

## UAV fully-actuated: modelo, control y comparación con configuración coplanaria

Antonio González-Morgado\*, Carlos Álvarez-Cía, Guillermo Heredia, Aníbal Ollero

*Grupo de Robótica, Visión y Control, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos sn., 41092, Sevilla, España.*

**To cite this article:** González-Morgado, A., Álvarez-Cía, C., Heredia, G. and Ollero, A. 2023. UAV Fully-Actuated: model, control and comparison with coplanar configuration. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 20, 401-411. <https://doi.org/10.4995/riai.2023.19348>

### Resumen

Con el desarrollo de la robótica aérea han aparecido nuevas plataformas de multirotores de actuación completa (*fully-actuated* en inglés), las cuales tienen la capacidad de desplazarse sin inclinar la plataforma. Este artículo presenta una comparación en cuanto a capacidades de movimiento entre un hexarotor de rotores coplanarios, configuración estándar, y un hexarotor de rotores inclinados, configuración *fully-actuated*. Para ello, se presenta el diseño, modelo y control de ambas configuraciones. Tras el montaje de las plataformas, se comparan con diferentes trayectorias, mediante simulaciones y experimentos. Así mismo, se muestran capacidades exclusivas de la plataforma *fully-actuated*, como la capacidad de mantenerse en hover con un ángulo de inclinación. Finalmente, se presenta la aplicación de la plataforma *fully-actuated* para inspección visual de techos de puentes <sup>1</sup>.

*Palabras clave:* UAVs, robótica aérea, robótica, modelado

### UAV fully-actuated: model, control and comparison with coplanar configuration

#### Abstract

With the development of aerial robotics, new multi-rotor platforms, known as fully-actuated, have appeared. These platforms have the ability to move without tilting the platform. This article presents a comparison in terms of motion capabilities between a coplanar hexarotor, standard configuration, and a tilted-propellers hexarotor, fully-actuated configuration. For this purpose, this paper presents the design, modelling and control of both configurations. Both platforms are compared with different trajectories through simulations and experiments. Also, unique capabilities of the fully-actuated platform, such as the ability to hover at a tilt angle, are shown. Finally, the use of the fully-actuated platform for visual inspection of bridge beams is included <sup>1</sup>.

*Keywords:* UAVs, aerial robotics, robotics, modeling

### 1. Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (*unmanned aerial vehicles*, UAVs) han ganado popularidad en los últimos años por su potencial para revolucionar diversos sectores, incluidas las tareas de inspección. Los UAVs, también conocidos como drones, ofrecen una alternativa rentable y eficiente a los métodos de inspección tradicionales, ya que pueden acceder de forma rápida y segura a zonas de difícil acceso (Ollero et al., 2022). Algunos ejemplos de aplicación son la inspección de refinerías de petróleo y gas (Trujillo et al., 2019), plantas químicas (Ollero et al., 2018), líneas eléctricas (Armengol et al., 2021; Suarez

et al., 2021), o infraestructuras civiles (Sanchez-Cuevas et al., 2020; Ivanovic et al., 2021; Ahmed et al., 2020).

Cuando se realizan inspecciones, a menudo es necesario interactuar con el entorno para recopilar los datos necesarios. Esto puede suponer un reto con las plataformas aéreas tradicionales, como helicópteros o multirrotores estándar, que tienen una capacidad limitada para maniobrar muy cerca de las infraestructuras (Lassen and Fumagalli, 2022). Esto se debe a que los multirrotores convencionales, es decir, de rotores coplanarios, son plataformas subactuadas, ya que deben variar su actitud para poder moverse lateralmente. Esto dificulta su uso en aplicaciones donde se necesita alta precisión o ejercer fuerzas.

<sup>1</sup> Video del artículo/Video of the paper: <https://youtu.be/d95Qvz5hba4>

\*Autor para correspondencia: mantonio@us.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

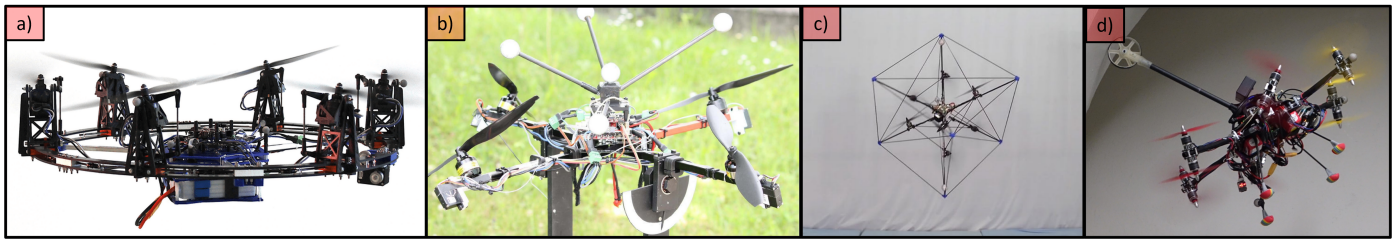


Figura 1: Plataformas omnidireccionales y *fully-actuated*: a) Plataformar *FAST-Hex* (Ryll et al., 2016), b) Quadrotor sobreactuado usando servomotores (Ryll et al., 2015), c) Plataforma omnidireccional con rotores bidireccionales (Brescianini and D'Andrea, 2016) d) Hexarotor omnidireccional usando seis servomotores (Kamel et al., 2018)

En los últimos años, para aumentar la capacidad de actuación de los multirrotores, se han desarrollado nuevos diseños, gracias a los cuales la plataforma deja de estar subactuada. Estas plataformas son conocidas como *fully-actuated* (Rajappa et al., 2015). Brescianini and D'Andrea (2016), usando ocho motores bidireccionales colocados en diferentes orientaciones, desarrollaron un UAV omnidireccional, el cual se puede desplazar y orientar en cualquier dirección. Así mismo, Ryll et al. (2015) propusieron un quadrotor en el cual cada hélice se puede orientar de manera independiente usando servomotores. De manera similar, Ryll et al. (2016) diseñaron el *FAST-Hex*, un hexarotor cuyas hélices se inclinan usando un único servomotor, lo que permitiendo pasar de una configuración coplanaria a una de rotores inclinados. Este diseño permite reconfigurar la plataforma según la aplicación. Para aplicaciones sin interacción física, la configuración elegida es coplanaria, para tener una eficiencia durante el vuelo. Para aplicaciones con interacción física, los motores se inclinan para poder realizar fuerzas laterales. Finalmente, Kamel et al. (2018) desarrollaron un hexarotor omnidireccional, el cual podía modificar la inclinación de cada motor de manera individual, usando para ello seis servomotores. Estas plataformas han permitido a los drones interactuar con el entorno (Bodie et al., 2019), permitiendo su uso en aplicaciones como realizar marcas en el techo (Lanegger et al., 2022-06). La Figura 1 muestra las plataformas anteriormente presentadas.

Aunque los diseños presentados anteriormente aumentan las capacidades de la plataforma, es necesario aumentar el número de actuadores, mediante servomotores o mediante rotores bidireccionales. Este aumento de componentes provoca que aumente el coste de la plataforma, así como el peso, lo que reduce la carga máxima y el tiempo de vuelo y, por lo tanto, el tiempo de inspección. Así mismo, estos nuevos diseños presentan nuevos retos en diferentes áreas. En primer lugar, se necesitan nuevas estrategias de control, al tener el sistema de translación y de rotación desacoplados (Rajappa et al., 2015). Así mismo, al tener los rotores inclinados aparecen interacciones aerodinámicas entre los rotores, las cuales no aparecen en la configuración convencional (Garofano-Soldado et al., 2022).

Otro tipo de plataforma *fully-actuated* es la desarrollada por Sanchez-Cuevas et al. (2020), donde los rotores están inclinados un ángulo  $\alpha$  y  $\beta$  fijos y, por lo tanto, no varían durante el vuelo. Este diseño permite tener una plataforma *fully-actuated* sin necesidad de aumentar las señales de control, permitiendo el desplazamiento sin variar los ángulos de *roll* y *pitch*, tal y como muestra la Figura 2. Esta diseño también permite interactuar con el entorno (Sanchez-Cuevas et al., 2020; Ryll et al., 2017) sin necesidad de componentes adicionales.

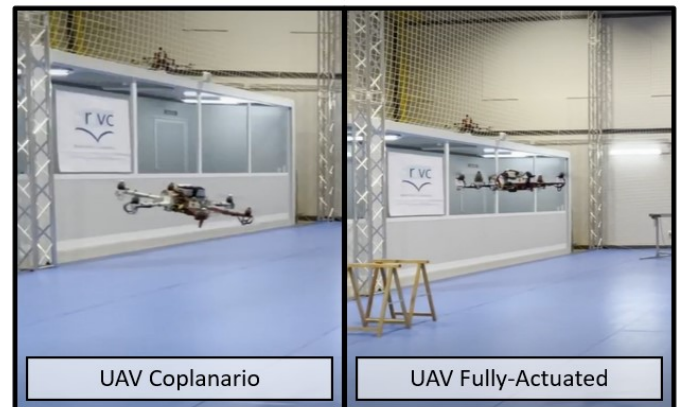


Figura 2: Movimiento de ambas configuraciones.

En este artículo se desarrolla una comparativa entre un hexarotor estándar y un hexarotor *fully-actuated*. La configuración seleccionada para el hexarotor *fully-actuated* es un hexarotor de hélices inclinadas, en el cual cada hélice ha sido orientada unos ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  fijos, como la plataforma de Sanchez-Cuevas et al. (2020). Se ha elegido esta plataforma ya que no hay que añadir más señales de control, siendo necesario únicamente rotar los motores con alguna pieza diseñada y desacoplar el control de actitud y posición. El artículo presenta el diseño, el modelo dinámico y la estrategia de control de ambas configuraciones. Así mismo, las capacidades de movimiento de ambas plataformas son comparadas mediante simulaciones y vuelos en interior. Además, el artículo presenta una maniobra exclusiva de la plataforma *fully-actuated*: el *hover* inclinado, es decir, mantenerse en *hover* variando *roll* y *pitch*. Finalmente, se presenta una aplicación de la plataforma *fully-actuated* para la inspección de puentes. El presente trabajo es una versión extendida del trabajo preliminar presentado en las Jornadas de Automática 2022, el cual obtuvo el premio al mejor trabajo dentro del grupo temático de robótica (González Morgado et al., 2022).

El artículo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 presenta el diseño y montaje de la configuración de rotores coplanarios y de inclinados. A continuación, en la sección 3 se presenta el modelo dinámico de ambas configuraciones, mostrando las capacidades de movimiento sin inclinación de la plataforma *fully-actuated*. Posteriormente, la sección 4 muestra la estrategia de control de cada configuración. Finalmente, en la sección 5 se comparan ambas plataformas mediante simulaciones, mientras en la sección 6 se comparan mediante experimentos, incluyendo un ejemplo de aplicación de la plataforma *fully-actuated* para la inspección de puentes.

## 2. Diseño del UAV

Para el diseño de la plataforma de rotores inclinados se ha partido de una estructura comercial, la cual ha sido modificada usando piezas impresas en 3D. En esta sección se presenta el hexarotor comercial utilizado, así como el diseño de las piezas para convertirlo en un hexarotor de rotores inclinados.

### 2.1. Hexarotor estándar

La plataforma aérea seleccionada para este trabajo está compuesta del frame comercial DJI F550, usando los motores DJI 2312E, las hélices DJI 9x4.5 y los variadores XRotor 40A. Para aumentar el espacio interior del frame, se usan espaciadores impresos en 3D en PLA, tal como muestra la Figura 3.

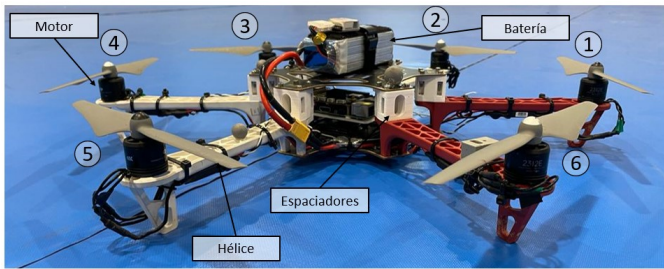


Figura 3: Componentes del hexarotor coplanario

El hexarotor usa *ArduPilot* como autopiloto, el cual se ejecuta en una Raspberry Pi 4 conectada a la placa de sensores Navio2 de Emlid. Todo el sistema está alimentado por una única batería LiPo 4S, de capacidad 5300 mAh. La Tabla 1 muestra las características de la plataforma. Las características que cambian según sea plataforma estándar o plataforma *fully-actuated* se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1: Características de la plataforma.

Parámetro	Valor
$I_{XX}$	0.03 [kgm <sup>2</sup> ]
$I_{YY}$	0.03 [kgm <sup>2</sup> ]
$I_{ZZ}$	0.054 [kgm <sup>2</sup> ]
Hélices	DJI 9x4.5 [in]
Motores	DJI 2312E
Variadores	XRotor 40A
Batería	LiPo 4S, 5300 [mAh]
Controladora	RPi4 + Navio2

### 2.2. Diseño de rotores inclinados

Para modificar la plataforma de rotores coplanarios presentada anteriormente se usan piezas impresas en 3D con ácido poliláctico (PLA). Estas piezas recogen dos giros que permiten inclinar cada rotor. Cada motor está rotado siguiendo la secuencia representada en la Figura 4.

El motor  $i$  se gira en primer lugar un ángulo  $\alpha_i$  respecto al eje  $X_i$ , definiendo una nueva base  $XYZ'$ , y posteriormente un ángulo  $\beta_i$  respecto al eje  $Y'_i$ , definiendo la nueva base  $XYZ''$ . La numeración de los motores está indicada en la Figura 3. Aunque los ángulos  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  pueden tomar valores diferentes, se considera  $|\alpha_i| = |\alpha| = |\beta| = |\beta_i|$  por simplificaciones de diseño.

Además, para minimizar las acciones de control, como se demuestra en (Rajappa et al., 2015), se toma  $\alpha_i = -\alpha$  y  $\beta_i = \beta$ , donde  $i = 1, 3, 5$ , y  $\alpha_i = \alpha$  y  $\beta_i = -\beta$ , donde  $i = 2, 4, 6$ .

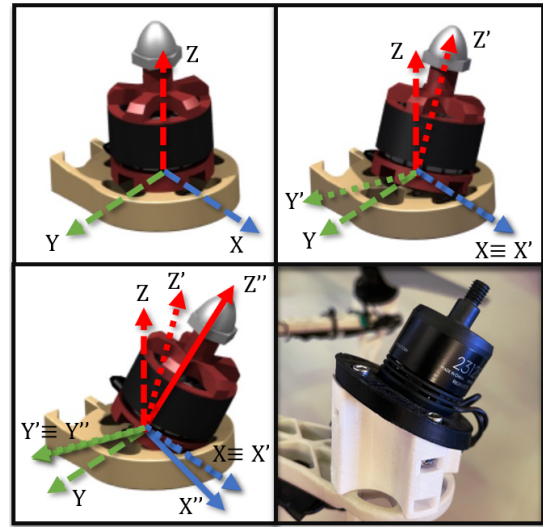


Figura 4: Secuencia de rotación de un motor

Para seleccionar los valores  $\alpha$  y  $\beta$  se tiene en cuenta que a mayores ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , menor eficiencia y menor tiempo de vuelo, al tener motores que anulan sus componentes de fuerzas horizontales en posición de *hover* y generan menor empuje en  $Z$  para la misma velocidad de rotación, al estar inclinado el motor. Sin embargo, a mayores  $\alpha$  y  $\beta$ , mayor capacidad para girar en *roll* y *pitch* en *hover*. La Figura 5 representa como varía la eficiencia respecto a la configuración estándar según  $\alpha$  y  $\beta$ . Esta eficiencia se obtiene teniendo en cuenta la contribución de cada motor para generar sustentación según  $\alpha$  y  $\beta$ . Además, se representan los ángulos máximos de *pitch* y *roll* que se pueden lograr en *hover*. Utilizando la Figura 5, se toma  $\alpha = \beta = 20^\circ$ , dando lugar a una configuración con una buena capacidad de inclinación en *hover*, pero en la cual la eficiencia no se ve muy comprometida.

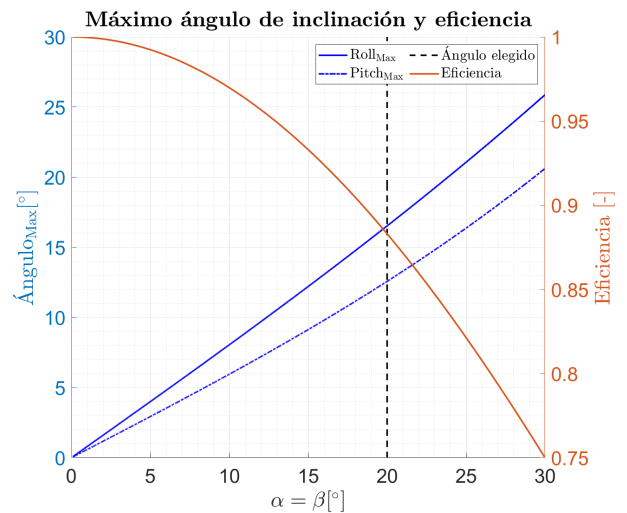


Figura 5: Eficiencia y ángulo máximo en *hover* de inclinación según  $\alpha$  y  $\beta$ .

Así mismo, resulta interesante evaluar las fuerzas laterales  $F_X$  y  $F_Y$  que se pueden generar para la configuración elegida. Para encontrar estos valores, se debe resolver el problema de optimización (1), donde  $F$  es el módulo de la fuerza lateral ejercida en la dirección  $\vec{v}$ ,  $m$  es la masa de la plataforma,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $H(\alpha, \beta)$  es el mezclador, presentado en la sección 3, mientras que  $\omega_{min}$  y  $\omega_{max}$  son las velocidades de rotación máximas y mínimas de los motores.

$$\begin{aligned} & \text{maximizar } F \\ & \omega^2 \in \mathbb{R}^6 \\ & \text{sujeto a } H(\alpha, \beta)\omega^2 = [F\vec{v} + mg\vec{z}; 0; 0; 0], \quad (1) \\ & \omega_{min}^2 < \omega^2 < \omega_{max}^2. \end{aligned}$$

Si se resuelve el problema de optimización (1) para las direcciones  $\vec{v} = \vec{x}$  y  $\vec{v} = \vec{y}$ , y para diferentes valores de  $|\alpha| = |\beta|$ , se obtienen las curvas presentadas en la Figura 6.

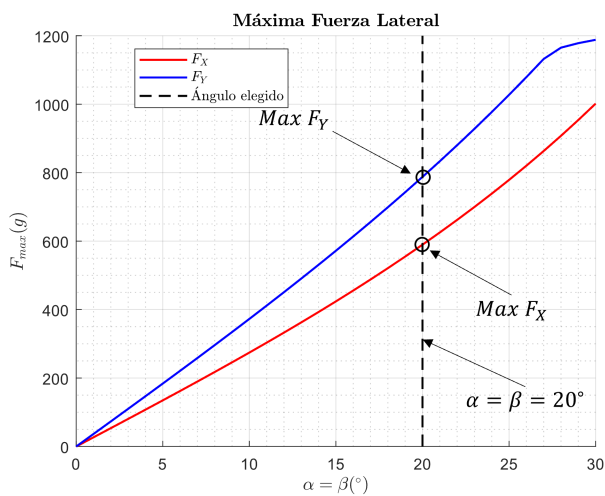


Figura 6: Fuerzas laterales máximas  $F_X$  y  $F_Y$  según  $\alpha$  y  $\beta$ .

Finalmente, la Figura 7 muestra la pieza diseñada e impresa en PLA, compuesta por dos piezas A y B, la cual realiza las rotaciones presentadas anteriormente, siendo  $\alpha = 20^{\circ}$  y  $\beta = 20^{\circ}$ .

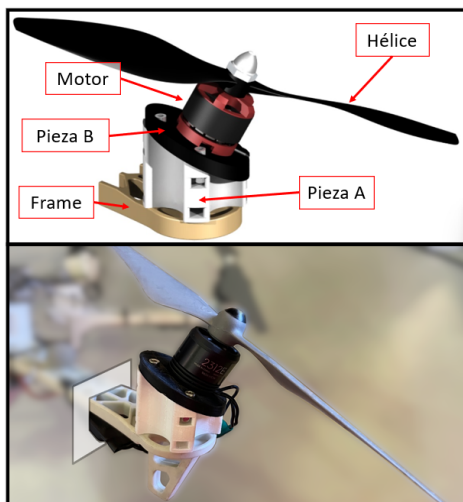


Figura 7: Vistas de la pieza diseñada.

Para ensamblar las piezas A y B al frame y al motor, se usan tornillos y tuercas M3. Para ello, en primer lugar, se atornilla la pieza A al frame. Posteriormente, se debe atornillar el motor a la pieza B. Finalmente, se pueden unir las piezas A y B usando tres tornillos M3, como presenta la Figura 7

### 2.3. Hexarotor fully-actuated

Usando las piezas anteriores, se lleva a cabo la modificación del hexarotor coplanario presentado en la sección 2.1. La Figura 8 muestra el resultado obtenido.

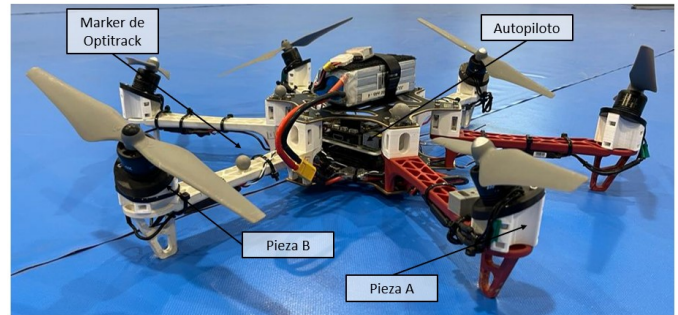


Figura 8: Hexarotor de rotores inclinados.

Finalmente, resulta interesante comparar las características que cambian entre la configuración estándar y la configuración *fully-actuated*. Algunas de estas características son el tiempo de vuelo, la capacidad de carga o el ángulo máximo de inclinación en *hover*. Para ello, la Tabla 2 recoge diferentes características que cambian de una configuración a otra. Se observa como la plataforma *fully-actuated* tiene menor tiempo de vuelo, *payload* y eficiencia, al tener rotores inclinados que contrarrestan sus fuerzas en algún momento. Sin embargo, esta configuración dota a la plataforma de capacidad de inclinación en *hover*, cosa que es imposible en la configuración estándar. Así mismo, se observa como la plataforma coplanaria no tiene capacidad de generar fuerzas laterales,  $F_X = F_Y = 0$  kg, mientras que la configuración *fully-actuated* puede generar hasta 0,5 kg de fuerza lateral en el eje X. Esta diferencia se ve reflejada en la capacidad de movimientos laterales que puede realizar la plataforma *fully-actuated*, como se presentan en las simulaciones de la sección 5 y en los experimentos de la sección 6.

Tabla 2: Estándar VS Fully-Actuated (F-A)

Parámetro	Estándar	F-A
Peso [kg]	1.8	2.0
Peso Max. en despegue [kg]	3.3	3.1
Tiempo de vuelo [min] <sup>2</sup>	10	8.5
Eficiencia [-]	1.0	0.88
Ángulo $\alpha$ [ $^{\circ}$ ]	0	20
Ángulo $\beta$ [ $^{\circ}$ ]	0	20
$\phi_{Max}$ en <i>hover</i> [ $^{\circ}$ ]	0	16.5
$\theta_{Max}$ en <i>hover</i> [ $^{\circ}$ ]	0	12.6
Máxima $F_X$ [g]	0	591
Máxima $F_Y$ [g]	0	776

<sup>2</sup>El tiempo de vuelo se ha obtenido experimentalmente, midiendo el tiempo de descarga de la batería para cada configuración durante un vuelo en *hover*.

### 3. Modelo del sistema

Esta sección presenta el modelo del sistema, obtenido mediante la formulación de Euler-Lagrange. Así mismo, se deduce el mezclador para ambas configuraciones, es decir, la matriz que relaciona las fuerzas y pares generados con las velocidades de rotación de los rotores.

#### 3.1. Formulación de Euler-Lagrange

El modelo dinámico del sistema se obtiene usando la formulación de Euler-Lagrange, aplicada a un sólido rígido de seis grados de libertad:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\xi}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \xi} = \mathcal{F} \quad \text{con } \mathcal{L} = T - V \quad (2)$$

donde  $\mathcal{L}$  es la Lagrangiana,  $V$  la energía potencial,  $T$  la energía cinética,  $\mathcal{F}$  el vector de fuerzas generalizadas y  $\xi$  el vector de coordenadas generalizadas. El vector  $\xi$  está compuesto por:

$$\xi = [p \ \eta]^T \in \mathbb{R}^6 \quad (3)$$

donde  $p = [x, y, z]$  es la posición del centro de gravedad del sistema en el sistema de referencia fijo a Tierra  $\{E\} = \{X_E Y_E Z_E\}$  y  $\eta = [\phi, \theta, \psi]$  los ángulos de Euler de la plataforma, expresados en el sistema de referencia  $\{B\} = \{X_B Y_B Z_B\}$ , ligado a la plataforma. La Figura 9 muestra ambos sistemas de referencia y dichas variables.

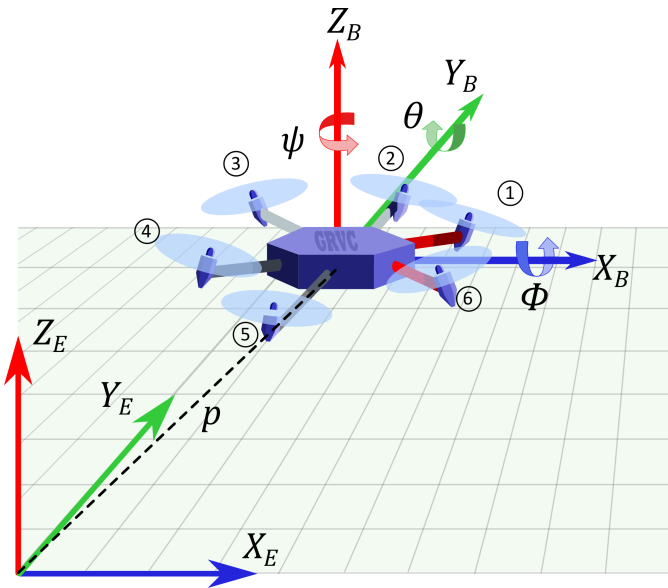


Figura 9: Sistemas de referencia.

El vector de fuerzas generalizadas  $\mathcal{F}$  está formado por las fuerzas y momentos generados por los rotores,  $F_C$ , así como otras fuerzas y momentos externos no modelados,  $F_{Ext}$ , como por ejemplo el viento. Este vector se expresa como:

$$\mathcal{F} = \mathbf{R}F_C + F_{Ext} \quad \text{con } F_C = \begin{bmatrix} F_M \\ \tau_M \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde  $\mathbf{R} = [\mathbf{R}_{EB} \ \mathbf{0}_{3 \times 3}; \ \mathbf{0}_{3 \times 3} \ \mathbf{I}_{3 \times 3}] \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  incluye la matriz de rotación  $\mathbf{R}_{EB} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  necesaria para pasar de ejes móviles  $\{B\}$  a

ejes Tierra  $\{E\}$  definida por los ángulos de Euler de la plataforma  $\eta$ ,  $F_M \in \mathbb{R}^3$  es el vector de fuerzas generadas por los rotores y  $\tau_M \in \mathbb{R}^3$  es el vector de momentos generados por los rotores.

Estas fuerzas  $F_M$  y momentos  $\tau_M$  están relacionados con las velocidades de rotación de los motores a través del mezclador, presentado en la sección 3.2. Finalmente, desarrollando la expresión (2), se obtiene que el modelo dinámico es:

$$\mathbf{M}(\xi) \ddot{\xi} + \mathbf{C}(\xi, \dot{\xi}) + \mathbf{G}(\xi) = \mathbf{R}F_C + F_{Ext} \quad (5)$$

donde  $\mathbf{M}(\xi)$  es la matriz de inercias,  $\mathbf{C}(\xi, \dot{\xi})$  representa la fuerza centrífuga y de Coriolis y  $\mathbf{G}(\xi)$  recoge la fuerza gravitatoria.

#### 3.2. Mezclador

Los vectores  $F_M = [F_x \ F_y \ F_z]^T$  y  $\tau_M = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_z]^T$  están relacionados con las velocidades de rotación de los motores a través de una matriz  $H(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ , también conocida como mezclador. Esta matriz se obtiene sumando las fuerzas y los momentos respecto al centro de masas generados por los motores.

Para ello, se sabe que un motor girando a una velocidad  $\omega_i$ , genera un empuje  $T_i = C_T \omega_i^2$  y un par de arrastre  $\tau_i = C_D \omega_i^2$ , donde  $C_T$  es el coeficiente de empuje,  $C_D$  el coeficiente de arrastre y  $\omega_i$  la velocidad de rotación del motor  $i$ . Sumando el empuje generado por cada motor, así como los pares, el mezclador toma la forma de la siguiente matriz  $6 \times 6$ :

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{3 \times 6} C_T \\ \mathbf{B}_{3 \times 6} L C_T + \mathbf{C}_{3 \times 6} C_D \end{bmatrix}}_{H(\alpha, \beta)} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \\ \omega_5^2 \\ \omega_6^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde  $L$  es la distancia desde el centro de gravedad hasta la posición del rotor. Se observa que las fuerzas  $F_x$ ,  $F_y$  y  $F_z$  están generadas por los empujes de los motores, y que los pares  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  y  $\tau_z$  se generan por los pares de arrastre de los motores y por la distancia  $L$  que existe entre el centro de masas y el punto de aplicación de los empujes de los motores. Para el caso general, las matrices  $\mathbf{A}_{3 \times 6}$ ,  $\mathbf{B}_{3 \times 6}$  y  $\mathbf{C}_{3 \times 6}$  quedan definidas en las ecuaciones (7), (8) y (9), donde  $A_i$  es la columna  $i$  de la matriz  $\mathbf{A}_{3 \times 6}$ , y  $c$  y  $s$  son las funciones trigonométricas  $\cos()$  y  $\sin()$  respectivamente.

En estas expresiones se observa la dependencia del mezclador con los ángulos de inclinación  $\alpha$  y  $\beta$ . Además, para el caso particular de rotores coplanarios, donde los dos ángulos de inclinación son nulos ( $\alpha = 0^\circ$  y  $\beta = 0^\circ$ ), se tiene que las dos primeras filas de  $\mathbf{A}_{3 \times 6}$  son nulas, haciendo que  $F_x = F_y = 0$ . De este análisis se concluye que para poder generar fuerzas laterales en el sistema de referencia  $\{B\}$  ligado al UAV, es necesario que los rotores tengan cierta inclinación.

Esta capacidad de generar fuerzas laterales queda definida por el rango de la matriz  $H(\alpha, \beta)$ . Para el caso de rotores coplanarios ( $\alpha = 0^\circ$  y  $\beta = 0^\circ$ ), el rango de dicha matriz es 4, no teniendo rango completo. Sin embargo, para el caso de rotores inclinados ( $\alpha \neq 0^\circ$  o  $\beta \neq 0^\circ$ ), la matriz del mezclador tiene rango completo. Esta dependencia en el rango de la matriz  $H(\alpha, \beta)$  provocará el uso de la pseudoinversa para el control de la plataforma coplanaria, tal y como se presenta en la siguiente sección.

$$A_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} s\beta - \frac{s\alpha c\beta}{2} & s\alpha c\beta & -\frac{\sqrt{3}}{2} s\beta - \frac{s\alpha c\beta}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} s\beta - \frac{s\alpha c\beta}{2} & s\alpha c\beta & -\frac{\sqrt{3}}{2} s\beta - \frac{s\alpha c\beta}{2} \\ \frac{s\beta}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} s\alpha c\beta & -s\beta & \frac{s\beta}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} s\alpha c\beta & \frac{s\beta}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} s\alpha c\beta & -s\beta & \frac{s\beta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} s\alpha c\beta \\ c\alpha c\beta & c\alpha c\beta & c\alpha c\beta & c\alpha c\beta & c\alpha c\beta & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} \frac{c\alpha c\beta}{2} & c\alpha c\beta & \frac{c\alpha c\beta}{2} & -\frac{c\alpha c\beta}{2} & -c\alpha c\beta & -\frac{c\alpha c\beta}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} c\alpha s\beta & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} c\alpha s\beta & \frac{\sqrt{3}}{2} c\alpha s\beta & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} c\alpha s\beta \\ s\alpha c\beta & -s\alpha c\beta & c\alpha c\beta & -s\alpha c\beta & c\alpha c\beta & -s\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C_{3 \times 6} = [-A_1 \quad A_2 \quad -A_3 \quad A_4 \quad -A_5 \quad A_6] \quad (9)$$

## 4. Control

El autopiloto utilizado ha sido *Ardupilot*, tanto para la plataforma estándar como para la plataforma *fully-actuated*. Sin embargo, para la plataforma *fully-actuated* ha sido necesario modificar el firmware de *Ardupilot* para desacoplar el control de actitud del control de posición. En esta sección se presentan los esquemas de control utilizados.

### 4.1. Hexarotor estándar

Para la plataforma de rotores coplanarios, al estar subactuada por construcción, únicamente se pueden controlar 4GdL (grados de libertad) de manera independiente. Estos 4GdL son: la altura  $z$  y los ángulos de actitud *roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$  y *yaw*  $\psi$ .

El controlador de la plataforma esta formado por dos controladores anidados: un lazo externo que se encarga del control de posición, y un lazo interno que se encarga del control de actitud. El control de posición, que tiene como entrada la referencia en posición  $(x_d, y_d, z_d)$ , calcula una fuerza vertical  $F_z$  para controlar la altura  $z$  y unos ángulos de  $\phi, \theta$  para controlar la posición  $x, y$ . A continuación, con la referencia en *yaw*  $\psi$ , del generador de trayectoria, y las referencias en *roll*  $\phi$  y *pitch*  $\theta$ , del control de posición, el controlador de actitud obtiene los pares necesarios para obtener dicha actitud. La Figura 10 muestra un esquema del control de 4GdL de un hexarotor estándar.

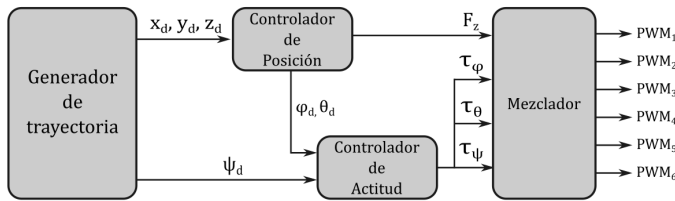


Figura 10: Esquema de control de 4 GdL.

El vector de actuación  $(F_z, \tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi)$  obtenido por los controladores es utilizado por el mezclador para obtener los PWMs necesarios en cada motor. Como para la configuración estándar el mezclador no tiene rango completo, se utiliza la pseudoinversa de Moore-Penrose para calcular los PWMs.

Además, en *Ardupilot* tanto el controlador de posición como de actitud son PID en cascada. En este esquema de control el error en posición/actitud, se transforma en una referencia en velocidad lineal/angular en un primer PID externo. Finalmente, la referencia en velocidad es controlada por un PID interno, generando las fuerzas y pares necesarios.

### 4.2. Hexarotor *fully-actuated*

Para el caso de la plataforma de rotores inclinados, se pueden controlar los 6GdL de manera independiente. Estos 6GdL son: la posición  $x, y$ , la altura  $z$ , y los ángulo de actitud *roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$  y *yaw*  $\psi$ . De manera similar al de 4GdL, este esquema de control está formado por el controlador de posición y el controlador de actitud. Sin embargo, para la configuración *fully-actuated*, ambos controladores están desacoplados, como muestra la Figura 11.

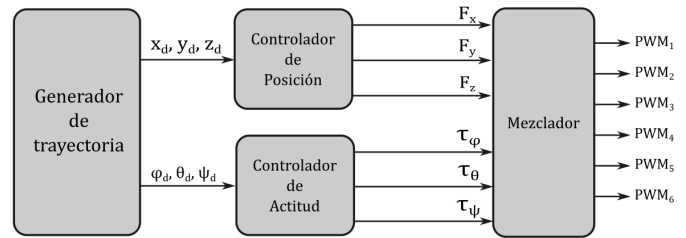


Figura 11: Esquema de control de 6 GdL.

En este caso, las referencias en actitud  $\phi, \theta$  y  $\psi$  son enviadas por el generador de trayectorias, y no por el controlador de posición. Así mismo, la salida del control de posición ahora incluye dos fuerzas nuevas  $F_x$  y  $F_y$ , las cuales no aparecían en la configuración coplanaria. Además, como el mezclador tiene rango completo siempre que  $\alpha \neq 0^\circ$  o  $\beta \neq 0^\circ$ , se puede calcular directamente su inversa, sin el uso de la pseudoinversa.

Además, se han programado dos modos de vuelos diferentes en la plataforma *fully-actuated*. El primero consiste en volar en posición sin modificar los ángulos de *roll*  $\phi$  y *pitch*  $\theta$ , es decir,  $\phi = 0^\circ$  y  $\theta = 0^\circ$ . De esta manera, la plataforma se movería lateralmente sin necesidad de modificar su actitud. El segundo, conocido como *hover* inclinado, consiste en mantener fija la posición  $(x, y, z)$ , modificando los ángulos de *roll*  $\phi$  y *pitch*  $\theta$ . Para no sobrepasar los límites de los motores y por motivos de seguridad, se han limitado los ángulos de *roll*  $\phi$  y *pitch*  $\theta$  para que sus valores máximos sean  $\phi_{max} = 12.0^\circ$  y  $\theta_{max} = 9.0^\circ$ .

## 5. Simulaciones

Una vez presentadas ambas plataformas, se van a comparar en primer lugar mediante simulaciones. Para ello se van a simular dos trayectorias: una trayectoria recta y una circular, ambas contenidas en el plano XY. Para simular la dinámica del sistema

se usa el software *MATLAB-Simulink*, donde se ha implementado la dinámica del sistema, presentada en la sección 3, así como los controladores presentados en la sección 4.

### 5.1. Trayectoria recta

En esta primera trayectoria, la plataforma debe desplazarse en 6 segundos desde la posición inicial  $p_{Ini}=[0.0; 0.0; 1.0]$  hasta la posición final  $p_{Fin}=[3.0; 0.0; 1.0]$ . Para generar la posición deseada, velocidad deseada y aceleración deseada durante el movimiento, se ha utilizado un polinomio de 5º orden, al que se le ha impuesto velocidad y aceleración nulas en  $t_{Ini} = 0$  y  $t_{Fin} = 6$  s, así como la posición inicial y final.

Se observa como ambas plataformas son capaces de seguir la trayectoria en X de referencia. Sin embargo, la configuración coplanaria debe modificar su ángulo de *pitch*  $\theta$  para poder desplazarse en X, a diferencia de la configuración *fully-actuated*, la cual se puede desplazar sin modificar sus ángulos.

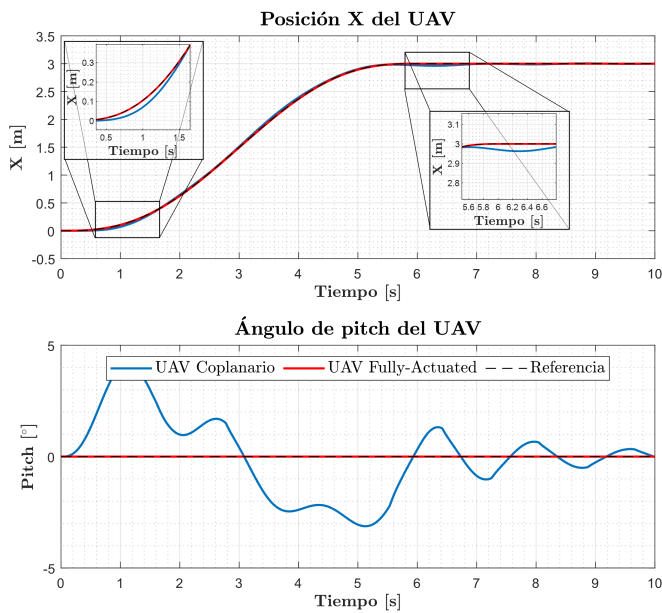


Figura 12: Resultados de simulación durante la trayectoria recta.

Así mismo, la configuración coplanaria tiene menor error, tal y como muestra la Figura 12, en la que se ha representado una vista ampliada del comienzo y final de la trayectoria, instantes en los que la plataforma coplanaria presente mayor error respecto a la trayectoria. Finalmente, la Tabla 3 recoge el valor medio del error de posición, el error máximo de posición y el ángulo máximo de *pitch* para cada plataforma.

Tabla 3: Error medio de posición y *pitch* máximo durante la trayectoria recta.

	Coplanario	Fully-Actuated
Error Medio	0.013 [m]	0.003 [m]
Error Máx.	- [m]	- [m]
Máx. $\theta$	4.21 [°]	0.00 [°]

### 5.2. Trayectoria circular

En este caso, la plataforma debe realizar un movimiento circular en el plano XY. La circunferencia queda parametrizada por la curva:  $x(t) = R \sin(\omega t)$ ,  $y(t) = R \cos(\omega t)$  y  $z(t) = 1$ , siendo  $R = 1$  m el radio de la trayectoria circular,  $\omega = 2\pi/T$  la frecuencia a la que se recorre la circunferencia y  $T = 8$  s el periodo del movimiento. Así mismo, las velocidades y aceleraciones deseadas quedan:  $\dot{x}(t) = \omega R \cos(\omega t)$ ,  $\dot{y}(t) = -\omega R \sin(\omega t)$ ,  $\dot{z}(t) = 0$ ,  $\ddot{x}(t) = -\omega^2 R \sin(\omega t)$ ,  $\ddot{y}(t) = -\omega^2 R \cos(\omega t)$  y  $\ddot{z}(t) = 0$ . Para evitar errores provocados por el transitorio inicial, la trayectoria se ha simulado durante 16 segundos, representando en la Figura 13 la última vuelta ( $t \in [8$  s, 16 s]), en la cual ya se ha alcanzado el régimen permanente del movimiento circular de referencia.

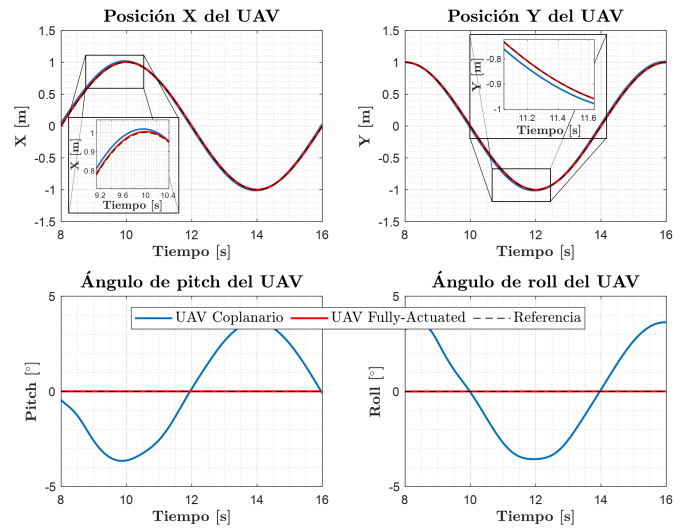


Figura 13: Resultados de simulación durante la trayectoria circular.

Se observa como las dos plataformas siguen de manera adecuada la referencia circular. Como ocurría en la trayectoria recta en X anteriormente presentada, la plataforma *fully-actuated* es capaz de desplazarse sin modificar sus ángulos de *roll* y *pitch*, a diferencia de la plataforma coplanaria, la cual modifica el ángulo de *roll* para desplazarse en Y y el ángulo de *pitch* para desplazarse en X.

Así mismo, como ocurría en la trayectoria recta en X, se observa como los errores de seguimiento son menores para la configuración *fully-actuated*. Esto se debe a una mayor capacidad de actuación respecto la configuración coplanaria, ya que tiene desacoplados los sistemas de translación y rotación, pudiendo realizar movimientos laterales sin modificar la actitud de la plataforma. Finalmente, la Tabla 4 recoge el error medio de posicionamiento durante la trayectoria circular, así como los ángulos máximos de *roll*  $\phi$  y de *pitch*  $\theta$  para ambas configuraciones.

Tabla 4: Error medio de posición y ángulos máximos durante la trayectoria circular.

	Coplanario	Fully-Actuated
Error Medio	0.042 [m]	0.012 [m]
Error Máx.	- [m]	- [m]
Máx. $\phi$	3.63 [°]	0.04 [°]
Máx. $\theta$	3.67 [°]	0.06 [°]

## 6. Experimentos

Para la comparación de las capacidades de ambas plataformas se han realizado cuatro experimentos. Los dos primeros, en los que se realiza una trayectoria lineal y una cuadrada, son realizados por ambas plataformas. El tercer experimento, consistente en una maniobra de *hover* variando la actitud, se realiza únicamente con la plataforma *fully-actuated*, ya que la plataforma de rotores coplanarios no puede realizarla al estar subactuada. Finalmente, en el cuarto experimento, se presenta el uso de la plataforma *fully-actuated* para la inspección de techos en puentes.

Los tres primeros experimentos se han llevado a cabo en las instalaciones interiores del GRVC de 20x15x7m, las cuales están equipadas con el sistema de posicionamiento Optitrack de posición milimétrica, compuesto por 28 cámaras. El último experimento se ha realizado en exteriores, usando para ello la *Total Station* como sistema de posicionamiento.

### 6.1. Trayectoria lineal

El primer movimiento para comparar ambas plataformas consiste en realizar una trayectoria recta a lo largo del eje X, definida por cuatro *waypoints*. La Tabla 5 recoge los *waypoints* utilizados para esta misión.

Tabla 5: Coordenadas de los WP.

	Inicial	WP1	WP2	Final
<b>X [m]</b>	-4.9	-4.9	-1.0	-1.0
<b>Y [m]</b>	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Z [m]</b>	0.0	1.5	1.5	0.0

La Figura 14 representa la trayectoria de referencia y las trayectorias de la plataforma de rotores inclinados y coplanarios. Además, la Figura 15 representa el PWM medio de los seis rotores de cada plataforma a lo largo de la misión.

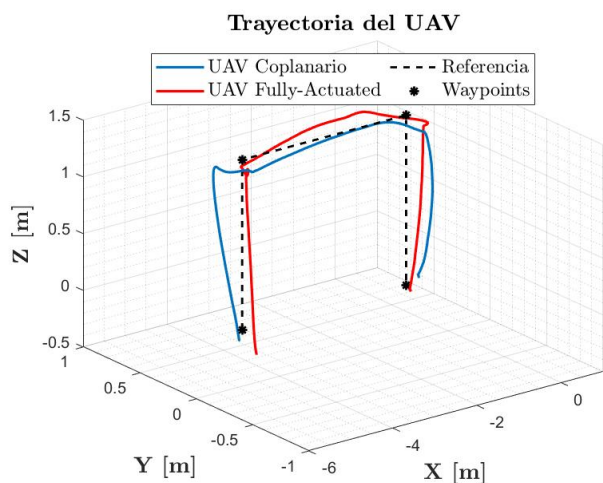


Figura 14: Trayectoria recta de ambos UAVs.

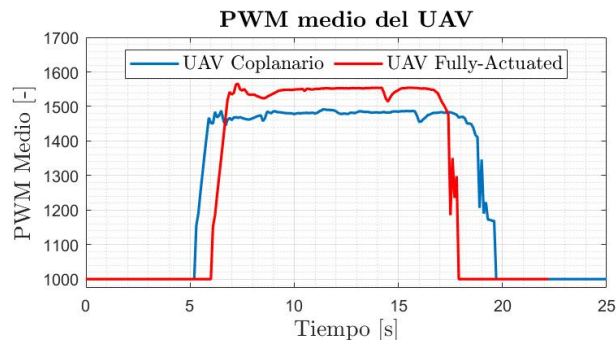


Figura 15: PWM medio durante la trayectoria, utilizado para obtener la eficiencia de manera experimental.

La Tabla 6 recapitula el error medio de posición de cada una de las plataformas así como la eficiencia de la plataforma *fully-actuated* respecto a la plataforma coplanaria. Esta eficiencia se obtiene comparando los PWMs de las dos configuraciones a lo largo de la trayectoria descrita, ya que el PWM medio está relacionado con el empuje necesario para mantener la plataforma en *hover*. Se observa como el valor obtenido es muy cercano al obtenido teóricamente en la Tabla 2.

Tabla 6: Error de posición y eficiencia.

Configuración	Error	Eficiencia
Coplanario	0.15 [m]	1.00 [-]
Fully-Actuated	0.10 [m]	0.85 [-]

Se observa como la plataforma *fully-actuated* tiene menor error de posición medio que la plataforma coplanaria. Sin embargo, la eficiencia disminuye, aumentando el consumo, ya que la inclinación de los rotores requiere un mayor empuje en cada motor para obtener una componente vertical equivalente a un rotor no inclinado, que le permita mantener la altura constante.

### 6.2. Trayectoria cuadrada

La segunda trayectoria que se realiza para comparar ambas plataformas es una trayectoria cuadrada, definida por cuatro *waypoints*. La Tabla 7 recoge las coordenadas de los *waypoints* definidos.

Tabla 7: Coordenadas de los WP.

	WP1	WP2	WP3	WP4
<b>X [m]</b>	-4.9	-1.0	-1.0	-4.9
<b>Y [m]</b>	-4.4	-4.4	0.0	0.0
<b>Z [m]</b>	1.5	1.5	1.5	1.5

De la misma manera, la Figura 16 representa la trayectoria de referencia y las trayectorias realizadas por ambas plataformas. Así mismo, la Figura 17 muestra el PWM medio para ambas configuraciones, lo que da una idea del consumo.



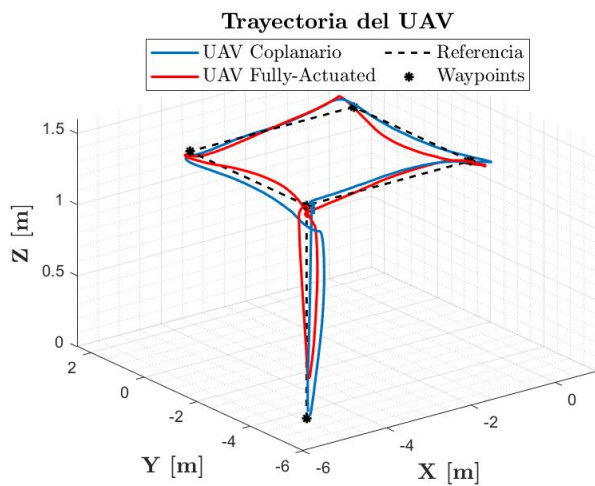


Figura 16: Trayectoria cuadrada de ambos UAVs.

Los resultados obtenidos para esta trayectoria son similares a los obtenidos para la trayectoria recta. La plataforma de rotores inclinados realiza el movimiento con menos error, como muestra la Tabla 8. Sin embargo, la eficiencia también disminuye, debido a la inclinación de los motores. Gracias a estos dos movimientos, quedan comparadas las capacidades de movimiento de ambas plataformas, obteniendo resultados parecidos.

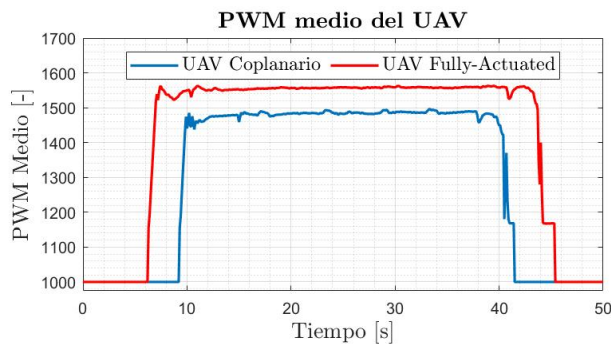


Figura 17: PWM medio durante la trayectoria, utilizado para obtener la eficiencia de manera experimental.

Tabla 8: Error de posición y eficiencia.

Configuración	Error	Eficiencia
Coplanario	0.22 [m]	1.00 [-]
Fully-Actuated	0.17 [m]	0.83 [-]

### 6.3. Maniobra de hover inclinado

Una vez que se han comparado ambas plataformas, en este último experimento se muestra una capacidad que únicamente tiene la plataforma de rotores inclinados. Este último experimento consiste en despegar la plataforma, mantenerla en *hover* en una posición y variar los ángulos de actitud manteniendo la posición. Con este último experimento se muestra el desacoplo entre la actitud y la posición en la plataforma *fully-actuated*, cosa que no ocurre en la configuración estándar. Por lo tanto,

este experimento se realiza únicamente con la plataforma *fully-actuated*.

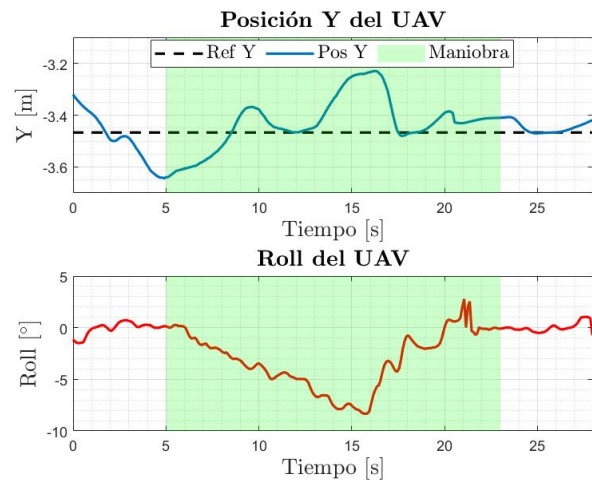


Figura 18: Posición y actitud durante la maniobra.

Para este movimiento se ha variado el ángulo de *roll* de la plataforma. Por lo tanto, la Figura 18 presenta el ángulo de *roll* de la plataforma, así como la posición Y de la plataforma. Se representa únicamente la posición Y ya que es la variable que se vería modificada en una plataforma de rotores coplanarios al variar el ángulo de *roll*.

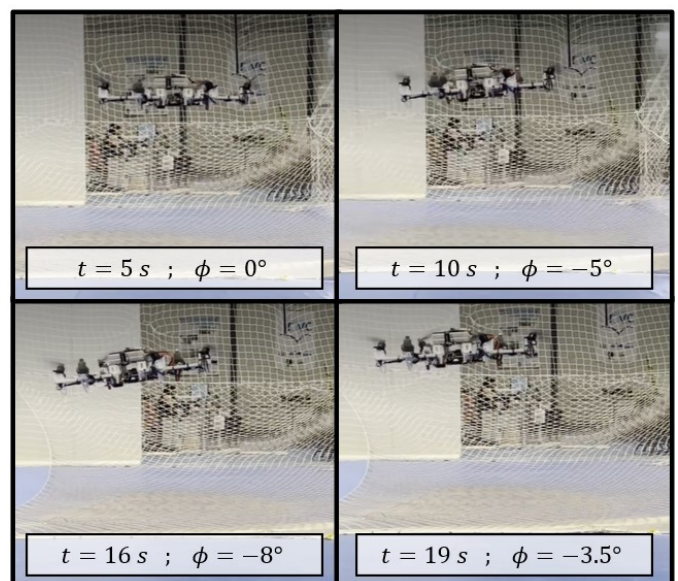


Figura 19: Maniobra de *hover* inclinado.

Se observa como, aunque varía el ángulo de *roll* de la plataforma, su posición Y se mantiene prácticamente fija, teniendo un error máximo de unos 20 cm. Por seguridad, el ángulo de *roll* se ha variado hasta 9°. La Figura 19 presenta algunos instantes del experimento, donde se ha añadido el instante de tiempo correspondiente así como el ángulo de la plataforma.

### 6.4. Vuelo en exteriores: contacto con puentes

En este último experimento se modifica la plataforma *fully-actuated* anteriormente presentada para realizar una inspección

visual a lo largo del techo de un puente. Para ello, la plataforma se dota a la plataforma de una estructura de fibra de carbono con ruedas esférica, como muestra la Figura 20. Así mismo, la plataforma cuenta con la cámara Logitech C920 HD Pro, la cual permite retransmitir la imagen del techo a una GCS (*Ground Control Station*) en la cual un operario puede evaluar la inspección visual.

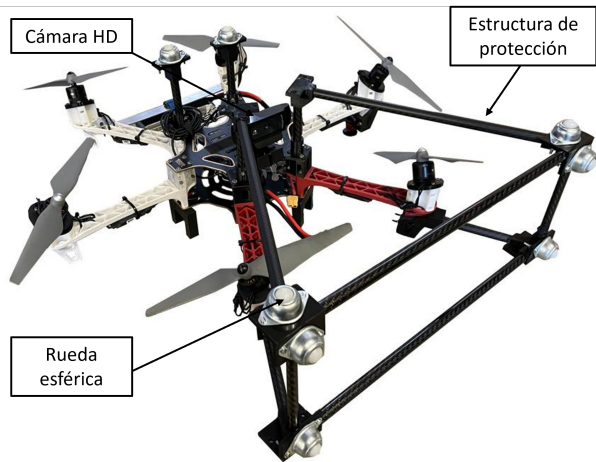


Figura 20: Plataforma *fully-actuated* para inspección de puentes.

La incorporación de la ruedas esféricas a la plataforma *fully-actuated* permite mantener el contacto de manera segura con la superficie del techo a la vez que la plataforma se desplaza a lo largo de la superficie, como muestra la Figura 21a. Este diseño no se podría utilizar con una plataforma de rotores coplanarios, ya que para desplazarse debe modificar su actitud, perdiendo el contacto con una de las ruedas. Esta pérdida de contacto podría ocasionar un choque de las hélices con la superficie del puente, como muestra la Figura 21b.

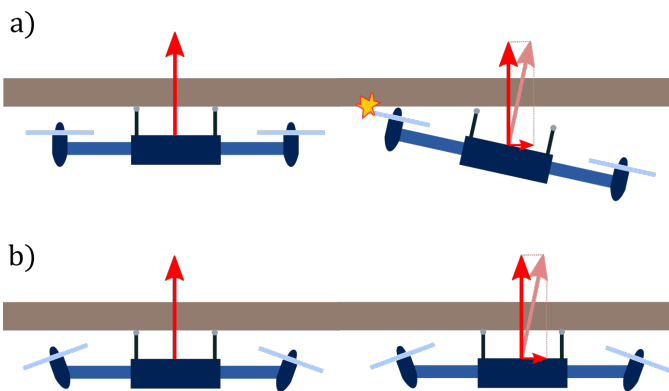


Figura 21: Comparativa de plataformas para la inspección de puentes. a) Plataforma de rotores coplanarios. b) Plataforma *fully-actuated*.

La inspección del techo se ha realizado en un puente cercano a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. Para ello, un piloto controla plataforma durante toda la inspección. Así mismo, un operario supervisa la inspección desde tierra utilizando la GCS, donde se muestran las imágenes obtenidas por la cámara del UAV. La Figura 22 muestra el UAV en contacto con el techo, incluyendo algunas imágenes capturadas durante la inspección. Así mismo, la Figura 23 muestra los ángulos de actitud y PWMs de la plataforma durante la inspección.

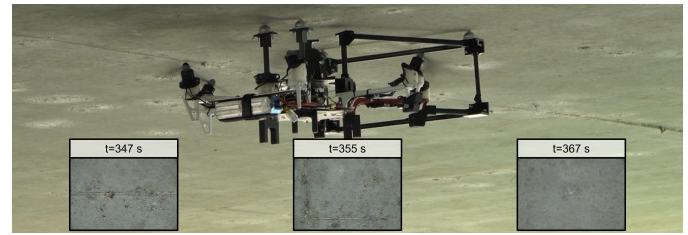


Figura 22: Inspección de puente con plataforma *fully-actuated*.

Como se observa en la Figura 23, durante la fase de vuelo libre los ángulos de actitud varían entorno a la referencia de  $0^\circ$ . Sin embargo, una vez que comienza el contacto con el puente, estos ángulos están impuestos por la inclinación de la superficie del techo. Para evitar inestabilidades debido a esta restricción geométrica, los controladores de *roll* y *pitch* se desactivan durante la fase de inspección. El piloto es el encargado de desactivarlos usando para ello la emisora de control. Así mismo se observa como al comenzar la fase de inspección el valor medio de los PWM aumenta. Esto se debe a que el empuje total generado por los motores debe compensar el peso de la plataforma y además generar una fuerza control el techo, garantizado de esta manera el contacto con el puente.

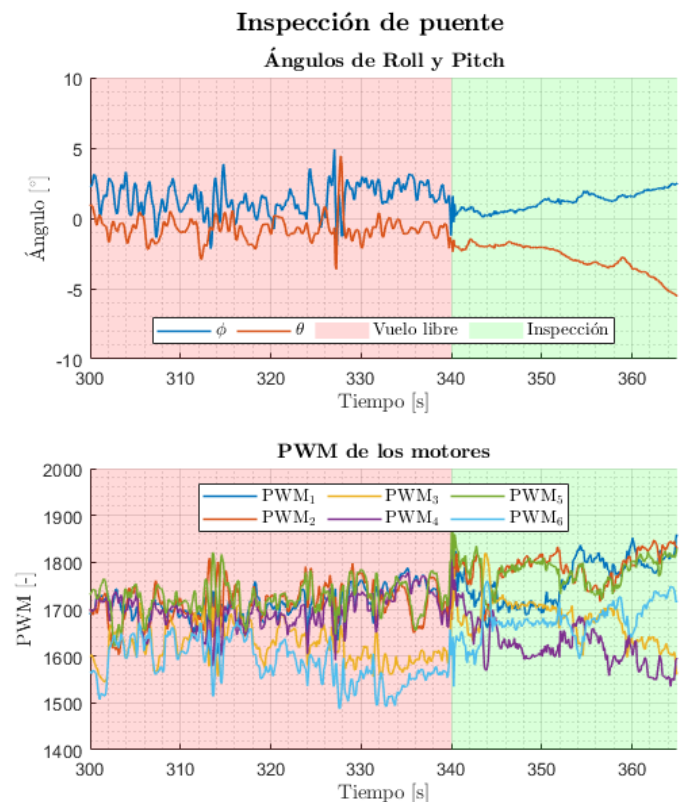


Figura 23: Actitud de la plataforma y PWMs de los motores durante la inspección.

## 7. Conclusiones

Este artículo ha presentado una comparación en cuanto a capacidades de movimiento y consumo energético entre una plataforma de rotores coplanarios, configuración estándar, y una de rotores inclinados, configuración *fully-actuated*.

Para ello, partiendo de una configuración de rotores coplanarios, se ha presentado el diseño y montaje de la plataforma de rotores inclinados. Posteriormente, se ha presentado el modelo dinámico para ambas configuraciones, así como el esquema de control de las dos plataformas. Así mismo, ambas plataformas se han comparado mediante simulaciones y experimentos, realizando diferentes trayectorias. Además, se ha mostrado una maniobra exclusiva de la plataforma *fully-actuated*. Finalmente, se ha puesto de manifiesto el interés de la aplicación de esta plataforma a la inspección de puentes.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la plataforma de rotores inclinados tiene una mayor precisión en los movimientos, al tener el control de posición y de actitud desacoplados. Sin embargo, el consumo aumenta respecto a la plataforma de rotores coplanarios, al tener los rotores inclinados.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos ROBMIN (PDC2021-121524-I00) y HAERA (PID2020-119027RB-I00), financiados por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, y los proyectos AERIAL-CORE (H2020-2019-871479) y AEROTRAIN (MSCA-ITN-2020-953454), financiados por la Comisión Europea.

## Referencias

- Ahmed, H., La, H. M., Gucunski, N., 2020. Review of non-destructive civil infrastructure evaluation for bridges: State-of-the-art robotic platforms, sensors and algorithms. *Sensors* 20 (14). DOI: 10.3390/s20143954
- Armengol, I., Suarez, A., Heredia, G., Ollero, A., 2021. Design, Integration and Testing of Compliant Gripper for the Installation of Helical Bird Diverters on Power Lines. In: 2021 Aerial Robotic Systems Physically Interacting with the Environment (AIRPHARO). pp. 1–8. DOI: 10.1109/AIRPHARO52252.2021.9571044
- Bodie, K., Brunner, M., Pantic, M., Walsler, S., Pfandler, P., Angst, U., Siegwart, R., Nieto, J., jun 2019. An omnidirectional aerial manipulation platform for contact-based inspection. *Robotics: Science and Systems Foundation*. URL: <https://doi.org/10.15607/rss.2019.xv.019> DOI: 10.15607/rss.2019.xv.019
- Brescianini, D., D'Andrea, R., 2016. Design, modeling and control of an omnidirectional aerial vehicle. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 3261–3266. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487497
- Garofano-Soldado, A., Sanchez-Cuevas, P. J., Heredia, G., Ollero, A., 2022. Numerical-experimental evaluation and modelling of aerodynamic ground effect for small-scale tilted propellers at low reynolds numbers. *Aerospace Science and Technology* 126, 107625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107625>
- González Morgado, A., Álvarez-Cía, C., Heredia, G., Ollero Baturone, A., 2022. UAV fully-actuated: modelo, control y comparación con configuración coplanaria. In: XLIII Jornadas de Automática. Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións, pp. 700–707.
- Ivanovic, A., Markovic, L., Car, M., Duvnjak, I., Orsag, M., 2021. Towards autonomous bridge inspection: Sensor mounting using aerial manipulators. *Applied Sciences* 11 (18). DOI: 10.3390/app11188279
- Kamel, M., Verling, S., Elkhatib, O., Sprecher, C., Wulkop, P., Taylor, Z., Siegwart, R., Gilitschenski, I., 2018. The voliro omniorientational hexacopter: An agile and maneuverable tilttable-rotor aerial vehicle. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 25 (4), 34–44. DOI: 10.1109/MRA.2018.2866758
- Lanegger, C., Ruggia, M., Tognon, M., Ott, L., Siegwart, R., 2022-06. Aerial layouting: Design and control of a compliant and actuated end-effector for precise in-flight marking on ceilings. In: *Proceedings of Robotics: Science and System XVIII*. p. p073. DOI: 10.3929/ethz-b-000551168
- Lassen, P., Fumagalli, M., 2022. Can your drone touch? exploring the boundaries of consumer-grade multirotors for physical interaction. In: 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 1–7. DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9812187
- Ollero, A., Heredia, G., Franchi, A., Antonelli, G., Kondak, K., Sanfeliu, A., Viguria, A., Martínez-de Dios, J. R., Pierri, F., Cortes, J., Santamaria-Navarro, A., Trujillo Soto, M. A., Balachandran, R., Andrade-Cetto, J., Rodriguez, A., 2018. The AEROARMS Project: Aerial Robots with Advanced Manipulation Capabilities for Inspection and Maintenance. *IEEE Robotics Automation Magazine* 25 (4), 12–23. DOI: 10.1109/MRA.2018.2852789
- Ollero, A., Tognon, M., Suarez, A., Lee, D., Franchi, A., 2022. Past, present, and future of aerial robotic manipulators. *IEEE Transactions on Robotics* 38 (1), 626–645. DOI: 10.1109/TR0.2021.3084395
- Rajappa, S., Ryll, M., Bühlhoff, H. H., Franchi, A., 2015. Modeling, control and design optimization for a fully-actuated hexarotor aerial vehicle with tilted propellers. In: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 4006–4013. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139759
- Ryll, M., Bicego, D., Franchi, A., 2016. Modeling and control of fast-hex: A fully-actuated by synchronized-tilting hexarotor. In: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 1689–1694. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759271
- Ryll, M., Bühlhoff, H. H., Giordano, P. R., 2015. A novel overactuated quadrotor unmanned aerial vehicle: Modeling, control, and experimental validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 23 (2), 540–556. DOI: 10.1109/TCST.2014.2330999
- Ryll, M., Muscio, G., Pierri, F., Cataldi, E., Antonelli, G., Caccavale, F., Franchi, A., 2017. 6d physical interaction with a fully actuated aerial robot. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 5190–5195. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989608
- Sanchez-Cuevas, P. J., Gonzalez-Morgado, A., Cortes, N., Gayango, D. B., Jimenez-Cano, A. E., Ollero, A., Heredia, G., 2020. Fully-actuated aerial manipulator for infrastructure contact inspection: Design, modeling, localization, and control. *Sensors* 20 (17). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4708> DOI: 10.3390/s20174708
- Suarez, A., Romero, H., Salmoral, R., Acosta, J. A., Zambrano, J., Ollero, A., 2021. Experimental Evaluation of Aerial Manipulation Robot for the Installation of Clip Type Bird Diverters: Outdoor Flight Tests. In: 2021 Aerial Robotic Systems Physically Interacting with the Environment (AIRPHARO). pp. 1–7. DOI: 10.1109/AIRPHARO52252.2021.9571029
- Trujillo, M. A., Martínez-de Dios, J. R., Martín, C., Viguria, A., Ollero, A., 2019. Novel Aerial Manipulator for Accurate and Robust Industrial NDT Contact Inspection: A New Tool for the Oil and Gas Inspection Industry. *Sensors* 19 (6). DOI: 10.3390/s19061305