

---

# TÍTULO

---

Máster Universitario en Robótica y Automatización  
Campus de Leganés  
Trabajo de Investigación Tutelado

Pedro Arias Pérez NIA 100421902  
100421902@alumnos.uc3m.es

**uc3m**

---

Universidad  
**Carlos III**  
de Madrid

## Índice

---

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Robótica Aérea . . . . .	3
1.2. Motivación . . . . .	5
1.3. Problema . . . . .	5
1.4. Objetivos . . . . .	5
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>6</b>
2.1. Segmento Tierra . . . . .	6
2.1.1. Estación de Control Terrestre . . . . .	6
2.1.2. Pilas de Vuelo . . . . .	6
2.1.3. Otro software . . . . .	7
2.2. Segmento Aire . . . . .	7
2.3. Protocolo de Comunicaciones . . . . .	10

## Índice de figuras

1.	Clasificación de los UAV [1]. . . . .	3
2.	Tipos de UAV. . . . .	4
3.	Drone de vigilancia en carretera de la Dirección General de Tráfico [2]. . . . .	4
4.	QGroundControl. . . . .	7
5.	Ejemplos de drones de fabricantes propietarios. . . . .	8
6.	Drone PX4 real. . . . .	8
7.	Pixhawk v1. . . . .	9
8.	Drone Iris simulado mediante <i>Gazebo</i> . . . . .	9

## Introducción

Este trabajo propone un estudio previo y diseño de un sistema para la programación y navegación de drones. Se persigue una estructura modular donde los diferentes bloques que constituyen el sistema puedan sustituirse para adaptarlos al problema, y que a su vez, permita la reutilización del código en diversas circunstancias.

Este primer capítulo recoge una introducción a la materia de estudio, la robótica aérea. Además, se expone la motivación cuyo resultado ha derivado en este estudio, junto al problema concreto al cual se le quiere dar solución.

### Robótica Aérea

El ámbito de la robótica y de los vehículos aéreos no tripulados es un sector caracterizado por una fuerte expansión en los últimos tiempos, con unas expectativas de crecimiento y de demanda de personal cualificado tanto a nivel Europeo como nacional muy relevantes para los próximos años. En el año 2035 el volumen de negocio anual estimado será 10.000M€ y 90.000 puestos de trabajo (1.220M€ y 11.000 ud solo para España), pasando en el año 2050 a un volumen de 14.600M€ y 110.000 puestos de trabajo (1.520M€ y 11.500 ud caso español) [3].

La robótica aérea es la rama de la robótica que se encarga del estudio del comportamiento autónomo de aeronaves no tripuladas. Se entiende como una aeronave no tripulada (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*, o más recientemente UAS, *Unmanned Aircraft System*) a aquella que es capaz de realizar una misión sin necesidad de tener una tripulación embarcada [1]. Otro término que también se utiliza con frecuencia es VANT, Vehículo Aéreo No Tripulado.

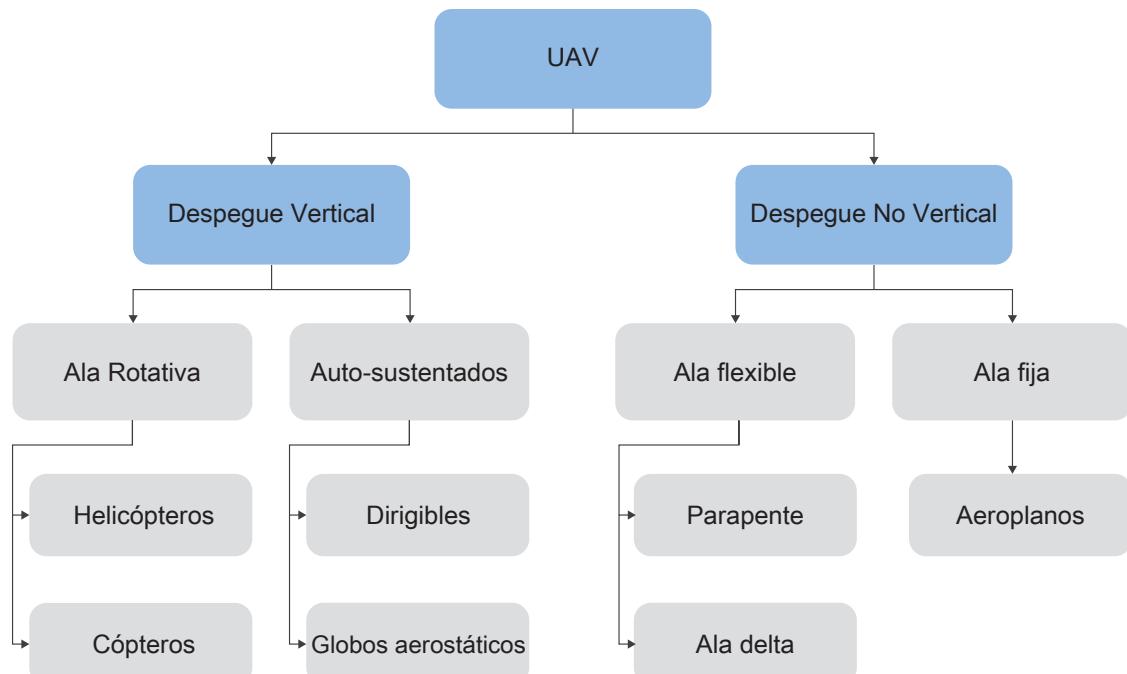


Figura 1: Clasificación de los UAV [1].

A la hora de establecer una clasificación de los UAV es posible atender a diferentes criterios. Siguiendo la clasificación propuesta por *Barrientos et al.* [1] se distinguen aeronaves en función del tipo de despegue, que puede ser vertical o no. A su vez, podemos subdividir las aeronaves en función del origen de su sustentación o del tipo de ala que poseen. Esta clasificación se representa en la Figura 1, mientras que en la Figura 2 se muestran ejemplos de los diferentes tipos de UAV.



(a) Aeroplano.

(b) Multicóptero.

Figura 2: Tipos de UAV.

Otros criterios de clasificación pueden responder a las capacidades de vuelo como el alcance, la altitud, la autonomía o la carga máxima. A su vez, también se clasificar las aeronaves en función de la actividad que realizan. Algunas de estas clasificaciones distinguen entre uso civil y militar o aplicaciones en explotación (producto) o en desarrollo (prototipo).



Figura 3: Drone de vigilancia en carretera de la Dirección General de Tráfico [2].

En la actualidad tiende a utilizarse el concepto de UAS frente al de UAV. La extensión del concepto de vehículo a sistema refleja que el vehículo aéreo autónomo precisa para su funcionamiento de todo un sistema y no solo de la aeronave instrumentada. Típicamente, un sistema UAS se compone de el segmento aire, compuesto principalmente por la aeronave, y por el segmento tierra, compuesto por un computador donde se ejecuta algún software de control, habitualmente una estación terrestre. Entre ambos segmentos debe existir en todo momento una comunicación, que se realiza a través de un protocolo de comunicaciones. Sin embargo, embarcar en la aeronave el segmento tierra también es posible, y de hecho, muy común. La inmensa mayoría de los sistemas que hoy en día entendemos como *inteligentes* o *autónomos* llevan embarcado un ordenador con un software que les permite cerrar el bucle de control. Este software no deja de ser un tipo de estación terrestre que también puede ejecutarse en un segmento tierra no embarcado. Las características de la plataforma aérea y el problema a resolver definirán si es necesario embarcar o no el software de control sobre la aeronave.

## Motivación

Este trabajo busca realizar un estudio previo y el diseño de un software de vuelo para la navegación autónoma de aeronaves, principalmente multicópteros.

La importancia del vuelo autónomo se ha visto reflejada en el alto incremento del uso de UAVs. Recientemente, los UAV se utilizan ampliamente tanto en aplicaciones militares como civiles debido a su pequeño tamaño y gran capacidad de maniobra [4]. Especialmente en aplicaciones civiles, los usos de los UAV se han expandido a casi todas las áreas. En el área de la agricultura, la rápida evolución de los UAV puede conducir a aplicaciones de agricultura de precisión, como la monitorización aérea de cultivos y las tareas de fumigación inteligente [5]. En el campo industrial, los desarrollos de los UAV mejoran la eficiencia de misiones como inspección industrial (e.g. plantas fotovoltaicas) [6], identificación de carga y entrega o logística, fuertemente ligadas a técnicas de *slam* visual (VSLAM). Además, los UAV también se pueden ver en tareas de búsqueda y rescate, de topografía o de vigilancia entre otras aplicaciones.

Dentro del ámbito nacional, el Ministerio de Ciencia e Innovación recoge en el documento Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027 [7] las Líneas Estratégicas de I+D+I nacional. Entre ellas se encuentra Inteligencia Artificial y Robótica, en el ámbito de intervención de Mundo Digital, Industria, Espacio y Defensa, ratificando la relevancia que están cobrando los UAVs en los últimos años.

## Problema

El problema a resolver es realmente complejo, alcanzar un software seguro y robusto que permita el vuelo autónomo de aeronaves es inabordable en tiempo y esfuerzo para este estudio. Por ello, este trabajo se centra en un subproblema del software. En concreto, se busca un software intermedio, a modo de *middleware*, que permita conectar distintas plataformas de vuelo con diferentes aplicaciones finales, entre las que se encuentran algoritmos de navegación autónoma. Estas aplicaciones pueden ser desarrolladas por usuarios ajenos al resto del software e incluso de la aeronave utilizadas. Además, el estudio se centrará solamente en el uso de un tipo de aeronaves, los multicópteros.

## Objetivos

El objetivo del trabajo es el desarrollo de una herramienta software que permita resolver el problema anteriormente descrito. Además, se adhieren como objetivos secundarios una serie de comprobaciones que permitan

comprobar el correcto funcionamiento del software. Entre estas, se encuentran por un lado, pruebas sobre diferentes aeronaves y, por otro lado, pruebas con diferentes aplicaciones que serán desarrolladas a propósito para las pruebas.

Así pues, los objetivos del proyecto son los siguientes:

- Desarrollo de herramienta software tipo *middleware*.
- Pruebas de la herramienta sobre distintas plataformas aéreas.
- Desarrollo de diferentes aplicaciones de control.

## Estado del Arte

---

A lo largo de este segundo capítulo se analizan las diferentes herramientas *software* y *hardware* utilizadas tanto en la comunidad científica como en la industria. Dado que la clasificación entre *software* y *hardware* puede ser algo confusa, se presentarán indistintamente distinguiendo entre herramientas del segmento tierra o del segmento aire, principalmente compuesto por la plataforma aérea, y el protocolo de comunicaciones.

### Segmento Tierra

El lado tierra del sistema se compone principalmente por la emisora de vuelo y/o un ordenador. La presencia de la emisora depende en gran medida de la aeronave en cuestión, mientras que la presencia de un ordenador en el lado tierra depende de la aplicación. Ambos elementos son compatibles y el uso de uno no significa la no necesidad del otro.

Una emisora radiocontrol es un control remoto que permite controlar la aeronave. Habitualmente, la comunicación es mediante una antena, aunque existen modelos que se comunicaban con un cable (aeronaves en vuelo cautivo).

Un ordenador ofrece una amplia variedad de posibilidades de software, desde aplicaciones comerciales a aplicaciones libres o incluso propias. Debido a la alta cantidad de software disponible, esta sección se centrará en una serie de herramientas que resultan relevantes para los objetivos del proyecto.

### Estación de Control Terrestre

Las Estaciones de Control Terrestre (GCS) son herramientas software que se utilizan para planificar y volar una misión. Generalmente proporcionan una pantalla con un mapa donde el usuario puede definir puntos de referencia para el vuelo y ver el progreso de la misión. Además, suelen disponer de una "cabina virtual", mostrando muchos de los mismos instrumentos que los aviones tripulados.

Hoy en día, las principales GCS o bien son software propietario de los principales fabricantes de UAVs o bien son software libre. Debido a su naturaleza, resultan más interesantes estas segundas. Entre ellas destacan principalmente *QGroundControl* [8] y *MissionPlanner* [9]. La Figura ?? muestra este software en ejecución.

### Pilas de Vuelo

Las Pilas de Vuelo son aplicaciones de control de vuelo programables. Ofrecen una interfaz de programación (API) que permite el desarrollo de aplicaciones a un nivel de abstracción muy elevado. Este tipo de software permite abstraerse de aspectos como el tipo de aeronave o la comunicación con la misma. Cabe destacar que este tipo de vuelo puede ir a bordo de la aeronave y formar parte del segmento aire o pertenecer al segmento

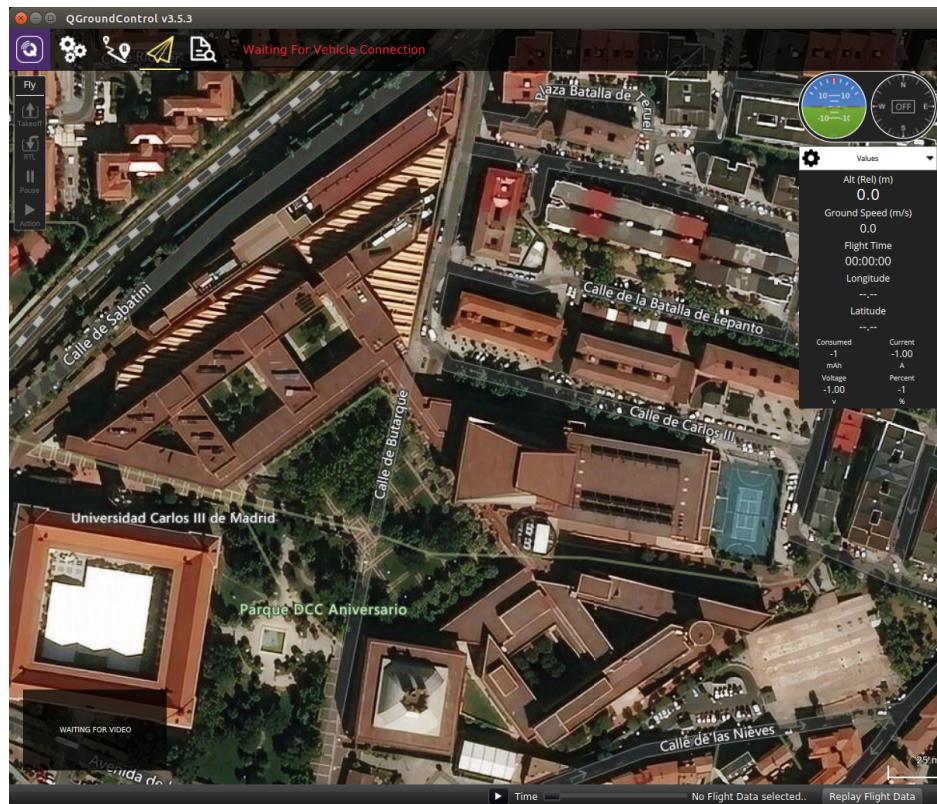


Figura 4: QGroundControl.

tierra y ejecutarse en un ordenador externo. Debido al alto número de software de este tipo, se han seleccionado dos que gran interés para este estudio. Ambas han sido desarrolladas por universidades madrileñas o organismos con vinculación a las mismas. La primera de estas, *Aerostack* [10], ha sido desarrollada por el grupo de Visión por Computador y Robótica Aérea de la Universidad Politécnica de Madrid. Se encuentra en un alto estado...

En segundo lugar, *Drone Wrapper* [], ha sido desarrollada por la asociación de robótica *JdeRobot* [] ligada a la Universidad Rey Juan Carlos, y entre sus desarrolladores se encuentra el autor de este proyecto.

#### Otro software

Al igual que sucedía con las Pilas de Vuelo, el software descrito en esta sección puede pertenecer tanto al segmento aire como al segmento tierra en función de donde este ubicado.

ROS, MAVROS, Python, OpenCV

#### Segmento Aire

El lado aéreo se compone por la plataforma aérea, es decir el drone junto a todos los elementos a bordo que componen el sistema. En este estudio se presentan dos tipos de aeronaves, reales o simuladas.

Las aeronaves reales pueden poseer un firmware propietario o libre, en función de si la controladora y el software de vuelo es abierto al usuario o no. Por un lado, entre los principales fabricantes propietarios se encuentran *DJI* [11], *Parrot* [12] o *3DR Robotics* [13] (ver Fig. 5).



(a) 3DR Solo Drone.



(b) DJI Tello.

Figura 5: Ejemplos de drones de fabricantes propietarios.

Por el otro lado, los dos principales firmware libre son *PX4* [14] y *Ardupilot* [15]. Mientras que la principal controladora de vuelo utilizada con estos es *Pixhawk* [16]. La Figura 6 muestra un multicóptero equipado con *PX4*, mientras que la Figura 7 contiene una controladora *Pixhawk* de primera versión.

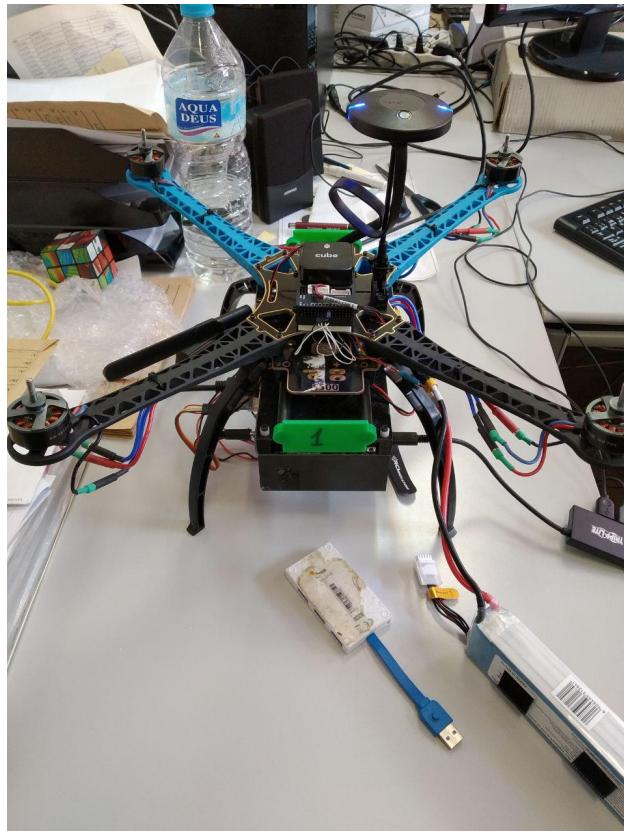


Figura 6: Drone PX4 real.



Figura 7: Pixhawk v1.

Las aeronaves simuladas suelen utilizar software de vuelo libre, dado la naturaleza abierta del mismo. En una simulación, la parte física de la aeronave se ve sustituida por software (*SITL, Software-In-The-Loop*). El SITL contiene el software de vuelo y permite enviar y recibir comandos de vuelo sin necesidad de tener una controladora real, haciendo de intermediario entre el autopiloto y el modelo SDL, necesario en la visualización gráfica. Dichas simulaciones se suelen acompañar de una visualización. Para ello, es necesario el uso de un simulador como *Gazebo* [17], *AirSim* [18] o *jMAVSim* [19]. El más extendido, debido a sus grandes prestaciones y posibilidades de configuración es *Gazebo*. La Figura 8 muestra un drone Iris (*3DR Robotics*) simulado mediante *Gazebo* con *PX4* como autopiloto.

Figura 8: Drone Iris simulado mediante *Gazebo*.

### Protocolo de Comunicaciones

El protocolo de comunicaciones puede ser privativo, utilizado por fabricantes de aeronaves y diferentes para cada una de ellas, o libre. El protocolo de comunicaciones libre por excelencia es MAVLink [20].

MAVLink son las siglas de *Micro Air Vehicle Link*, un protocolo de comunicaciones muy ligero para el intercambio de mensajes con un drone y sus componentes a bordo. MAVLink se sitúa entre los extremos de la comunicación, siendo el puente de comunicación entre el lado tierra y el lado aire. Es considerado como el protocolo estándar de comunicaciones en robótica aérea y multitud soluciones comerciales lo utilizan, por ejemplo las ya mencionadas GCS, *QGroundControl* y *Mission Planner*.

Se compone por cuatro tipo de elementos; mensajes, comandos, enumerados y microservicios. Los mensajes sirven para transmitir el estado o información de la aeronave, principalmente datos de navegación o de posición. Los comandos sirven para transmitir peticiones y acciones a la aeronave desde la GCS, o viceversa. Los enumerados describen diferentes estados, como puede ser el modo de vuelo, el tipo de aeronave o el estado de la comunicación, y son usados como campos de los mensajes o de los comandos. Por último, los microservicios establecen como deben ser intercambiados los mensajes y comandos para un correcto funcionamiento de la comunicación.

## Referencias

- [1] A. Barrientos, J. Del Cerro, P. Gutiérrez, R. San Martín, A. Martínez, and C. Rossi, “Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. tecnología y aplicaciones,” *Universidad politécnica de Madrid, Madrid*, 2007.
- [2] D. G. de Tráfico, “Tráfico distribuye los 39 drones que vigilarán las carreteras españolas este verano.”
- [3] . Ministerio de Fomento, “Plan estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021.”
- [4] J. Kim, S. Kim, C. Ju, and H. I. Son, “Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 105100–105115, 2019.
- [5] P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, T. Lagkas, and I. Moscholios, “A compilation of uav applications for precision agriculture,” *Computer Networks*, vol. 172, p. 107148, 2020.
- [6] H. Yao, R. Qin, and X. Chen, “Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications—a review,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 12, p. 1443, 2019.
- [7] M. de Ciencia e Innovación, “Estrategia española de ciencia, tecnología e innovación 2021-2027.”
- [8] a. L. F. C. P. Dronecode Project, Inc., “Qgroundcontrol.”
- [9] A. D. Team., “Mission planner.”
- [10] J. L. Sanchez-Lopez, R. A. S. Fernández, H. Bavle, C. Sampedro, M. Molina, J. Pestana, and P. Campoy, “Aerostack: An architecture and open-source software framework for aerial robotics,” in *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 332–341, IEEE, 2016.
- [11] DJI, “Dji drones.” <https://www.dji.com/es>. Último acceso: 12-07-2021.
- [12] P. D. SAS, “Parrot drones.” <https://www.parrot.com/es/drones>. Último acceso: 12-07-2021.
- [13] D. Robotics, “3dr drone.” <https://www.3dr.com/>. Último acceso: 12-07-2021.
- [14] I. Dronecode Project, “Px4.” <https://px4.io/>. Último acceso: 11-02-2020.
- [15] A. D. Team and Community, “Ardupilot.” <https://ardupilot.org/>. Último acceso: 11-02-2020.
- [16] A. Ltd., “Pixhawk.” <https://pixhawk.org/>. Último acceso: 07-03-2020.
- [17] O. S. R. Foundation, “Gazebo.” <http://gazebosim.org/>. Último acceso: 11-02-2020.
- [18] M. Research, “Airsim.” <https://microsoft.github.io/AirSim/>. Último acceso: 13-07-2021.
- [19] I. Dronecode Project, “jmavsim.” <https://github.com/PX4/jMAVSIM>. Último acceso: 13-07-2021.
- [20] a. L. F. C. P. Dronecode Project, Inc., “Mavlink.”