

Máster Universitario en Robótica y Automatización
2021-2022

Trabajo Fin de Máster

Infraestructura de programación de robots aéreos y aplicaciones visuales con aprendizaje profundo

Pedro Arias Pérez

Tutor/es

David Martín Gómez

José María Cañas Plaza

Leganés, 11 de febrero de 2022



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

*Á miña familia
polos seus consellos,
que son sempre bos.*

RESUMEN

Los robots aéreos forman parte de nuestro día a día con aplicaciones en muchos ámbitos de nuestra vida. En muchas ocasiones desarrollar estas aplicaciones puede resultar una tarea ardua o incluso imposible para usuarios con conocimientos limitados en la robótica aérea. Este trabajo busca proporcionar una infraestructura de programación de robots aéreos que facilite este tipo procesos.

La infraestructura, *DroneWrapper*, ofrece la posibilidad al usuario de desarrollar aplicaciones abstrayéndose de las complejidades asociadas a la aeronave a través de una sencilla interfaz de programación de usuario. La aplicación se ha implementado con ROS y Python siguiendo un diseño modular que facilita el acople de diversos *drivers* que permiten extender las funcionalidades de la infraestructura.

Junto con la infraestructura se han desarrollado varios *drivers*. Uno de ellos es *Tello Driver*, el cual permite adaptar la aplicación para su uso con los drone DJI Tello.

En paralelo, se han desarrollado dos aplicaciones que ejemplifican el uso de la infraestructura creada, *sigue-color* y *sigue-persona*. Ambas aplicaciones utilizan técnicas de visión por ordenador, clásicas o modernas (aprendizaje profundo), para seguir un determinado tipo de objeto.

Dichas aplicaciones se han probado sobre diferentes plataformas aéreas, reales y simuladas, para dar validez a la solución ofrecida. En concreto, las aeronaves utilizadas son tres; un PX4 simulado, un DJI Tello y un PX4 de construcción propia.

Palabras clave: infraestructura de programación, drones, robótica aérea, aplicaciones, visión por ordenador, aprendizaje profundo

AGRADECIMIENTOS

Antes de comenzar con el trabajo, creo que es justo pararme y agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de este viaje y que habéis hecho posible que esté escribiendo estas palabras. Ha sido un trayecto apasionante en el que me he topado con grandes profesores, compañeros y amigos. Por ello, me gustaría, en primer lugar, dar las gracias al Laboratorio de Sistemas Inteligentes, a la Escuela Politécnica Superior, a la Universidad Carlos III de Madrid y a todos sus profesionales por su dedicación y atención ofrecida.

Además, en particular, quisiera dar las gracias a ciertas personas que me han allanado el camino, y han conseguido hacerme disfrutar de esta travesía.

A José María, co-tutor de este trabajo. Gracias por estos últimos dos años y medio en los que nos hemos reunido una o dos veces por semana. Gracias por tu tiempo y tu paciencia, siempre intento aprender al máximo de tu conocimiento. Gracias también, por invitarme a JdeRobot, donde se ha gestado la semilla de este trabajo.

A David, co-tutor de este trabajo. Gracias por ponerlo todo tan fácil desde el inicio, por permitirme elegir la idea sobre la que desarrollar el trabajo y por facilitarme todos los medios para conseguirlo. Pero gracias sobretodo por tu tiempo, he aprendido muchas cosas estos meses escuchándote.

A mi hermana Raquel, a mis padres y a mi familia. Gracias por todo vuestro amor y apoyo, y gracias por todos vuestros consejos, el tiempo siempre os acaba dando la razón. Este trabajo es para vosotros, espero que estéis orgullosos.

A mis grandes amigos, Dani, Verto, Sunil, Juan, Ana y Carme, sois un lujo que no merezco. También a mis otros grandes amigos, Alejandro, Castell, Luci, Silvi, Pablo, Javis, Pau y Carmen, cada vez es más difícil juntarnos pero gracias por seguir ahí.

A todos mis compañeros del máster y del laboratorio, gracias por ayudarme a superar esta etapa. En especial a los integrantes de Yarpiz; Meira, Carlos, Roca, Sergi, Aitor, Quispe y Marru. Gracias por todas las risas entre trabajos y partidos de volley.

¡Mil gracias a todos!

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Robótica aérea	1
1.2. Motivación	5
1.3. Problema	6
1.4. Objetivos	7
1.5. Estructura de la memoria	8
2. HERRAMIENTAS	10
2.1. Segmento tierra.	10
2.1.1. Estación de control terrestre.	11
2.1.2. Toolkits de vuelo.	12
2.2. Segmento aire	13
2.2.1. Aeronaves reales	13
2.2.2. Aeronaves simuladas.	16
2.3. Protocolo de comunicaciones	17
2.4. Programación de robots	19
2.4.1. Plataformas robóticas de software	19
2.4.2. Aprendizaje profundo	20
2.5. Aplicaciones visuales en robótica aérea	21
3. MATERIAL Y MÉTODO	23
3.1. Hardware	23
3.1.1. Aeronaves.	23
3.1.2. Dispositivos embebidos	26
3.1.3. Sensores de visión	28
3.2. Software.	29
3.2.1. Simulación	30
3.2.2. NVIDIA JetPack	31
3.2.3. Aprendizaje profundo	31
3.3. Método	32

4. INFRAESTRUCTURA DESARROLLADA	33
4.1. Diseño.	33
4.2. Drone Wrapper.	36
4.3. Tello Driver.	42
4.4. Victure Driver	46
5. APLICACIONES CON ROBOTS AÉREOS	48
5.1. Aplicación Sigue Color	48
5.2. Aplicación Sigue Persona	56
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	67
6.1. Conclusiones	67
6.2. Líneas futuras.	68
BIBLIOGRAFÍA	69

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Clasificación de UAVs	2
1.2	Ejemplos de UAVs	3
1.3	Aeronave de vigilancia en carretera perteneciente a la DGT	3
1.4	Aeronave de paquetería de Amazon	4
1.5	Evolución del número de modelos de drones según su ámbito de aplicación a nivel mundial	5
2.1	Transmisor <i>Taranis Q X7S OpenTX</i>	10
2.2	Módulo receptor <i>FrSky X8R</i>	11
2.3	QGroundControl	12
2.4	Bucle de control de un UAV	13
2.5	Ejemplos de drones de fabricantes propietarios	14
2.6	Diferentes modelos de controladoras PixHawk	15
2.7	Dron simulado mediante jMAVsim	16
2.8	Arquitectura perceptrón multicapa	20
2.9	Control de un multirrotor bajo fallo de uno de los motores	22
2.10	Secuencia de imágenes en maniobra de evasión	22
3.1	DJI Tello	24
3.2	Dron no comercial	25
3.3	PiBot	26
3.4	NVIDIA Jetson AGX Xavier	27
3.5	Cámara Victure AC600	28
3.6	Aeronave con cámara instalada	28
3.7	3DR Iris simulado mediante Gazebo	30
3.8	Esquema de PX4 sobre SITL	31
4.1	Esquema de capas de la infraestructura	33
4.2	Diseño inicial de la infraestructura	34
4.3	Diseño final de la infraestructura	35

4.4	Estructura modular de <i>DroneWrapper</i>	35
4.5	Estructura de “envoltorio”	36
4.6	Grafo de nodos y <i>topics</i> de <i>DroneWrapper</i>	38
4.7	Esquema de comunicaciones de <i>Tello Driver</i>	42
4.8	Grafo de nodos y <i>topics</i> de <i>Tello Driver</i>	44
4.9	Grafo de nodos y <i>topics</i> de <i>Victure Driver</i>	47
4.10	Imagen obtenida por el <i>Victure driver</i>	47
5.1	Balizas utilizadas en <i>sigue-color</i>	48
5.2	Estructura de <i>sigue-color</i>	49
5.3	Bloques presentes en <i>sigue-color</i>	49
5.4	Máscara del filtro de color	51
5.5	Esquema de la percepción	51
5.6	Entrada y salida del filtrado	52
5.7	Esquema de control en <i>sigue-color</i>	52
5.8	Respuesta del bloque de control en <i>sigue-color</i> .	53
5.9	Experimento <i>sigue-color</i> con modelo estático.	55
5.10	Lista de reproducción <i>sigue-color</i> .	55
5.11	Modelo de persona en el simulador Gazebo	56
5.12	Estructura de <i>sigue-persona</i>	56
5.13	Bloques presentes en <i>sigue-persona</i>	57
5.14	Detecciones en la aplicación <i>sigue-persona</i> .	58
5.15	Esquema de identificación en <i>sigue-persona</i>	59
5.16	Esquema de control en <i>sigue-persona</i>	60
5.17	Respuesta del bloque de control en <i>sigue-persona</i> .	61
5.18	Experimento <i>sigue-persona</i> con modelo estático.	62
5.19	Experimento <i>sigue-persona</i> con múltiples modelos.	63
5.20	Cruce trasero de persona.	63
5.21	Cruce frontal de persona.	64
5.22	Lista de reproducción <i>sigue-persona</i> .	64
5.23	Seguimiento de una persona por un pasillo.	65
5.24	Ejemplos de la aplicación <i>sigue-persona</i> bajo diferentes circunstancias.	66

ÍNDICE DE TABLAS

2.1 Principales mensajes de MAVLink.	19
3.1 Especificaciones del DJI Tello.	24
3.2 Especificaciones del dron de construcción propia.	25
3.3 Especificaciones de Jetson AGX Xavier.	27
3.4 Especificaciones de la cámara Victure AC600.	29
4.1 <i>Topics</i> presentes en <i>DroneWrapper</i>	37
4.2 Máscaras de control utilizadas por <i>DroneWrapper</i>	40
4.3 Servicios presentes en <i>DroneWrapper</i>	40
4.4 <i>DroneWrapper API</i>	41
4.5 Máscaras de control utilizadas por <i>Tello Driver</i>	43
4.6 Arquitectura ROS de <i>Tello Driver</i>	43
4.7 Comandos usados por <i>Tello Driver</i>	45
4.8 Información recibida por <i>Tello Driver</i>	46
5.1 Máscaras HSV.	51
5.2 Controladores PID y sus constantes.	54

ÍNDICE DE CÓDIGOS

2.1	Definición del mensaje HEARTBEAT de MAVLink.	17
2.2	Definición CMD_NAV_WAYPOINT, comando de MAVLink.	18
4.1	Definición del mensaje <code>mavros_msgs/PositionTarget()</code>	39
4.2	Caso de uso simple de <i>DroneWrapper</i>	40
4.3	<i>Victure Driver</i>	47
5.1	Pseudo-código de <i>sigue-color</i>	50
5.2	Fichero de configuración de la aeronave Tello	54
5.3	Pseudo-código de <i>sigue-persona</i>	57

GLOSARIO

Entrada Descripción

3DR 3D Robotics.

AESA Agencia Estatal de Seguridad Aérea.

API Application Programming Interface.

ATM Air Traffic Management.

CARMEN CARnegie MELLon robot Navigation.

COCO Common Objects in Context.

CPU Central Processing Unit.

CUDA Compute Unified Device Architecture.

CVAR Computer Vision Aerial Robotics.

DJI Dà-Jiāng Innovations.

EEA European Economic Area.

FIFO First In First Out.

GCS Ground Control Station.

GPS Global Positioning System.

GPU Graphics Processing Unit.

HSV Hue Saturation Value.

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IMU Inertial Measurement Unit.

LiDAR Light Detection and Ranging.

LSI Laboratorio de Sistemas Inteligentes.

LTS Long Term Support.

MAVLink Micro Air Vehicle Link.

MAVROS MAVLink to ROS.

MLP MultiLayer Perceptron.

Entrada	Descripción
NED	North-East-Down.
NumPy	Numerical Python.
OpenCV	Open Computer Vision.
OROCOS	Open RObot Control Software.
OSRF	Open Source Robotics Foundation.
PID	Proporcional Integral Derivativo.
RF	Radio Frequency.
RGB	Red Green Blue.
ROS	Robot Operating System.
SDF	Structure Data File.
SDK	Software Development Kit.
SESAR	Single European Sky ATM Research.
SITL	Software In The Loop.
SLAM	Simultaneous Location And Mapping.
SOM	System On Module.
UAS	Unmanned Aircraft System.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle.
UC3M	Universidad Carlos III de Madrid.
UDP	User Datagram Protocol.
UHF	Ultra High Frequency.
UPM	Universidad Politecnica de Madrid.
URJC	Universidad Rey Juan Carlos.
USB	Universal Serial Bus.
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado.
vSLAM	Visual Simultaneous Location And Mapping.
WiFi	Wireless Fidelity.
YARP	Yet Another Robot Platform.
YOLO	You Only Look Once.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo propone el diseño e implementación de un sistema para la programación y navegación de robots aéreos. El diseño 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 trabajo, junto al problema concreto al cual se pretende dar solución y los objetivos extraídos del problema.

1.1. Robótica aérea

El término *robot* aparece por primera vez en 1920, en la obra teatral *Rossum's Universal Robots* del escritor checo Karel Čapek en cuyo idioma la palabra “robota” significa fuerza o servidumbre [1]. El nacimiento de la robótica y los robots surge asociado a la idea de trabajo y producción tras la Segunda Revolución Industrial y a lo largo del siglo XX. La automatización industrial de aquella época da lugar a los primeros sistemas de control automático que se extienden rápidamente a todos los sectores industriales, y que dan lugar a la robótica industrial tal como la conocemos hoy en día [2].

El término *robótica* es acuñado por Isaac Asimov, definiendo a la ciencia que estudia a los robots. El propio Asimov postuló también las Tres Leyes de la Robótica en su libro *Yo Robot* publicado en 1950 [1]. El término ha evolucionado mucho desde sus inicios, hoy entendemos la robótica como la rama de la tecnología que estudia el diseño y construcción de máquinas capaces de desempeñar tareas realizadas por el ser humano o que requieren el uso de inteligencia [3]. Como se puede entender, la visión actual es mucho más amplia que en sus inicios y abarca muchas áreas de la ingeniería.

Existen diversas clasificaciones de los robots en función de su arquitectura, de su aplicación, de su cronología, etc. Una de estas clasificaciones distingue robots en función de su morfología [4], que suele distinguir los siguientes tipos:

- **Poliarticulados:** Son artílulos mecánicos y electrónicos destinados a realizar de forma automática determinados procesos de fabricación o manipulación. Suelen ser fijos, aunque también pueden realizar desplazamientos limitados y poseen un espacio de trabajo concreto y limitado. Los mejores ejemplos son los robots industriales, manipuladores o cartesianos.
- **Móviles:** Están provistos de algún tipo de mecanismo que les permite desplazarse autónomamente, como patas o ruedas, y reciben información de su entorno a través de sus propios sensores. Son ampliamente utilizados en el transporte de mercancías

o en la exploración de lugares de difícil acceso. Pueden ser terrestres, acuáticos, aéreos o espaciales.

- **Androides:** Intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento del ser humano. No solo imitan la apariencia humana (antropomorfismo), si no que emulan también la conducta de forma autónoma.
- **Zoomórficos:** Son aquellos que trata de reproducir en mayor o menor grado de realismo los sistemas de locomoción de diversos seres vivos. Este tipo podría incluir también a la morfología androide, en función del autor de la clasificación. Una subclasificación distingue entre robots caminadores y no caminadores.

Además de la robótica industrial, la otra gran rama de esta ciencia es la robótica de servicios. Actualmente este se encuentra en gran crecimiento a medida que aplicaciones útiles se pueden abordar con robots, ya lejos de las factorías. Es el caso de los robots de limpieza, los coches autónomos, los robots médicos o los robots aéreos.

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 [5]. Otro término que también se utiliza con frecuencia es VANT, Vehículo Aéreo No Tripulado. A lo largo de esta memoria se utilizará el término *drones* en referencia a este tipo de sistemas, cuyo uso está muy extendido.

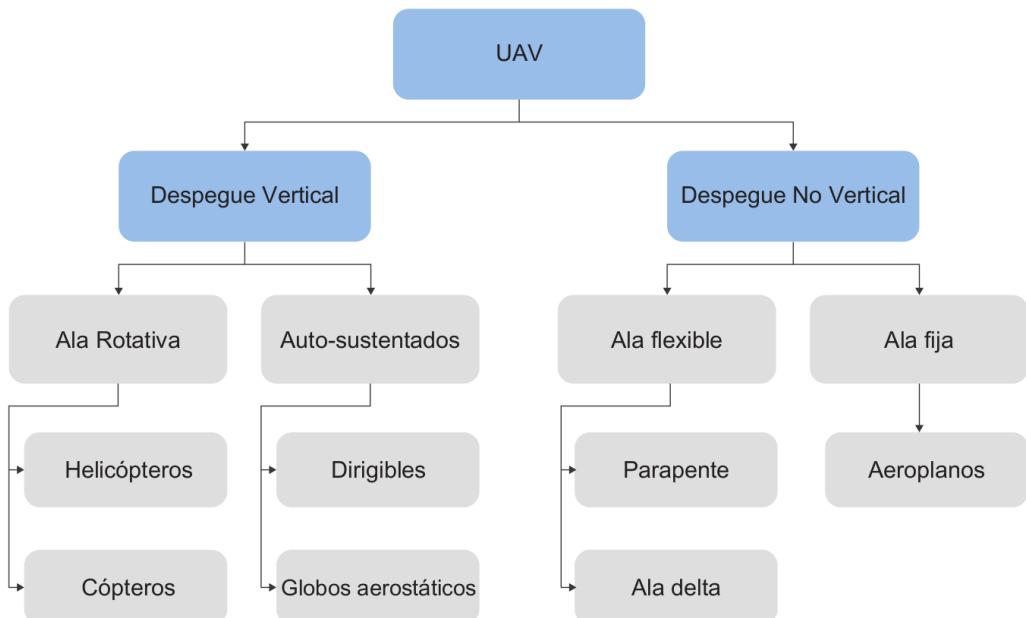


Fig. 1.1. Clasificación de UAVs [5].

A la hora de establecer una clasificación de los UAV es posible atender a diferentes criterios. Siguiendo la clasificación propuesta por Barrientos et al. [5] 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 1.1, mientras que en la Figura 1.2 se muestran dos ejemplos de diferentes tipos de UAV.



(a) Aeroplano.



(b) Multicóptero.

Fig. 1.2. Ejemplos de UAVs.

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 pueden 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).

Entre las principales aplicaciones civiles donde se emplean drones se encuentran el transporte, tanto de mercancías (ver Fig. 1.4) como de personas, la seguridad y/o vigilancia (Fig. 1.3), la pesca y agricultura, la cartografía o el ocio y entretenimiento, entre otros.



Fig. 1.3. Aeronave de vigilancia en carretera perteneciente a la Dirección General de Tráfico [6].



Fig. 1.4. Aeronave de paquetería de Amazon [7].

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, es posible prescindir del segmento tierra dotando de la suficiente inteligencia a la aeronave. 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 suprimir al segmento tierra de la ecuación. La complejidad del ordenador embarcado y del software de control marcará el nivel de *inteligencia* de la aeronave y la necesidad, o no necesidad, del segmento tierra.

Embarcar el segmento tierra abordo de la aeronave supone un aumento en la complejidad del sistema, por lo que puede no ser siempre interesante. 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.

Actualmente la robótica aérea se encuentra en un alto nivel de maduración en Europa. Desde el año 2021, la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) dispone que todo tipo de UAS debe seguir la normativa europea [8], independientemente de su tamaño o peso. Entre las nuevas medidas se encuentran que todo operador debe poseer de una licencia (número de operador) y disponer de un seguro de responsabilidad civil a terceros obligatorio, sean las intenciones con fines recreativos o comerciales. Se puede obtener más información de la situación actual en el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 [9] y en Reglamento Delegado (UE) 2019/945 [10] del Espacio Económico Europeo (EEA, *European Economic Area*).

1.2. Motivación

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) [11].

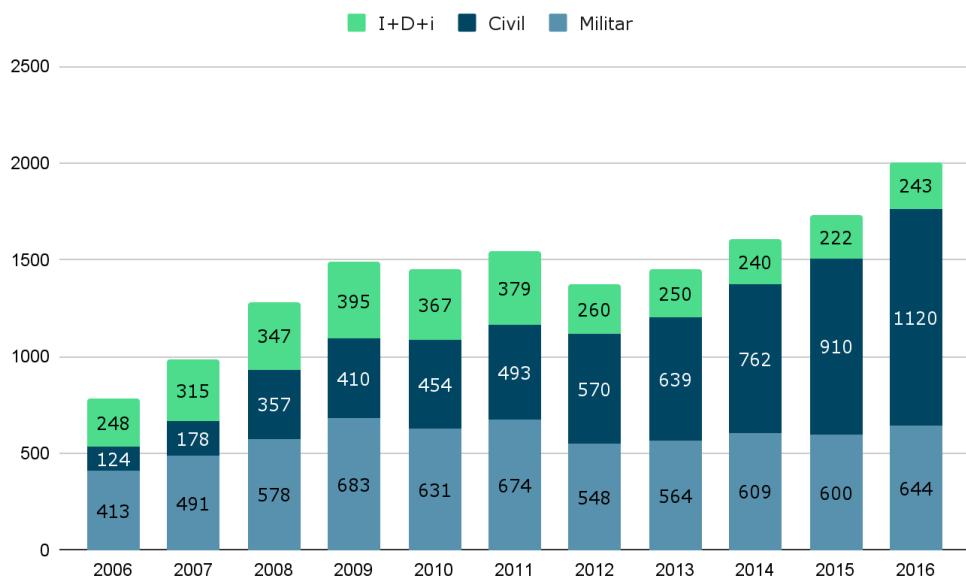


Fig. 1.5. Evolución del número de modelos de drones según su ámbito de aplicación a nivel mundial [11].

La importancia del vuelo autónomo se ha visto reflejada en el alto incremento del uso de UAVs (ver Fig. 1.5). Recientemente, los UAV se utilizan ampliamente tanto en aplicaciones militares como civiles debido a su pequeño tamaño y gran capacidad de maniobra [12]. 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 [13]. En el campo industrial, los desarrollos de los UAV mejoran la eficiencia de misiones como inspección industrial (e.g. plantas fotovoltaicas) [14], 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.

La revolución en la robótica aérea también ha supuesto un gran avance en la normativa legal europea y nacional, donde Europa se aproxima al futuro *U-Space*, un conjunto de nuevos servicios y procedimientos específicos diseñados para respaldar el acceso seguro, eficiente y protegido al espacio aéreo para un gran número de drones [15].

El proyecto *U-Space* es promovido por la institución europea SESAR (*Single European Sky ATM Research*) que se encarga del diseño del cielo único europeo y su gestión del tráfico aéreo (ATM, *Air Traffic Management*) de forma común por los estados miembros de Unión Europea. Espacio aéreo que compartirán de forma habitual aeronaves tripuladas y UAS, bajo una gestión del tráfico común.

A mayores, la normativa legal vigente se encuentra en continua evolución para permitir nuevas aplicaciones manteniendo la seguridad existente, como ha ocurrido este último año en el ámbito europeo con la nueva normativa europea de UAS [8].

Dentro del ámbito nacional, el Ministerio de Ciencia e Innovación recoge en el documento Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027 [16] 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.

Pese al gran avance tecnológico, el desarrollo de aplicaciones para UAS sigue siendo complejo. Este tipo sistemas son heterogéneos (plataformas de vuelo muy diferentes), con muchos ingredientes integrados (autopilotos, subsistemas de control y estabilización, de comunicaciones, de navegación, de percepción...) y en un escenario peligroso, donde un error puede suponer la caída de la aeronave o el daño a terceros.

Por ello, y debido a la gran expansión social y económica que está sufriendo esta materia, se observa que existe la necesidad de herramientas que permitan construir aplicaciones para el uso extendido de drones. Herramientas que permitan abstraerse de las complejidades que lleva asociada una aeronave e incluso de la plataforma en sí.

Este trabajo persigue ese fin. Busca proporcionar al usuario un entorno para la programación y navegación de robots aéreos, que permita al usuario centrar sus esfuerzos en resolver solamente la aplicación final del dron, y olvidarse del resto de complejidades.

1.3. 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 trabajo. Por ello, este trabajo se centra en un subconjunto del problema. En concreto, se busca un software intermedio, a modo de *middleware*, que permita conectar distintas plataformas de vuelo con diferentes aplicaciones finales, las cuales quedarían a cargo del desarrollo del usuario. Se utiliza la palabra *middleware*, ya que el software propuesto se encuentra a medio camino entre las aplicaciones (software) y las aeronaves (hardware). Entre las aplicaciones posibles, la herramienta a desarrollar busca ofrecer soluciones para la creación de algoritmos de navegación autónomos. Más allá del típico control por posición en exteriores, basado en GPS, se persiguen aplicaciones basadas en posición en interiores (en ausencia de GPS), p.e. algoritmos de auto-localización visual (*visual SLAM*), o aplicaciones de control visual, no basadas en posición.

Por último, con el propósito de acotar todavía más el problema, este trabajo solo se centrará en el uso de un tipo de aeronaves, los multicópteros, cuyo uso es el más extendido dentro de todos los tipos de aeronaves.

1.4. Objetivos

Este trabajo presenta una serie de objetivos principales y secundarios. En primer lugar, se quiere desarrollar herramientas software que permitan la programación y navegación de multicópteros. Este primer objetivo se abordará creando una solución software que ofrezca al usuario una interfaz de programación de aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) que facilite el desarrollo de aplicaciones.

Asociado a este objetivo principal, se encuentran un grupo de características del código considerados como atributos de calidad y objetivos secundarios. Se precisa un software intuitivo y sencillo de usar (los usuarios no tienen por qué ser expertos en drones), robusto y seguro, al tratarse de un software que trabaja directamente con drones. Cabe destacar que estas aplicaciones pueden ser creadas por usuarios ajenos al resto del software e incluso a la aeronave utilizada. Además, el software que se propone está enfocado a un público, el cual, aunque sí deba tener unas nociones básicas en robótica, no tiene por qué ser experto en drones. Por tanto, se consideran como objetivos secundarios ligados a este primer objetivo principal la usabilidad, la seguridad y la robustez del código.

En segundo lugar, se pretende extender dicho software para el uso de diferentes plataformas aéreas. Así, otro de los objetivos principales del software es que sea multiplataforma y se pueda utilizar con diferentes aeronaves. Para ello, se realizarán diferentes pruebas que permitan comprobar el funcionamiento del software con varias aeronaves.

Como objetivo secundario ligado a este segundo objetivo, se buscará utilizar aeronaves de distinta naturaleza dentro de los multicópteros. Una variedad en las aeronaves usadas durante las pruebas dará una mejor perspectiva del alcance del trabajo realizado. Aunque durante el Capítulo 2 se profundizará sobre las herramientas disponibles para este trabajo, es necesario introducir las posibles alternativas existentes para el correcto entendimiento de los objetivos. Entre los multicópteros se distinguen aeronaves reales o simuladas, y orientadas a un vuelo en interiores o en exteriores.

En tercer lugar, se realizarán diferentes aplicaciones ilustrativas similares a las desarrolladas por los futuros usuarios. Dichas aplicaciones harán uso de la solución desarrollada para el primer objetivo del trabajo y se basarán en algún control reactivo visual. Dichas aplicaciones tratarán de mostrar ejemplos de aplicaciones de dificultad variable, partiendo de un uso básico de las herramientas recogidas en este trabajo, hasta el desarrollo de algoritmos navegación basado en aprendizaje profundo.

Así pues, y a modo de resumen, los objetivos contemplados en este trabajo son:

- 1. Desarrollo de herramientas para la programación y navegación de multicópteros.** El diseño se centrará en la usabilidad, la seguridad y robustez del software.

2. **Comprobaciones sobre distintas plataformas aéreas.** Multicópteros de diversa índole, haciendo uso de aeronaves reales, simuladas, de interiores y de exteriores.
3. **Desarrollo de diferentes aplicaciones de control.** Aplicaciones de distinto nivel de dificultad técnica, partiendo de usos básicos centrados en navegación hasta algoritmos complejos basados en aprendizaje profundo.

1.5. Estructura de la memoria

Esta última sección describe la estructura de la memoria, introduce los diferentes capítulos y los temas que se tratarán en cada uno de los mismos.

En primer lugar se encuentra este capítulo introductorio (Cap. 1) que se concibe como una serie de aclaraciones previas y necesarias para el correcto entendimiento del trabajo en su conjunto. Incluye un contexto histórico de la robótica, la robótica aérea y las estaciones de tierra y sus aplicaciones, que establecen el marco en el que se sitúa este trabajo. A continuación incluye el problema abordado en este trabajo y la motivación del mismo, es decir, ¿qué se trata de resolver con este trabajo?, y ¿por qué surge la necesidad del mismo?. Se incluyen también los objetivos principales y secundarios que ha de cumplir la solución desarrollada.

En el Capítulo 2 se detallan las herramientas software y hardware que constituyen el estado del arte, ofreciendo una visión global de la robótica aérea actual. Para ello, se realiza un pequeño estudio de las principales herramientas presentes tanto en la comunidad científica como en la industria.

Además, este capítulo recoge en diferentes secciones cada uno de los elementos que entran en juego en un sistema aéreo. Por un lado, en una primera sección se explica el segmento tierra y su composición. Por otro lado, en la siguiente sección se detalla el segmento aire y sus componentes. Finalmente, el capítulo se centra en el protocolo de comunicaciones entre ambos lados, tierra y aire.

En el Capítulo 3 se presentan el material y método utilizados en este trabajo. Este capítulo recopila, de entre todas las herramientas existentes, los componentes concretos seleccionados para la resolución del problema. Además, ofrece una descripción pormenorizada de los mismos, junto con la motivación de su elección.

En el Capítulo 4 se explica la infraestructura software desarrollada para dar solución al problema. En una primera sección se explica detalladamente el diseño elegido y se explican también varias decisiones relevantes a la hora de seleccionar el diseño. En la sección sucesiva se describe la implementación de cada una de las herramientas de código identificadas.

En el Capítulo 5 se desarrollan las aplicaciones propuestas que permiten validar la solución presentada en el anterior capítulo. A lo largo del capítulo, se introducen las diferentes aplicaciones, se explican cada uno de los diseños y sus implementaciones y se

presentan los resultados obtenidos tras el desarrollo en forma de diversos ensayos experimentales con pruebas de vuelo en simulación y en real.

Por último, en el Capítulo 6 se recogen las conclusiones extraídas con la finalización del trabajo y se evalúan los distintos objetivos iniciales propuestos. A mayores, se exponen una serie de posibles vías de desarrollo futuro y de mejoras para la herramienta.

2. HERRAMIENTAS

A lo largo de este segundo capítulo se analizan las diferentes herramientas *software* y *hardware* que forman el estado del arte de la robótica aérea actual. A la hora de proceder a desgranar los diferentes agentes que entran en acción, se realiza previamente una clasificación entre el lado tierra, el lado aire y la comunicación entre estos, primeras secciones de este capítulo. A continuación, se incluyen una sección que describe las principales herramientas para la programación de robots. Finalmente, la última sección del capítulo realiza una revisión del estado del arte actual de la robótica aérea con aplicaciones visuales.

2.1. Segmento tierra

El lado tierra del sistema se compone por los elementos del sistema que no se encuentran abordo de la aeronave. Principalmente, está compuesto por los elementos de control de vuelo. Estos son, típicamente, una emisora de vuelo y/o un ordenador. La presencia de la emisora depende en gran medida de la aeronave en cuestión y suele estar casi siempre presente, 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 ausencia del otro, siendo en muchos casos la frontera que los separa difusa. La Figura 2.1 muestra el aspecto típico de una emisora de vuelo.



Fig. 2.1. Transmisor *Taranis Q X7S OpenTX*.

Las emisoras radiocontrol son un control remoto que permiten controlar la aeronave a distancia. La comunicación suele ser por radio frecuencia, ya que ofrecen más libertad de movimiento a la aeronave, aunque existen modelos que se comunican mediante cable con el dron (aeronaves en vuelo cautivo), y típicamente dúplex. Las frecuencias utilizadas suelen depender de las necesidades de la aplicación. Esto es debido a que las características de la señal, fijan parámetros de la conexión tan importantes como el rango o el ancho de banda. Las bandas utilizadas se encuentran dentro de la frecuencia ultra-alta (UHF, *Ultra High Frequency*) sobre los 433MHz o sobre los 915MHz, en función la cantidad de datos que es necesario transmitir (mensajes, imágenes, vídeo, etc.). Otras frecuencias utilizadas, aunque en menor medida debido a su corto alcance, son las bandas de 2.4GHz, correspondientes con el estándar WiFi (IEEE 802.11). La Figura 2.2 contiene un módulo receptor de telemetría a 2,4GHz, listo para enlazar con la emisora mostrada.



Fig. 2.2. Módulo receptor *FrSky X8R*.

Por otro lado, un ordenador ofrece una amplia variedad de aplicaciones con multitud de posibilidades, desde aplicaciones generalistas a específicas a un ámbito (véase por ejemplo la topografía), o desde aplicaciones comerciales a libres o incluso desarrolladas por el propio usuario.

Debido a la gran cantidad de posibles opciones, los sucesivos apartados tratarán sobre diferentes tipos de aplicaciones que resultan relevantes para este proyecto.

2.1.1. 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 poseen los aviones tripulados. Entre otras funcionalidades, suelen también disponer de herramientas de configuración de la aeronave y herramientas de descarga y análisis de archivos de registro de vuelo.

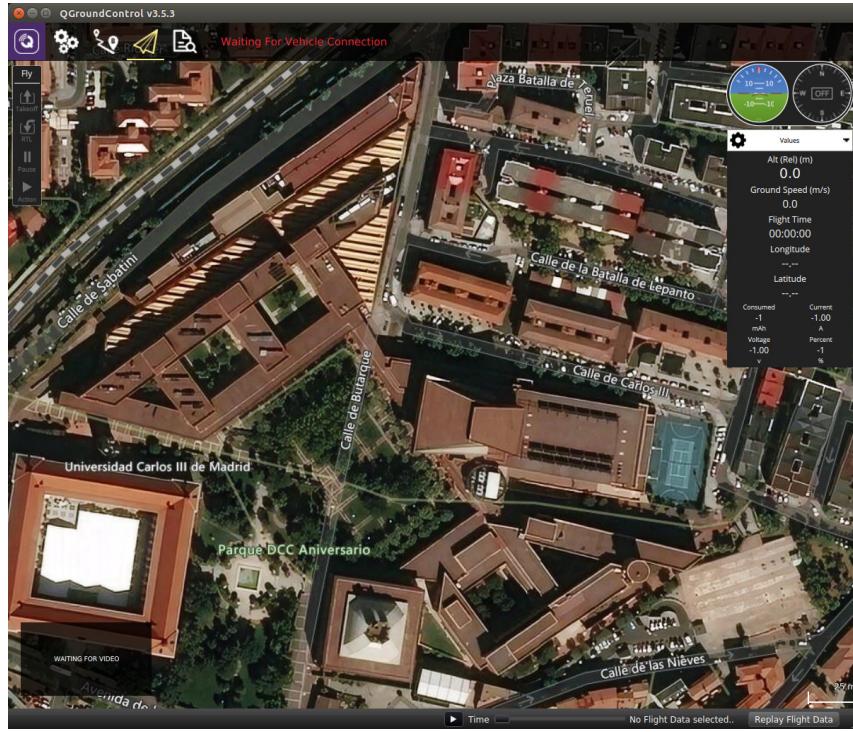


Fig. 2.3. QGroundControl.

Hoy en día, las principales GCS son, o bien software propietario de los principales fabricantes de UAVs, o software libre. Debido a su naturaleza, resultan más interesantes estas segundas. Entre ellas destacan principalmente *QGroundControl* [17] y *MissionPlanner* [18]. La Figura 2.3 muestra un ejemplo de estos programas en ejecución.

2.1.2. Toolkits de vuelo

Los toolkits de vuelo incluyen bibliotecas, herramientas, drivers, etc para aplicaciones 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 concreto de aeronave o la comunicación con la misma. Cabe destacar que este tipo de software puede ejecutarse a bordo de la aeronave y formar parte del segmento aire o pertenecer al segmento tierra y ejecutarse en un ordenador externo.

Un ejemplo de toolkit de vuelo es *Aerostack* [19]. Aerostack ofrece a desarrolladores herramientas para diseñar y construir la arquitectura de control de sistemas robóticos aéreos, integrando múltiples soluciones computacionales heterogéneas como algoritmos de visión por ordenador, métodos de mapeo y auto-localización, planificadores de movimiento, etc. [20]. Ha sido desarrollada por el grupo de Visión por Computador y Robótica Aérea de la Universidad Politécnica de Madrid (CVAR-UPM) [21] y actualmente se encuentra en su versión 5.

2.2. Segmento aire

El lado aéreo consiste en la plataforma aérea, es decir el dron en si, junto a todos los elementos a bordo que componen el sistema. En esta sección se presentan dos tipos de aeronaves, reales o simuladas, que se abordarán los sucesivos apartados.

El elemento principal de una aeronave es el autopiloto, el cual se encarga del control de los actuadores y de la estabilización de vuelo y la navegación a través de los sensores. Un autopiloto se compone de una parte hardware (controladora) que va embarcada en la aeronave y una parte software (firmware) que se ejecuta en el hardware. El funcionamiento que sigue una aeronave simulada es el mismo que el de una real. La Figura 2.4 representa el bucle estándar de control disponible en los autopilotos más comunes.

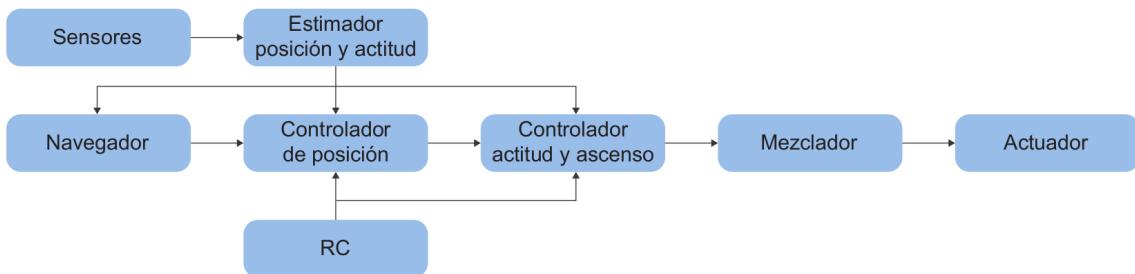


Fig. 2.4. Bucle de control de un UAV [22].

El funcionamiento de un bucle de control básico es el siguiente. El estimador toma una o más entradas de diferentes sensores, las combina y calcula el estado del vehículo. La controladora toma un punto de ajuste y una medición o estado estimado como entradas. Su objetivo es ajustar el valor del estado estimado de modo que coincida con el punto de ajuste. La salida es una corrección para eventualmente alcanzar ese punto de ajuste. Por ejemplo, el controlador de posición toma los puntos de ajuste de posición como entradas, y según la posición estimada calcula la salida que es un punto de ajuste de actitud y empuje que mueve el vehículo hacia la posición deseada. Finalmente, el mezclador toma comandos concretos, como girar a la derecha, y los traduce a comando de motor individuales, al tiempo que garantiza que no se excedan algunos límites. Esta traducción es específica para cada vehículo y depende de varios factores, como la disposición del motor con respecto al centro de gravedad o la inercia rotacional del vehículo, entre otros.

2.2.1. Aeronaves reales

Existen multitud de aeronaves y diversas posibles clasificaciones, como la propuesta por Barrientos et al. (Fig. 1.1) [5]. Otro posible criterio es la naturaleza del firmware, en base a si es propietario o libre. En una aeronave libre el usuario tiene acceso a la controladora y al software de vuelo, que sería de código abierto y donde el mismo usuario podría modificar si lo precisa. En frente se encuentran las aeronaves propietarias, donde tanto la controladora y el firmware son privados y no accesibles al usuario.



(a) DJI Mavic.



(b) 3DR Solo Drone.

Fig. 2.5. Ejemplos de drones de fabricantes propietarios.

Por un lado, entre los principales fabricantes propietarios se encuentran *DJI* [23] o *Parrot* [24], y hasta 2017 *3DR Robotics* [25] (ver Fig. 2.5).

Por el otro lado, a la hora de hablar de plataformas libres es necesario distinguir entre los componentes hardware (principalmente la controladora) y el software de vuelo (firmware).

Los dos principales firmwares libres son *PX4* y *Ardupilot*. *PX4* es un software de control de vuelo de código abierto para drones y otros vehículos no tripulados. Proporciona un conjunto flexible de herramientas para que los desarrolladores compartan tecnologías que consigan crear soluciones personalizadas para aplicaciones de drones [26]. *PX4* pertenece Dronecode, una organización sin ánimo de lucro de la Fundación Linux.

ArduPilot es un sistema de piloto automático confiable, versátil y de código abierto que admite muchos tipos de vehículos: multicópteros, helicópteros, aviones de ala fija, boites, submarinos, rovers y más [27]. El código fuente está desarrollado por la comunidad abierta de desarrolladores *Ardupilot-Dev Team*.

La principal controladora de vuelo utilizada con ambos firmware es *Pixhawk* [28]. Al igual que *PX4*, *Pixhawk* pertenece al grupo Dronecode. La Figura 2.6 contiene diferentes controladoras *Pixhawk*, mientras que la Figura 3.2 muestra un multicóptero equipado con *PX4*.

Existen diversos métodos para operar con UAS. Una primera clasificación posible es distinguir entre operaciones manuales o autónomas. Un vuelo manual dispone de un operario en tierra controlando a la aeronave a través de una emisora (control remoto), mientras que en un vuelo autónomo la aeronave puede realizar la misión de inicio a fin sin necesidad de un operador. Hoy en día, la forma más habitual de uso es operaciones semi-autónomas, con etapas en el vuelo en las que interviene el operario y otras en las que no.

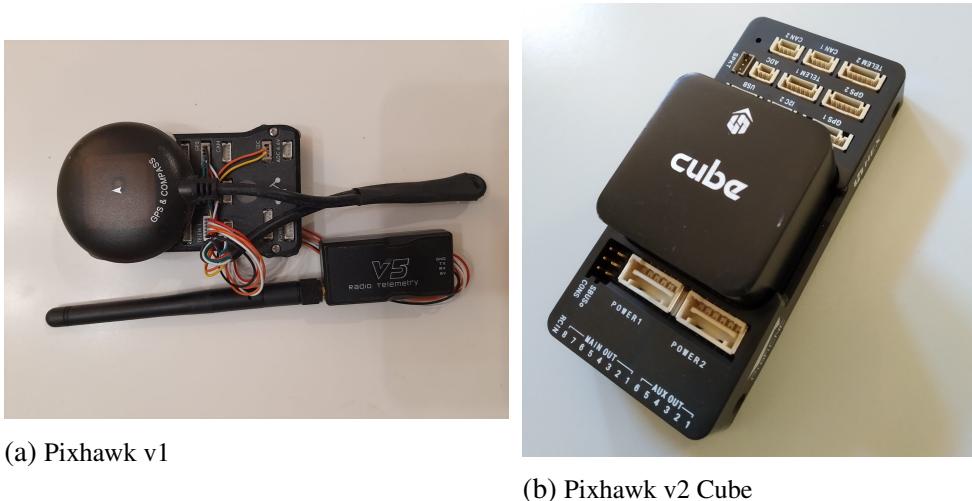


Fig. 2.6. Diferentes modelos de controladoras PixHawk.

Los diferentes modos de operación se consiguen gracias a los modos de vuelo del autopiloto. Los modos de vuelo definen cómo responde el piloto automático a la entrada del control remoto y cómo gestiona el movimiento del vehículo durante un vuelo totalmente autónomo.

Los modos brindan diferentes niveles de asistencia al piloto, que van desde la automatización de tareas comunes como el despegue y el aterrizaje, hasta mecanismos que facilitan recuperar el nivel de vuelo, mantener el vehículo en una ruta o posición fija, etc.

En general, existen dos tipos de modos de vuelo, manuales y autónomos. Los manuales son aquellos en los que el piloto tiene el control sobre el vehículo a través del control remoto o emisora, mientras que los modos autónomos son aquellos que están totalmente controlados por el autopiloto.

Cobran gran interés estos últimos, pues no requieren ninguna entrada del control remoto. PX4 posee 6 modos autónomos, *HOLD* (mantener posición actual), *RETURN* (retorno al punto de despegue), *MISSION* (vuelo de una misión preprogramada), *TAKEOFF* (despegue), *LAND* (aterrizaje), *FOLLOW ME* (seguimiento mediante comandos de posición, solo disponible para multicópteros) y *OFFBOARD* (control robótico) [29].

Todos los modos salvo el último, *OFFBOARD*, utilizan un control mediante posición GPS. De hecho el modo común de operación es el modo *MISSION*, donde previo al vuelo al dron se le indica una secuencia de puntos de paso que sigue una vez en el aire gracias a la ayuda del sensor GPS de forma autónoma. Sin embargo, este tipo de vuelos solo es posible en exteriores y bajo cobertura GPS. En interiores no es posible al no disponer de cobertura GPS debido a limitaciones con la señal.

Así pues, el modo de operación en interiores, y en general en aplicaciones de robótica, es el modo *OFFBOARD*. Este modo de vuelo permite un control variado de la aeronave, permitiendo no solo controlar a la aeronave mediante posición, sino también con comandos de velocidad, de aceleración o de fuerza.

2.2.2. Aeronaves simuladas

Las aeronaves simuladas suelen utilizar software de vuelo libre, dada 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 es, en si mismo, un simulador. 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 SDF, necesario en la visualización gráfica. Existen diferentes SITL en función del controlador simulado (PX4, ArduPilot, etc.) y en general suelen soportar la simulación de sensores sencillos como GPS, IMU, etc.

Dichas simulaciones se suelen acompañar de una visualización gráfica. Para ello, es necesario el uso de un simulador como *Gazebo* [30], *AirSim* [31] o *jMAVSim* [32]. El más extendido, debido a sus grandes prestaciones y posibilidades de configuración es Gazebo. Simuladores como estos, permiten probar rápidamente algoritmos, diseñar robots o realizar pruebas sobre sistemas de inteligencia artificial sobre entornos realistas. Ofrecen funciones punteras como la simulación con precisión de poblaciones de robots en entornos complejos de interior y exterior, manteniendo un motor de físicas robusto y con gráficos configurables. La Figura 2.7 muestra un dron simulado mediante jMAVsim con PX4 como autopiloto.



Fig. 2.7. Dron simulado mediante jMAVsim.

2.3. Protocolo de comunicaciones

El protocolo de comunicaciones puede ser propietario, utilizado por fabricantes de aeronaves y diferentes para cada una de ellas, o libre. El protocolo de comunicaciones libre por excelencia es MAVLink [33], que se ha convertido *de facto* en el estándar del sector. MAVLink son las siglas de *Micro Air Vehicle Link*, un protocolo de comunicaciones muy ligero para el intercambio de mensajes con un dron 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*.

El protocolo se compone de cuatro tipo de elementos: mensajes, comandos, enumerados y microservicios.

Los mensajes son el objeto más pequeño de intercambio de información del protocolo. Sirven para transmitir el estado o información de la aeronave, principalmente datos de navegación o de posición. Son muchos los mensajes existentes y de diversa utilidad, como se puede comprobar en la documentación existente [34]. Ejemplo de ello son los mensajes *HEARTBEAT* (ver Cód. 2.1) o *ATTITUDE*.

```
1 <message id="0" name="HEARTBEAT">
2   <description>The heartbeat message shows that a system or
3     component is present and responding. The type and autopilot
4     fields (along with the message component id), allow the
5     receiving system to treat further messages from this system
6     appropriately.</description>
7   <field type="uint8_t" name="type" enum="MAV_TYPE">Vehicle or
8     component type. For a flight controller component the vehicle
9     type (quadrotor, helicopter, etc.). For other components the
  component type (e.g. camera, gimbal, etc.).</field>
1 <field type="uint8_t" name="autopilot" enum="MAV_AUTOPILOT">
2   Autopilot type / class. Use MAV_AUTOPILOT_INVALID for
3   components that are not flight controllers.</field>
4 <field type="uint8_t" name="base_mode" enum="MAV_MODE_FLAG">
5   display="bitmask">System mode bitmap.</field>
6 <field type="uint32_t" name="custom_mode">A bitfield for autopilot
7   -specific flags</field>
8 <field type="uint8_t" name="system_status" enum="MAV_STATE">System
9   status flag.</field>
  <field type="uint8_t_mavlink_version" name="mavlink_version">
    MAVLink version, not writable by user, gets added by protocol
    because of magic data type: t_mavlink_version</field>
</message>
```

Cód. 2.1. Definición del mensaje HEARTBEAT de MAVLink.

Los comandos sirven para transmitir peticiones y acciones a la aeronave desde la GCS, o viceversa. Se encapsulan en un tipo especial de mensajes (*COMMAND_INT* o *COMMAND_LONG*). Los comandos pueden ser de tres tipos: de navegación, de acción y de condición, en función del tipo de petición requerida. Los comandos utilizados en el protocolo se pueden comprobar también en la documentación de MAVLink [34]. El Código 2.2 muestra, a modo de ejemplo, la estructura de un comando de navegación a un punto.

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. Los enumerados sirven, en definitiva, para representar errores, estados o modos. Cada enumerado tiene un atributo de nombre obligatorio y puede contener una serie de elementos de entrada (con nombres exclusivos de enumeración) para los valores admitidos.

En el mensaje HEARTBEAT (Cód. 2.1) se hace referencia a varios, como *MAV_TYPE* o *MAV_AUTOPILOT*. Al igual que los mensajes y los comandos, los enumerados disponibles se pueden comprobar en la documentación de MAVLink [34].

```

1 <enum name="MAV_CMD">
2   <description>Commands to be executed by the MAV. They can be
      executed on user request, or as part of a mission script. </
      description>
3   <entry value="16" name="MAV_CMD_NAV_WAYPOINT">
4     <description>Navigate to waypoint.</description>
5     <param index="1">Hold time in decimal seconds. (ignored by fixed
        wing, time to stay at waypoint for rotary wing)</param>
6     <param index="2">Acceptance radius in meters (if the sphere with
        this radius is hit, the waypoint counts as reached)</param>
7     <param index="3">0 to pass through the WP, if > 0 radius in
        meters to pass by WP. Positive value for clockwise orbit,
        negative value for counter-clockwise orbit. Allows
        trajectory control.</param>
8     <param index="4">Desired yaw angle at waypoint (rotary wing).
        NaN for unchanged.</param>
9     <param index="5">Latitude</param>
10    <param index="6">Longitude</param>
11    <param index="7">Altitude</param>
12  </entry>
13  ...
14 </enum>
```

Cód. 2.2. Definición CMD_NAV_WAYPOINT, comando de MAVLink.

Por último, los microservicios establecen cómo deben ser intercambiados los mensajes y comandos para un correcto funcionamiento de la comunicación. Representan protocolos de alto nivel que los sistemas MAVLink pueden adoptar para una mejor interacción. Los microservicios se utilizan para intercambiar muchos tipos de datos, incluidos: pará-

metros, misiones, trayectorias, imágenes y otros archivos. Los datos pueden ser mucho más grandes de lo que cabe en un solo mensaje, por lo que los microservicios definirán cómo se dividen y se vuelven a ensamblar los datos, y cómo garantizar que los datos perdidos se vuelvan a transmitir. Otros microservicios proporcionan reconocimiento de comandos, informes de errores, etc. Los diferentes microservicios se definen en la documentación de MAVLink [35].

Tabla 2.1. Principales mensajes de MAVLink.

MENSAJES	
HEARTBEAT	VFR_HUD
SYS_STATUS	SET_MODE
HIGHRES_IMU	RADIO_STATUS
BATTERY_STATUS	ATTITUDE
GLOBAL_POSITION_INT	

Fuente: MAVLink [33]

Comandos como el presentado (Cód. 2.2) son útiles a la hora navegar de forma tradicional mediante posición GPS. Junto a este comando, otros mensajes y comandos son necesarios para un correcto funcionamiento del protocolo de comunicaciones. La Tabla 2.1 recoge varios mensajes muy utilizados.

2.4. Programación de robots

Existen multitud de herramientas que permiten y facilitan la programación de robots. Esta sección se centra en dos, las plataformas robóticas de software y los algoritmos de aprendizaje profundo.

2.4.1. Plataformas robóticas de software

Las plataformas robóticas de software son entornos que permiten la interacción software-hardware. Una analogía que las define con sencillez es que si los datos son el torrente sanguíneo de tu robot, entonces las plataformas robóticas de software son el sistema circulatorio del mismo.

Más específicamente, estas plataformas permiten la construcción de sistemas de control de robots como una colección de programas que se comunican *peer-to-peer* con una familia extensible de tipos de conexión. A este tipo de plataformas se les conoce comúnmente como *middleware*, al encontrarse a medio camino entre el hardware y el software.

Pese a describir este software como parte del segmento tierra, es importante destacar que puede también pertenecer al segmento aire, en función de donde esté ubicado. Existen múltiples plataformas robóticas, las más comunes son ROS [36], YARP [37], [38], Orococos [39] o CARMEN [40].

Hoy en día, la plataforma más utilizada en robótica es ROS. ROS (*Robot Operating System*) es “un meta-sistema operativo de código abierto para su robot”, mantenido por *Open Source Robotics Foundation* (OSRF) [41]. A pesar del nombre, ROS no es un sistema operativo al uso. Más bien, es un SDK (*Software Developer Kit*, kit de desarrollo de software) que proporciona los componentes básicos para crear aplicaciones robóticas.

Principalmente, ROS proporciona un sistema de envío de mensajes, *middleware*. El sistema de mensajería permite la comunicación entre nodos distribuidos, típicamente, a través de un patrón anónimo de publicación/suscripción a *topics*. El enfoque de ROS da como resultado sistemas más fáciles de mantener, contribuir y reutilizar.

Además, ROS proporciona servicios que se esperarían de un sistema operativo, incluyendo abstracción de hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidades comunes o manejo de paquetes. Otra funcionalidad relevante son una serie de librerías y herramientas de desarrollo. Herramientas para el lanzamiento, la introspección, la depuración, la visualización, el graficado o la grabación y reproducción de ejecuciones.

El ecosistema de ROS es enorme. Actualmente, soporta multitud de robots y sensores, y está integrado en los principales simuladores como Gazebo. Además, otra gran ventaja es la comunidad alrededor de ROS, la cual es global y de gran tamaño, lo que produce que haya gran cantidad de documentación disponible.

2.4.2. Aprendizaje profundo

El aprendizaje profundo es un conjunto de algoritmos de aprendizaje automático que intenta modelar abstracciones de datos de alto nivel usando redes neuronales. Las redes neuronales son arquitecturas computacionales de datos expresados en forma matricial o tensorial. Cada unidad, llamada *neurona*, se organiza en capas que forman la red.

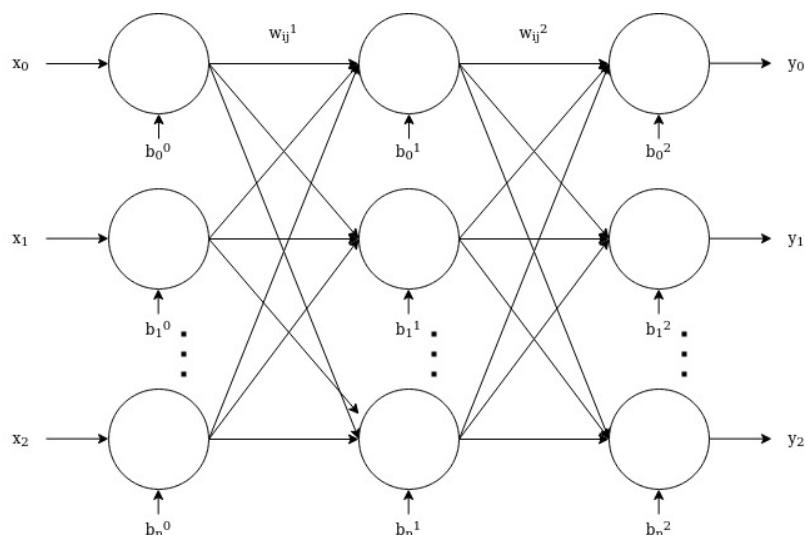


Fig. 2.8. Arquitectura perceptrón multicapa.

La palabra “profundo” hace referencia al número de capas que posee la red, siendo redes profundas aquellas redes con más de tres capas. En la Figura 2.8 se ilustra una arquitectura de red neuronal básica, conocida como perceptrón multicapa (MLP, *MultiLayer Perceptron*). La arquitectura presentada posee una capa de entrada, una de salida y una capa oculta.

Existen diferentes marcos de programación que permiten el desarrollo de redes y algoritmos. Las principales plataformas son Keras [42], TensorFlow [43], PyTorch [44] y, en el ámbito de la visión, Darknet [45].

- **Keras** es una biblioteca de redes neuronales de código abierto escrita en Python y desarrollada por François Chollet. Es capaz de ejecutarse sobre TensorFlow (fue integrado a mediados de 2017) y otros marcos de programación. Está diseñado para permitir una experimentación rápida con redes neuronales profundas.
- **TensorFlow** es una biblioteca de software de código abierto para la programación de redes neuronales y del flujo de datos en una variedad de tareas, desarrollado por Google y lanzado en 2015. Ofrece múltiples niveles de abstracción para construir y entrenar modelos.
- **PyTorch** es una biblioteca de aprendizaje automático de código abierto para Python, basada en Torch. Se utiliza para aplicaciones como el procesamiento del lenguaje natural y fue desarrollado por el grupo de investigación de inteligencia artificial de Facebook en 2017.
- **Darknet** es un marco de trabajo de código abierto escrito en C y CUDA. Es rápido, fácil de instalar y admite cálculos de CPU y GPU. En él se han desarrollado redes como YOLO [46].

Este tipo de algoritmos se usan frecuentemente en los sistemas de percepción de los robots, ya que proporcionan mucha robustez. Han permitido a los robots funcionar bien en entornos reales, fuera de los laboratorios, en condiciones no controladas de iluminación o meteorología. En los últimos años se está explorando también su uso en la toma de decisiones, extendiendo su aplicación los sistemas de control en redes que comprenden la percepción y control del robot.

2.5. Aplicaciones visuales en robótica aérea

Las técnicas de visión en robótica han evolucionado mucho en los últimos tiempos. La aparición disruptiva de la Inteligencia Artificial ha revolucionado ciencia y industria a tan altos niveles que sectores siempre reacios, como la aviación comercial, discuten ahora la hoja de ruta para integrar este tipo de sistemas en la industria [47].

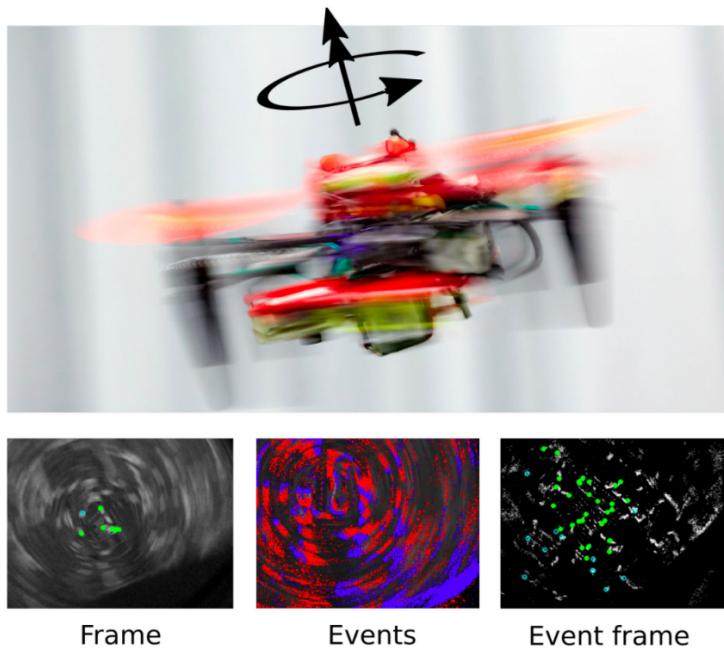


Fig. 2.9. Control de un multirrotor bajo fallo de uno de los motores [48].

En investigación, técnicas de aprendizaje profundo han permitido dar un salto cuantitativo y cualitativo en las aplicaciones basadas en visión en la robótica aérea. Mejoras que tienen una aplicación directa en la seguridad, como la propuesta por S. Sun et al. con su algoritmo que evita un accidente en caso de fallo de un motor [48] (ver Fig. 2.9) o el algoritmo de evasión de obstáculos dinámicos desarrollado por D. Falanga et al [49] (ver Fig. 2.10).



Fig. 2.10. Secuencia de imágenes en maniobra de evasión [49].

Técnicas que han evolucionado de ser puramente de percepción a integrar también el control en la red neuronal. El algoritmo desarrollado por E. Kaufmann, *Agile Drone Flight* [50], es prueba de ello. Este permite obtener posiciones y velocidades optimizadas a partir de una imagen utilizando redes neuronales profundas.

Aeronaves como el Tello de DJI (Fig. 3.1) son ampliamente utilizadas en investigación debido a su bajo coste y tamaño. Ejemplo de ello puede ser el estudio realizado por A. Anwar y A. Raychowdhury donde proponen un nuevo algoritmo de navegación autónoma basado en técnicas de aprendizaje profundo [51] o A. Scannell et al. en su investigación sobre nuevos algoritmos de optimización de trayectorias en entornos complejos [52].

3. MATERIAL Y MÉTODO

Durante este capítulo se explican las diferentes herramientas concretas que han servido de ingredientes en la realización de este trabajo. A la hora desgranar los diferentes agentes que entran en acción, se realiza previamente una clasificación entre software y hardware que se refleja en las secciones de este capítulo.

3.1. Hardware

Dentro del material hardware dispuesto se distinguen aeronaves, dispositivos embebidos y sensores de visión. Dichos elementos se abordarán en los próximos apartados.

3.1.1. Aeronaves

En coherencia con los objetivos del proyecto, se han seleccionado tres diferentes aeronaves sobre las que realizar las pruebas del software desarrollado. La elección de estas aeronaves se ha realizado con el propósito de cubrir un amplio abanico de opciones, siendo los tres cuadri-cópteros muy diferentes entre ellos. Entre las seleccionadas se encuentran aeronaves reales y simuladas, aeronaves propietarias y libres, y aeronaves de vuelo en interiores o en exteriores. Cubrir una gran variedad de posibilidades supone dotar al software de una alta versatilidad, siendo en un futuro más fácilmente extensible a otras plataformas.

Las aeronaves elegidas son:

1. **3DR Iris simulado.**
2. **DJI Tello.**
3. **PX4 de construcción propia.**

En primer lugar se encuentra una aeronave simulada, 3DR Iris de 3D Robotics. Utilizar una aeronave simulada en las primeras fases del desarrollo supone grandes ventajas en ahorro de tiempo y coste, pues los errores en el código no suponen un daño en el material. La aeronave utiliza PX4 como autopiloto y se simula mediante Gazebo. Se darán más detalles acerca de esta aeronave en la sección de software (Sec. 3.2.1).

La segunda aeronave seleccionada es el DJI Tello (Fig. 3.1). Es una aeronave propietaria (del fabricante chino *DJI*) pensada para vuelos en interiores debido a su pequeño tamaño y peso (ver Tabla 3.1). Incluye un sensor telemétrico (*optical flow*) y un barómetro, para cálculos de odometría, un sensor de visión y una antena WiFi para las comunicaciones.

Tabla 3.1. Especificaciones del DJI Tello.

Características	Valores
Peso (g)	80
Tamaño (mm)	98×92.5×41
Distancia máx. (m)	100
Velocidad máx. (m/s)	10
Tiempo máx. (min)	13
Altura máx. (m)	30
Cámara (MP)	5
FOV (°)	82.6
Vídeo	HD 720p 30 fps

Fuente: DJI

Debido a sus características es ideal para realizar los primeros ensayos de navegación en interiores. Su tamaño y peso aseguran daños limitados a terceros en caso de accidente, y pese a su apariencia es una aeronave robusta y con grandes prestaciones de vuelo. Además, el propio fabricante ofrecen un kit de desarrollo (SDK) para la programación de aplicaciones sobre el dron.

Sin embargo, su uso es limitado por la comunicación con la estación terrestre, debido a que el procesamiento no se puede realizar a bordo de la aeronave.



Fig. 3.1. DJI Tello.

En tercer lugar, se ha elegido un dron de construcción propia y desarrollado por A. Madridano en su tesis doctoral [53] junto al Laboratorio de Sistemas Inteligentes (LSI) de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) [54]. La aeronave posee una controladora PixHawk v1, con el autopiloto PX4 en su última versión estable (v1.12.3). La aeronave

lleva a bordo un ordenador de cómputo que permite realizar el procesamiento de la información in-situ. Además incluye una antena GPS, un receptor de telemetría y una antena WiFi, entre otros sensores. La Tabla 3.2 recoge las características principales de la aeronave.

Tabla 3.2. Especificaciones del dron de construcción propia.

Características	Valores
Peso (Kg)	2,5
Tamaño (mm)	340×340x250
Distancia máx. (m)	1000
Velocidad máx. (m/s)	12
Altura máx. (m)	120

Fuente: Elaboración propia [53].

Dicha aeronave está pensada para su uso en las últimas fases del desarrollo al ser la aeronave más potente de las tres. Al realizar a bordo el procesamiento, permite realizar tareas más complejas en exteriores sin limitaciones con la comunicación con la estación terrestre, ya que esta es prescindible. La Figura 3.2 muestra el cuadri-cóptero.



Fig. 3.2. Dron no comercial.

3.1.2. Dispositivos embebidos

En la apartado anterior, con la última aeronave se ha presentado un dispositivo embebido. Estos equipos están presentes cuando existe interés de embarcar parte del software en la aeronave. Ejecutar ciertos procesos en la aeronave ofrece un salto de rendimiento en algoritmos en tiempo real, muy presentes en la visión por computador. Además, al tratarse de vehículos aéreos no es posible en muchos casos ejecutar estos algoritmos en ordenadores portátiles como sí se hace tradicionalmente en vehículos terrestres, debido a la latencia en las comunicaciones. Una alta latencia dificulta cerrar el ciclo de control en el segmento tierra, que se ve limitada por la distancia a la estación de tierra.

Por ello, debido al mencionado aumento de interés en aplicaciones de visión en tiempo real ha propiciado el desarrollo de dispositivos embebidos de baja potencia para su integración en sistemas robóticos móviles. Ejemplo de ello son los dispositivos como Arduino [55] o Raspberry Pi [56], utilizados en pequeños robots como PiBot [57] (ver Fig. 3.3) o el GoPiGo [58].

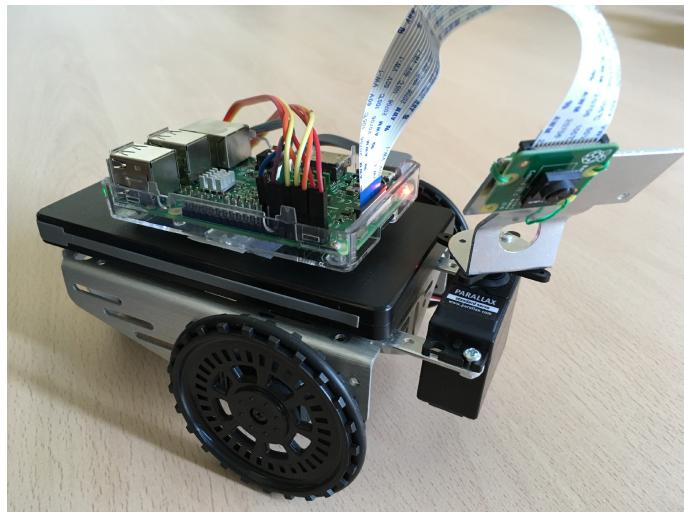


Fig. 3.3. PiBot.

Sin embargo, para ejecutar algoritmos complejos, como redes neuronales, no es suficiente con los dispositivos mencionados y es necesario utilizar dispositivos específicos. Una alternativa viable son los dispositivos *Jetson* fabricados por *NVIDIA* [59]. Cada NVIDIA Jetson es un sistema en módulo (SOM) completo que incluye CPU, GPU, memoria, administración de energía, interfaces de alta velocidad y más, que permiten ejecutar CUDA [60], una biblioteca de computación paralela de bajo nivel, así como varios kits de herramientas (como JetPack SDK [61]) diseñados para optimizar los procesos que se ejecuten en el dispositivo.

El tamaño y consumo de estos dispositivos hacen que sea sistemas ideales para embarcar en vehículos aéreos. Existen diferentes modelos disponibles como la Jetson Nano, la Jetson TX2 o la Jetson AGX Xavier, seleccionada para embarcar en la aeronave. La Figura 3.4 muestra los principales elementos del dispositivo, mientras que la Tabla 3.3 recoge sus características.

Tabla 3.3. Especificaciones de Jetson AGX Xavier.

Características	Valores
Peso (g)	630
Tamaño (mm)	100×86
Potencia (W)	10 15 30
GPU	Volta 64 Tensor Cores
CPU	8-Core ARM 64-Bit
Rendimiento (TFLOPS)	11
Memoria (GB)	16
Almacenamiento (GB)	32

Fuente: NVIDIA

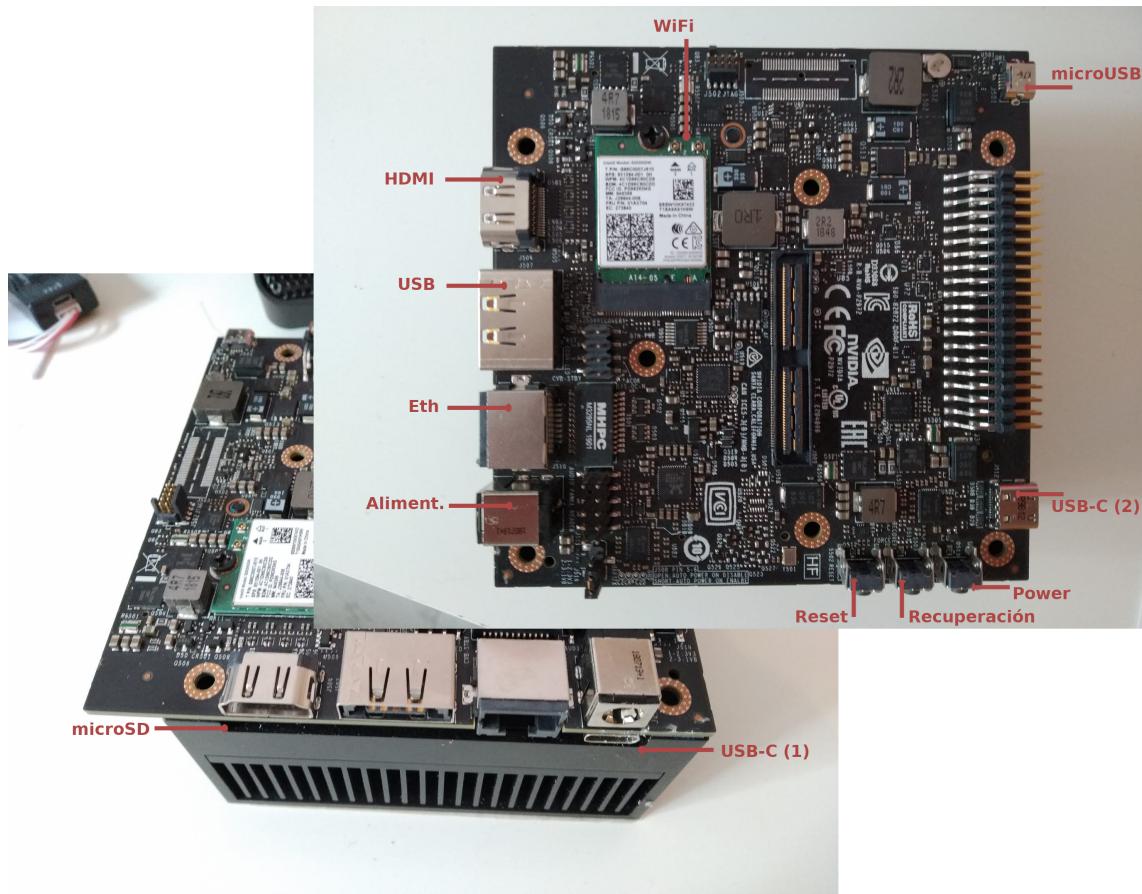


Fig. 3.4. NVIDIA Jetson AGX Xavier.

3.1.3. Sensores de visión

Para el desarrollo de aplicaciones de control visual, es necesario poseer un sensor de visión a bordo de la aeronave. Tanto la aeronave simulada como el Tello poseen una cámara embarcada, en el primer caso un sensor simulado (del cual se darán más detalles en la Sec. 3.2.1), mientras que en el segundo el sensor viene integrado en el propio dron. Sin embargo, para el dron de desarrollo propio es necesario seleccionar una cámara, ya que el diseño inicial no incluye ninguna. A la hora de elegir el sensor, se ha apostado por el uso de un sensor RGB básico, teniendo un sistema similar al de resto de las aeronaves.



Fig. 3.5. Cámara Victure AC600.

En concreto, el sensor seleccionado es una cámara USB Victure AC600 (Fig. 3.5). Además, la Tabla 3.4 recoge las características de la cámara. Finalmente, el montaje final del sistema de la cámara junto a la aeronave se muestra en la Figura 3.6.

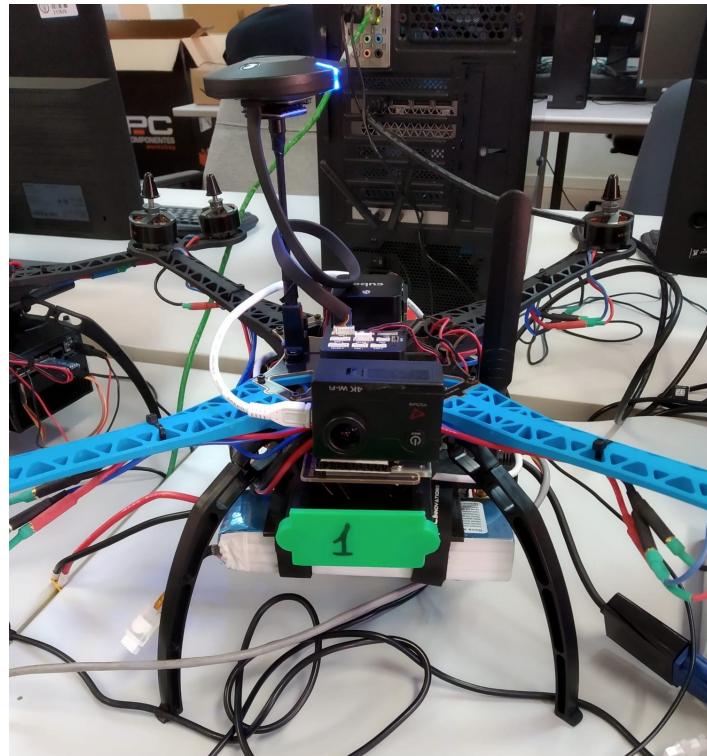


Fig. 3.6. Aeronave con cámara instalada.

Tabla 3.4. Especificaciones de la cámara Victure AC600.

Características	Valores
Peso (g)	78
Tamaño (mm)	60x40x25
Resolución (MP)	16
FOV (°)	170
Vídeo	4k ultraHD 25 fps

Fuente: Victure

3.2. Software

El sistema operativo utilizada durante el desarrollo y las pruebas ha sido Ubuntu, la distribución de Linux basada en Debian. En concreto, la edición utilizada es la versión con soporte de largo plazo, *Ubuntu 18.04.3 LTS (Bionic Beaver)* [62]. El motivo de esta elección es que Ubuntu suele ser la primera opción en aplicaciones relacionadas con el software libre y la robótica. Además, como veremos en a lo largo de la sección, las principales herramientas de simulación de drones utilizan esta plataforma.

El lenguaje elegido para el desarrollo de la aplicación ha sido Python [63]. Este lenguaje creado a principios de 1990 por Guido van Rossum en los Países Bajos es un lenguaje de programación interpretado, interactivo y orientado a objetos. Sus principales ventajas, que han motivado su elección para este proyecto, son una sintaxis muy clara y su portabilidad. En concreto, la versión utilizada es *Python v2.7.17*.

Además, para ciertos aspectos del desarrollo se ha utilizado también C++ [64]. C++ es un lenguaje de programación multiparadigma diseñado en 1979 por Bjarne Stroustrup. La intención de su creación fue extender al lenguaje de programación C mecanismos que permiten la manipulación de objetos. En concreto, la versión *C++14* junto al compilador versión *g++ 7.5.0*.

La plataforma robótica de software seleccionada es ROS. Además de ser la plataforma de uso más extendido, dispone de librerías en diferentes lenguajes que facilitan su uso. Una de ellas es *rospy* [65], un cliente para Python que permite interactuar rápidamente con los nodos, servicios y parámetros de ROS.

ROS posee diferentes paquetes que facilitan el desarrollo de software en múltiples ámbitos. Dentro de la robótica aérea, existe una colección de nodos de comunicación extensible MAVLink para ROS conocida como *MAVROS (Micro Air Vehicles ROS)* [66]. Este paquete de ROS proporciona un controlador de comunicación para varios autopilotos con protocolo de comunicación MAVLink, junto a una colección de nodos, servicios y parámetros que aseguran una correcta comunicación con la aeronave. La versión de MAVROS es *v1.9.0* con la colección de mensajes de *MAVLink v2021.3.3*.

Para el procesamiento de imágenes, se ha elegido *OpenCV* (Open Source Computer Vision) [67]. OpenCV es una biblioteca de código abierto C++/Python/Java (escrita de forma nativa en C++) utilizada en Visión por Computador. Entre los métodos clásicos y de última generación que incluye, se pueden encontrar varias funciones adecuadas para reconocimiento facial, seguimiento ocular, establecimiento de marcadores para realidad aumentada, etc. Debido a su excelente rendimiento, esta biblioteca ha logrado convertirse en el estándar *de facto* en visión artificial para todo tipo de usuarios. La versión utilizada es v3.2.0.

Otra biblioteca muy útil para el trabajo matricial con imágenes es *NumPy* [68]. NumPy es una biblioteca para Python que da soporte para crear vectores y matrices grandes multidimensionales, junto con una gran colección de funciones matemáticas de alto nivel para operar con ellas. La versión utilizada es la v1.13.3.

3.2.1. Simulación

Entre los drones utilizados se ha introducido en la sección anterior el 3DR Iris simulado. Tal como se ha adelantado, la simulación se realiza mediante el SITL de PX4 y sobre el simulador *Gazebo*. Este simulador de código abierto es por excelencia el más utilizado en aplicaciones de robótica y visión artificial. Debido a su gestión abierta permite la integración de múltiples vehículos, mundos, sensores, físicas, etc.

La versión utilizada durante el proyecto es *Gazebo9*. El modelo del Iris simulado en el simulador se puede observar en la Figura 3.7. El modelo lleva incluido dos *plugins* que le permiten obtener imágenes (una frontal y otra ventral) de modo similar a una cámara.



Fig. 3.7. 3DR Iris simulado mediante Gazebo.

El firmware utilizado por la controladora es PX4 con la versión v1.11.3, cuyo esquema de SITL se puede observar en la Figura 3.8.

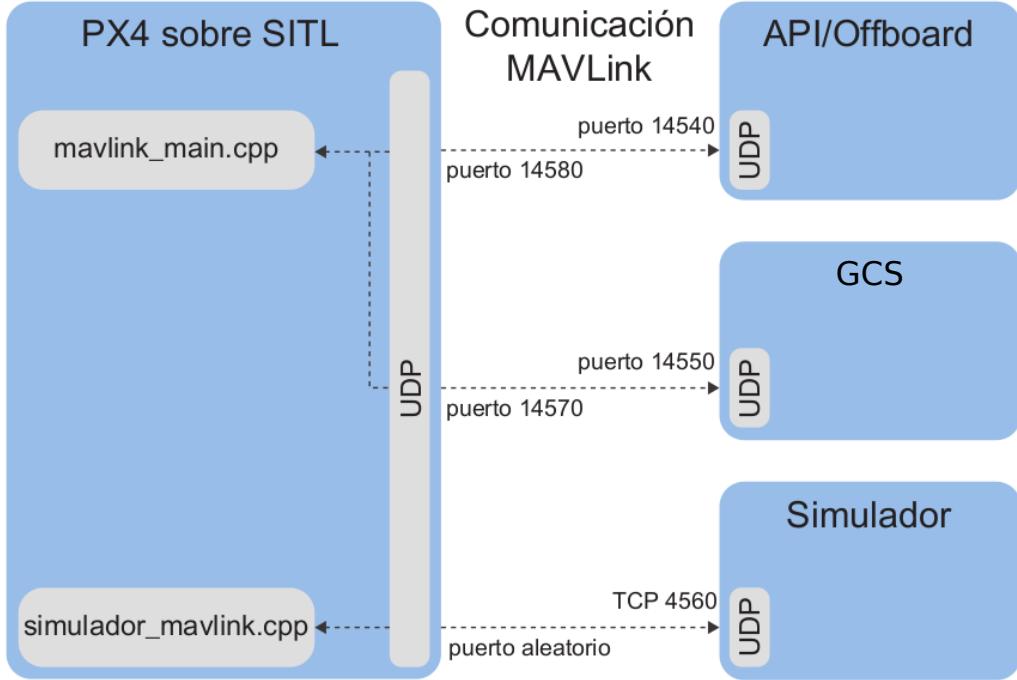


Fig. 3.8. Esquema de PX4 sobre SITL [69].

3.2.2. NVIDIA JetPack

El dispositivo embebido utilizado, la NVIDIA Jetson AGX Xavier, sigue unas pautas de diseño integradas muy optimizadas. NVIDIA desarrolla y mantiene una versión personalizada de Ubuntu Linux, llamada NVIDIA JetPack, y está disponible para descargar e instalar como firmware de la placa [61]. Esta implementación personalizada incluye interfaces de bajo nivel para implementar operaciones de computación paralelas (CUDA) y varias optimizaciones SDK (kits de desarrollo de software), como TensorRT. Para el sistema desarrollado, la versión utilizada es *JetPack 4.6* (L4T 32.6.1).

3.2.3. Aprendizaje profundo

Para este trabajo, uno de los objetivos es el desarrollo de una aplicación de aprendizaje profundo en un dron, por lo que no ha sido necesario diseñar y desarrollar una red neuronal.

En cambio, se ha utilizado una ya creada y ampliamente usada, YOLO (*You Only Look Once*). YOLO es un sistema de detección de objetos en tiempo real de última generación, diseñado por Joseph Redmon hasta su tercera versión [46]. Tras el abandono del autor, fue continuada por Alexey Bochkovskiy, creador de las versiones más actuales [70].

Su enfoque, muy novedoso en su lanzamiento, permite alcanzar velocidad de ejecución

muy elevadas. Con su método, la red neuronal se aplica una única vez sobre la imagen. Esta red divide la imagen en regiones y predice cuadros delimitadores y probabilidades para cada región.

La versión utilizada de la red para este trabajo es la *YOLOv4*. Se han utilizado la configuración y pesos por defecto de la versión YOLOv4 y YOLOV4-tiny. Dichos pesos se han obtenido entrenando con la base de datos Microsoft COCO (*Common Objects in Context*) [71], la cual posee 80 clases diferentes y más de 300.000 imágenes y un millón y medio de objetos etiquetados.

3.3. Método

La metodología seguida durante el desarrollo es la filosofía del código libre. Todo el código se encuentra disponible en abierto en *GitHub* [72]. *GitHub* es una plataforma de desarrollo colaborativo para alojar proyectos utilizando el sistema de control de versiones *git*. Esta plataforma permite además una metodología en espiral con incidencias y parches.

El código fuente del proyecto se encuentra en diferentes repositorios públicos. Parte del código se aloja en *JdeRobot/drones*¹ (rama `melodic-devel`, versión 1.3.10), mientras que otra parte del código se puede encontrar en *RoboticsLabURJC/2021-tfm-pedro-arias*². El software en el repositorio *drones* ha sido desarrollado por la asociación de robótica *JdeRobot* [73], ligada a la Universidad Rey Juan Carlos (URJC), y entre sus desarrolladores se encuentra el autor de este trabajo. El código del segundo repositorio ha sido desarrollado en su totalidad por el autor y con motivo de este proyecto.

Además, a lo largo del proyecto se han mantenido reuniones semanales (o cada dos semanas, en función del periodo del año) con los tutores mediante videoconferencia. Para cada una de estas reuniones, se ha desarrollado una presentación con los progresos y avances realizados durante cada periodo de tiempo. Dichas reuniones han permitido mantener un flujo de información constante entre alumno y tutores, recibir periódicamente realimentación del trabajo realizado y fijar los objetivos a corto plazo para el siguiente periodo de trabajo.

¹<https://github.com/JdeRobot/drones>

²<https://github.com/RoboticsLabURJC/2021-tfm-pedro-arias>

4. INFRAESTRUCTURA DESARROLLADA

Este capítulo aborda el diseño e implementación de la infraestructura software desarrollada para facilitar la programación de aplicaciones sobre drones. En primer lugar se explica el esquema seguido junto a las decisiones tomadas durante la fase de diseño. En segundo lugar, se presentan las diferentes herramientas desarrolladas y su implementación.

4.1. Diseño

La infraestructura ha sido diseñada desde el inicio teniendo en cuenta los objetivos y requisitos del proyecto. El esquema general del problema se presentan en la Figura 4.1. Sobre el esquema se distinguen tres diferentes capas. En la parte inferior se encuentra la capa correspondiente a la aeronave, mientras que en la parte superior se encuentra el usuario, interesado en desarrollar una aplicación para controlar la aeronave. Entremedias se encuentra la herramienta a desarrollar, que se enfrenta al desafío de comunicarse con la aeronave, generalmente una tarea compleja, y de ofrecer al usuario una interfaz sencilla.

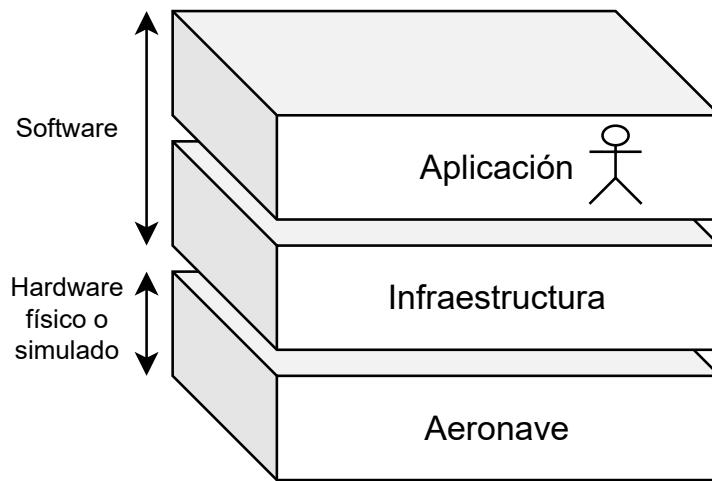


Fig. 4.1. Esquema de capas de la infraestructura.

Para resolver el problema de la comunicación con la aeronave se ha decidido usar MAVROS, previamente presentado en el capítulo correspondiente al material utilizado. MAVROS establece una arquitectura de nodos, *topics* y servicios que permiten comunicarse con la aeronave. Dichas herramientas se analizarán con profundidad en el Sección 4.2.

La interacción con el usuario se resuelve ofreciendo un paquete de ROS y fácilmente importables a Python. El paquete, llamado *DroneWrapper*, ofrece una interfaz de programación al usuario que le permite controlar la aeronave ya sea física o simulada. El paquete

posee una clase *DroneWrapper*, de nombre igual al paquete, cuyos métodos proporcionan todo tipo de tareas para el trabajo con un multicóptero.

Así pues, el nuevo esquema que se obtiene con el diseño presentado hasta ahora se ilustra en la Figura 4.2.

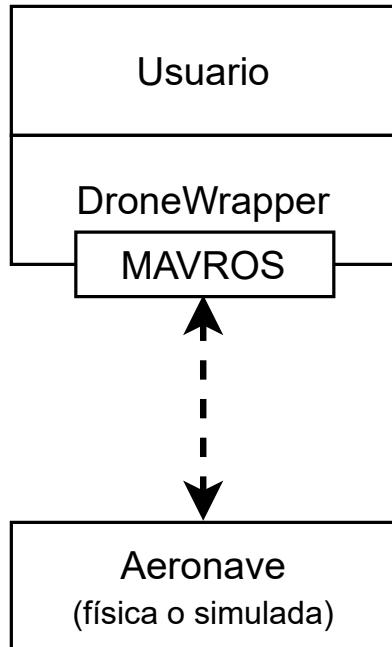


Fig. 4.2. Diseño inicial de la infraestructura.

Es importante destacar que los objetivos de seguridad y robustez se ven cumplidos con MAVROS. La comunicación cuenta con la robustez de ROS, mientras la seguridad está presente al utilizar la versión 2.0 de MAVLink, la cual permite, entre otros aspectos de seguridad, el cifrado de los mensajes.

Con este diseño se puede observar cómo la comunicación se realiza a través de MAVROS y dentro del paquete *DroneWrapper* presentado. Según este último esquema, MAVROS tiene que poder entender y comunicarse con ambos extremos de la comunicación. *DroneWrapper* no presenta problema ninguno, pues ha sido desarrollado para esta causa, pero la aeronave si puede suponer alguna dificultad.

MAVROS soporta los principales controladores de vuelo como PX4, presente en dos de las tres aeronaves utilizadas. Sin embargo, el Tello no posee soporte con MAVROS, tampoco con ROS, al ser un controlador privado. Para resolver dicho problema, se ha ideado y programado un controlador (o *driver*) de comunicaciones que simula a MAVROS, llamado *Tello Driver*.

Tello Driver ofrece, de igual forma que hace MAVROS, una serie de nodos y servicios que permiten la comunicación con *DroneWrapper*. Por otro lado, para comunicarse con la aeronave se utiliza el SDK oficial de Tello [74] que permite controlar la aeronave con mensajes especificados por el fabricante.

Siguiendo esta consideración, el esquema presentado se ve ligeramente modificado. El nuevo diseño se muestra en la Figura 4.3.

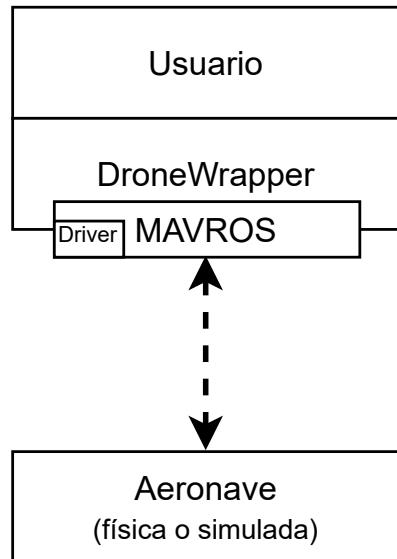


Fig. 4.3. Diseño final de la infraestructura.

Así como el Tello necesita un *driver* particular de comunicaciones, puede que otras aeronaves necesiten otro controlador de comunicaciones específico para hacer uso de la herramienta *DroneWrapper*.

Otros elementos periféricos pueden también necesitar *drivers* para encajar en la infraestructura dispuesta. Es el caso de la cámara utilizada (*Victure*) en la aeronave de construcción propia. Para ofrecer las imágenes a través de la interfaz de *DroneWrapper* se ha desarrollado también otro controlador, llamado *Victure driver*.

Ambos *drivers* se presentan al usuario en forma de paquetes de ROS, que el usuario puede incluir en la infraestructura software en función de sus necesidades.

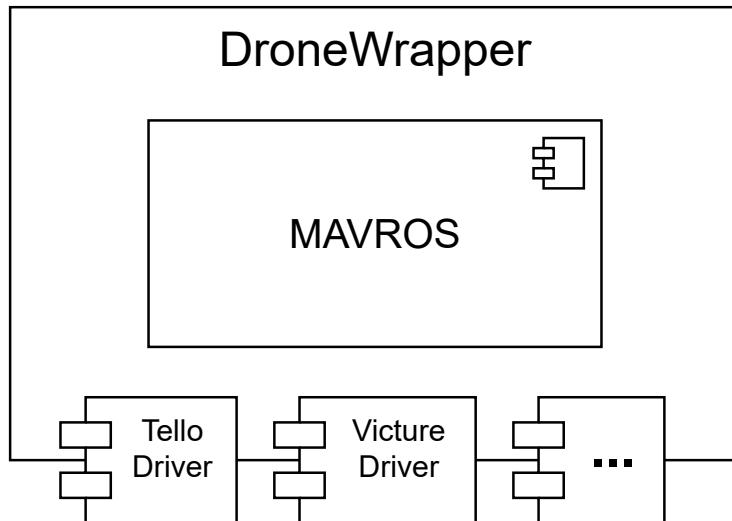


Fig. 4.4. Estructura modular de *DroneWrapper*.

Antes de continuar con los detalles de implementación de los distintos paquetes es necesario discutir ciertos aspectos del diseño para una mejor comprensión del mismo.

En primer lugar, se ha apostado por diseñar un paquete principal horizontal que congregue todos los aspectos comunes de la infraestructura. Sobre este recae una arquitectura modular (ver Fig. 4.4), donde los distintos “módulos” (*drivers* según se han introducido anteriormente) se pueden incluir según las necesidades de la aeronave o del usuario.

El diseño pretende reflejar a *DroneWrapper* como una especie de driver genérico para multicópteros, independiente de los drivers concretos de bajo nivel de cada aeronave. Para aeronaves con controladores de vuelo PX4 y ArduPilot se utiliza MavLink y MAVROS directamente como elementos de comunicación. Asimismo, *DroneWrapper* abstracta la funcionalidad fundamental como el control en velocidad, control en posición, así como los datos de los sensores habituales a bordo de las aeronaves.

El nombre elegido para el paquete (*DroneWrapper*) hace referencia a la utilidad del mismo, “envoltorio para drones”. Envoltorio pues envuelve a la aeronave y permite desarrollar sobre él aplicaciones de más alto nivel de abstracción obviando detalles cercanos al hardware.

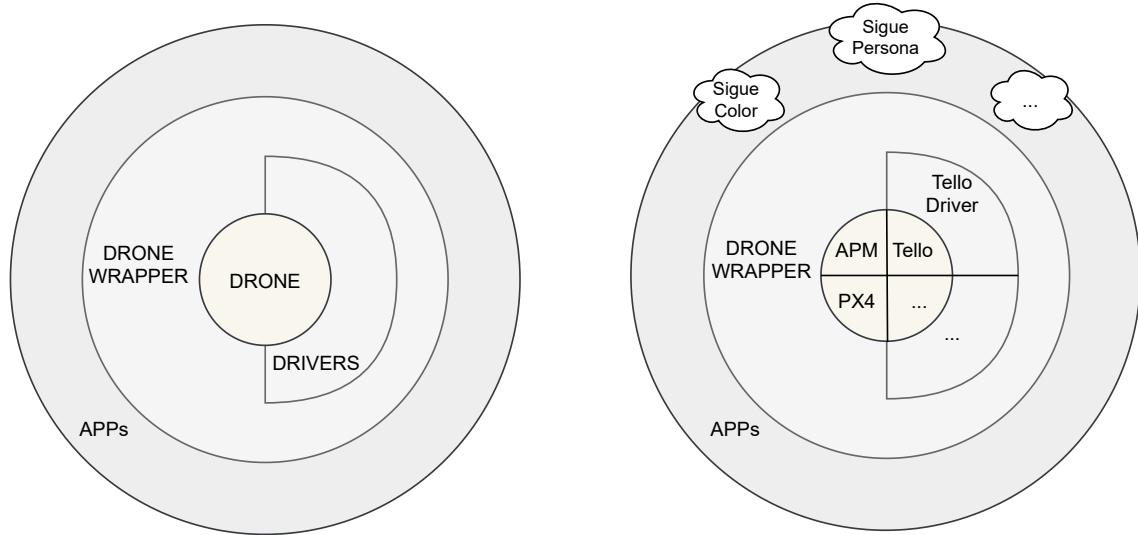


Fig. 4.5. Estructura de “envoltorio”.

En las próximas secciones se analizarán los diferentes paquetes presentados, *DroneWrapper*, *Tello Driver* y *Victure Driver*. Sobre ellos se explicará la estructura del paquete y su funcionamiento interno.

4.2. Drone Wrapper

DroneWrapper está organizado de forma similar a un paquete ROS tipo. El código se divide en diferentes carpetas en función de su utilidad. El directorio principal con el código fuente es *src*. Otros carpetas contienen archivos de lanzamiento de ROS (*launch*) o código de prueba (*test*), entre otros. Los archivos *launch* solo tienen uso con la aeronave simulada pues permiten lanzar la simulación de PX4 junto a MAVROS en Gazebo.

DroneWrapper se enmarca dentro de un meta-paquete junto a otros paquetes, como por ejemplo *Tello Driver*. El meta-paquete congrega los útiles para drones de JdeRobot.

El código se encuentra disponible en abierto en el repositorio *drones/drone_wrapper*³ de JdeRobot. En este momento, el paquete dispone de aproximadamente 1000 líneas de código entre los diferentes archivos, de las cuales casi 700 son de código fuente.

DroneWrapper, al igual que todo paquete de *ROS*, utiliza una serie de herramientas para mantener la comunicación. Estas herramientas son los nodos, *topics*, servicios y parámetros. Los nodos son procesos, los *topics* canales de comunicación entre dos nodos, los servicios son métodos de comunicación por petición y los parámetros sirve para almacenar y manipular datos.

El esquema en ejecución de *DroneWrapper* se muestra en la Figura 4.6. El grafo muestra los *topics* o canales de intercambio de mensajes. A ambos lados se sitúan los diferentes nodos. Por un lado, MAVROS (/mavros en la figura), quien realiza la comunicación con la aeronave, y por otro lado, *DroneWrapper* (/drone), accesible al usuario. El nodo de MAVROS es el estándar del paquete, que se ejecuta tal como indica su documentación.

Tabla 4.1. *Topics* presentes en *DroneWrapper*

topic		Tipo de mensaje
Public.	/mavros/state	mavros_msgs/State()
	/mavros/extended_state	mavros_msgs/ExtendedState()
	/mavros/local_position/pose	geometry_msgs/PoseStamped()
	/mavros/local_position/velocity_body	geometry_msgs/TwistStamped()
	/mavros/global_position/global	sensor_msgs/NavSatFix()
	/mavros/battery	sensor_msgs/BatteryState()
	/iris/cam_frontal/image_raw	sensor_msgs/Image()
	/iris/cam_ventral/image_raw	sensor_msgs/Image()
Subscr.	/mavros/setpoint_raw/local	mavros_msgs/PositionTarget()

Fuente: ROS Wiki

Sobre los *topics* distinguimos dos grupos, los publicadores de mensajes y los receptores o subscriptores de mensajes. Nótese que cada *topic* es publicador o subscriptor en función del nodo en cuestión en el que se fije la atención. La clasificación se realiza sobre el nodo de *DroneWrapper* pues el paquete que se pretende explicar en esta sección.

Entre los publicadores de mensajes (y sobre los que se subscribe la aplicación) se encuentran 8 *topics*, los cuales envían información de estado de la aeronave, como la posición o datos de la batería, junto a las imágenes de las cámaras (en este caso de los *plugins* al encontrarnos con una aeronave simulada).

Por otro lado, solo existe un subscriptor (al que la aplicación le envía mensajes), el cual se encarga de enviar comandos y órdenes de actuación a la aeronave. En la Tabla 4.1 se muestran los *topics* utilizados junto al tipo de mensaje usado.

³https://github.com/JdeRobot/drones/tree/melodic-devel/drone_wrapper

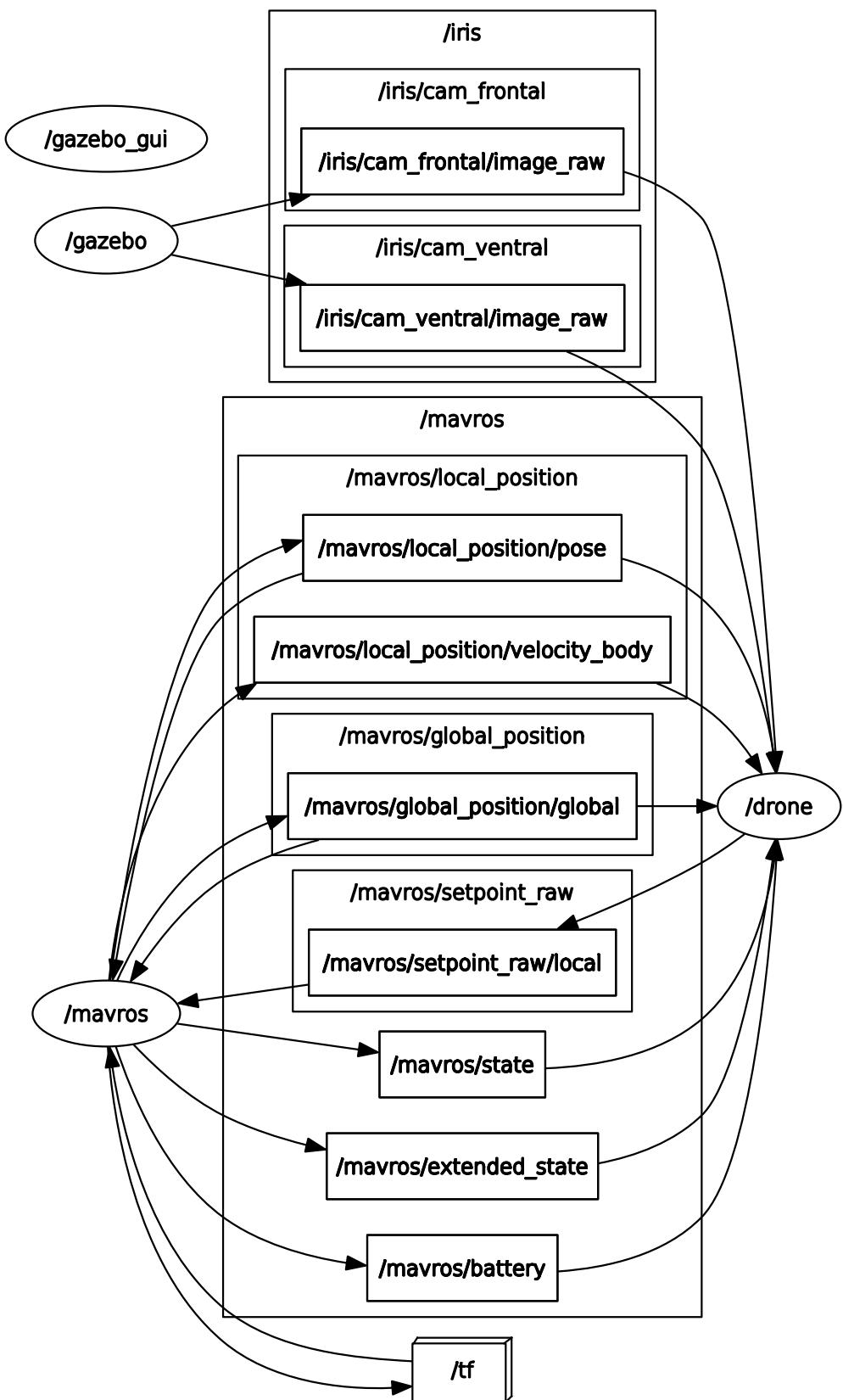


Fig. 4.6. Grafo de nodos y *topics* de *DroneWrapper*.

El control sobre la aeronave se realiza a través del *topic* /mavros/setpoint_raw/local. Para entender correctamente su funcionamiento, es necesario analizar el tipo de mensaje mavros_msgs/PositionTarget(). El Código 4.1 muestra la definición del mensaje. Es importante destacar que para los autopilotos puedan responder correctamente a dichos mensajes es necesario que se encuentren en un modo de vuelo concreto. En el caso de PX4, este modo de vuelo es OFFBOARD.

```

1 std_msgs/Header header
2
3 uint8 coordinate_frame
4 uint8 FRAME_LOCAL_NED = 1
5 uint8 FRAME_LOCAL_OFFSET_NED = 7
6 uint8 FRAME_BODY_NED = 8
7 uint8 FRAME_BODY_OFFSET_NED = 9
8
9 uint16 type_mask
10 uint16 IGNORE_PX = 1 # Position ignore flags
11 uint16 IGNORE_PY = 2
12 uint16 IGNORE_PZ = 4
13 uint16 IGNORE_VX = 8 # Velocity vector ignore flags
14 uint16 IGNORE_VY = 16
15 uint16 IGNORE_VZ = 32
16 uint16 IGNORE_AFX = 64 # Acceleration/Force vector ignore flags
17 uint16 IGNORE_AFY = 128
18 uint16 IGNORE_AFZ = 256
19 uint16 FORCE = 512 # Force in af vector flag
20 uint16 IGNORE_YAW = 1024
21 uint16 IGNORE_YAW_RATE = 2048
22
23 geometry_msgs/Point position
24 geometry_msgs/Vector3 velocity
25 geometry_msgs/Vector3 acceleration_or_force
26 float32 yaw
27 float32 yaw_rate

```

Cód. 4.1. Definición del mensaje mavros_msgs/PositionTarget()

El mensaje PositionTarget() permite el uso de diferentes marcos de coordenadas (coordinate_frame). La aplicación utiliza siempre el mismo eje, FRAME_BODY_NED (8), que pese al nombre se comporta como un eje local, fijo al punto de despegue, y con orientación Norte-Este-Abajo (NED, *North-East-Down*).

Este mensaje permite también diferentes tipos de control, en posición, en velocidad, en aceleración, en fuerza y con controles mixtos, a través de los últimos campos del mensaje. Dichos controles se seleccionan en función de la máscara type_mask activa. Nótese que no todas las máscaras son válidas. *DroneWrapper* soporta tres tipos de control, en posición, en velocidad y mixto basado en un control en velocidad con altura de vuelo fija. Las máscaras utilizadas se ilustran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Máscaras de control utilizadas por *DroneWrapper*

Control	Máscara	Campos activos
Posición	3064	x y z yaw
Velocidad	1991	vx vy vz yaw_rate
Mixto	1987	vx vy vz z yaw_rate

Fuente: Elaboración propia

Además de *topics*, la aplicación hace uso de servicios y parámetros. Los servicios son utilizados para lanzar solicitudes a la aeronave de diversa índole. Estas solicitudes se encargan del armado de la aeronave, del aterrizaje, del cambio de modo y de la manipulación de los parámetros. La Tabla 4.3 recoge los servicios utilizados por *DroneWrapper*.

Tabla 4.3. Servicios presentes en *DroneWrapper*

Servicio	Tipo de servicio
/mavros/cmd/arming	mavros_msgs/CommandBool()
/mavros/cmd/land	mavros_msgs/CommandTOL()
/mavros/set_mode	mavros_msgs/SetMode()
/mavros/param/set	mavros_msgs/ParamSet()
/mavros/param/get	mavros_msgs/ParamGet()

Fuente: ROS Wiki

Finalmente, los parámetros utilizados por la aplicación son solamente uno, aunque MAVROS utiliza múltiples internamente para poder realizar sus tareas. El parámetro usado por *DroneWrapper* es *drone_model*. Como su nombre indica sirve para representar el modelo de la aeronave, muy útil para manejar sensores y otros elementos que difieren entre aeronaves. En simulación, por ejemplo, el valor del parámetro es *iris*, correspondiente al modelo de la aeronave simulada.

Hasta ahora se ha presentado el funcionamiento interno y más próximo a la aeronave de la infraestructura. A continuación, se explicará el otro extremo, más cercano al usuario. Ya se ha adelantado que *DroneWrapper* se presenta al usuario como un paquete importable en Python y con una serie de métodos (API) que permiten operar con la aeronave.

```

1 #!/usr/bin/env python
2 from drone_wrapper import DroneWrapper
3 from time import sleep
4
5 drone = DroneWrapper()
6 drone.takeoff(h=2.5)
7 drone.set_cmd_vel(az=1) # spin
8 sleep(5) # wait a couple of seconds
9 drone.land()
```

Cód. 4.2. Caso de uso simple de *DroneWrapper*

Un caso de uso sencillo se presenta en el Código 4.2. En él, se crea, en primer lugar, un objeto que representa al dron y que da acceso a todas las funcionalidades presentes en el paquete. A continuación, se le ordena despegar y tras ello, el dron da vueltas sobre sí mismo durante varios segundos. Finalmente el dron aterriza en la posición actual. Cabe destacar que el esquema de nodos presentado anteriormente (Fig. 4.6) se ha obtenido con la aeronave simulada y el código ahora mostrado.

Finalmente, la API presente en *DroneWrapper* se muestra en la Tabla 4.4. En ella se recogen los métodos que permiten obtener información sobre los sensores y estado de la aeronave, los métodos para controlar a la aeronave y los métodos para obtener las imágenes de las cámaras de la aeronave.

Tabla 4.4. *DroneWrapper* API

	API	Descripción
Sensores y estado	<code>[x, y, z] = get_position()</code>	Devuelve la posición de la aeronave (m)
	<code>[vx, vy, vz] = get_velocity()</code>	Devuelve la velocidad de la aeronave (m/s)
	<code>rate = get_yaw_rate()</code>	Devuelve la velocidad de guiñada de la aeronave (rad/s)
	<code>[r, p, y] = get_orientation()</code>	Devuelve la orientación de la aeronave (rad)
	<code>r = get_roll()</code>	Devuelve el ángulo de alabeo de la aeronave (rad)
	<code>p = get_pitch()</code>	Devuelve el ángulo de cabeceo de la aeronave (rad)
	<code>y = get_yaw()</code>	Devuelve el ángulo de guiñada de la aeronave (rad)
	<code>s = get_landed_state()</code>	Devuelve si la aeronave está en tierra (1), volando (2) o aterrizando (4)
Control	<code>takeoff(h)</code>	Despegue a altura h (m)
	<code>land()</code>	Aterrizaje en posición actual
	<code>set_cmd_pos(x, y, z, yaw)</code>	Control en posición x, y, z (m) y guiñada (rad)
	<code>set_cmd_vel(vx, vy, vz, vyaw)</code>	Control en velocidad vx, vy, vz (m/s) y guiñada (rad/s)
	<code>set_cmd_mix(vx, vy, z, vyaw)</code>	Control mixto vx, vy (m/s), z (m) y guiñada (rad/s)
Cámaras	<code>img = get_frontal_image()</code>	Devuelve la imagen de la cámara frontal
	<code>img = get_ventral_image()</code>	Devuelve la imagen de la cámara ventral

Fuente: Elaboración propia

4.3. Tello Driver

Al igual que el paquete anterior, *Tello Driver* es un paquete ROS y está organizado de tal forma. En su directorio raíz se encuentran diferentes carpetas que reúnen el código en función de su propósito. En el directorio *src* está el código fuente, en el directorio *launch* se hallan archivos de lanzamiento, en el directorio *test* hay diferentes códigos de prueba y en el directorio *scripts* se encuentran varios ejecutables que permiten realizar acciones como aterrizar, despegar o una desconexión rápida de emergencia.

Al igual que *DroneWrapper*, el paquete *Tello Driver* pertenece al meta-paquete de drones de JdeRobot.

El código se encuentra disponible en abierto en el repositorio *drones/tello_driver*⁴ de JdeRobot. En este momento, el paquete dispone de más 900 líneas de código entre los diferentes archivos, de las cuales casi 600 son de código fuente.

Tello Driver posee dos principales tareas, comunicarse con *DroneWrapper* y con la aeronave Tello. Para mostrar de forma clara su implementación, ambas partes se presentarán por separado, aunque no tengan sentido una parte en ausencia de la otra.

En la sección de diseño se ha adelantado el uso del Tello SDK para la comunicación con la aeronave física. Siguiendo las indicaciones para su uso, el *driver* hace uso de una serie de *sockets* e hilos para realizar la comunicación. La arquitectura de la comunicación se muestra en la Figura 4.7.

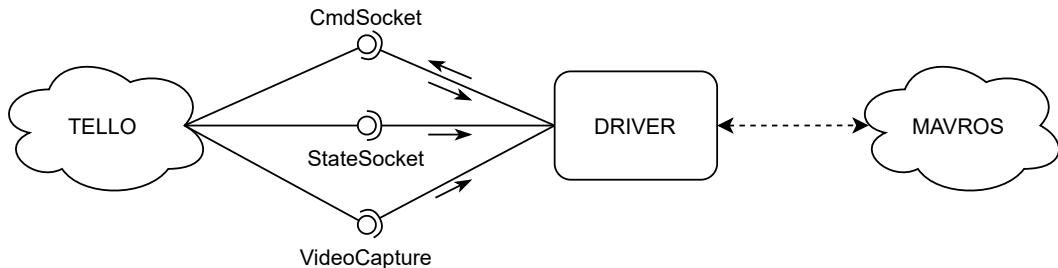


Fig. 4.7. Esquema de comunicaciones de *Tello Driver*.

El *driver* posee tres *sockets*. El primero de ellos, *CmdSocket* usado para el envío de comandos y para recibir la respuesta de los comandos. Es el único de los tres *sockets* bidireccional. El segundo de los *sockets*, *StateSocket*, es utilizado para recibir la información de estado de la aeronave. Finalmente, el *socket* *VideoCapture* se encarga de recibir las imágenes enviadas desde el Tello.

Toda la información recibida se maneja desde tres distintos manejadores de mensajes (*handlers*), en hilos secundarios, que se encargan de escuchar por los tres respectivos *sockets* la información recibida. En cambio, los comandos enviados a la aeronave se atienden a través del hilo principal del *driver*. Los detalles de la arquitectura de la comunicación se resumen en la Tabla 4.5.

⁴https://github.com/JdeRobot/drones/tree/melodic-devel/tello_driver

Tabla 4.5. Máscaras de control utilizadas por *Tello Driver*

Socket	Dirección	Hilo	Uso
<i>CmdSocket</i>	192.168.10.1:8889	Hilo ppal.	Envío de comandos
	0.0.0.0:9000	Response handler	Respuesta de comandos
<i>StateSocket</i>	0.0.0.0:8890	State handler	Recepción datos de estado
<i>VideoCapture</i>	0.0.0.0:11111	Video handler	Recepción de vídeo

Fuente: Tello SDK. Elaboración propia

El *driver* tiene por otro lado la comunicación con MAVROS (ver Fig. 4.7). De forma similar a *DroneWrapper*, la comunicación se realiza a través de ocho *topics*, siete publicadores y un subscriptor, y seis servicios. La comunicación es casi idéntica a la presentada con *DroneWrapper*, pues se trata de imitar el comportamiento estándar de MAVROS para que la aplicación no note diferencia entre distintos drones. Como únicas diferencias se encuentran un nuevo servicio para despegar, aunque en la práctica no se utiliza con *DroneWrapper* (sí con algún ejecutable del paquete), y la ausencia de uno de los dos publicadores de imágenes, pues el Tello solo posee una cámara. La Tabla 4.6 recoge de forma resumida la arquitectura de *ROS* utilizada. Asimismo, la Figura 4.8 ilustra el grafo de nodos y *topics* utilizado.

Tabla 4.6. Arquitectura ROS de *Tello Driver*

topic		Tipo de mensaje
Public.	/mavros/state	mavros_msgs/State()
	/mavros/extended_state	mavros_msgs/ExtendedState()
	/mavros/local_position/pose	geometry_msgs/PoseStamped()
	/mavros/local_position/velocity_body	geometry_msgs/TwistStamped()
	/mavros/global_position/global	sensor_msgs/NavSatFix()
	/mavros/battery	sensor_msgs/BatteryState()
	/tello/cam_frontal/image_raw	sensor_msgs/Image()
Subscr.	/mavros/setpoint_raw/local	mavros_msgs/PositionTarget()

Servicio	Tipo de servicio
/mavros/cmd/arming	mavros_msgs/CommandBool()
/mavros/cmd/takeoff	mavros_msgs/CommandTOL()
/mavros/cmd/land	mavros_msgs/CommandTOL()
/mavros/set_mode	mavros_msgs/SetMode()
/mavros/param/set	mavros_msgs/ParamSet()
/mavros/param/get	mavros_msgs/ParamGet()

Fuente: ROS Wiki

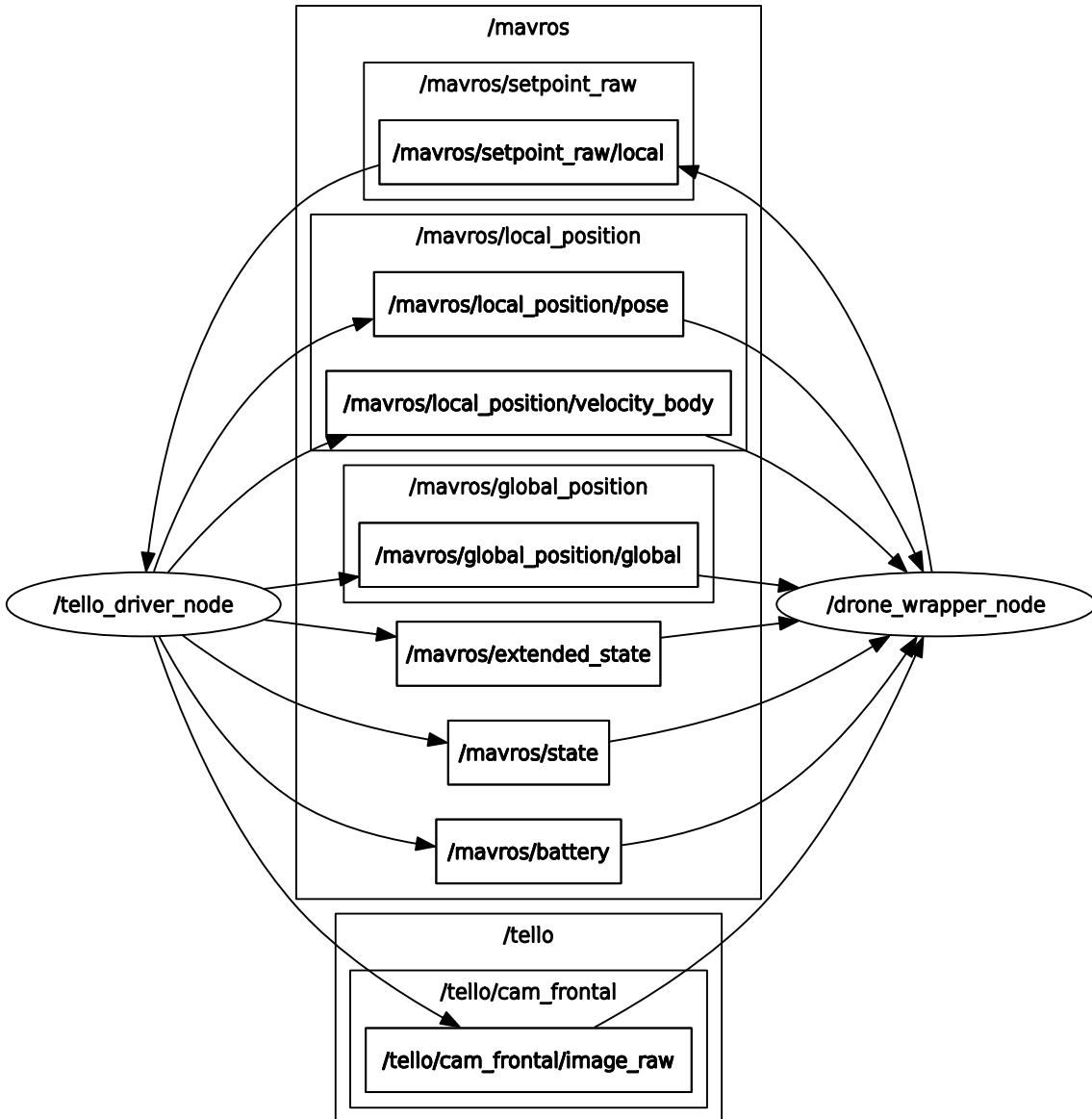


Fig. 4.8. Grafo de nodos y *topics* de *Tello Driver*.

Tras explicar ambos extremos del *driver*, falta por explicar la parte intermedia que convierte los mensajes y servicios de ROS en un lenguaje de mensajes entendidos por el Tello SDK y viceversa. El envío de comandos de actuación se realiza enviando una cadena de texto a través del *socket* previamente mostrado. En función del contenido de la cadena de texto, la aeronave interpreta una orden u otra. Son muchas las órdenes aceptadas en el Tello SDK, la Tabla 4.7 solamente recoge las utilizadas por el *driver*.

El *driver* se encarga de traducir los comandos recibidos por el *topic* subscriptor y a través de los servicios en los distintos mensajes de la tabla, para que la aeronave realice la tarea ordenada. La respuesta al comando se obtiene por uno de los *handlers* y se notifica a través de MAVROS.

Tabla 4.7. Comandos usados por *Tello Driver*

Comando	Descripción	Possible respuesta
command	Entrada al modo SDK	ok / error
streamon	Habilitar transmisión de vídeo	ok / error
streamoff	Deshabilitar transmisión de vídeo	ok / error
emergency	Parada de motores de emergencia	ok / error
takeoff	Despegue	ok / error
land	Aterrizaje	ok / error
forward x	Avanza x cm	ok / error
back x	Retrocede x cm	ok / error
left x	Izquierda x cm	ok / error
right x	Derecha x cm	ok / error
up x	Suba x cm	ok / error
down x	Baje x cm	ok / error
cw x	Rota x grados (horario)	ok / error
ccw x	Rota x grados (anti-horario)	ok / error
rc a b c d	Control remoto (cm/s) a derecha/izquierda (-100,100) b adelante/atrás (-100,100) c arriba/abajo (-100,100) d guiñada (-100,100)	ok / error
battery?	Obtén la batería restante	x (0-100)

Fuente: Tello SDK

Por otro lado, el estado de la aeronave se recibe a través del *StateSocket* en una cadena de texto con aspecto: dato:valor;dato2:valor2;....;\r\n. El conjunto de datos enviados por el Tello se muestra en la Tabla 4.8 por orden de aparición en la cadena de texto. Dichos valores se procesan en el *driver*, se encapsulan en los diferentes mensajes de ROS y se envían a través de los distintos *topics*.

Tabla 4.8. Información recibida por *Tello Driver*

Información	Descripción
pitch	Ángulo de cabeceo (grados)
roll	Ángulo de alabeo (grados)
yaw	Ángulo de guiñada (grados)
vgx	Velocidad en eje x (cm/s)
vgy	Velocidad en eje y (cm/s)
vgz	Velocidad en eje z (cm/s)
templ	Temperatura mínima (C°)
temph	Temperatura máxima (C°)
tof	Distancia recorrida desde despegue (cm)
h	Altura (cm)
bat	Nivel de batería (%)
baro	Medición barométrica (cm)
time	Tiempo de vuelo (s)
agx	Aceleración en eje x (cm/s ²)
agy	Aceleración en eje y (cm/s ²)
agz	Aceleración en eje z (cm/s ²)

Fuente: Tello SDK

Finalmente, a través del *VideoCapture* se reciben los distintos fotogramas que se retransmiten a través del *topic* preparado para ello.

4.4. Victure Driver

El *driver* para la cámara integrado en la infraestructura, *Victure driver*, posee al igual que los dos paquetes anteriores una estructura de paquete de ROS. Sobre el directorio principal se encuentra una carpeta con el código fuente (*src*), una carpeta con código para probar el *driver* (*test*) y una carpeta con ficheros de lanzamiento (*launch*).

El código se encuentra disponible en el repositorio *RoboticsLabURJC/2021-tfm-pedro-arias*⁵ de forma pública. En este momento, el paquete dispone de aproximadamente 300 líneas de código entre los diferentes archivos.

La estructura ROS es muy simple. El *driver* se compone de un nodo (*victure_cam*) que lee imágenes de la cámara y las envía a través de un *topic* (*victure_cam/image_raw*). El código del *driver* se muestra en el Código 4.3.

⁵https://github.com/RoboticsLabURJC/2021-tfm-pedro-arias/tree/main/victure_driver

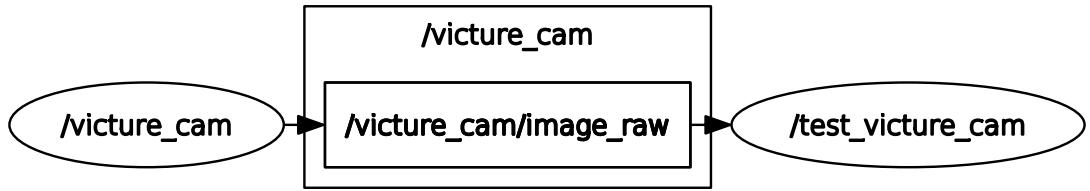


Fig. 4.9. Grafo de nodos y *topics* de *Victure Driver*.

```

1  #!/usr/bin/env python
2  import rospy
3  from cv_bridge import CvBridge
4  from sensor_msgs.msg import Image
5  import cv2
6
7  rospy.init_node("victure_cam")
8  img_pub = rospy.Publisher("victure_cam/image_raw", Image)
9  bridge = CvBridge()
10
11 cap = cv2.VideoCapture("/dev/video0")
12 while(True):
13     ret, frame = cap.read()
14     if ret:
15         img_pub.publish(bridge.cv2_to_imgmsg(frame))
16
17 cap.release() # When everything done, release the capture

```

Cód. 4.3. *Victure Driver*

Finalmente, el grafo de nodos del *driver* se muestra en la Figura 4.9. La figura recoge el nodo principal junto a un nodo de prueba (*test*), que se encarga de leer sobre el *topic* y mostrar por pantalla la imagen recibida (ver Figura 4.10).

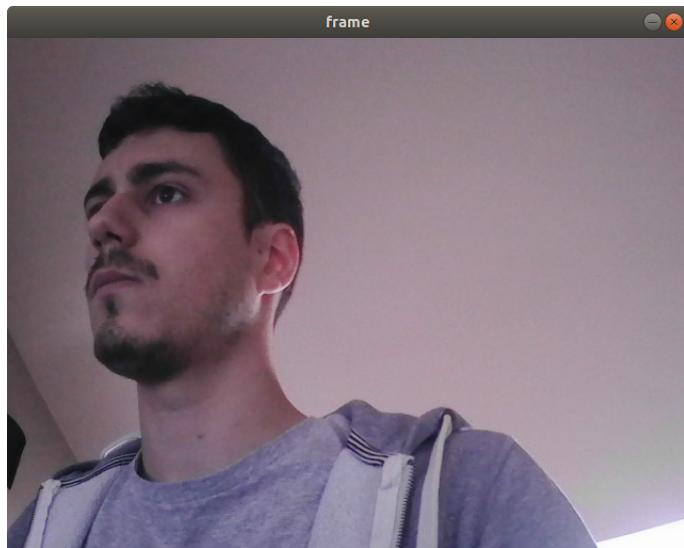


Fig. 4.10. Imagen obtenida por el *Victure driver*.

5. APLICACIONES CON ROBOTS AÉREOS

Este capítulo recoge las dos aplicaciones desarrolladas sobre la infraestructura presentada. El objetivo principal de las mismas es ilustrar el uso de la infraestructura, incluyendo el manejo de visión con Aprendizaje profundo y el control en velocidad que permite validar su correcto funcionamiento. En diferentes secciones, se muestran los dos experimentos desarrollados, *sigue-color* y *sigue-persona*. Sobre ambos se explican los diseños ideados, su implementación y los resultados obtenidos con las diferentes plataformas.

5.1. Aplicación Sigue Color

La aplicación *sigue-color* consiste en el seguimiento por parte de la aeronave de un elemento de un color llamativo. La aplicación se ha probado sobre dos aeronaves, el dron simulado y el Tello real. Las balizas cromáticas, o elementos a seguir, utilizadas para cada uno de los experimentos se muestran en la Figura 5.1. Sobre la baliza simulada se han desarrollado varios *plugins* de Gazebo para darle movimiento al modelo, bien sea con una trayectoria predeterminada o teleoperando desde teclado al objeto.

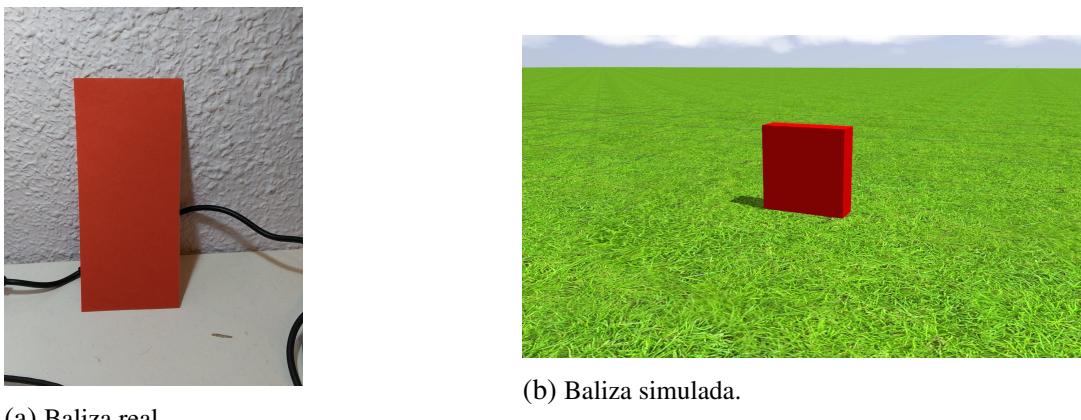


Fig. 5.1. Balizas utilizadas en *sigue-color*.

La infraestructura permite compartir el mismo código fuente para ambas aeronaves, la real y la simulada. Sin embargo, las características de las aeronaves son muy diferentes. Utilizar la misma lógica para ambos drones es posible gracias a que la aplicación utiliza archivos de configuración donde se guardan ciertos parámetros intrínsecos a la aeronave. La Figura 5.2 muestra la estructura de la aplicación.

Estos ficheros de configuración guardan datos que permiten ajustar el código genérico a una aeronave concreta. Durante el lanzamiento de los procesos, los datos se cargan como parámetros de ROS, donde *DroneWrapper* y *sigue-color* pueden acceder fácilmente. En las sucesivas secciones se explicarán con más detalle los parámetros que contienen los archivos de configuración.

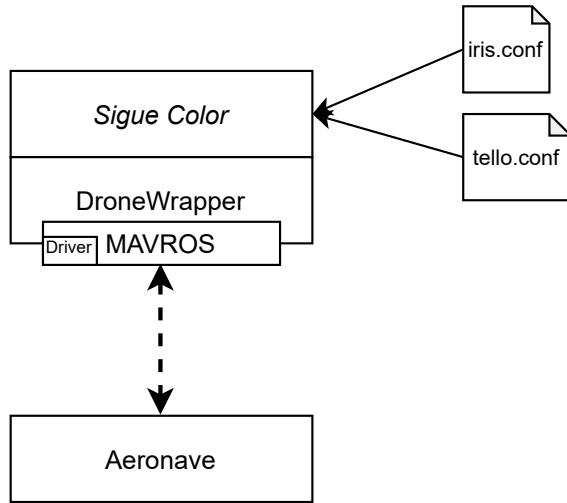


Fig. 5.2. Estructura de *sigue-color*.

Diseño

El diseño de la aplicación del robot aéreo consiste en dos partes, la percepción y el control. La percepción se encarga de detectar visualmente el objeto a seguir, mientras que el control envía los comandos de movimiento a la aeronave para lograr seguir al objeto. La Figura 5.3 representa dicho diseño en un esquema de bloques.

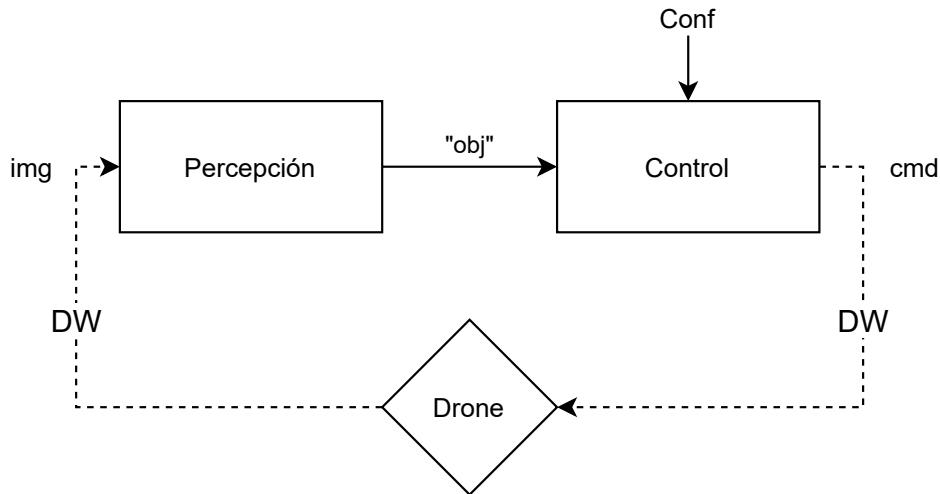


Fig. 5.3. Bloques presentes en *sigue-color*.

El comportamiento de la aeronave se describe en el Código 5.1. Tras el despegue, se inicia un bucle iterativo infinito donde se realizan las tareas de percepción y control. La percepción consiste en un filtrado por color de la imagen obtenida por la cámara del dron. Cuando se detecta algo en la percepción entra en acción el control. El control consta de tres controladores PID que calculan las velocidades comandadas a la aeronave. Si el filtrado de percepción no obtiene ninguna salida, la aeronave realiza un algoritmo de búsqueda hasta que encuentre un nuevo objeto al cual seguir. Este algoritmo de búsqueda consiste en dar vueltas sobre si mismo a una velocidad constante.

```

1 despegue
2 while:
3     obten imagen
4     filtro color
5     if 'color':
6         nuevo error
7         actualiza PIDs
8         cmd velocidad
9 land

```

Cód. 5.1. Pseudo-código de *sigue-color*

Percepción

La percepción es un filtrado por color de la imagen mediante técnicas clásicas. El filtrado se realiza gracias a la biblioteca de visión por ordenador OpenCV. A lo largo de la explicación, se harán referencia a diferentes métodos de la biblioteca que se utilizan en la aplicación.

El filtrado se realiza, en general, en el espectro HSV (*Hue-Saturation-Value*, o Tono-Saturación-Brillo) en vez de en el espacio RGB (*Red-Green-Blue*, o Rojo-Verde-Azul). Esto es debido a que el espacio HSV representa en un solo valor el tono del color (*Hue* o Tono), mientras que el espacio RGB necesita tres campos para representar el tono y es mucho más frágil frente a cambios de iluminación en la escena, lo que dificulta el diseño del filtro.

El diseño del filtrado por color se compone de cuatro etapas:

1. **Desenfoque gaussiano.** Desenfoque sobre imagen a color (RGB) para eliminar píxeles espúreos mediante `cv2.GaussianBlur()` y transformación a espacio HSV.
2. **Máscara HSV.** Máscara sobre espacio HSV mediante `cv2.inRange()`, combinación bit a bit de imagen y máscara (`cv2.bitwise_and()`) y conversión a imagen en escala de grises.
3. **Umbralización.** Umbral de nivel fijo, y con valor 150, sobre imagen en escala de grises `cv2.threshold()`.
4. **Segmentación.** Agrupación por contornos sobre imagen en blanco y negro para la detección de objetos (`cv2.findContours()`).

La máscara aplicada es, por la naturaleza del espacio HSV, una combinación de dos máscaras. Dicha combinación, es la suma de ambas máscaras: `mask = mask1 + mask2`. Esto ocurre debido a la discontinuidad angular en el tono, ya que valores de tono $H = 1$ o $H = 359$ son valores cromáticamente similares aunque numéricamente sean muy distintos. La Tabla 5.1 refleja los valores seleccionados para la máscara.

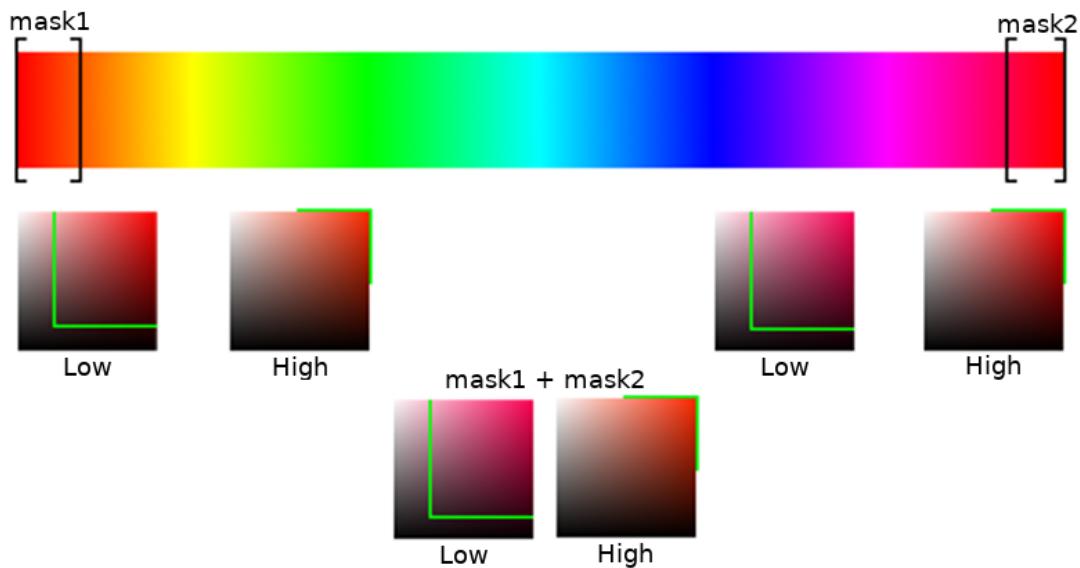


Fig. 5.4. Máscara del filtro de color.

Tabla 5.1. Máscaras HSV.

Máscara	Mínimo			Máximo		
	H	S	V	H	S	V
mask1	0	70	50	10	255	255
mask2	340	70	50	359	255	255

Fuente: Elaboración propia

Dicho valores pueden resultar algo confusos con su representación numérica. Para facilitar su comprensión, se ilustra en la Figura 5.4 una representación gráfica de las máscaras usadas.

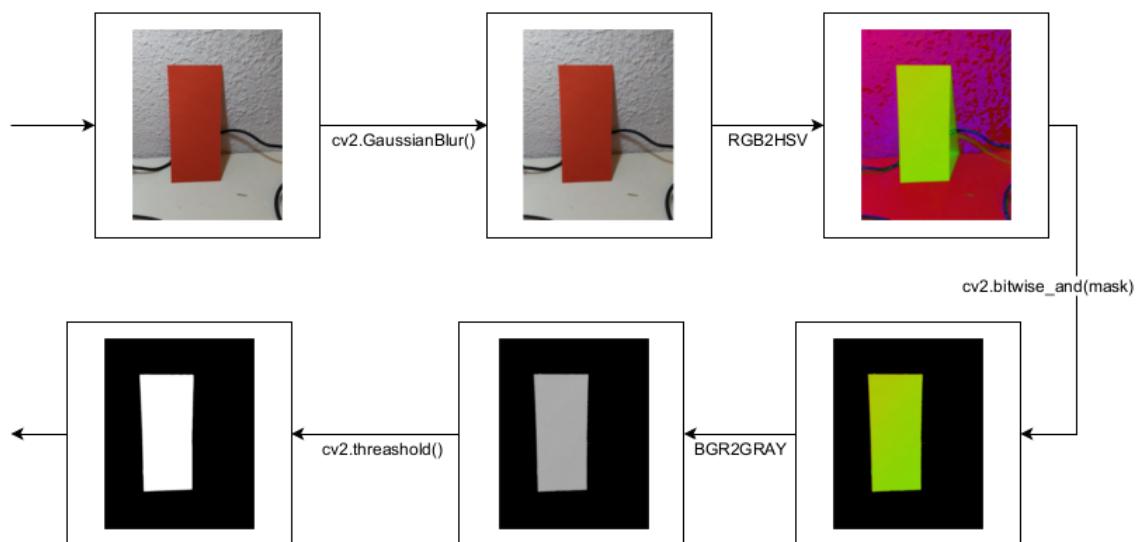


Fig. 5.5. Esquema de la percepción.

El proceso seguido durante el bloque de percepción se muestra en la Figura 5.5. Como se puede observar en la figura, el filtrado da por resultado una imagen binaria (en blanco y negro). Sobre esta imagen, los píxeles detectados (en blanco) se agrupan por contornos en objetos `cv2.findContours()`. En caso de detectar varios objetos, el objeto a seguir es aquel con el área más grande. Así pues, la Figura 5.6 muestra la salida según una entrada concreta.

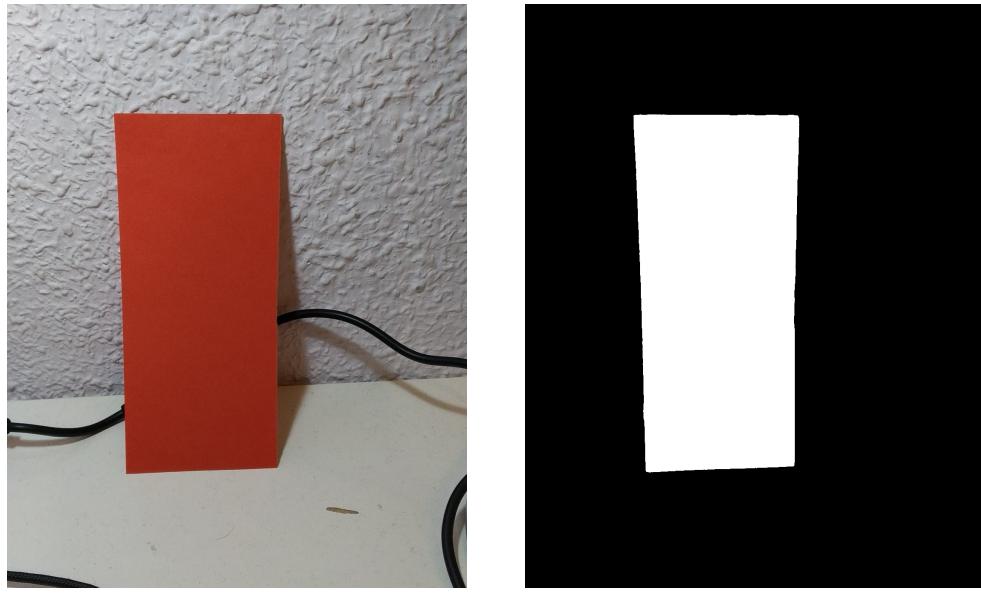


Fig. 5.6. Entrada y salida del filtrado.

Control

El bloque de control se ejecuta siempre con una entrada única, el objeto a seguir. Sobre este objeto se extraen propiedades como la posición sobre la imagen o el radio del mínimo círculo envolvente al contorno. Dichos valores se utilizan para calcular los errores o entradas de los controladores, y cuya salida son las *velocidades* a comandar a la aeronave. La Figura 5.7 representa un esquema del bloque de control.

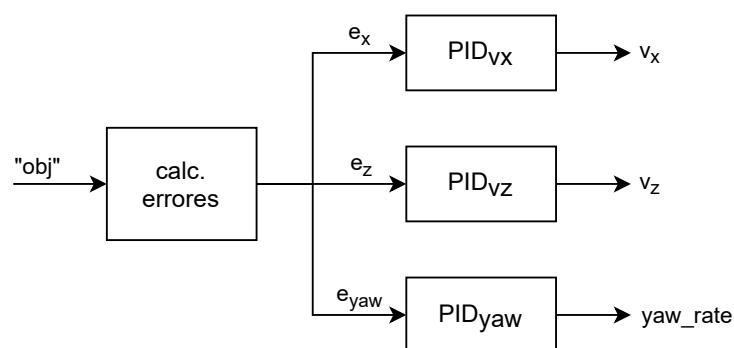


Fig. 5.7. Esquema de control en *sigue-color*.

En concreto son tres los controladores PID usados, uno que controla el avance (v_x), uno que controla la altura (v_z) y uno que controla el ángulo de guiñada (yaw_rate). Las entradas para los controladores se calculan según las siguientes fórmulas:

$$e_x = \frac{radio - target_radio}{target_radio} \quad (5.1)$$

$$e_z = c_y - obj_y \quad (5.2)$$

$$e_{yaw} = c_x - obj_x \quad (5.3)$$

El control en altura y en guiñada (Ec. 5.2 y Ec. 5.3) se realiza según la posición del centroide del objeto filtrado respecto del centro de la imagen (ver Fig. 5.8). El control en avance (Ec. 5.1) es algo más complejo, pues utiliza la diferencia normalizada del radio del mínimo círculo envolvente al contorno y un radio de referencia ($target_radio = 10$). De tal forma que, cuanto más pequeño sea el objeto en la imagen, más rápidamente avanzará el dron, hasta que el radio observado vuelve a estar cercano al de referencia. Dicho radio de referencia está relacionado con una distancia al objeto de aproximadamente 5 metros.

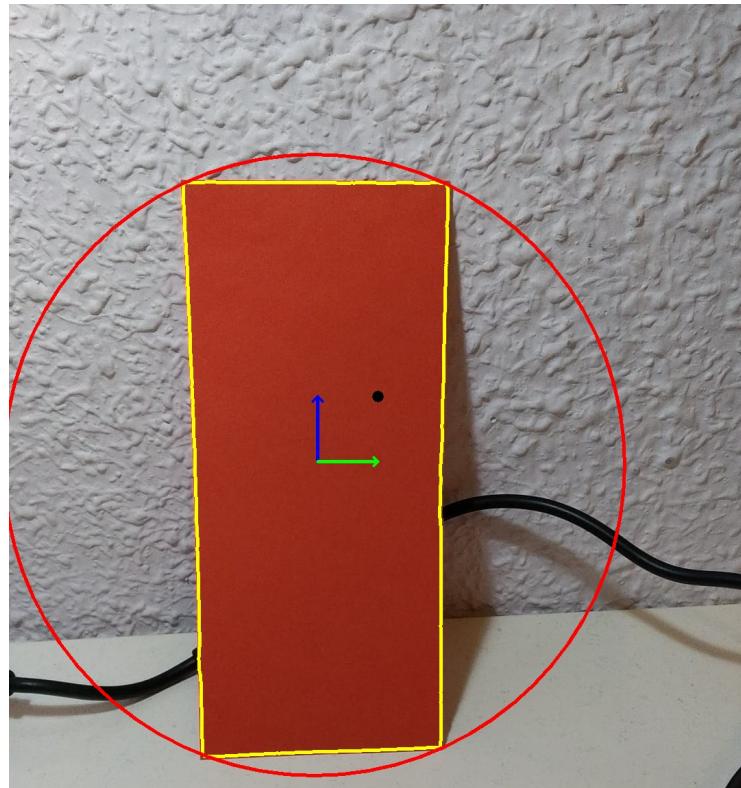


Fig. 5.8. Respuesta del bloque de control en *sigue-color*.

La Figura 5.8 muestra la respuesta dada por el bloque de control a una entrada cualquiera. Las flechas indican la dirección que tomará el dron para corregir el error existente, llevando el centro del objeto detectado hacia el centro de la imagen (punto negro). También se puede observar en la figura el contorno del objeto filtrado junto al círculo mínimo envolvente al contorno.

Los errores obtenidos son la alimentación de los controladores que tratan de reducir a cero estos valores con su respuesta, que son directamente los comandos de velocidad que se envían al dron.

La respuesta del controlador depende de las constantes del mismo (k_P , k_I , k_D). Dado que el control del dron depende de sus características intrínsecas concretas para ese modelo, las constantes de los controladores forman parte de los parámetros de los ficheros de configuración (ver Cód. 5.2).

```

1 drone:
2   model: 'tello'
3
4   vx:
5     kp: 0.02
6     ki: 0.0
7     kd: 0.0002
8
9   yaw_rate:
10    kp: 0.002
11    ki: 0.0
12    kd: 0.0001
13
14   vz:
15     kp: -0.0015
16     ki: 0.0
17     kd: 0.0

```

Cód. 5.2. Fichero de configuración de la aeronave Tello

Las constantes de los controladores se han calculado de forma experimental para ambas aeronaves. El ajuste final de los valores se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Controladores PID y sus constantes.

Controlador	Iris			Tello		
	k_P	k_I	k_D	k_P	k_I	k_D
vx	0.05	0.0	0.001	0.02	0.0	0.0002
vy	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
vz	-0.02	0.0	0.001	-0.0015	0.0	0.0
yaw_rate	-0.005	0.0	0.001	0.002	0.0	0.0001

Fuente: Elaboración propia

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en forma de distintas pruebas o experimentos. En general, se parte de un caso sencillo y se incrementa la dificultad del mismo en los sucesivos casos. Para el *sigue-color*, se ha partido de experimento simple con el objeto a seguir estático y en simulación (ver Figura 5.9).

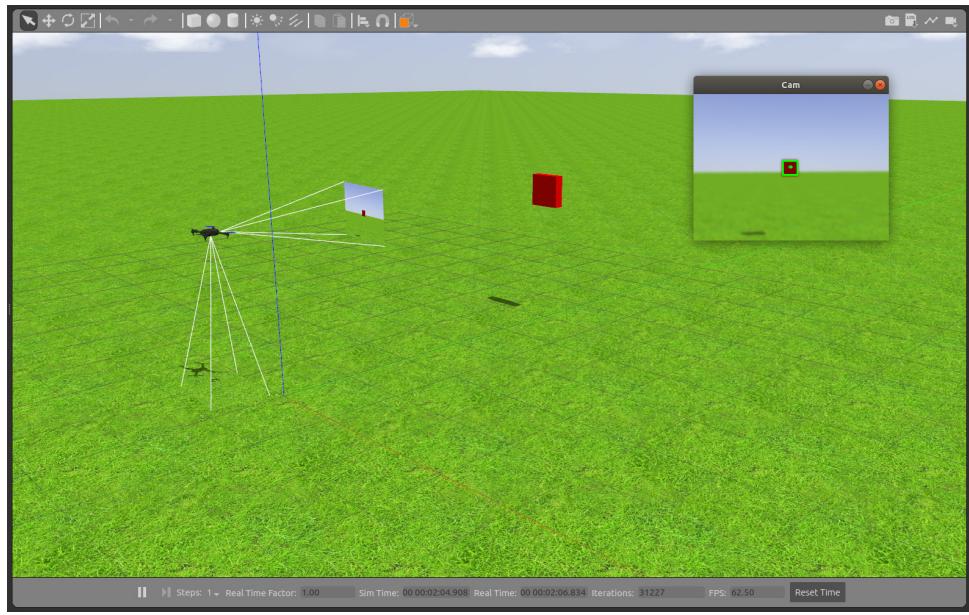


Fig. 5.9. Experimento *sigue-color* con modelo estático.

En segundo lugar, se ha probado la aplicación con un objeto en movimiento, primero moviendo el objeto manualmente a través de la herramienta de teleoperación desarrollada y con movimientos suaves. A continuación, se ha probado con un objeto con movimiento automático y acciones más bruscas y veloces que en el caso anterior.

Tras superar con éxito las pruebas en simulado, la aplicación se ha probado sobre el dron real Tello. De forma similar, los experimentos realizados han ido incrementando en dificultad hasta obtener un caso en movimiento con acciones rápidas y cambios bruscos.

Los diferentes experimentos están disponibles para su visualización en una lista de reproducción⁶ que recoge los vídeos con cada uno de los experimentos (ver Fig. 5.10).

Título	Duración	Author
[Sigue Color] Simulación con teleoperación	1:34	Pedro Arias
[Sigue Color] Simulación con movimiento autónomo	0:56	Pedro Arias
[Sigue Color] Tello I	1:42	Pedro Arias
[Sigue Color] Tello II	0:55	Pedro Arias

Fig. 5.10. Lista de reproducción *sigue-color*.

⁶https://youtube.com/playlist?list=PL2ebURGAzRwusKLBYPJUkfZJ5SHudh6Z_

5.2. Aplicación Sigue Persona

La aplicación *sigue-persona* consiste en seguir a una persona con la aeronave. Existen diversos antecedentes de aplicaciones similares, como la desarrollada por Nacho Condés [75], [76] para robots terrestres. El experimento se ha realizado sobre las tres aeronaves disponibles, el dron simulado, el Tello y el PX4 de construcción propia. Para la simulación se ha utilizado un modelo perteneciente a la base de datos de *Ignition Robotics* [77]. Sobre el modelo se han diseñado varios *plugins* para dar movimiento a la persona. La Figura 5.11 muestra el modelo utilizado.



Fig. 5.11. Modelo de persona en el simulador Gazebo [77].

La aplicación sigue el mismo diseño que el experimento anterior. La infraestructura pensada permite utilizar el mismo código fuente con distintos archivos de configuración. Así pues, el cuerpo de la aplicación es el mismo para las tres aeronaves. La Figura 5.12 muestra la estructura de la aplicación *sigue-persona*.

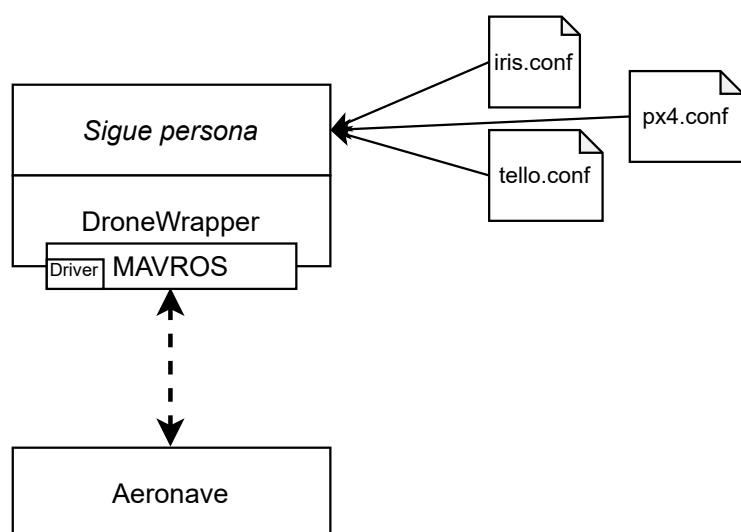


Fig. 5.12. Estructura de *sigue-persona*

Diseño

El diseño es idéntico al ideado para el experimento anterior. La aplicación se compone de dos bloques, la percepción y el control. La percepción se encarga de detectar a la persona a seguir, mientras que el control se encarga de comandar a la aeronave. El esquema de bloques seguido se muestra en la Figura 5.13.

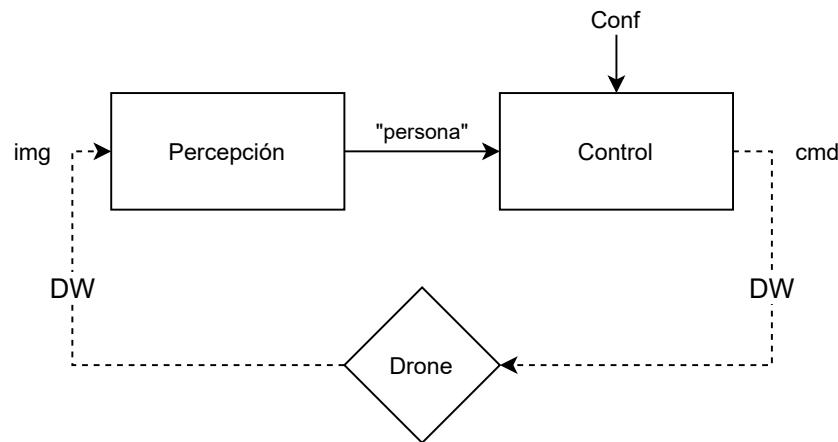


Fig. 5.13. Bloques presentes en *sigue-persona*.

Es importante destacar que la percepción es diferente entre las dos aplicaciones, detectar un objeto de color no conlleva la misma dificultad que detectar una persona, mientras que el control es idéntico entre ambas aplicaciones. Por tanto, el comportamiento de la aeronave (ver Cód. 5.3) no es muy diferente entre aplicaciones.

```
1 despegue
2 while:
3     obtén imagen
4     detecta 'persona'
5     if 'persona':
6         nuevo error
7         actualiza PIDs
8         cmd velocidad
9     else:
10        busca persona
11 land
```

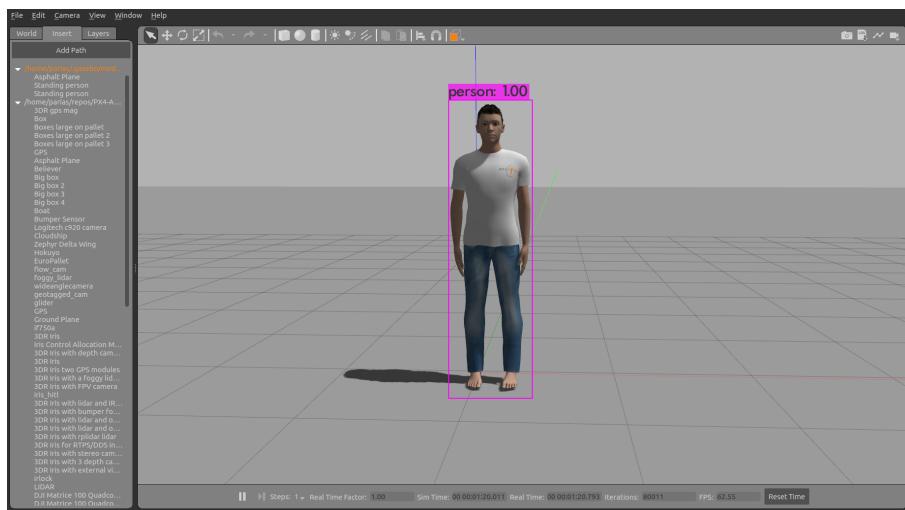
Cód. 5.3. Pseudo-código de *sigue-persona*

Percepción

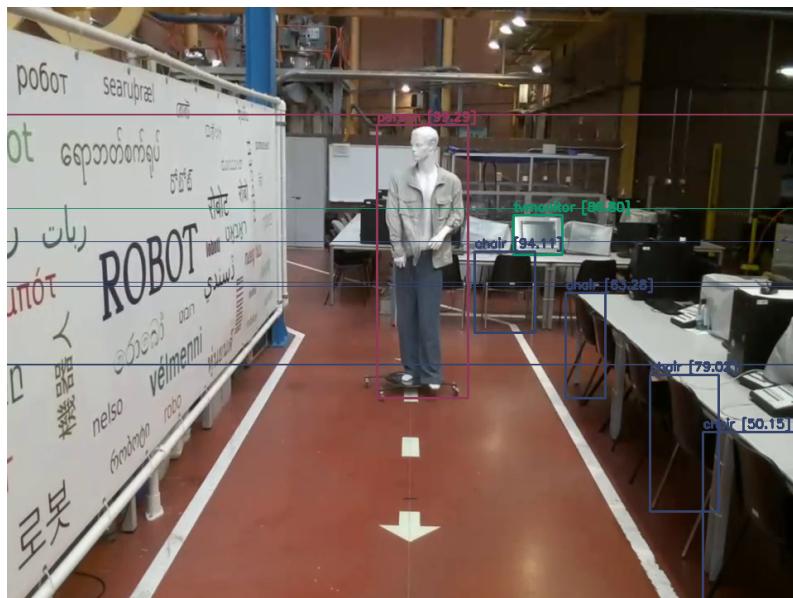
La percepción consta de dos partes, la detección robusta de la persona y la identificación de la misma. La detección se realiza mediante aprendizaje profundo, mientras que la identificación se consigue gracias a un seguimiento espacio-temporal con memoria finita de la detección.

La detección consiste en una red neuronal profunda, en concreto la red YOLOv4 [70]. La detección mediante aprendizaje profundo aporta robustez a la solución. La detección es fiable en muchos escenarios de iluminación, frente a occlusiones o frente a múltiples objetos a detectar. Sin embargo, su principal desventaja es su tiempo de inferencia, que si no se mantiene acotado, ralentiza los bucles de control deteriorando el seguimiento hasta un punto que lo imposibilita.

El funcionamiento de la red es sencillo. La red toma una imagen y devuelve una serie de detecciones sobre la misma, lo que ocurre entre medias está oculto al usuario. Las detecciones consisten en una etiqueta, una confianza (probabilidad de detección) y la posición del objeto dentro de la imagen (en forma de caja delimitadora), para cada una de las detecciones. Estas detecciones se filtran por etiqueta para solo obtener las “personas” detectadas. La Figura 5.14 recoge varias detecciones realizadas por la red.



(a) Detección en simulación.



(b) Detección de un maniquí con el *tello*.

Fig. 5.14. Detecciones en la aplicación *sigue-persona*.

La identificación se realiza almacenando posiciones anteriores de una detección considerada como “principal”. La selección de la detección principal depende del número de detecciones. Partiendo de una situación donde no exista detección principal, si el número de personas detectadas es nulo, no existe objeto sobre el que realizar el seguimiento. En caso de que solo una persona sea detectada, es seleccionada como principal, y en caso de que haya más de una detección, la persona con confianza más alta es elegida como principal.

Sobre la detección principal se almacenan las posiciones de los últimos centroides sobre la imagen en una cola FIFO (*First-In-First-Out*, último en entrar primero en salir) finita. La longitud de la cola es 5, lo que indica que se guardan las últimas cinco posiciones de la identificación. Sobre las nuevas detecciones se calculan sus centroides y se comparan con la media de los centroides almacenados en la cola. La detección con el centroide más próximo, es considerado como el objeto a seguir. La Figura 5.15 muestra el esquema de la cola de identificación

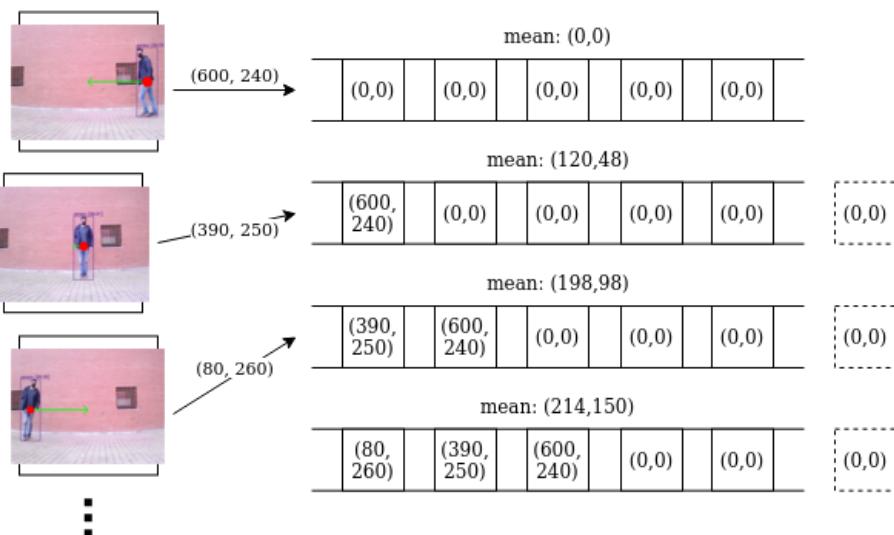


Fig. 5.15. Esquema de identificación en *sigue-persona*.

El bloque de percepción tiene por tanto una única salida, la persona detectada a seguir, si es que esta existe. En caso de no existir, la aeronave realizará un algoritmo de búsqueda consistente en dar vueltas sobre sí mismo hasta encontrar a una persona a la cual seguir.

Destacar que pese a que la percepción se centre en la detección de personas, la aplicación es fácilmente trasladable al seguimiento de otros objetos que pueda detectar la red, véase “caballos” o “coches” por ejemplo. Además, se ha elegido la red YOLOv4, pero en cualquier caso la detección se podría realizar con cualquiera otra red, con un coste de integración sencillo en la infraestructura.

Control

El bloque de control es prácticamente idéntico, tal como se ha comentado durante la sección de diseño. La entrada del bloque es única, la persona detectada por el bloque de percepción. Sobre la caja delimitadora de la detección se calculan ciertas características que permiten calcular los errores a corregir por los controladores con sus salidas, las nuevas órdenes de velocidad de la aeronave. La Figura 5.16 recoge el esquema del bloque de control.

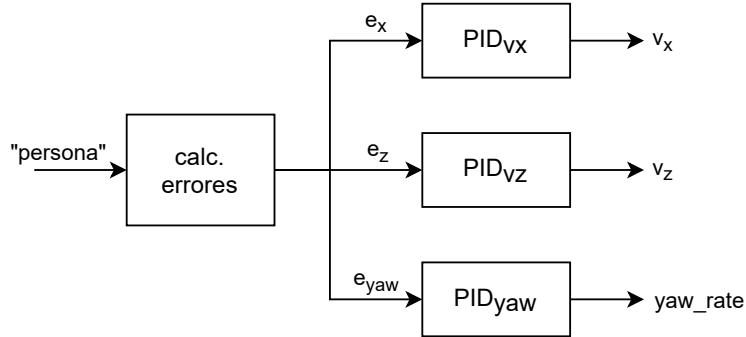


Fig. 5.16. Esquema de control en *sigue-persona*.

Los controladores usados vuelven a ser tres PIDs, control en avance (vx), control en altura (vz) y control en guiñada (yaw_rate). Los controles en altura y en guiñada son idénticos, mientras que el control en avance es ligeramente diferente.

$$e_x = \frac{area_{total}}{area_{det}} - \frac{area_{total}}{area_{target}} \quad (5.4)$$

$$e_z = c_y - obj_y \quad (5.5)$$

$$e_{yaw} = c_x - obj_x \quad (5.6)$$

Sobre la caja delimitadora de la persona se calcula el centroide. La posición del centroide se utiliza junto a la posición del centro de la imagen para calcular el error en altura y en guiñada (Ec. 5.5 y Ec. 5.6). El error en avance (Ec. 5.4) se calcula con la diferencia entre la relación de dos áreas. Por un lado, el área total y el área del objeto detectado, y por otro lado, el área total y un área de referencia. La relación de este segundo elemento tiene un valor de veinte ($\frac{area_{total}}{area_{target}} = 20$). Así pues, el control asegura que la persona detectada se encuentre aproximadamente a una distancia la cual el área de la persona ocupe una vigésima parte de la imagen, valor que experimentalmente se ha considerado aceptable. La red es robusta frente a la orientación relativa entre la cámara y la persona (vista de perfil, desde atrás, etc.) y a la posición de la persona a detectar (de pie, sentado, agachado, etc.). Además, la red responde también correctamente frente a detecciones parciales por occlusiones o problemas similares. Utilizar el área de la detección como control de avance, ofrece un buen resultado en estos casos como se mostrará en la siguiente sección.



Fig. 5.17. Respuesta del bloque de control en *sigue-persona*.

La Figura 5.17 muestra la respuesta dada por el bloque de control a una entrada con varias detecciones. Las flechas indican la dirección que tomará el dron para corregir el error existente.

El constantes de los controladores PID no varían, pues las aeronaves son las mismas (ver Tabla 5.2). En el caso del PX4 utilizado en solo esta aplicación, no se han podido calcular los parámetros, ya que la aeronave ha tenido varios problemas prácticos que han impedido su vuelo. En la siguiente sección, se explicarán las dificultades encontradas con este dron.

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan de forma similar a la aplicación anterior, a través de distintas pruebas o experimentos. Se ha partido de un caso sencillo en simulado, y tras superarlo, se probó un nuevo caso con alguna dificultad añadida, hasta considerar que la aplicación es lo suficientemente robusta para probarla sobre una aeronave real.

Las pruebas en aeronave real se realizan en primer lugar sobre el Tello al ser una aeronave de menor tamaño y que se puede volar en interiores. Tras superar las pruebas sobre el dron de menor tamaño, se realizaron los experimentos sobre la aeronave de mayor tamaño, el PX4 propio. Así pues, la aplicación se ha probado sobre las tres plataformas disponibles.

Sin embargo, debido a diversos problemas con la aeronave, no se han podido realizar vuelos con la misma, limitándose los experimentos a la parte de percepción con el procesado a bordo de la aeronave con PX4.

El principal problema detectado es una carencia en la potencia de alimentación del dispositivo embebido a bordo de la aeronave. La batería abordo no es capaz de alimentar con

suficiente potencia al dron y a la NVIDIA Jetson al mismo tiempo, cuando esta segunda está ejecutando tareas con grandes prestaciones como requiere la red neuronal.

Además, a lo largo del desarrollo se han detectado otros errores que sí se han podido subsanar. Es el caso de la actualización del NVIDIA JetPack al último disponible, necesario para poder ejecutar la red neuronal a bordo, la instalación de una antena WiFi para las comunicaciones o el reemplazo del sensor GPS y de uno de los motores, los cuales se encontraban dañados.

Pese a no conseguir volar dicha aeronave, se presentan también los resultados obtenidos con esta, ya que se considera relevante para este trabajo embarcar en una aeronave todo el software desarrollado. Esto es debido a que en aeronaves con el procesamiento en el segmento tierra, como es el caso del Tello, existen grandes limitaciones en la comunicación. Limitaciones tan importantes como la distancia o la degradación de la señal que hacen impracticable el experimento fuera de un entorno controlado.

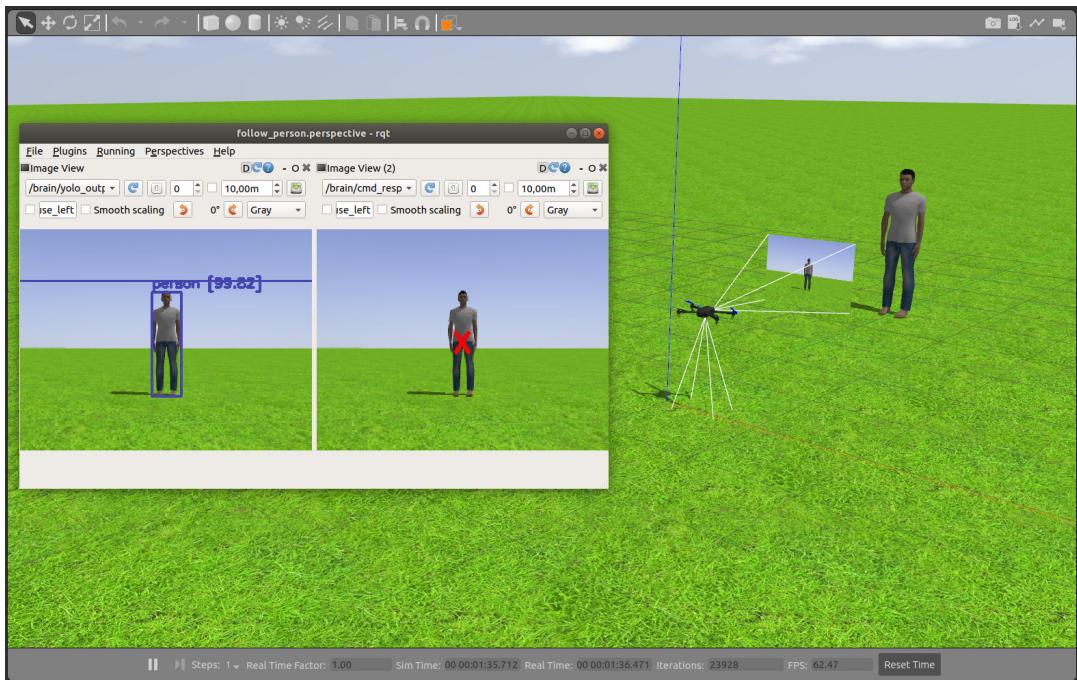


Fig. 5.18. Experimento *sigue-persona* con modelo estático.

Los experimentos se han iniciado en simulado, partiendo de un experimento simple con la persona a seguir estática (ver Fig. 5.18). En segundo lugar, se ha dotado de movimiento al modelo, probando la aplicación en un caso ya más cercano al mundo y también más complejo. Finalmente, se ha probado la aplicación sobre un entorno con varios modelos de personas, moviendo indistintamente los modelos a placer (Fig. 5.19).

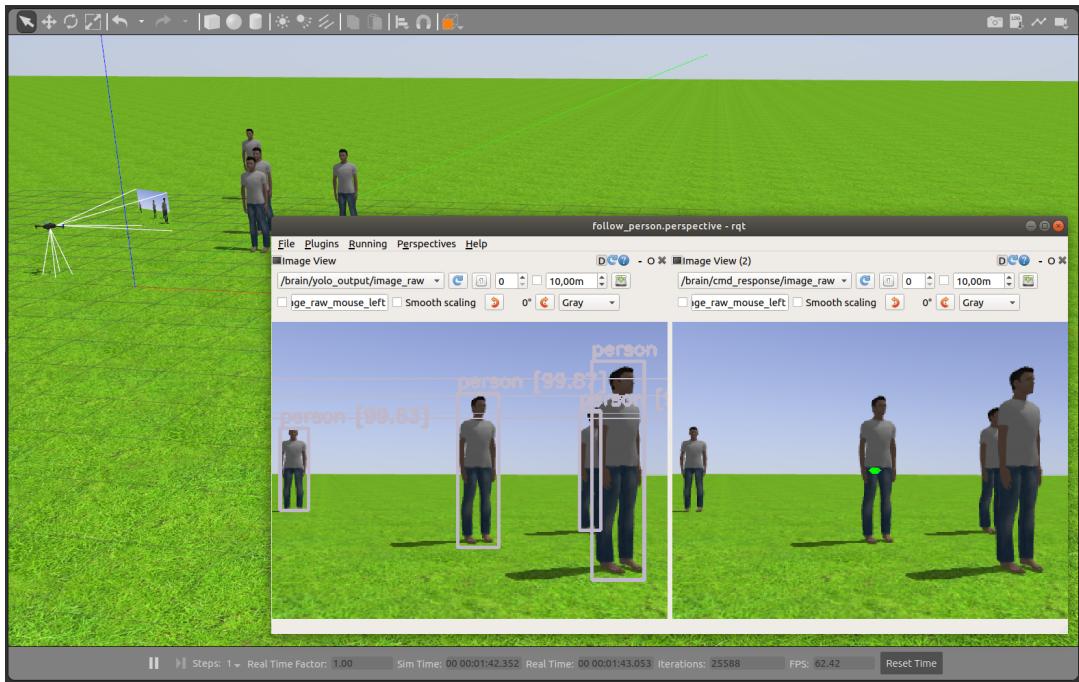


Fig. 5.19. Experimento *sigue-persona* con múltiples modelos.

Tras superar con éxito estas primeras pruebas en simulado, la aplicación se ha probado con la primera de las aeronaves reales, el Tello. De forma similar, se ha partido de un caso sencillo, con una única persona estática, en este caso un maniquí. A continuación, el maniquí se ha substituidos por una persona, capaz de moverse en los distintos ejes de control, donde se ha observado un funcionamiento correcto del seguimiento. Recalcar que los experimentos realizados con el Tello se han realizado en interiores, donde el uso tradicional de los drones, por posición GPS, no es posible. La Figura 5.23 recoge uno de los experimentos realizados, donde el dron Tello sigue a una persona a través de un pasillo.

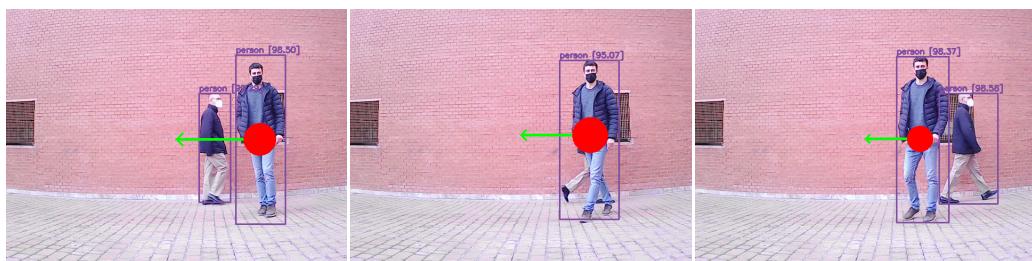


Fig. 5.20. Cruce trasero de persona.

Finalmente, la aplicación se ha probado en exteriores con la aeronave de mayor tamaño. Pese a su gran limitación de no poder volar, se ha comprobado el correcto funcionamiento del bloque de percepción con el procesamiento a bordo de la aeronave. Entre los experimentos realizados, se ha probado el funcionamiento de la aplicación frente a occlusiones entre varias personas. Los experimentos han sido dos, uno donde el cruce de la persona es por detrás del elemento a seguir (ver Fig. 5.20) y otro más complejo donde



Fig. 5.21. Cruce frontal de persona.

el cruce se realiza por delante de la persona sobre la que se realiza el seguimiento (ver Fig. 5.21). En este segundo caso, se puede observar como la detección se pierde cuando la persona identificada como a seguir está oculta sobre la segunda persona que cruza. Sin embargo, la identificación permite mantener el seguimiento a la persona correcta cuando esta vuelve a ser detectada.

Las pruebas realizadas con aeronaves reales han sido diversas y de distinta dificultad. Los experimentos han sido numerosos, no solo se ha dotado de movimiento al objeto a seguir, sino que se ha probado con diferentes personas y posiciones de las mismas, número de personas en la imagen, iluminaciones y entornos. La Figura 5.24 recoge ejemplos de las distintas circunstancias probadas.

Los diferentes experimentos se han recogido en varios vídeos disponibles para su visualización en una lista de reproducción⁷ que recopila todas las pruebas realizadas (ver figura 5.22).

Video Title	Length	Uploader
[Sigue Persona] Iris simulado	1:56	Pedro Arias
[Sigue Persona] Tello sobre maniquí	1:06	Pedro Arias
[Sigue Persona] Tello I	1:55	Pedro Arias
[Sigue persona] Tello II	2:16	Pedro Arias
[Sigue Persona] Procesamiento abordo de PX4	1:09	Pedro Arias
[Sigue Persona] Resumen	5:00	Pedro Arias

Fig. 5.22. Lista de reproducción *sigue-persona*.

⁷<https://youtube.com/playlist?list=PL2ebURGAzRwtsXui0GPFuQsIBJotnTIXj>



Fig. 5.23. Seguimiento de una persona por un pasillo.



Fig. 5.24. Ejemplos de la aplicación *sigue-persona* bajo diferentes circunstancias.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este capítulo final reúne las conclusiones alcanzadas tras la realización del proyecto y describe posibles líneas futuras de trabajo que surgen a partir del mismo. Estas líneas de trabajo suponen, en su mayoría, vías de mejora para la infraestructura en nuevos desarrollos.

6.1. Conclusiones

El trabajo finaliza con una nueva infraestructura para la programación de drones disponible para la comunidad. Se ha demostrado el correcto funcionamiento de dicha infraestructura a través del uso de tres aeronaves diferentes y sobre dos aplicaciones distintas.

La infraestructura desarrollada consiste en un producto con una arquitectura modular compleja basada en ROS. Los diferentes componentes se dividen en programas con diversos nodos que se comunican a través de múltiples *topics* y servicios. El código ha sido desarrollado en Python, y los programas principales como *DroneWrapper* o *TelloDriver* tienen una extensión de 700 y 600 líneas de código fuente respectivamente, sin incluir todos los archivos de lanzamiento, de simulación, de testeo, etc., elaborados durante el desarrollo. Por tanto, se puede concluir que los objetivos descritos en la Sección 1.4 se han satisfecho.

El primero de los objetivos, el desarrollo de herramientas para la programación de multicópteros se ha completado durante el Capítulo 4 con la propuesta del software *DroneWrapper*. La infraestructura basada en los estándares de MAVROS y MAVLink presenta como gran novedad un control en velocidad, común en robótica móvil pero poco habitual en la robótica aérea. Incorpora también otros métodos como la obtención de información de los sensores de visión que posibilita la construcción de aplicaciones visuales sobre la infraestructura.

La selección de ROS como *middleware* permite garantizar la seguridad y la robustez, objetivos secundarios del proyecto. Además, el diseño elegido facilita una alta usabilidad, pues la interfaz de programación ofrecida al usuario (ver Tabla 4.4) es sencilla de usar.

El segundo de los objetivos, el uso de distintas aeronaves, se ha satisfecho con la utilización de tres multicópteros distintos, tanto reales como simulados, tal como se ha descrito el material en el Capítulo 3. La distinta naturaleza de los drones seleccionados cumple con los objetivos secundarios fijados, y permite demostrar la horizontalidad de la infraestructura.

Finalmente, el tercero de los objetivos, el desarrollo de diferentes aplicaciones, se ha superado con las dos aplicaciones explicadas en el Capítulo 5, que se han validado experimentalmente. Las dos aplicaciones propuestas ofrecen distinto tipo de complejidad

técnica, siendo viable para todo tipo de usuarios, sean novatos o expertos en el campo de la robótica. Incluyen una parte perceptiva basada en visión, mediante técnicas clásicas o modernas (aprendizaje profundo), y una parte de control reactivo, en velocidad, para los motores que emplea controladores PID.

El trabajo concluye con una versión operativa de la infraestructura publicada como software libre en GitHub, utilizada no solo en las aplicaciones propuestas, sino también en otros proyectos de software libre como Unibotics [78] o BehaviorMetrics [79] de Jde-Robot [73]. El resultado final ofrece una opción viable y muy completa para la programación de aplicaciones para drones, como se ha demostrado a lo largo de esta memoria, para todo tipo de usuarios y campos de aplicación.

6.2. Líneas futuras

La infraestructura propuesta ofrece un punto de inicio para multitud de aplicaciones reales con drones. Pese a ser un producto sólido y en explotación, existen múltiples posibilidades de mejora y de funcionalidades de las cuales dotar el software. Alguna de estas, pueden ser:

1. Extender el soporte de la infraestructura a nuevas aeronaves. Comprende el desarrollo de nuevo drivers de comunicación con nuevos tipos de aeronave. Ejemplo de ello serían otras aeronaves DJI o los drones Parrot.
2. Dotar de usabilidad a nuevos sensores. La infraestructura solamente soporta hoy en día el uso de cámaras. Otros sensores, véase por ejemplo sensores LiDAR o balizas de radio-frecuencia (RF), pueden resultar útiles para algunas aplicaciones del usuario.
3. Añadir nuevas funcionalidades a la interfaz de programación de usuario. Nuevas opciones que permitan al usuario tareas como la navegación convencional (global) o la obtención de más datos acerca de la aeronave.
4. Cambio a Python3. La versión actual de Python está obsoleta y necesita una actualización a una versión actual.
5. Cambio a ROS2. La infraestructura está construida sobre ROS Melodic, el cual posee mantenimiento hasta marzo de 2023. Existe también una versión más actual en ROS Noetic, aunque sería conveniente el salto a ROS2 Foxy. Sin embargo, el paso a ROS2 no es trivial y supone muchos cambios en la arquitectura.
6. Desarrollo de nuevas aplicaciones que usen la infraestructura y permitan demostrar su validez en diversos ámbitos y con distintas aeronaves.
7. Popularizar su uso. Dar visibilidad a la aplicación para que otros miembros de la comunidad puedan disfrutar de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. S. Martín et al., «Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci (Parte I),» *Actas Urológicas Españolas*, vol. 31, n.º 2, pp. 69-76, 2007.
- [2] A. O. Baturone, *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2005.
- [3] R. A. Española, *Diccionario de la lengua española*, 23.º ed. <https://dle.rae.es>, Último acceso: 02-02-2020.
- [4] J. R. de Garibay Pascual, «Robótica: Estado del arte,» *Universidad de Deuston. Número. Fecha*, p. 54, 2006.
- [5] A. Barrientos, J. Del Cerro, P. Gutiérrez, R. San Martín, A. Martínez y C. Rossi, «Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones,» *Universidad politécnica de Madrid, Madrid*, 2007.
- [6] D. G. de Tráfico, *Tráfico distribuye los 39 drones que vigilarán las carreteras españolas este verano*, https://www.dgt.es/prensa/notas-de-prensa/2021/Trafico_distribuye_los_39_drones_que_vigilaran_las_carreteras_espanolas_este_verano.shtml, Último acceso: 12-07-2021.
- [7] Amazon, *Amazon Prime Air*, <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?node=8037720011>, Último acceso: 11-01-2022.
- [8] A. E. de Seguridad Aérea, *Normativa europea de UAS*, <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/normativa-europea-de-uas-drones>, Último acceso: 10-01-2022.
- [9] E. E. Area, *Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02019R0947-20200606>, Último acceso: 10-01-2022.
- [10] ——, *Reglamento Delegado (UE) 2019/945*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02019R0945-20200809>, Último acceso: 10-01-2022.
- [11] M. de Fomento, *Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021*, <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/7B974E30-2BD2-46E5-BEE5-26E00851A455/148411/PlanEstrategicoDrones.pdf>, Último acceso: 07-07-2021.
- [12] J. Kim, S. Kim, C. Ju y H. I. Son, «Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 105 100-105 115, 2019.

- [13] P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, T. Lagkas e I. Moscholios, «A compilation of UAV applications for precision agriculture,» *Computer Networks*, vol. 172, p. 107 148, 2020.
- [14] H. Yao, R. Qin y X. Chen, «Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications—A review,» *Remote Sensing*, vol. 11, n.º 12, p. 1443, 2019.
- [15] SESAR, *U-Space*, <https://www.sesarju.eu/U-space>, Último acceso: 10-01-2022.
- [16] M. de Ciencia e Innovación, *Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027*, <https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/EECTI-2021-2027.pdf>, Último acceso: 07-07-2021.
- [17] DronecodeProject, *QGroundControl*, <http://qgroundcontrol.com/>, Último acceso: 12-07-2021.
- [18] ArduPilot-Dev-Team, *Mission Planner*, <https://ardupilot.org/planner/>, Último acceso: 12-07-2021.
- [19] CVAR-UPM, *Aerostack Github*, <https://github.com/aerostack>, Último acceso: 24-12-2021.
- [20] J. L. Sanchez-Lopez et al., «Aerostack: An architecture and open-source software framework for aerial robotics,» en *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, IEEE, 2016, pp. 332-341.
- [21] U. P. de Madrid, *Grupo de Visión por Computador y Robótica Aérea*, <https://cvar-upm.github.io/>, Último acceso: 25-12-2021.
- [22] I. Dronecode Project, *Bucle de control de un UAV*, <https://dev.px4.io/master/en/concept/architecture.html>, Último acceso: 24-02-2020.
- [23] DJI, *DJI drones*, <https://www.dji.com/es>, Último acceso: 12-07-2021.
- [24] P. D. SAS, *Parrot drones*, <https://www.parrot.com/es/drones>, Último acceso: 12-07-2021.
- [25] 3. Robotics, *3DR Drone*, <https://www.3dr.com/>, Último acceso: 12-07-2021.
- [26] L. Meier, D. Honegger y M. Pollefey, «PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms,» en *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, IEEE, 2015, pp. 6235-6240.
- [27] A. D. Team y Community, *Ardupilot*, <https://ardupilot.org/>, Último acceso: 11-02-2020.
- [28] L. Meier, P. Tanskanen, F. Fraundorfer y M. Pollefey, «Pixhawk: A system for autonomous flight using onboard computer vision,» en *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2011, pp. 2992-2997.
- [29] PX4, *Modos de vuelo*, https://docs.px4.io/master/en/getting-started/flight_modes.html, Último acceso: 12-01-2022.

- [30] O. S. R. Foundation, *Gazebo*, <http://gazebosim.org/>, Último acceso: 11-02-2020.
- [31] M. Research, *AirSim*, <https://microsoft.github.io/AirSim/>, Último acceso: 13-07-2021.
- [32] I. Dronecode Project, *jmavsim*, <https://github.com/PX4/jMAVSIM>, Último acceso: 13-07-2021.
- [33] DronecodeProject, *MAVLink*, <https://mavlink.io/en/>, Último acceso: 12-07-2021.
- [34] I. Dronecode Project, *Documentación de MAVLink con los mensajes disponibles*. <https://mavlink.io/en/messages/common.html>, Último acceso: 26-02-2020.
- [35] ——, *Microservicios de MAVLink*, <https://mavlink.io/en/services/>, Último acceso: 02-03-2020.
- [36] M. Quigley et al., «ROS: an open-source Robot Operating System,» en *ICRA workshop on open source software*, Kobe, Japan, vol. 3, 2009, p. 5.
- [37] P. Fitzpatrick, E. Ceseracciu, D. E. Domenichelli, A. Paikan, G. Metta y L. Natale, «A middle way for robotics middleware,» *J. Softw. Eng. Robot*, vol. 5, n.º 2, pp. 42-49, 2014.
- [38] G. Metta, P. Fitzpatrick y L. Natale, «YARP: yet another robot platform,» *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 3, n.º 1, p. 8, 2006.
- [39] H. Bruyninckx, «Open robot control software: the OROCOS project,» en *Proceedings 2001 ICRA. IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 01CH37164)*, IEEE, vol. 3, 2001, pp. 2523-2528.
- [40] M. Montemerlo, N. Roy y S. Thrun, «Perspectives on standardization in mobile robot programming: The Carnegie Mellon navigation (CARMEN) toolkit,» en *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453)*, IEEE, vol. 3, 2003, pp. 2436-2441.
- [41] I. Open Source Robotics Foundation, *OSRF*, <https://www.openrobotics.org/>, Último acceso: 13-07-2021.
- [42] K. Team, *Keras*, <https://keras.io/>, Último acceso: 31-12-2021.
- [43] Google, *TensorFlow*, <https://www.tensorflow.org/>, Último acceso: 13-07-2021.
- [44] F. AI, *PyTorch*, <https://pytorch.org/>, Último acceso: 31-12-2021.
- [45] J. Redmon, *Darknet: Open Source Neural Networks in C*, <http://pjreddie.com/darknet/>, 2013.
- [46] J. Redmon y A. Farhadi, «YOLOv3: An Incremental Improvement,» *arXiv*, 2018.

- [47] EASA, *Artificial Intelligence Roadmap 1.0*, <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-roadmap-10>, Último acceso: 13-1-2022.
- [48] S. Sun, G. Cioffi, C. De Visser y D. Scaramuzza, «Autonomous quadrotor flight despite rotor failure with onboard vision sensors: Frames vs. events,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, n.º 2, pp. 580-587, 2021.
- [49] D. Falanga, K. Kleber y D. Scaramuzza, «Dynamic obstacle avoidance for quadrotors with event cameras,» *Science Robotics*, vol. 5, n.º 40, 2020.
- [50] E. Kaufmann, A. Loquercio, R. Ranftl, A. Dosovitskiy, V. Koltun y D. Scaramuzza, «Deep drone racing: Learning agile flight in dynamic environments,» en *Conference on Robot Learning*, PMLR, 2018, pp. 133-145.
- [51] A. Anwar y A. Raychowdhury, «Autonomous navigation via deep reinforcement learning for resource constraint edge nodes using transfer learning,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26 549-26 560, 2020.
- [52] A. Scannell, C. H. Ek y A. Richards, «Trajectory Optimisation in Learned Multi-modal Dynamical Systems Via Latent-ODE Collocation,» en *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2021.
- [53] Á. Madridano Carrasco, «Arquitectura de software para navegación autónoma y coordinada de enjambres de drones en labores de lucha contra incendios forestales y urbanos,» Tesis doct., Universidad Carlos III de Madrid, 2020.
- [54] U. C. I. de Madrid, *Laboratoria de Sistemas Inteligentes*, <https://lsi.uc3m.es/>, Último acceso: 26-12-2021.
- [55] A. AG, *Arduino*, <https://www.arduino.cc/>, Último acceso: 27-12-2021.
- [56] R. P. Foundation, *Raspberry pi*, <https://www.raspberrypi.org/>, Último acceso: 27-12-2021.
- [57] J. Vega y J. M. Cañas, «PiBot: An open low-cost robotic platform with camera for STEM education,» *Electronics*, vol. 7, n.º 12, p. 430, 2018.
- [58] D. Industries, *GoPiGo*, <https://www.dexterindustries.com/gopigo3/>, Último acceso: 11-01-2022.
- [59] N. Corporation, *NVIDIA Jetson*, <https://www.nvidia.com/es-es/autonomous-machines/embedded-systems/>, Último acceso: 20-07-2021.
- [60] ——, *NVIDIA CUDA*, <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>, Último acceso: 20-07-2021.
- [61] ——, *NVIDIA JetPack SDK*, <https://developer.nvidia.com/embedded/jetpack>, Último acceso: 20-07-2021.
- [62] C. Ltd., *Ubuntu 18.04.3 LTS*, <https://ubuntu.com/download/desktop>, Último acceso: 09-02-2020.

- [63] P. S. Foundation, *Python*, <https://www.python.org/>, Último acceso: 09-02-2020.
- [64] C++, *C++*, <https://www.cplusplus.com/>, Último acceso: 28-12-2021.
- [65] I. Open Source Robotics Foundation, *rospy*, <http://wiki.ros.org/rospy>, Último acceso: 28-12-2021.
- [66] ——, *MAVROS*, <http://wiki.ros.org/mavros>, Último acceso: 13-07-2021.
- [67] O. Team, *OpenCV*, <https://opencv.org/>, Último acceso: 19-07-2021.
- [68] N. developers, *NumPy*, <https://numpy.org/>, Último acceso: 10-02-2020.
- [69] I. Dronecode Project, *PX4*, <https://px4.io/>, Último acceso: 11-02-2020.
- [70] A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang y H.-Y. M. Liao, *YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection*, 2020. arXiv: [2004.10934 \[cs.CV\]](https://arxiv.org/abs/2004.10934).
- [71] T.-Y. Lin et al., «Microsoft coco: Common objects in context,» en *European conference on computer vision*, Springer, 2014, pp. 740-755.
- [72] I. GitHub, *GitHub*, <https://github.com/>, Último acceso: 26-02-2020.
- [73] JdeRobot, *JdeRobot*, <https://jderobot.github.io/>, Último acceso: 13-07-2021.
- [74] DJI, *Tello SDK*, <https://dl-cdn.ryzerobotics.com/downloads/Tello/Tello%20SDK%202.0%20User%20Guide.pdf>, Último acceso: 01-01-2022.
- [75] N. Condés, *Embedded solution for person identification and tracking with a robot*, https://gsyc.urjc.es/jmplaza/students/tfm-deeplearning-person-following-nacho_condes-2020.pdf, Último acceso: 12-01-2022.
- [76] I. Condés, J.-M. Cañas y E. Perdices, «Embedded Deep Learning Solution for Person Identification and Following with a Robot,» en *Workshop of Physical Agents*, Springer, 2020, pp. 291-304.
- [77] OpenRobotics. «Standing person,» Open Robotics. (ene. de 2018), [En línea]. Disponible en: <https://fuel.ignitionrobotics.org/1.0/OpenRobotics/models/Standing%20person>.
- [78] JdeRobot, *Unibotics*, <https://unibotics.org/>, Último acceso: 09-01-2022.
- [79] ——, *BehaviorMetrics*, <https://jderobot.github.io/BehaviorMetrics/>, Último acceso: 09-01-2022.