., and Dimarogonas, D.V. (2016). Slung load transportation with a single aerial vehicle and disturbance removal. In *2016 24th Mediterranean conference on control and automation (MED)*, 671–676. IEEE.
- Ren, W. and Beard, R.W. (2008). *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control*. Springer.
- Ruggiero, F., Lippiello, V., and Ollero, A. (2018). Aerial manipulation: A literature review. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3), 1957–1964.
- Sreenath, K. and Kumar, V. (2013). Dynamics, control and planning for cooperative manipulation of payloads suspended by cables from multiple quadrotor robots. *rn*, 1(r2), r3.
- Sun, S. and Franchi, A. (2023). Nonlinear mpc for full-pose manipulation of a cable-suspended load using multiple uavs. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 969–975. IEEE.
- Tagliabue, A., Kamel, M., Siegwart, R., and Nieto, J. (2019). Robust collaborative object transportation using multiple mavs. *The International Journal of Robotics Research*, 38(9), 1020–1044.
- Tagliabue, A., Kamel, M., Verling, S., Siegwart, R., and Nieto, J. (2017). Collaborative transportation using mavs via passive force control. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5766–5773. IEEE.
- Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., and Ji, P. (2022). Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 372–389.
- Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumehraz, M., Atalla, S., and Mansoor, W. (2023). A comprehensive review of recent research trends on unmanned aerial vehicles (uavs). *Systems*, 11(8), 400.
- Tuci, E., Alkilabi, M.H., and Akanyeti, O. (2018). Cooperative object transport in multi-robot systems: A review of the state-of-the-art. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 59.
- Verginis, C.K. and Dimarogonas, D.V. (2022). Control of cooperative manipulator-endowed systems under high-level tasks and uncertain dynamics. *Annual Reviews in Control*, 54, 219–240.
- Villa, D.K., Brandao, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2020). A survey on load transportation using multirotor uavs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 98, 267–296.