



INGENIERÍA TÉCNICA INFORMÁTICA EN SISTEMAS

Curso Académico 2011/2017

Proyecto Fin de Carrera

ROBÓTICA AÉREA CON AVIONES

Autor : José Antonio Fernández Casillas

Tutor : José María Cañas Plaza

Proyecto Fin de Carrera

Robótica aérea con aviones

Autor : José Antonio Fernández Casillas **Tutor :** José María Cañas Plaza

La defensa del presente Proyecto Fin de Carrera se realizó el día de
de 20XX, siendo calificada por el siguiente tribunal:

Presidente:

Secretario:

Vocal:

y habiendo obtenido la siguiente calificación:

Calificación:

Fuenlabrada, a de de 20XX

*Dedicado a
mi familia / mi abuelo / mi abuela*

Agradecimientos

Aquí vienen los agradecimientos... Aunque está bien acordarse de la pareja, no hay que olvidarse de dar las gracias a tu madre, que aunque a veces no lo parezca disfrutará tanto de tus logros como tú... Además, la pareja quizás no sea para siempre, pero tu madre sí.

Resumen

Aquí viene un resumen del proyecto. Ha de constar de tres o cuatro párrafos, donde se presente de manera clara y concisa de qué va el proyecto. Han de quedar respondidas las siguientes preguntas:

- ¿De qué va este proyecto? ¿Cuál es su objetivo principal?
- ¿Cómo se ha realizado? ¿Qué tecnologías están involucradas?
- ¿En qué contexto se ha realizado el proyecto? ¿Es un proyecto dentro de un marco general?

Lo mejor es escribir el resumen al final.

Summary

Here comes a translation of the “Resumen” into English. Please, double check it for correct grammar and spelling. As it is the translation of the “Resumen”, which is supposed to be written at the end, this as well should be filled out just before submitting.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Robótica Aérea	1
1.2. Tipos de Aeronaves	7
1.3. Aplicaciones	8
1.4. Robótica aérea en el laboratorio de Robótica de la URJC	11
2. Objetivos	15
2.1. Problema a abordar	15
2.2. Requisitos	16
2.3. Metodología y plan de trabajo	18
3. Infraestructura utilizada	21
3.1. Hardware	21
3.2. Placa estabilizadora	22
3.3. JdeRobot	23
3.3.1. Interfaces	24
3.4. MAVLink	27
3.5. Python y PyQt5	28
3.6. Mapas y Geo-referenciación	29
3.7. SITL	29
4. APM Server	31
4.1. Análisis y diseño	31
4.2. Interfaces	32
4.3. Implementación	32

5. AUV Commander	33
5.1. Arquitectura general	33
6. Experimentos	35
7. Conclusiones	37
7.1. Consecución de objetivos	37
7.2. Aplicación de lo aprendido	37
7.3. Lecciones aprendidas	37
7.4. Trabajos futuros	38
7.5. Valoración personal	38
A. Manual de usuario	39
Bibliografía	41

Índice de figuras

1.1.	Infografía de la Agencia EFE con la regulación	6
1.2.	Dron grabando en el interior de un crater	9
1.3.	Dron Yamaha RMAX fumigando	10
1.4.	Ventanas de UAV Viewer	12
2.1.	Evolución de nuestra	19
3.1.	Placa estabilizadora ardupilot	22
3.2.	Arquitectura de SITL	30
5.1.	Estructura del parser básico	34

Capítulo 1

Introducción

Los UAV o Drones se han popularizado en los últimos años hasta es punto de formar parte de nuestro día a día con aplicaciones en muchos ámbitos de nuestra vida.

Si bien se están utilizando ya de forma habitual en sectores como el cine o la ingeniería civil, aún se están explorando muchas de las posibles utilidades que estos robots pueden llegar a ofrecer.

El objetivo de este trabajo final es poner en valor y asentar el uso de un tipo de UAV que no está hoy muy representado en el ámbito civil y que aventaja en varios aspectos al más popularizado quadracóptero, se trata del avión.

1.1. Robótica Aérea

Los orígenes de la robótica aerea tienen origen militar y su avance ha estado intrínsecamente ligado a este ámbito durante todo el siglo XX.

Se consideran el origen de los aviones no tripulados los experimentos llevados a cabo a principios del siglo XX durante la 1^a guerra mundial como el 'Aerial Target' desarrollado por el capitán A. H. Lowpara para su uso como blanco aéreo. Si bien eran vehículos no tripulados (Unmanned Aereal Vehicles) no eran autónomos y eran manejados desde tierra a través de una radio. No es hasta el final del siglo XX cuando bajo el escenario de la guerra de Vietnam y ante la creciente perdida de vidas de los pilotos estos vehículos vuelvan de nuevo a ser objeto de desarrollo y se conviertan en vehículos autónomos.

Desde ese momento y hasta nuestros días se utilizan de forma habitual en el ámbito militar

en misiones de reconocimiento, bombardeos o apoyo sin arriesgar vidas humanas.

A lo largo de los primeros años de este siglo debido al abaratamiento de los componentes electrónicos y a su miniaturización y potencia, la robótica aérea se ha 'desmilitarizado' y esta experimentado un enorme crecimiento en el ámbito de las aplicaciones civiles.

Hoy en día es común encontrar en cualquier juguetería quadracópteros radio-pilotados por poco menos de 30 euros y en tiendas especializadas podemos encontrarlos ya con el hardware y software integrados que les permiten seguir una serie de puntos de control y comportarse de forma autónoma por poco más de 200 €.

En la actualidad el uso de AUV o drones se ha popularizado tanto que es una de las industrias en las que más ha crecido su inversión, y es que según la empresa analista especializada en drones Droneii con sede en Hamburgo en un estudio sobre la inversión en el sector¹ en europa se invirtió en proyectos domésticos en 2016 cerca de 65 millones de dólares incrementándose esta cifra hasta los 314 millones si atendemos al mercado norteamericano.

Estas datos se asientan en un mercado cada vez más extendido y con una gran proyección de crecimiento, la publicación BI Intelligence² espera que las ventas de drones alcancen los 12.000 millones en 2021. La venta de drones es sólo una de las piezas de éste negocio incipiente, empresas como DJI, Xiaomy o 3DR están en la punta de lanza de la innovación desarrollo de éstos, pero es tan solo la punta del iceberg. Esta industria está potenciando otras como la de las videocámaras deportivas GoPRO e incluso están surgiendo nuevos puestos de trabajo como el de operador de drones. Las grandes empresas tecnológicas ven el potencial económico que pueden aportar a sus balances y se está produciendo una pugna por adquirir las principales empresas especializadas en drones, Verizon compró en febrero Skyward, facebook compró Acenta y google

La enorme aceptación y expansión de los drones se ha producido de un modo tan explosivo, que en ciertos aspectos de la sociedad no se ha avanzado lo suficiente como para que su utilización se haga de forma segura.

- Problemas de seguridad. Los drones y en especial los drones de gran envergadura más allá de su uso profesional o lúdico pueden ser muy peligrosos. Sus palas giran a mas de 1000RPM y pueden producir cortes o amputaciones o producir daños personales y/o materiales en el caso de una pérdida de control del mismo o una caída. Esto se hizo patente

¹<http://www.droneii.com/drone-investment-trends-2016>

²<http://www.businessinsider.com/the-drones-report-research-use-cases-regulations-and->

cuando durante la filmación de un concierto del cantante Enrique Iglesias en Tijuana (Méjico) éste agarró el drone que le grababa de forma espontánea y ésto le produjo severos cortes en su mano derecha que hizo que sangrara profusamente.

También pueden utilizarse con fines terroristas como se sospechó en Francia cuando se detectaron en octubre de 2014 volando en las proximidades de varias centrales nucleares. Además, en la noche del 19 al 20 de enero de 2015 otro 'dron' sobrevoló el Palacio del Elíseo, donde tiene su residencia el presidente de la república Francesa, Françoise Hollande. Y a ellos hay que sumar los 19 'drones' que han sido avistados sobrevolando 17 centrales nucleares francesas de octubre a febrero de 2015. De hecho en el ámbito militar los drones son parte importante del despliegue militar del IS (Estado islámico) quien con vídeo e infografías como la siguiente se jactan de sus "logros" con ellas en las redes sociales. Su bajo coste y su versatilidad producen que proliferen muchos drones construidos por sus militantes para la guerra.

A estos problemas de seguridad hay que unir el problema del Hacking, muchos de los más extendidos drones comerciales no tienen protección alguna contra el ataque de un ciberdelincuente. Por poner un ejemplo el modo en el que el Parrot AR-Drone se empareja con el móvil es una conexión plana sin contraseña, haciendo posible conectarse a él por un tercero con unas pocas líneas de código.

- Guía sencilla de hacking del AR-Drone 2.0 - <http://www.xdrones.es/guia-para-hackear-el-ar-drone-2-0/>
- Cómo atacar el AR-Drone 2.0 con nodecopter - <http://www.nodecopter.com/hack>
- Suit para hackear drones a través de WIFI - <https://github.com/samyk/skyjack>

Si bien es relativamente simple su hackeo el daño que pueda producirse con ellos es más bien leve o muy moderado, pero existen técnicas como el GPS Spoofing que pueden "secuestrar" cualquier drone que se guíe por GPS como ocurrió en Irán en 2011 donde hackers iraníes se hicieron con el control de un drone militar americano Lockheed Martin RQ-170 Sentinel³ mediante esta técnica que engaña a la antena GPS del UAV haciéndole pensar que se encuentra en otro lugar. Si bien para este ataque se necesitó un hardware

³https://en.wikipedia.org/wiki/Iran%E2%80%93U.S._RQ-170_incident



(a) Infografía publicada por el IS en twitter



(b) Dron casero del IS

caro que haría el ataque prohibitivo, hoy es posible realizarlo por unos pocos cientos de euros con hackrf o braderf como se demostró por la compañía china Qihoo 360 en las conferencias de Hacking DEFCON de 2015.⁴

- Problemas regulatorios. Otro problema importante que apenas se está empezando a abordar es el regulatorio. Con el fin de minimizar el riesgo para las personas se está llevando a cabo una regulación del sector en todo el mundo. En España por ejemplo hasta abril de 2014, volar un dron para uso civil estaba absolutamente prohibido. La no regulación no indicaba que se pudiese volar, indicaba más bien todo lo contrario. Otro tema es el desconocimiento total por parte de las fuerzas del orden del Estado, donde una persona volase

⁴<http://www.rtl-sdr.com/spoofing-gps-locations-with-low-cost-tx-sdrs/>

un drone y nadie le dijese nada. En éste marco regulatorio no se puede por ejemplo, volar un dron en núcleos urbanos, sólo debe hacerse en zonas previstas a tal efecto. Tampoco es posible volar un dron de más de 2Kg más allá de donde puedas verlo (500m), y es que antes era muy usual ponerle una cámara y volar varios kilómetros con él.

Para hacernos una idea clara del marco regulatorio actual para su uso no profesional basta con fijarnos en la siguiente infografía publicada por la agencia EFE.

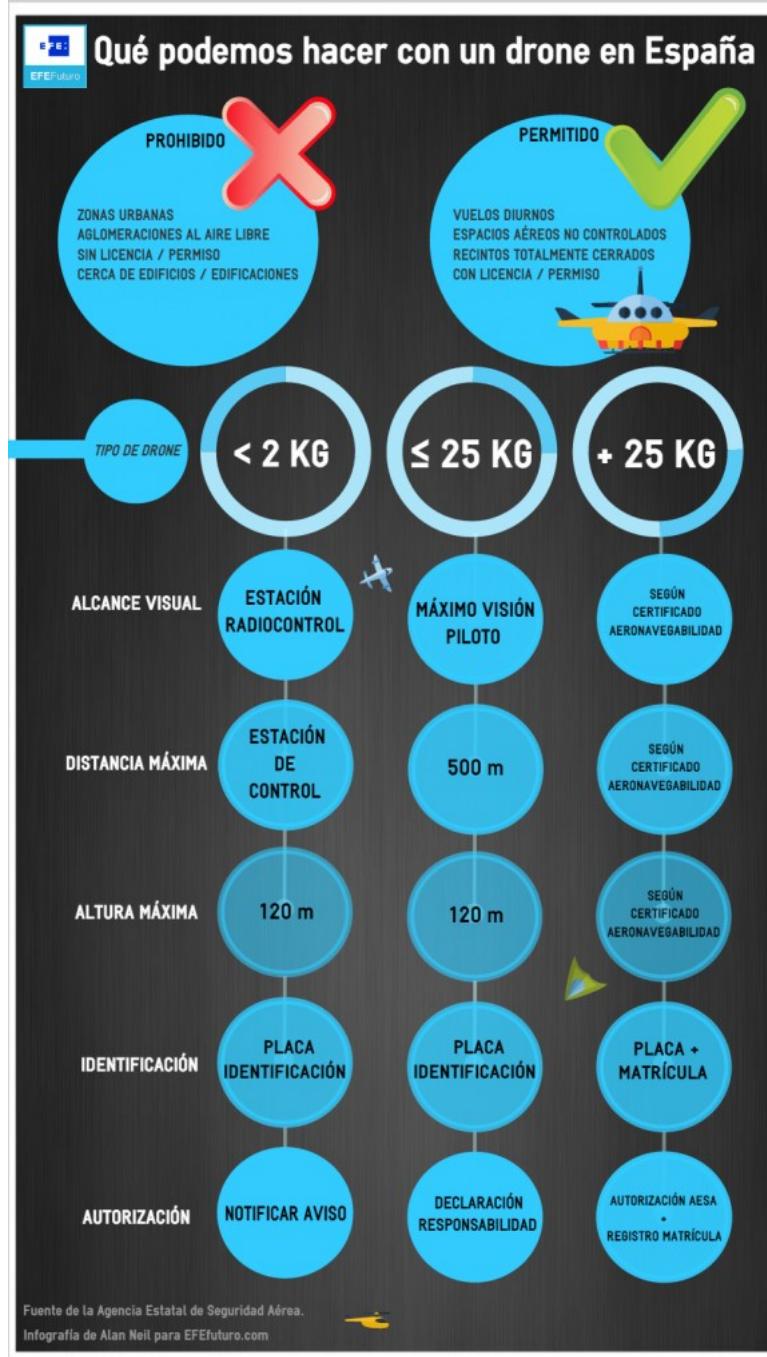


Figura 1.1: Infografía de la Agencia EFE con la regulación

Para poder utilizar los drones con fines profesionales la ley es aún más restrictiva la Agencia Española de Seguridad Aérea AESA exige el registro de las aeronaves civiles pilotadas por control remoto cuya masa máxima al despegue exceda de 25 kg, que deberán estar inscritas en el Registro de matrícula de aeronaves y disponer de certificado de aeronavegabilidad. Para drones de menor peso, el piloto deberá presentar ante la Agencia Estatal

de Seguridad Aérea una comunicación previa y declaración responsable) con una antelación mínima de cinco días al día del inicio de la operación y éste ha de estar habilitado como operador de drones.

La ley completa se puede consultar el BOE⁵

Con su uso ya ampliamente extendido en sectores como el cine, la televisión, fotografía, agropecuario, forestal, ingeniería civil y presencia en sectores como el de salvamento o seguridad y protección el nicho de mercado de los UAV esta lejos de su cima y se investigan dia a dia nuevos usos en sectores como el de la logística o las telecomunicaciones como veremos mas adelante suponiendo un reto constante para investigadores, desarrolladores, ingenieros, inversores y entidades regulatorias.

1.2. Tipos de Aeronaves

Las aeronaves son la base sobre las que se asienta la inteligencia que permite que nuestro robot vuele de ahí que convenga dedicar unas líneas a entender la base de las mismas y en particular las que son objeto de estudio y desarrollo en este PFC los llamados aerodinos.

Los aerodinos son aquellas aeronaves que vuelan a pesar de pesar más que el aire, son capaces de generar sustentación por sus propios medios a diferencia de los aerostatos como por ejemplo los globos aerostáticos.

Existen principalmente 2 tipos de aerodinos si atendemos al modo en que generan su sustentación con sus alas, de ala fija y las de ala rotatoria.

Dentro de la tipificación de ala fija tenemos aquellas aerodinos que tienen sus alas fijas al fuselaje, y que comúnmente conocemos como aviones, según la OACI, un avión es un «Aerodino propulsado por motor, que debe su sustentación en vuelo principalmente a reacciones aerodinámicas ejercidas sobre superficies que permanecen fijas en determinadas condiciones de vuelo» Algunos ejemplos de aerodinos de ala fija son los aeroplanos, planeadores/veleros, aladeltas, parapentes, paramotores y ultraligeros.

Este tipo de aerodinos tienen como principal ventaja que la carga de aire que necesitan en sus alas puede ser producida de muchas formas distintas (los veleros no tienen ningún tipo de

⁵http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4243006/rdl_8_2014_4julio.pdf

propulsión). Esta carga es variable en función de la superficie alar del mismo y permite por tanto cargas más grandes que si instalásemos el mismo propulsor en un ala rotatoria. Pongamos como ejemplo el A380 de Airbus, es el avión de pasajeros más grande del mundo y cuenta con 4 motores que producen un empuje de entre 70.000 y 80.000lbs, unas 32-36 toneladas de empuje cada uno generando por tanto entre los 4 a máximo rendimiento y optimás condiciones alrededor de 144 toneladas de empuje. Este avión tiene un peso máximo al despegue⁶ de entre 560 y 590 toneladas. Tenemos por tanto que necesitamos en este caso $\frac{1}{4}$ del peso total en empuje para despegar este avión. Si hiciésemos este mismo ejercicio con un aerodino de ala rotatoria como el Boing AH-64 o Apache con un peso máximo al despegue de 9,5 toneladas necesitaríamos que la combinación que realizan empuje y palas superase esos 9,5 toneladas para siguiera levantar del suelo. Este tipo de aerodinos son por tanto más eficientes, rápidos, con mayor carga de pago, mayor alcance debido a su menor consumo y más estables.

Dentro de la tipificación de ala rotatoria tenemos aquellas aerodinos que producen su sustentación con el movimiento (rotación) de sus alas. En este tipo de aerodinos las alas, también llamadas 'palas' en este tipo de aerodinos, giran en torno a un eje produciendo con este giro la sustentación necesaria para despegar del suelo. Algunos ejemplos de este tipo de aerodinos son los helicópteros, autogiros, convertibles o los ampliamente conocidos en robotica aerea los quadracópteros. Este tipo de aerodino tiene como principal ventaja frente a los ala fija en su versatilidad a la hora de realizar las maniobras de despegue y aterrizaje que pueden realizarse de forma vertical (VTOL⁷) además de la capacidad de realizar vuelo estacionario⁸ que le hacen imprescindible en escenarios poco accesibles o donde nos es posible aterrizar como el rescate marítimo.

1.3. Aplicaciones

La robótica aérea ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, se ha popularizado su uso y se ha extendido la comercialización de drones.

El sector donde más rápida acogida ha tenido la robótica aérea ha sido el sector audiovisual, se usa de forma habitual en cine, grabación de espectáculos en directo televisión y fotografía.

⁶Peso máximo que es capaz de soportar un avión en su maniobra de despegue

⁷Vertical take off and landing

⁸Mantenerse estáticamente en un punto elevado

El porqué de tal acogida se basa principalmente en 2 factores, los costes y la viabilidad técnica. Los costes de realizar una toma aérea en una producción antes pasaban por el alquiler de un helicóptero, dependiendo de la toma, así como del material y la contratación de los medios humanos a bordo para realizarlas podía ascender a entre 4000 y 6000 euros la hora. Hoy en día basta con un pequeño dron entre 400 y 1800 euros⁹ por jornada e incluirían en el tramo más elevado piloto y operador de cámara. Como se puede constatar fácilmente el ahorro incurrido no es para nada desdeñable y ofrece a pequeñas productoras acceder a éste tipo de grabaciones que de otro modo serían privativas para éstas. Aunque aspecto económico es especialmente importante para decantarse por el uso de este tipo de medios, existen en el mundo audiovisual trabajos que no hubiesen sido posibles hasta este momento gracias a los drones. Grabaciones en las que el riesgo humano y material que habría que asumir es tan alto que tan solo de éste modo, debemos por tanto a los drones fotografías como ésta que si bien nos se tomó como parte de ningún proyecto cinematográfico nos hace una idea de lo que la robótica aérea puede ofrecernos.



Figura 1.2: Dron grabando en el interior de un crater

Otro sector que ha adaptado rápidamente el uso de éstas pequeñas aeronaves es el agropecuario donde se utiliza para medir la condiciones del terreno, con el fin de recoger información sobre la hidratación, la temperatura o el ritmo de crecimiento de los cultivos. Controlan el riego e incluso esparcen los pesticidas de manera eficiente siendo un arma eficaz contra las plagas, se utilizan incluso como espantapájaros. La aplicación de drones en este sector se remonta a

⁹Precios aproximados extraídos de la empresa especializada World Aviation Helicopters <https://www.worldaviation.es/es/servicio-drones.aspx>

1983 cuando el Ministerio de Agricultura de Japón preocupado por el envejecimiento de su población rural encargó a Yamaha el desarrollo de una aeronave no tripulada capaz de realizar varias tareas de las anteriormente descritas a fin de atraer más gente al medio rural. En 1990 se entregaron las primeras unidades del Yamaha RMAX y actualmente el 40 % de los arrozales japoneses cuentan con un dron sobrevolándolos.



Figura 1.3: Dron Yamaha RMAX fumigando

Son utilizados también por los servicios de rescate tras una catástrofe para evaluar los daños experimentados y ayudas a encontrar supervivientes entre los escombros. Algunos son capaces de enviar a los supervivientes paquetes de supervivencia con salvavidas, alimentos o agua mientras esperan su rescate¹⁰

E incluso se han empezado a utilizar por el Ministerio de Hacienda de España con fines recaudatorios, sobrevuelan las viviendas o fincas localizando edificaciones no registradas por el catastro con el fin de regularizar su situación.

El uso de drones es especialmente importante en el ámbito científico para por ejemplo tomar medidas de temperatura y CO₂ en zonas peligrosas¹¹, estudiar las nubes volcánicas¹² o volar dentro de una grieta en un glaciar¹³.

El futuro del uso de los drones se está escribiendo en este mismo momento y es que poco a poco se investigan con nuevos usos o cómo mejorar los ya actuales.

¹⁰<http://www.elmundo.es/economia/2015/09/15/55f8239546163fc6598b45c3.html>

¹¹<http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1395-medidas-de-temperatura-y-co2-de-las->

¹²<https://www.nasa.gov/topics/earth/earthmonth/volcanic-plume-uavs.html>

¹³http://tn.com.ar/tecnologia/recomendados/increible-un-drone-volo-dentro-de-un-glaciar_648661

Uno de los usos más prometedores que está siendo investigado es el uso de drones para la logística y paquetería, Amazon estudió en 2015 la viabilidad de utilizar drones para el reparto, especialmente en zonas de difícil acceso o bien alejadas de las zonas habituales de reparto. A finales de dicho año realizó pruebas de entregas en el Reino Unido y desarrollo un prototipo de alrededor de 25Kg de peso. El objetivo de Amazon, entregas de menos de 3Kg en 30 minutos y una toma de contacto en la entrega de paquetes en zonas pobladas. Esto ha dado pie a las principales empresas de logística y paquetería a realizar sus propios desarrollos y construir sus propios prototipos. DHL ha realizado sendas pruebas con drones de cerca de 5 Kg para la entrega de paquetes de hasta 1,2 Kg. La empresa francesa GeoPost se ha asociado con la empresa Atechsys, especializada en el desarrollo de sistemas autónomos para aeronaves no tripuladas, que ha dado como resultado un dron que cuenta con seis motores eléctricos y estructura de fibra de carbono, con capacidad para llevar paquetes de un peso aproximado de hasta 2 kilos. UPS ha realizado un experimento en Tampa con un octocóptero que despegaría desde el techo de la furgoneta de reparto para entregar los paquetes en zonas rurales y ahorrar en kilometraje el dron tenía una carga de pago de unos 4,5Kg.

Otro de los estudios que más llama la atención es el de Google y Facebook que compiten en llevar internet a zonas aisladas a través de una red de drones y satélites. Facebook presentó en su F8 en Marzo de 2015 su prototipo de dron a tal efecto, Aquila, fruto de la adquisición de la empresa especializada en robótica aérea Acenta. Este proyecto se enmarca dentro del plan internet.org y liderado Connectivity Lab¹⁴ que pretende ofrecer internet con un coste reducido a todo aquel que no lo tenga. En 2014 Google por su parte compró Titan Aerospace para crear una flota de drones impulsados por energía solar, capaces de volar más de una semana mientras tomaban fotos de la superficie y proveían de acceso a Internet a lugares remotos y proveer nueva información para sus mapas. Éste desarrollo sin embargo se ha abandonado en enero de este año en pro de la utilización de globos aerostáticos para tal propósito.

1.4. Robótica aérea en el laboratorio de Robótica de la URJC

Dentro del laboratorio de robótica de la Universidad Rey Juan Carlos cabe destacar los trabajos realizados para profundizar investigar y experimentar con ellos.

¹⁴Un equipo formado por 50 expertos en aeronáutica y ciencia espacial

Trabajos como el de Alberto Martínez Florido permitió controlar un AR-Drone real desde una aplicación cliente, desarrollando para ello un driver para el dron, ardrone_server y una aplicación cliente UAV Viewer. El driver ardrone_server es capaz de conectar con el AR-DRONE a través de comandos AT tanto para obtener los datos de todos sus sensores como para controlarlo y expone todo ello en interfaces JdeRobot para su interconexión con todo el software disponible en el framework. El AR-Drone es un quadracóptero que en su versión actual cuenta con acelerómetros, giróscopos y magnetómetros en 3 ejes que determinan junto con su barómetro y un sensor de ultrasonidos la actitud del mismo, dispone además de 2 cámaras, una ventral y otra frontal y algunos modelos traen sensor GPS. Alberto desarrolló también el software de control UAV Viewer, esta aplicación cliente es capaz de controlar con cualquier dron y mostrar de forma visual su actitud, lo que captan sus cámaras.

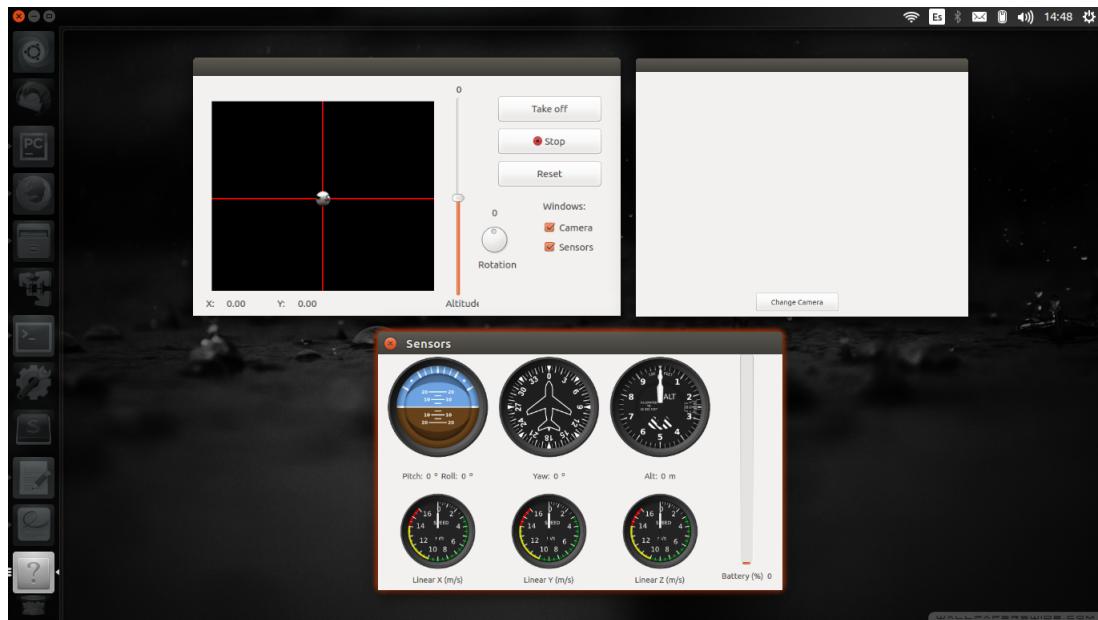
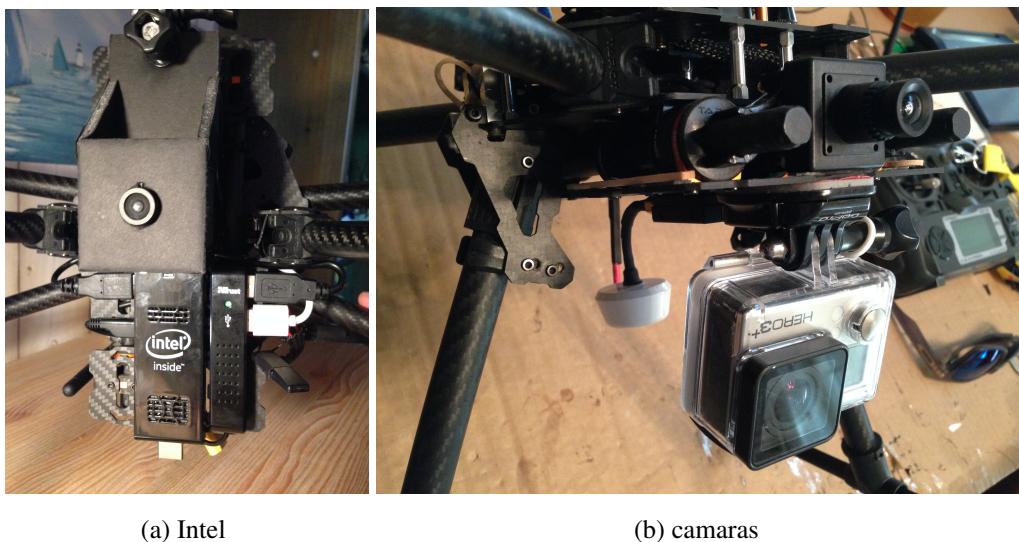


Figura 1.4: Ventanas de UAV Viewer

Daniel Yague desarrolló un driver para poder simular el comportamiento del AD-Drone en el simulador Gazebo, de referencia en el departamento de robótica de la universidad y contenido dentro de la suite JdeRobot. Con este desarrollo se hizo posible desarrollar, probar anticipar los problemas que puedan surgir en el vuelo del dron antes siquiera de volarlo, de esta forma es posible el desarrollo de aplicaciones de navegación complejas sin disponer de el, sin arriesgarlo e independientemente de factores externos como la climatología. Para mostrar las posibilidades de desarrollo que se abrían desarrolló varias aplicaciones en el ar-drone simulado como un gato-

ratón donde un dron teleoperado trataba de huir de otro que le seguía o una aplicación donde el dron seguía una carretera.

Jorge Cano construyó propio su dron utilizando como base un quadracóptero con un Intel Compute Stick (ICS) STCK1A8LFC como ordenador de abordo y una placa Pixhawk como placa estabilizadora/piloto automático. Esta placa utiliza como protocolo de comunicación MAVLink¹⁵ y dispone de acelerómetros, giróscopos y magnetómetros para determinar la actitud. Además de la construcción del dron Jorge desarrolló el driver MAVLinkServer donde apoyándose en MAVProxy adaptó los comandos MAVLink a interfaces JdeRobot permitiendo acceder a la actitud y controlar el dron con comandos tipo GotoXY enviados a través del interfaz Pose3D¹⁶



En la actualidad se están desarrollando nuevos trabajos sobre este tipo de placas estabilizadoras que tiene como software base ArduCopter/Ardupilot o son compatibles.

Diego Jiménez trabaja en controlar un Solo Drone de la empresa 3DR¹⁷ mediante el interfaz de velocidades CMDVel¹⁸, este quadracóptero tiene como placa de control una Pixhawk como la utilizada por Jorge Vela en el dron que se construyó y utiliza también comandos MAVLink.

Jorge Vela se encuentra desarrollando como realizar la maniobra de aterrizaje de forma

¹⁵Micro Air Vehicle Link <https://en.wikipedia.org/wiki/MAVLink>

¹⁶Ver capítulo 3 Arquitectura utilizada

¹⁷Empresa norteamericana con sede en California especializada en robótica aérea. Se sitúa en 2017 como la 3^a empresa del sector

¹⁸Ver capítulo 3 Arquitectura utilizada

automática al localizar un patrón o baliza localizado visión, como drone estan utilizando un Solo Drone con una Intel Stick como ordenador de abordo.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Problema a abordar

Los objetivos de este proyecto final de carrera es dar un soporte en la plataforma software JdeRobot para drones de ala fija que utilicen como interfaz de comunicación MAVLink. Para abordar el problema lo hemos dividido en 5 grandes Milestones:

1. Preparación del hardware necesario para abordar el problema con un avión real.
2. Desarrollo de un driver que acceda a los sensores y actuadores de drones de ala fija que utilicen MAVLink y dar soporte a la actuación de misiones que hasta ahora no soportaba JdeRobot el driver se llamará APM Server siglas de Ardupilot Mega Server.
3. Desarrollo de una aplicación GCS Ground Control Station que permita al operador introducir misiones y seguir el cumplimiento de las mismas a través de el. Permitiendo el acceso a toda la actitud y a las cámaras de abordo. Se llamará UAV Commander.
4. Experimentos en simulación. Conectaremos nuestro driver APM Server al simulador SITL y el UAV Commander al APM Server para poder simular el seguimiento de misiones.
5. Experimentos en el avión real. Montaremos la aviónica en el avión real y lo llevaremos al campo de vuelo para validar su comportamiento.

2.2. Requisitos

Para abordar con éxito los milestones expuestos anteriormente debemos cubrir los siguientes requisitos:

1. Preparación del hardware necesario.

a) Compra del hardware necesario:

- Raspberry Pi, se empezó por la Raspberry 2 y se ha adquirido posteriormente la 3.
- Cámara Picam.
- Ardupilot Mega junto con GPS.
- Avión de radiocontrol Bix3.
- Kit de motorización más potente.

b) Instalación de Raspbian y JdeRobot en Raspberry Pi.

c) Pruebas de vídeo en Raspberry Pi con cameraserver.

2. APM Server

a) Dar acceso a los sensores del APM y servir en forma de Pose3D y NavData:

- 1) Conectar con el APM
- 2) Leer los mensajes que envían sus sensores.
- 3) Implementar los interfaces Pose3D y NavData con esta información.
- 4) Servir a través de Ice todos los interfaces.

b) Dar acceso a instrucciones de actuación a través del interfaz mission.

- 1) Recibir a través de Ice un objeto de misión.
- 2) Construir los comandos MAVLink necesarios para que el APM sepa interpretar y realizar la misión.
- 3) Recibir los comandos de despegue y aterrizaje a través del interfaz Extra.
- 4) Construir los comandos MAVLink necesarios para que el APM sepa interpretarlos y añadirlos a la misión.

3. UAV Commander

- a) Recibir toda la información sensorial a partir de los interfaces Ice Pose3D y NavData.
- b) Funcionalidad de creación de misiones:
 - 1) Recuperar mapa georeferenciado de un servicio WMS.
 - 2) Capacidad de actuar sobre él para añadir puntos de misión.
 - 3) Añadir botones de despegue y aterrizaje que interactúen con el mapa.
 - 4) Borrado de misión actual.
 - 5) Envío de misión al APM.
- c) Funcionalidad de seguimiento de misiones:
 - 1) Pintar estela del avión en el mapa.
 - 2) Recuperar nuevo mapa con mayor zoom si se prevé la salida del actual mapa.
- d) Acceso a la información de actitud de forma visual.
- e) Acceso a las cámaras de abordo.

4. Experimentos en simulación.

- a) Montaje de máquina virtual para el simulador
- b) Instalación de SITL.
- c) Conectar APM server a SITL.
- d) Ejecución de plan de pruebas simuladas:
 - 1) Prueba de integración de todo el software.
 - 2) Prueba envío de misión con avión en vuelo.
 - 3) Prueba de envío de misión con despegue y varios waypoints.
 - 4) Prueba de envío de misión con despegue y aterrizaje.
 - 5) Prueba de autozoom forzando la salida del avión del mapa.

5. Experimentos en el avión real.

- a) Pruebas de envío recepción del sistema de radiofrecuencias.

- b) Pruebas de conexión con APM Server y UAV Commander.
- c) Ejecución de plan de pruebas:
 - 1) Pruebas de seguimiento del avión a través del UAV Commander.
 - 2) Prueba de envío de misión desde el avión en vuelo.

Cómo requisitos no funcionales debemos:

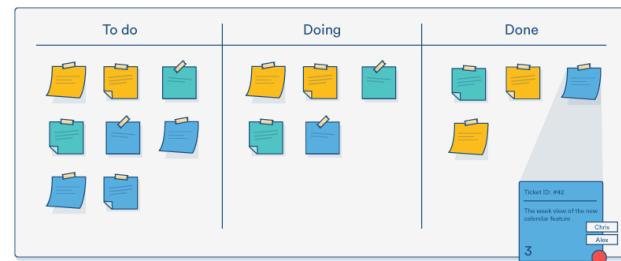
1. Ser multiplataforma.
2. Utilizar únicamente librerías de software libre.
3. Ser 100 % compatibles con los actuales interfaces JdeRobot.

2.3. Metodología y plan de trabajo

Este proyecto se ha abordado en con 2 metodologías de trabajo distintas que combinadas, la primera metodología de desarrolló aplicada es el desarrollo en espiral que se ha utilizado como metodología principal, y la segunda que se ha aplicado la metodología ágil Kanban, para un control de tareas y subtareas más eficiente.



(a) Representación gráfica del desarrollo en espiral.



(b) Representación de una pizarra kanban

El modelo de desarrollo en espiral define una serie de ciclos que se repiten en un bucle hasta el final del proyecto, dividiéndolo en varias subtareas más sencillas y estableciendo puntos de control al final de cada iteración en los que se evalúa el trabajo realizado y se enfocan las nuevas tareas para continuar. Esta metodología recibe su nombre por la forma de espiral que tiene su representación gráfica o diagrama de flujo, que podemos ver en la figura 2.1. En cada iteración se llevan a cabo las siguientes actividades: Determinar los objetivos, dividir en subobjetivos y fijar

requisitos. Analizar los riesgos y factores que impidan o dificulten el trabajo y las consecuencias negativas que este pueda ocasionar.

Para desarrollar las tareas especificadas en cada incremento, fijadas en cada reunión de seguimiento, se utilizó la metodología kanban. Esta metodología de desarrollo no es más que una adaptación de su versión industrial que surgió en Toyota. A finales de los años 40, Toyota empezó a optimizar sus procesos de ingeniería a partir del modelo que empleaban los supermercados para llenar los estantes. Los supermercados almacenan los productos suficientes para suprir la demanda del cliente, una práctica que optimiza el flujo entre el supermercado y el cliente. En su versión TIC ésta metodología se centra, al igual que su versión industrial, en el just in time y permite ver de una forma muy visual las tareas que hay en vuelo, desarrolladas, pendientes o bloqueadas pudiendo anticiparnos a cuellos de botella o bloqueos de forma sencilla. Esta metodología nos permite visualizar tareas que a priori no tienen relación pero se relacionan a un nivel mas profundo y agruparlas para optimizar el tiempo.

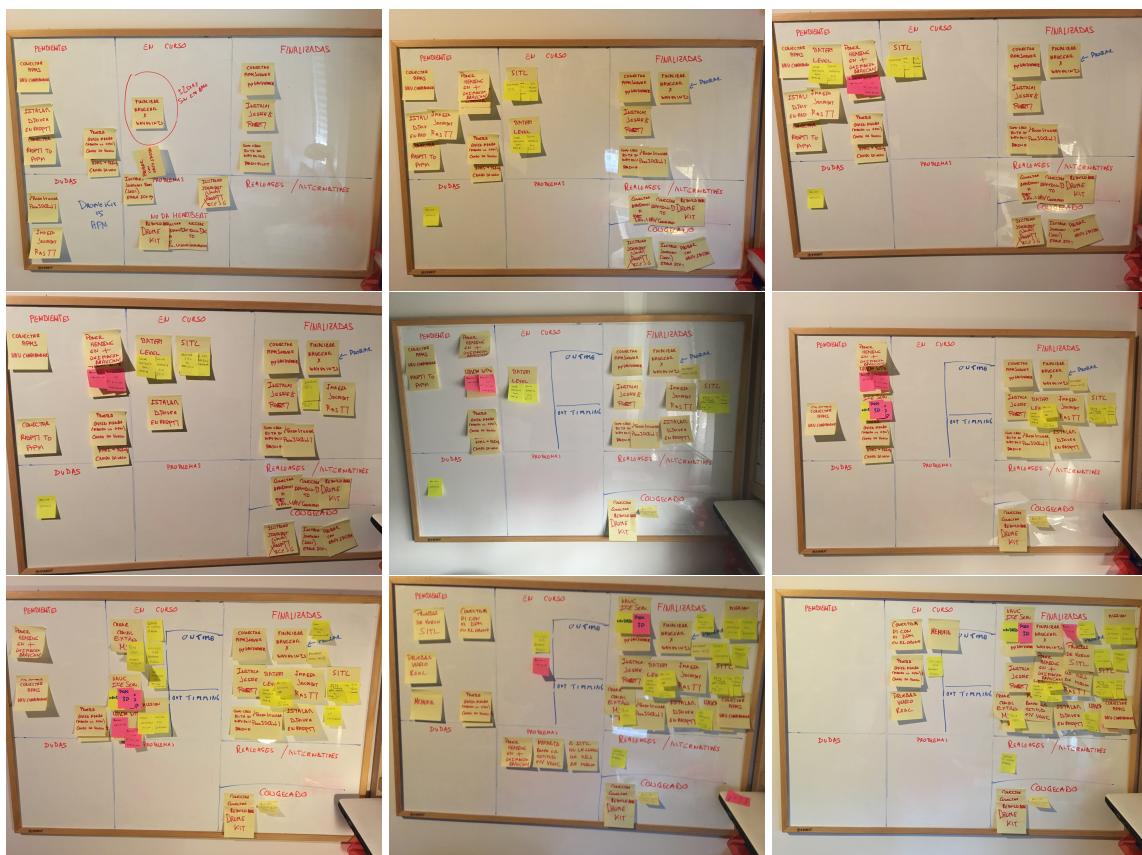


Figura 2.1: Evolución de nuestra

Durante el ciclo de vida del proyecto se han llevado a cabo reuniones semanales de seguimiento.

miento con el tutor. En ellas se evaluaban las tareas realizadas y se marcaba qué dirección tomar para la siguiente iteración o incremento. Si los puntos marcados en la anterior reunión no se habían alcanzado se ampliaba el plazo o se discutían otras vías para avanzar. En caso contrario se proponían nuevos subobjetivos.

Para apoyarnos en nuestro desarrollo hemos utilizado principalmente 4 herramientas:

- GitHub como forja y control de versiones. En el repositorio <https://github.com/RoboticsURJC-students/2014-pfc-JoseAntonio-Fernandez> se almacenan todos los desarrollos que son objetivo de éste PFC así como ésta memoria. También se encuentran subproductos de desarrollo que han ido surgiendo como apoyo o pruebas a los desarrollos principales.
- Contamos también con un mediawiki en JdeRobot dónde hemos actualizado periódicamente nuestros avances acompañados con explicaciones, vídeos e imágenes. Aquí se puede contemplar con mas detalle la construcción del UAV.
- Como apoyo principalmente al mediawiki dispusimos de una carpeta en el FTP de Jde-Robot hasta que colgamos los videos en Youtube.
- Youtube. Muchos de los vídeos del mediawiki han sido compartidos en youtube.com.

Capítulo 3

Infraestructura utilizada

3.1. Hardware

Este PFC se apoya principalmente en 2 piezas hardware:

- El avión a radio-control. Para este desarrollo hemos elegido el avión Bix3 distribuido por la empresa china www.hobbyking.com, hemos elegido este modelo por ser un avión muy estable debido principalmente a sus cualidades como velero y su alta superficie alar. Otro aspecto importante de la construcción del avión es que el propulsor no se encuentra en el frontal del avión lo que nos permitirá aprovechar al máximo esa zona pudiendo poner incluso una cámara frontal.



(a) Bix3



(b) Vista de cerca



(c) Bix3 en vuelo

Para poder cargar con el equipo necesario nos ha sido necesario cambiar el motor, el variador y las baterías de serie por otras de mayor rendimiento que nos permitan volar con tanta carga de pago.

- Una raspberry PI3 que es nuestro ordenador de abordo y en el que instalaremos la infraestructura necesaria para que podamos dotarle de inteligencia. Hemos elegido éste dispositivo debido al compromiso peso/potencia que nos otorga así como porque se trata de un hardware muy asequible y extendido. Conectado a esta PI3 irá una PiCam que nos permitira ver lo que el avión vea.

3.2. Placa estabilizadora

El estabilizador/piloto automático, para este desarrollo hemos optado por un Ardupilot Mega¹. Este dispositivo tiene como base una placa Arduino Mega a la que se le han incorporado, giróscopos y acelerómetros en 3 ejes para su estabilización y que trae de serie un receptor GPS con brújula. El kit que adquirimos incluye también Esta placa ataca directamente sobre los actuadores del avión (los servos y el motor) a través de señales PWM.



Figura 3.1: Placa estabilizadora ardupilot

Esta placa ha de flashearse con un firmware en función del tipo de aeronave que utilicemos como base, Arducopter para alas rotatorias o Ardupilot para alas fijas.

Esta y otras placas similares como PixHawnk ofrecen un interfaz que se apoya en comandos llamado MAVLink. A través de comandos MAVLink se puede acceder a los sensores, a los que incorpora la placa o a los que le añadamos a la misma como el GPS o sensores de velocidad del aire. A través de estos comandos se le puede también enviar órdenes al piloto automático quien las ejecutará más adelante trataremos el protocolo MAVLink en profundidad. Cabe sin embargo destacar ya en este punto no sólo que algunos de los comandos que mandemos tendrán distinto comportamiento en la placa en función del firmware escogido sino que hay set de comandos que no pueden ser utilizados en uno o en otro.

¹<http://www.ardupilot.co.uk/>

3.3. JdeRobot

JdeRobot es un framework desarrollado por el laboratorio de robótica de la Universidad Rey Juan Carlos, para el desarrollo de aplicaciones de robótica. Su última realease la 5.5 se liberó el 15 de Marzo de 2017 pudiendo ver los detalles de ésta en el github oficial². JdeRobot se compone de interfaces, drivers, utilidades y aplicaciones para el desarrollo de cualquier proyecto de robótica, se apoya en estos interfaces, algunos de ellos los veremos en profundidad a continuación, para interconectar entre sí todos los aplicativos del mismo y en Zeroc ICE para la comunicación entre ellos. Algunos de los driver mas importantes que contiene serían:

1. Camer(server. Se trata de un driver para enviar imágenes y video a través del interfaz camera
2. Gazebo(server. Driver desarrollado para conectar la herramienta de simulación Gazebo con JdeRobot y así poder simular los desarrollos.
3. MAVLinkServer. Desarrollado para intercomunicar JdeRobot con placas que utilicen el protocolo de comunicación MAVLink.
4. Ardrone_server. Driver que conecta el Parrot Ar-Drone a JdeRobot. Este driver escrito en c++ transforma el set de comandos AT del drone en interfaces y viceversa, implementa los interfaces camera, cmdvel, navdata, extra y pose3D y permite acceder a la actitud del drone así como a sus 2 cámaras. Sirve también datos como el nivel de la batería y permite grabar vídeo o tomar fotos.

Algunas de las aplicaciones desarrolladas más importantes serían:

1. Cameraview. Se trata de una aplicación desarrollada en c++ capaz de recibir vídeo a través del interfaz camera.
2. UAV viewer. Aplicación desarrollada como ground control de robots aéreos. Esta aplicación permite teleoperar cualquier tipo de robot aéreo y ofrece de forma visualmente atractiva datos como la actitud, velocidades lineales y angulares, ofrece también la posibilidad de visualizar videos servidos por el interfaz camera.

²<https://github.com/JdeRobot/JdeRobot/wiki/JdeRobot-5.5.0>

3.3.1. Interfaces

JdeRobot expone más de 30 interfaces pero en este capítulo explicaremos los que durante nuestro desarrollo hemos implementado:

- Pose3D. Utilizado para recoger los datos de actitud y la posición de la aeronave.

Pose3DData

```

{
    float x; /* x coord */
    float y; /* y coord */
    float z; /* z coord */
    float h; /* */
    float q0; /* qw */
    float q1; /* qx */
    float q2; /* qy */
    float q3; /* qz */
};
```

- Camera. Utilizado para servir imágenes.

```

class CameraDescription
{
    string name;
    string shortDescription;
    string streamingUri;
    float fdistx;
    float fdisty;
    float u0;
    float v0;
    float skew;
    float posx;
    float posy;
```

```
    float posz;  
    float foax;  
    float foay;  
    float foaz;  
    float roll;  
};
```

- NavData. Utilizado para servir datos secundarios de actuación como velocidades lineales o angulares o el estado de la batería.

```
class NavdataData  
{  
    int vehicle; //0-> ArDrone1, 1-> ArDrone2  
    int state; // landed, flying,...  
    float batteryPercent; //The remaing charge of baterry %  
  
    //Magnetometer Ardrone2.0  
    int magX;  
    int magY;  
    int magZ;  
  
    int pressure; //Barometer Ardrone2.0  
    int temp; //Temperature sensor Ardrone2.0  
    float windSpeed; //Estimated wind speed Ardrone2.0  
  
    float windAngle;  
    float windCompAngle;  
  
    float rotX; //rotation about the X axis  
    float rotY; //rotation about the Y axis  
    float rotZ; //rotation about the Z axis
```

```

int altd; //Estimated altitude (mm)

//linear velocities (mm/sec)
float vx;
float vy;
float vz;

//linear accelerations (unit: g) ¿Ardron2.0?
float ax;
float ay;
float az;

//Tags in Vision Detectoion
//Should be unsigned
int tagsCount;
arrayInt tagsType;
arrayInt tagsXc;
arrayInt tagsYc;
arrayInt tagsWidth;
arrayInt tagsHeight;
arrayFloat tagsOrientation;
arrayFloat tagsDistance;

float tm; //time stamp
};

```

- **Extra.** Utilizado principalmente para las órdenes de despegue y aterrizaje.

```

void land() - land drone.
void takeoff() - takeoff drone.
void reset()

```

```

void recordOnUsb(bool record)
void ledAnimation(int type, float duration, float req)
void flightAnimation(int type, float duration)
void flatTrim()
void toggleCam() - switch camera.

```

3.4. MAVLink

labelsec:mavlink

MAVLink siglas de Micro Air Vehicle Link es un protocolo de comunicación desarrollado para comunicar las placas estabilizadoras con piloto automático a los GCS o Ground control station, las aplicaciones desde las que se podía enviar misiones y seguir el cumplimiento de las mismas desde tierra. MAVLink se publicó en 2009 por Lorenz Meier, publicado bajo licencia LGPL aspira a convertirse en el protocolo standard en robótica aérea y se ha probado su funcionamiento en PX4, PIXHAWK, APM³ y Parrot AR.Drone.

Un ejemplo de comando MAVLink sería:

```

type GpsStatus struct {
    SatellitesVisible uint8      Número de satélites visibles
    SatellitePrn     [20]uint8   Id Global de cada satélite
    SatelliteUsed    [20]uint8   Lista con el uso de cada satélite
    SatelliteElevation [20]uint8  Elevaci\on, nos da el ángulo sobre el horizonte
    SatelliteAzimuth  [20]uint8  Direcci\on del satélite, 0: 0 grados, 255: 360 grados
    SatelliteSnr      [20]uint8   Señal/ruido de cada uno de los satélites
}

```

Este mensaje trae la información del enlace actual con el GPS y se envía periódicamente en ciclos que decidimos en parámetros de conexión con el dispositivo. Otro parámetro, esta vez vinculado a la actuación sería:

```

type MissionItem struct {
    Param1          float32    parámetro variable en funci\on del comando.
    Param2          float32    parámetro variable en funci\on del comando.

```

³Ardupilot Mega

```

Param3          float32    parámetro variable en función del comando.
Param4          float32    parámetro variable en función del comando.
X              float32    latitud
Y              float32    longitud
Z              float32    altitud
Seq             uint16    Número del ítem en la misión
Command         uint16    Tipo de comando de navegación.
TargetSystem    uint8     ID del sistema
TargetComponent uint8
Frame           uint8     Sistema de coordenadas que se utiliza.
Current          uint8    Misión actual no:0, si:1
Autocontinue    uint8    Autocontinuar al siguiente objeto de misión.

}

```

3.5. Python y PyQt5

Python es un lenguaje de programación interpretado y multiplataforma que nació en los años 80 en los países bajos con idea de hacer más legible el código. El lenguaje de programación que inicialmente se utilizaba principalmente para scripting, ha sabido crecer con los años y con la publicación de Python3 en 2009 ha recibido el impulso que necesitaba para ser hoy en día el 5º lenguaje más utilizado por encima de PHP, .NET y Javascript que baja hasta el 8º puesto según TIOBE en un estudio de Abril de 2017.

El porqué de utilizar Python, muy sencillo mantiene el carácter multiplataforma de JdeRobot, su código es simple y legible y trabaja muy bien con dependencias muy utilizadas en robótica como OpenCV.

Para nuestro desarrollo hemos utilizado PyQt5 para desarrollar el interfaz gráfico. PyQt5 es un binding de Qt5 en forma de librería python que nos permite acceder a toda la funcionalidad de Qt5. Qt, propiedad de Nokia, es un conjunto de librerías escritas en C++ para interfaces gráficas.

3.6. Mapas y Geo-referenciación

En nuestro desarrollo hemos tenido que trabajar con mapas geo-referenciados. Estos mapas, que tanto se han popularizado gracias a Google, son una herramienta imprescindible en robótica aérea si se quiere trabajar con largas distancias.

Un mapa geo-referenciado es aquel en el que conocemos o podemos calcular la posición en el planeta que representa cada pixel del mismo.

La forma mas común de obtener estos mapas geo-referenciado es a través de WMS, siglas de Web Map Service. Un WMS nos es mas que un servicio web que recibe como entrada unas coordenadas y una serie de parámetros y devuelve una imagen encuadrada en lo datos enviados. En nuestro desarrollo hemos utilizado 2 WMS el del IGN⁴ y el de Google, a continuación vamos a desgranar un WMS, el de PMOA del IGN.

El WMS PNOA requiere como entrada 4 atributos principales:

1. La posición GPS.
2. Bounding Box. El Bounding box son 2 puntos que corresponden con la posición GPS que queremos que sea el extremo inferior izquierdo de nuestra imagen y con el punto superior derecho de la misma.
3. Datum. El datum es el sistema de referencia o proyección de la tierra a utilizar. En el caso de IGN pese a que soporta varias utilizamos WGS84 que es el estandar.
4. Tamaño de la imagen, el tamaño que queremos que tenga la imagen obtenida.

El resultado un mapa del que conocemos el punto central, y los extremos inferior izquierdo y superior derecho y los pixeles que tiene a lo ancho y alto del mismo, un mapa geo-referenciado.

3.7. SITL

SITL siglas de Software in the loop es un simulador que te permite a cualquier programa que envíe o reciba comandos MAVLink ejecutar pruebas sin necesidad de tener ninguna placa estabilizadora y evitando la pérdida de la aeronave en caso de error del mismo. SITL se conecta con JSBSim, un simulador de vuelo de software libre para ejecutar el aspecto físico de la

⁴Instituto Geográfico Nacional de España

simulación y con MAVProxy para el envío de commandos y seguimiento de misiones. Se trata de una compilación en C++ de ardupilot y se podría asemejar a nuestro gazeboserver. SITL puede conectarse también con Gazebo o a FlightGear para hacer mas completa su simulación mostrando el vuelo en un entorno desarrollado para pruebas con elementos del mundo real.

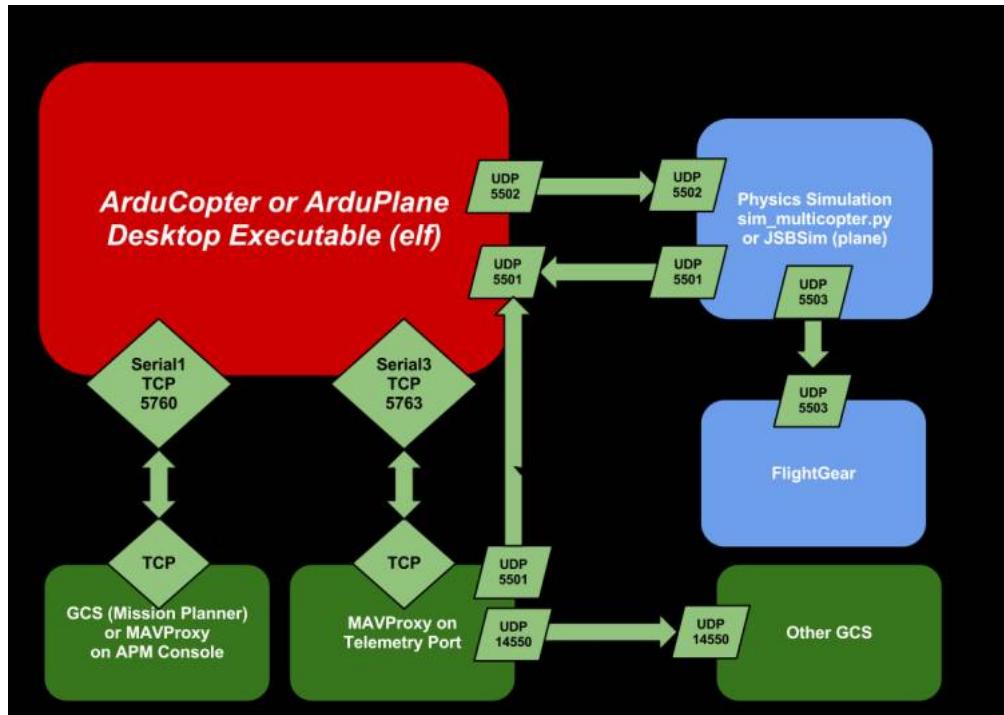


Figura 3.2: Arquitectura de SITL

Capítulo 4

APM Server

4.1. Análisis y diseño

De un análisis exhaustivo definimos los requerimientos hablados en el capítulo 2.1.2 y que serían a grandes rasgos:

- El driver debe ser capaz de conectar con dispositivos físicos de estabilización como APM 2.8 o PixHawnk así como al simulador SITL
- El driver debe acceder a los sensores y actuadores del robot aéreo, interpretarlos y servirlos en forma de interfaz.
- El driver debe ser capaz de recibir a través de interfaces JdeRobot interfaces que éste interprete y envíe a los actuadores del robot aéreo.

Para abordar este desarrollo vamos a definir 3 capas que pasamos a describir desde la más cercana al hardware hasta la más cercana a JdeRobot:

- Capa de comunicación con el dispositivo APM. Esta capa se encargará de la comunicación del driver con el dispositivo APM a través del protocolo de comunicación MavLink.
- Capa de negocio e interpretación. En esta capa el driver transformará los comandos MavLink y las interfaces JdeRobot interpretando la información en ambos sentidos y haciendo ésta legible en ambos sentidos.
- Capa de comunicación con JdeRobot. En ésta capa se expondrán los servicios Ice necesarios para la recepción y envío de los interfaces Ice que implementa.

4.2. Interfaces

4.3. Implementación

Capítulo 5

AUV Commander

5.1. Arquitectura general

figura 5.1.

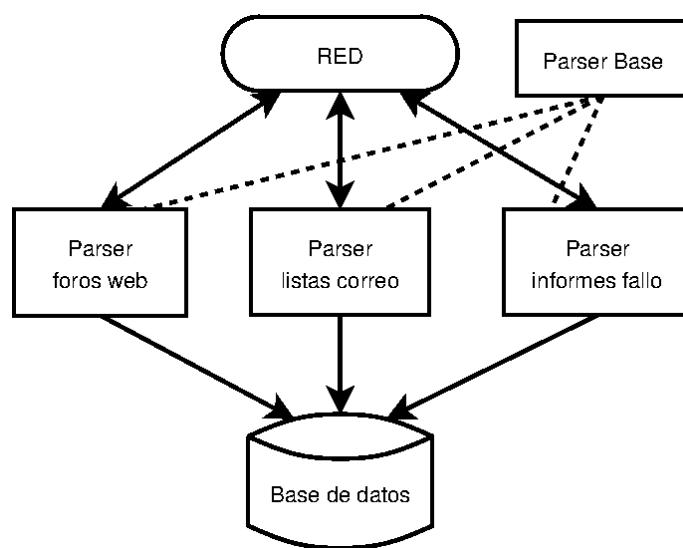


Figura 5.1: Estructura del parser básico

Capítulo 6

Experimentos

Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Consecución de objetivos

Esta sección es la sección espejo de las dos primeras del capítulo de objetivos, donde se planteaba el objetivo general y se elaboraban los específicos.

Es aquí donde hay que debatir qué se ha conseguido y qué no. Cuando algo no se ha conseguido, se ha de justificar, en términos de qué problemás se han encontrado y qué medidas se han tomado para mitigar esos problemás.

7.2. Aplicación de lo aprendido

Aquí viene lo que has aprendido durante el Grado/Máster y que has aplicado en el TFG/TFM. Una buena idea es poner las asignaturas más relacionadas y comentar en un párrafo los conocimientos y habilidades puestos en práctica.

1. a

2. b

7.3. Lecciones aprendidas

Aquí viene lo que has aprendido en el Trabajo Fin de Grado/Máster.

1. a

2. b

7.4. Trabajos futuros

Ningún software se termina, así que aquí vienen ideas y funcionalidades que estaría bien tener implementadas en el futuro.

Es un apartado que sirve para dar ideas de cara a futuros TFGs/TFMs.

7.5. Valoración personal

Finalmente (y de manera opcional), hay gente que se anima a dar su punto de vista sobre el proyecto, lo que ha aprendido, lo que le gustaría haber aprendido, las tecnologías utilizadas y demás.

Apéndice A

Manual de usuario

Bibliografía