

Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones

A. Barrientos, J. del Cerro, P. Gutiérrez, R. San Martín, A. Martínez, C. Rossi
Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid
antonio.barrientos@upm.es

Resumen: Los vehículos aéreos no tripulados o robots aéreos, permiten el desarrollo autónomo o semiautónomo de diferentes tipos de misiones que cubren desde los sectores de defensa y seguridad a los de agricultura o medio ambiente. El interés en su desarrollo, tanto a nivel de centros de investigación como de sectores de usuarios potenciales, ha aumentado de manera considerable en los últimos años. Este documento da una breve visión general de la tecnología implicada y de sus posibles aplicaciones, basada en la experiencia de 10 años en su desarrollo y uso por parte de los autores.

1. Introducción

Si bien desde hace algunas décadas las aeronaves no tripuladas han sido motivo de interés, en particular en el ámbito militar, no ha sido hasta los últimos años que han pasado de sistemas experimentales a equipos aptos para su uso profesional.

Su actual capacidad de desarrollar misiones reales se ha visto difundida no solo en los ámbitos restringidos de los investigadores, fabricantes o usuarios afines a esta tecnología, sino que también ha sido dada a conocer, por diferentes medios, a la opinión pública general, que comienza a conocer su existencia y utilidad.

Su uso exitoso en los últimos conflictos bélicos ha impulsado de manera notoria su interés desde el sector defensa, que fue el primer promotor de su desarrollo, arrastrando a la industria especializada en este sector a dedicar esfuerzos al perfeccionamiento de los elementos que forman parte de una aeronave no tripulada, como son la instrumentación para el guiado, navegación y control, las comunicaciones o los sistemas de alimentación, entre otros.

Junto al interés en aplicaciones militares, la ampliación de su uso a misiones civiles ha originado la aparición de un número apreciable de grupos de investigación y de pequeñas empresas dedicados al desarrollo de los subsistemas, a la integración de los mismos o a la puesta en marcha de aplicaciones y servicios basados en el uso de aeronaves no tripuladas.

La tecnología, en particular en el ámbito civil, es todavía incipiente. Su uso extendido debe vencer una serie importante de obstáculos, que van desde los estrictamente técnicos, hasta los puramente legales, pero la variedad e importancia de las aplicaciones potenciales, y el incremento en las inversiones y avances en los últimos años, hace razonable prever una notable y rápido progreso en el futuro inmediato.

Como referencia se citan las siguientes aplicaciones civiles para los UAV presentadas en un estudio de Frost and Sullivan en UAVworld.com:

- 2004-2007: Patrulla de fronteras y costas, Obtención de datos para cartografía. Lucha contra incendios, Monitorización de infraestructura energética
- 2008-2012: Apoyo a los agentes de la ley, Búsqueda y rescate, Control de tráfico marítimo, Supervisión de materiales peligrosos, Gestión de crisis
- 2013 en adelante: Sustitutos de satélites, Servicios de comunicaciones, Transporte, Apoyo a los agentes de la ley en zonas urbanas

El Grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid (DISAM) inició su investigación en UAV en el año 1977, centrandose inicialmente su actividad en el desarrollo del sistema de control (autopiloto) para un helicóptero autónomo. Tras 10 años de trabajos en esta área, cuenta en la actualidad con una flota de UAV que incluye helicópteros, quadrotors y dirigibles, con diferentes tipos de controladores.

En este documento se revisan algunos de los aspectos relativos a las aplicaciones y tecnologías de los UAV, en especial a las relativas a la concepción y desarrollo del sistema de control. Asimismo y dado que el uso real de los UAV en el ámbito civil es una actividad sin regular, se realizan algunos comentarios respecto a las buenas prácticas en su uso, que pueden servir de referencia.

2. Definiciones y Clasificación

Existe en la actualidad un espectro amplio de posibles aeronaves con capacidad de realizar misiones con cierto grado de autonomía. La novedad de su llegada a las aplicaciones civiles dificulta la existencia de un consenso en su definición, que cuestiona, en determinadas ocasiones, si un determinado sistema responde o no al concepto de UAV. Existe por ello cierta variedad de términos que, con mayor o menor acierto, son utilizados para referirse a este tipo de aeronaves.

Así en el pasado fueron denominados **ROA** ("Remotely Piloted Aircraft") o **UA** ("Unmanned Aircraft" o "Uninhabited Aircraft"). En la actualidad suele utilizarse el término **UAV** (Unmanned Aerial Vehicle) o más recientemente **UAS** ("Unmanned Aircraft System")

Estas denominaciones hacen referencia a la ausencia de tripulación en el vehículo, lo que no es necesariamente sinónimo de autonomía. Por ello, en las siguientes definiciones, se diferencian ambas posibilidades:

Se entiende por una **aeronave no tripulada (UAV: Unmanned Aerial Vehicle** o también **UAS: Unmanned Aircraft System** o **UAVS: Unmanned Aircraft Vehicle System**) a aquella que es capaz de realizar una misión sin necesidad de tener una tripulación embarcada. Debe entenderse que ésta condición no excluye la existencia de piloto, controlador de la misión u otros operadores, que pueden realizar su trabajo desde tierra. La extensión del concepto de vehículo a sistema, refleja que el UAVS precisa, no solo de la aeronave adecuadamente instrumentada, si no también de una estación en tierra, que complementa la instrumentación y capacidades embarcadas. Es conveniente considerar que

esta definición podría incluir algunos casos que quedan fuera del concepto subyacente de UAV. Así los globos aerostáticos, utilizados por ejemplo con fines meteorológicos, responden a la definición y sin embargo no son considerados como UAV dada su no controlabilidad. Lo mismo cabría decir de los misiles autopilotados o con control remoto.

Puesto que la definición anterior no excluye el telecontrol de la aeronave, cabe definir también **aeronave autónoma o sistema aéreo autónomo (AAS: Autonomous Aerial System)** como aquél capaz de desarrollar la misión sin necesidad de intervención humana. En este caso cabría la posibilidad de que la aeronave transportara personal, no dedicado a la misión, pero esta posibilidad, similar al piloto automático con el que cuentan la mayor parte de los aviones actuales, queda fuera del contexto en el que los sistemas considerados operan.

En los últimos años, la proyección de estos sistemas desde el sector militar al civil, ha propiciado que diferentes grupos de investigadores, procedentes del área de la robótica, hayan enfocado buena parte de sus esfuerzos a la investigación y desarrollo de éstos. Por este motivo, si bien normalmente fuera del ámbito aeronáutico, se utiliza en ocasiones el término de **Robot aéreo** entendiendo como tal a un sistema físico, capaz de desplazarse de manera autónoma o semiautónoma por el aire, para realizar diferentes misiones.

En lo que sigue se utilizará el término UAV de manera indistinta, considerando en todo caso que la aeronave no transporta personas, con ningún propósito y que puede ser total o parcialmente controlado desde la estación de tierra.

A la hora de establecer una clasificación de los UAV es posible atender a diferentes criterios. Tal vez el más simple sea el que se basa en el tipo de aeronave del UAV. De acuerdo a éste pueden distinguirse a aquellas de despegue vertical de las que no lo son, estando dentro de las primeras las de ala rotativa o hélice (helicópteros y quad-rotors entre otros), los de ala flexible (parapentes, ala delta) y los auto-sustentados (dirigibles y globos). Dentro de los de despegue no vertical, se encuentran los de ala fija (aeroplanos). La Figura 1, muestra los diferentes tipos de aeronaves utilizadas en los UAV., mientras que de la Figura 2 a la Figura 5.

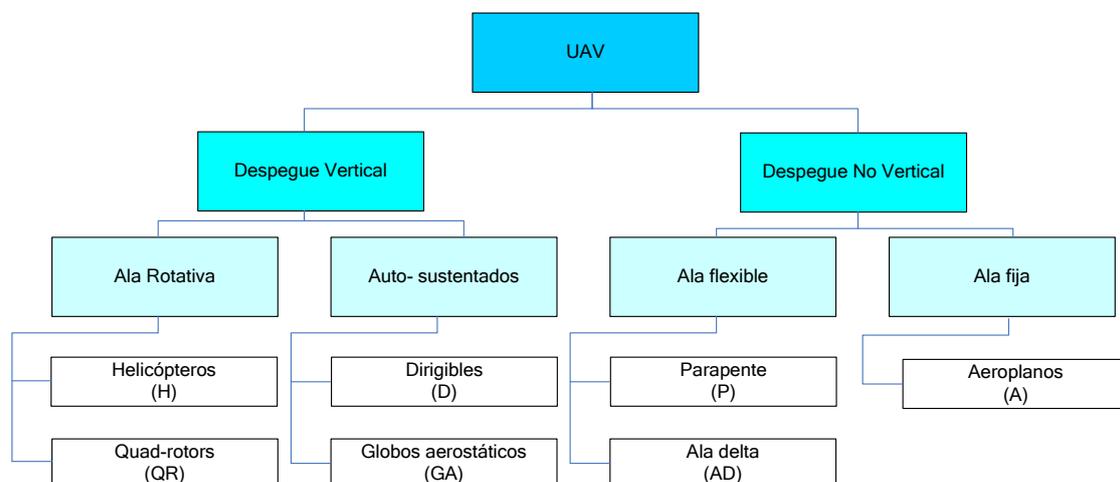


Figura 1. Algunos tipos de aeronaves utilizadas en los UAV

Las prestaciones y por lo tanto las aplicaciones varían mucho de un tipo de aeronave a otra, cubriendo cada uno de ellos un espectro de aplicabilidad diferente. La siguiente Tabla 1 recoge algunas de las características de las principales aeronaves utilizadas para UAV

Tabla 1. Características de los principales tipos de aeronaves para UAV

Característica	Helicópteros	Aeroplanos	Dirigibles	Quad-rotors
Capacidad de vuelo estacionario	***		****	***
Velocidad de desplazamiento	***	****	*	**
Maniobrabilidad	***	*	*	****
Autonomía de vuelo (tiempo)	**	***	****	*
Resistencia a perturbaciones externas (viento)	**	****	*	**
Auto Estabilidad	*	***	****	**
Capacidad de vuelos verticales	****	*	**	****
Capacidad de carga	***	****	*	**
Capacidad de vuelo en interiores	**	*	***	****
Techo de vuelo	**	****	***	*

Otros criterios de clasificación pueden hacer referencia a las capacidades de vuelo (alcance, altitud, autonomía). La Tabla 2 recoge la clasificación atendiendo a este criterio.



Figura 2 Dirigible autónomo (Cortesía Grupo de Robótica y Cibernética UPM)



Figura 3 Quad-Rotor autónomo (Cortesía Grupo de Robótica y Cibernética UPM)



Figura 4 Helicóptero autónomo (Cortesía Grupo de Robótica y Cibernética UPM)



Figura 5 Paracaídas “autónomo” (Cortesía Atair)

Tabla 2. Clasificación de los UAV por sus capacidades de vuelo (fuente AUVSI)

Categoría	Acrónimo	Alcance (km)	Altitud de vuelo (m)	Autonomía (horas)	Carga máxima en despegue (kg)	Tipo de aeronave
Micro	μ(Micro)	< 10	250	1	< 5	H,A,otros
Mini	Mini	< 10	150 a 300	< 2	< 30	H,A, P, Otros
Alcance cercano	CR	10 a 30	3.000	2 a 4	150	H,A,P,Otros
Alcance corto	SR	30 a 70	3.000	3 a 6	200	A,Otros
Alcance medio	MR	70 a 200	5.000	6 a 10	1.250	A, Otros
Altitud baja Penetración profunda	LADP	> 250	50 a 9.000	0,5 a 1	350	A
Autonomía media	MRE	> 500	8.000	10 a 18	1.250	A,H
Autonomía alta Altitud baja	LALE	> 500	3.000	> 24	< 30	A
Autonomía alta Altitud media	MALE	> 500	14.000	24 a 48	1.500	A,H
Autonomía alta Altitud alta	HALE	> 2000	20.000	24 a 48	12.000	A
Combate	UCAV	aprox. 1500	10.000	aprox. 2	10.000	H,A
Ofensivo	LETH	300	4.000	3 a 4	250	A
Señuelo	DEC	0 a 500	5.000	< 4	250	A,H
Estratosférico	STRATO	> 2000	Entre 20.000 y 30.000	> 48	ND disponible) (no	A
Exo-estratosférico	EXO	ND	> 30.000	ND	ND	A

Hay que indicar que esta clasificación abarca todas las aplicaciones de los UAV, tanto civiles como militares, siendo estas últimas la mayoría.

La mayor parte de los UAV actuales se encuentran dentro de la categoría Mini y MR, siendo, el vehículo más frecuentemente utilizado con diferencia el aeroplano.

Para las actuales aplicaciones civiles, el helicóptero presenta ventajas, cubriendo principalmente las categoría de micro o mini. La Figura 6 relaciona la carga máxima en despegue y altura máxima de vuelo para el mercado actual de helicópteros autónomos. En ella se observa como la mayoría de los sistemas se encuentran en las citadas categorías.

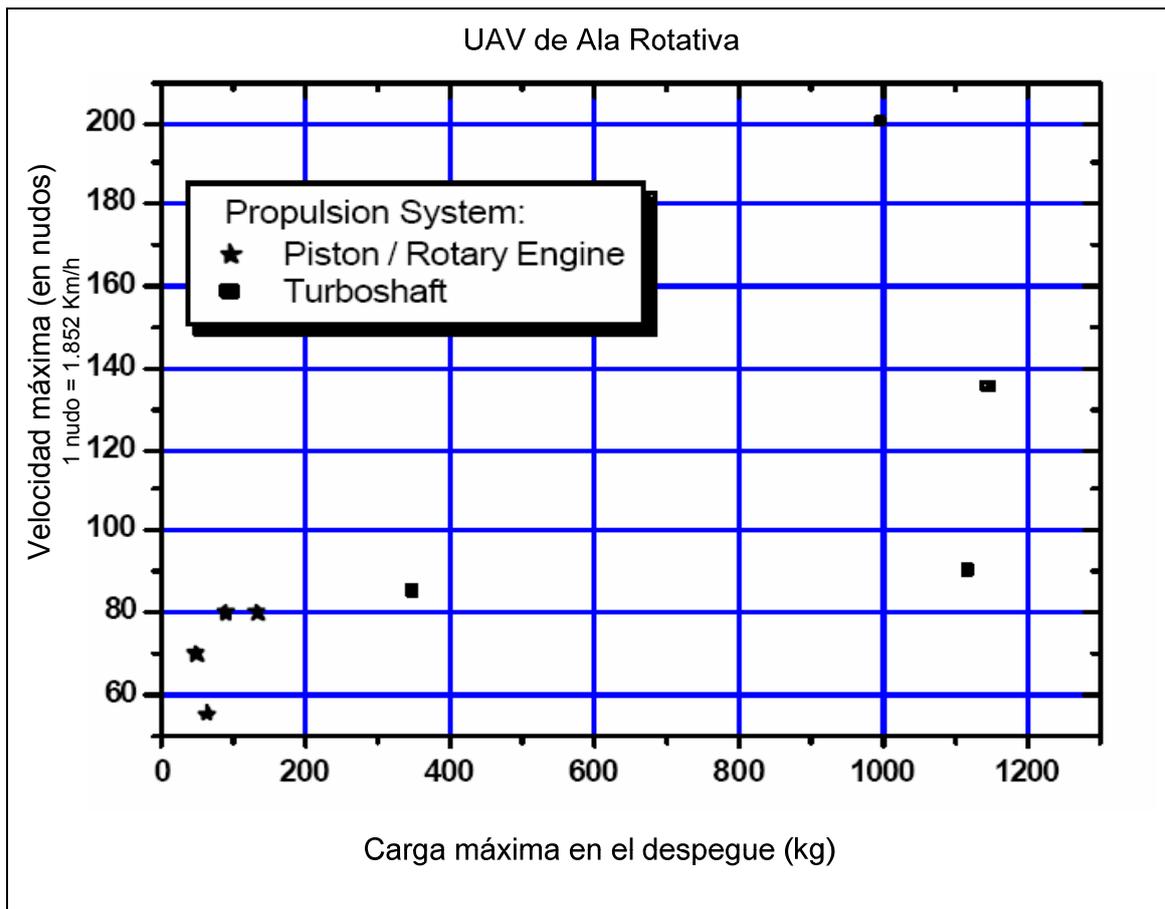


Figura 6 Velocidad máxima frente a carga máxima en el despegue para los helicópteros autónomos comercializados. (Fuente IABG)

Puede realizarse una clasificación más simple basada en la capacidad de carga útil, medida como capacidad de carga en el despegue (TOW). Según esta se tiene 4 clases de UAV (Tabla 3)

Tabla 3. Clasificación de los UAV según la máxima carga en el despegue

Clase de UAV	Máxima TOW (kg)	Rango	Típico alcance (km)	Típica altura máxima (m)
Clase 0	< 25	Cercano	15	300
Clase 1	25-500	Corto	15-150	4500
Clase 2	500-2000	Medio	150-1000	9000
Clase 3	>2000	Largo	>1000	>3000

Por último puede establecerse una clasificación atendiendo al nivel de autonomía

Tabla 4. Clasificación según el nivel de autonomía (Fuente IABG)

	Blanco móvil (Drone)	Nivel 1 No autónomo	Nivel 2 Maniobra autónoma	Nivel 3 Piloto inteligente limitado	Nivel 4 Piloto inteligente completo
Trayectoria de vuelo en 4 dimensiones	Preprogramada	Preplanificada, preprogramada	Preplanificada, preprogramada	Parcialmente autónomo Posibilidad de cálculo de ruta	Posibilidad de cálculo de ruta
Presencia de piloto	Por seguridad	Guiado y control continuo	Como Nivel 1	Supervisión continua. Guiado y control ocasional	Solo como respaldo
Posibilidad de actuación del piloto	Solo en despegue y aterrizaje	Manipulación	Como Nivel 1	POsible	Solo como respaldo
Necesidad de actuación del piloto	Solo en FTS	En todos los casos	Cuando no haya maniobra automática	Ocasionalmente	Solo como respaldo
Piloto automático	No	No	No	Limitado	Completo
Presencia de ATC	Supervisión	Contacto continuo con el operador	Contacto continuo con el operador	Contacto continuo con el operador y con el piloto automático	Contacto continuo con el piloto automático (con el operador como respaldo)
Intervención de ATC	Petición o activación del FTS	Por petición del operador	Por petición del operador	Por petición del operador o del piloto automáticos	Por petición del piloto automático (del operador por respaldo)

3. Aplicaciones civiles de los UAV

Si bien fue en el sector militar donde surgieron los UAV y el que ha impulsado su desarrollo, desde hace 15 años han surgido diferentes aplicaciones civiles, que han ampliado el interés, la investigación y el desarrollo de estos sistemas, a la vez que han originado nuevos requisitos en su operatividad, y generando un mayor espectro de sistemas.

Así mientras que en aplicaciones militares la mayor parte de los UAV existentes son del tipo aeroplano y responden a las categorías Mini en adelante, para aplicaciones civiles, la maniobrabilidad y capacidad de vuelo estacionario de los helicópteros ha hecho que sea este tipo de aeronave el más frecuente, aún estando en la actualidad limitada a la categoría micro

La Tabla 5 recoge las aplicaciones civiles de los UAV. En muchas de ellas las distancias necesarias entre la estación base y el vehículo, varía entre las decenas y las centenas de metros (en algunos casos de unos pocos Kilómetros). Además es frecuente que para realizar la misión encomendada, se precise vuelo a baja velocidad, incluso en ocasiones vuelo estacionario, lo que justifica el uso preferente de los helicópteros.

Debe considerarse que, si bien algunas de estas misiones pueden ser realizadas utilizando vehículos de radio control (RC) en lugar de UAV, el uso de

éstos es ventajoso, pues debe tenerse en cuenta, entre otras, las siguientes dificultades de uso del sistema RC.

- El vehículo puede ser muy inestable y difícil de controlar de manera manual, precisando de pilotos especializados.
- En algunas ocasiones no es posible el contacto visual entre piloto y aeronave (por distancia o por la existencia de obstáculos)
- La capacidad de atención del piloto es limitada, debiéndose dedicar normalmente de manera completa al vuelo de la aeronave no pudiendo prestar atención al entorno o a la misión.
- La distancia, los obstáculos u otros motivos, pueden originar la pérdida de comunicación entre la consola de control del piloto y el vehículo, con lo que de no disponer de cierto grado de autonomía, se produciría un accidente.

El uso de un UAV que, aún siendo telecontrolado incorpore la instrumentación necesaria para su estabilización automática y para su guiado de manera simple, con instrucciones de alto nivel (proporcionadas generalmente por un mando de tipo joystick), elimina o disminuye notablemente los inconvenientes anteriores.

De entre las aplicaciones de la Tabla 5, es a destacar el uso de helicópteros no tripulados (con telecontrol) para las tareas de fumigación. Esta aplicación cuenta en Japón con un número elevado (1.565 en el año 2001) de sistemas en funcionamiento, cubriendo el 10% de la extensión fumigada en Japón. El uso de helicópteros con control remoto, frente al de helicópteros convencionales, elimina los riesgos del piloto, permite vuelos a baja velocidad (20 km/h) y a menor altura (3 m) y evita la dependencia de un helicóptero tripulado con un costo muy superior al del no tripulado.

Otra aplicación civil en la que los UAV, en particular los helicópteros, están teniendo un éxito destacado es la filmografía. De nuevo se utilizan helicópteros telecontrolados, dotados en este caso del adecuado equipo cinematográfico para rodar escenas que, de otro modo, sería imposible o difícil de obtener. En la actualidad es aún predominante el uso de helicópteros de RC, sin las capacidades propias de un UAV, pero el abaratamiento de los costos y las demandas de los usuarios de estos sistemas, hace prever que en un futuro cercano se utilicen prioritariamente UAV en lugar de los sistemas de radio control.

Un conjunto amplio de aplicaciones coinciden en dotar al UAV de una cámara de vídeo y de los medios adecuados para capturar y/o transmitir la imagen a la estación base. Esta capacidad de adquirir imagen en un espectro visible o infrarrojo, para su procesamiento manual o automático en línea o en una fase posterior, permite abordar tareas como la inspección, la vigilancia o la búsqueda, de interés en múltiples campos.

Tabla 5. Aplicaciones civiles de los UAV (lista no exhaustiva)

Aplicación	Ejemplo	Tipo de aeronave más frecuente
Inspección de infraestructuras	Líneas eléctricas Oleoductos y Gaseoductos	H
Inspección de obra civil	Puentes, viaductos, presas	
Vigilancia de Fronteras	Inmigración ilegal Contrabando	H,A
Supervisión de Tráfico		H
Patrulla marítima	Inmigración ilegal Contrabando	A
Filmografía	Cine Reportaje fotográfico	H,A
Reconocimiento y toma de datos en desastres naturales	Huracanes Riadas Volcanes	H,A
Levantamiento de mapas	Topografía	A
Climatología	Toma de muestras y monitorización de partículas en Aerosol Monitorización de contaminación atmosférica	H,A,D
Agricultura	Aplicación de fumigantes Análisis del estrés hídrico Agricultura de precisión	H
Intervención en desastres no naturales	Radioactivos Vertidos contaminantes (Petróleo) Incendios forestales	H,A
Enlace de comunicaciones		A,H
Localización de recursos naturales	Pesca Minería	A,H
Transporte de paquetería		A
Búsqueda y rescate	Nafragios Accidentes en montaña o zonas de difícil acceso	H

4. Sistema de control de un UAV

La instrumentación necesaria para el desarrollo del control de un UAV y en particular los algoritmos destinados a su control, puede presentar diferencias dependiendo del tipo de aeronave que se utilice. Por este motivo y dado que como se ha indicado son los helicópteros los vehículos más polivalentes para

aplicaciones civiles, se va a describir a continuación el sistema de control de un helicóptero dotado de vuelo autónomo y semiautónomo.

Como se señaló en el apartado 2, en la actualidad tiende a utilizarse el concepto de UAVS, haciendo referencia a que el vehículo aéreo autónomo precisa para su funcionamiento de todo un sistema y no solo de la aeronave instrumentada. En concreto la instrumentación embarcada o segmento aire, debe verse complementada con la estación base o segmento tierra, debiéndose considerar las funcionalidades y características de ambos segmentos.

4.1. Segmento tierra y segmento aire

La operación de un UAV, precisa, aún en el caso de sistemas totalmente autónomos, de un puesto de mando en tierra dedicado, al menos, a la definición y supervisión de la misión que debe realizar el UAV.

De esta manera, el sistema de control del UAV, queda repartido en dos segmentos, denominados habitualmente segmento tierra y segmento aire, unidos mediante diferentes sistemas de comunicaciones.

Mientras determinadas funciones propias del control deben ser ejecutadas necesariamente en uno de los dos segmentos, otras pueden ser realizadas indistintamente por cualquiera de los dos, debiéndose sopesar las ventajas e inconvenientes que una distribución concreta de funciones conlleva.

Así, funciones como la definición de la misión y la supervisión del desarrollo de ésta, deben ser llevadas a cabo necesariamente en el segmento tierra, mientras que la adquisición de la información asociada a la misión y buena parte de los sensores que permiten conocer la actitud y posición del vehículo, corresponde a la instrumentación embarcada en el segmento aire.



Figura 7 Estación base (Segmento tierra) (Cortesía NRI)

Sin embargo otras funciones, entre las que cabe incluir la planificación de una determinada maniobra o incluso algunos de los lazos de control que regulan el vuelo del vehículo, pueden ejecutarse tanto en el segmento tierra como en el de aire, siempre que las características de las comunicaciones entre ambos segmentos así lo permita.

Por lo tanto, las funcionalidades que se realizan en cada uno de los segmentos pueden variar, dependiendo, fundamentalmente, del grado de autonomía que tenga el vehículo por la misión concreta

4.2. Arquitectura HW del sistema de control de un helicóptero autónomo

Para poder definir la arquitectura del sistema de control de un vehículo aéreo autónomo se deben especificar los requisitos y funcionalidades a los que el sistema debe responder.

Los helicóptero en general y los minihelicóptero en particular, son vehículos de por si inestables, con una dinámica rápida, sobre todo en actitud, lo que obliga a su continuo y preciso control, así como a considerar la necesidad de medidas que minimicen los riesgos de un posible fallo y las consecuencias de éste. El tipo de aplicaciones a las que se prestan, precisan de disponer de una capacidad de carga de pago de valor bajo-medio (de 2 a 20 Kg)

4.2.1. Requisitos del HW de control del segmento aire

El sistema de control embarcado está sujeto a las limitaciones impuestas por el vehículo que fundamentalmente están motivadas por la limitada capacidad de carga y por las vibraciones asociadas al giro del rotor del helicóptero.

4.2.1.1. Capacidad de carga

La capacidad de carga de un minihelicóptero autónomo debe ser repartida entre su carga de pago (la utilizada de manera específica para el desarrollo de la misión) y su sistema de control. Dependiendo de la misión a realizar por el UAV el peso de la carga de pago puede fluctuar entre 2 y 30 Kg al que debe ser añadido el peso del sistema de control, oscilando éste entre 500 gr y 3 Kgr. La Tabla 6 recoge de manera orientativa el peso de la carga de pago para diferentes misiones.

Tabla 6. Estimación del peso de carga de pago según aplicación

Aplicación	Peso de la carga de pago
Filmografía	5-10 Kg
Búsqueda de recursos naturales	15-30 Kg
Fumigación	30-50 Kg

La capacidad de carga dependerá fundamentalmente de la envergadura de las palas de su rotor principal y del motor que las accione. Existe una relación casi lineal entre la capacidad de carga y el peso total del helicóptero con un factor de escala de 0,5. Es decir, se precisa un helicóptero con un peso del doble de la carga útil que se desea transportar. Esta relación induce a considerar el aumento del tamaño del vehículo como método para aumentar la carga útil del

mismo. Sin embargo es más importante la influencia del diámetro del rotor sobre la capacidad de carga útil, siendo en este caso la relación entre ambos factores cuadrática.

Dado que el peso de la carga de pago depende exclusivamente de la misión a desarrollar, mientras que el peso del sistema de control es en gran medida independiente de ésta, los helicópteros pequeños aprovechan su capacidad de carga peor que los grandes.

En conclusión se puede establecer que, sobre todo en UAV basados en helicópteros de capacidad de carga pequeña (5 Kg) o media (15 Kg) es de gran importancia aligerar al máximo el peso del sistema de control, siendo valores orientativos los de 0,5 Kg y 3 kg respectivamente. Así mismo, para aumentar la capacidad de carga es aconsejable aumentar en lo posible la envergadura de las palas del rotor principal del UAV antes que optar por un helicóptero de mayor peso.

4.2.2. Robustez

A diferencia de los aeroplanos, que pueden mantenerse en vuelo aún sin control durante breves espacios de tiempo o los dirigibles que mantienen esta situación de manera ilimitada, la pérdida instantánea de control en un helicóptero tiene por lo general consecuencias irreversibles, siendo muy complicado recuperar su vuelo estable una vez que éste se ha perdido.

Debe considerarse que junto a los costes asociados a la pérdida o rotura del equipo, la caída del UAV sobre una zona despoblada o habitada, puede tener consecuencias muy graves. Por este motivo el sistema de control debería poder garantizar la disponibilidad permanente del mismo, evitando interrupciones totales o intermitentes de su función.

La disponibilidad permanente del sistema de control, está condicionada por diversos factores, como son el correcto funcionamiento del procesador de control (CPU y periferia) y de determinados instrumentos de uso imprescindible para el control de la estabilidad de UAV (como la unidad de medida inercial o IMU), así como por disponibilidad de la alimentación eléctrica a los mismos

La alimentación del sistema de control UAV es proporcionada habitualmente por baterías, con una autonomía que varía entre las decenas de minutos y una o dos horas. En algunos casos se utiliza un generador eléctrico conectado al propio motor del helicóptero para recargar o ayudar a las baterías.

En cualquier caso es importante monitorizar de manera permanente el nivel de carga de las baterías, notificando si es posible al segmento tierra éste valor y actuando mediante algún procedimiento automático preestablecido (por ejemplo retornar a un punto de aterrizaje definido).

En lo que respecta al procesador de control es necesario evaluar los motivos que pueden llevar a un mal funcionamiento del mismo, incorporando medidas para evitarlos o disminuirlos. La posibilidad de trabajar con un sistema redundante en la unidad de control solo se considera de manera excepcional en UAV de altas prestaciones, destinados a misiones muy críticas.

Como motivos de averías del sistema de control, además de los escasos pero posibles fallos que pueden presentarse en cualquier circuito electrónico, cabe considerar las siguientes:

- Vibraciones a las que se ve sometido el helicóptero como consecuencia del giro de su rotor.
- Descargas eléctricas asociadas al sistema de ignición del motor de combustión (bujías)
- Campos magnéticos generados por los imanes con que cuenta el sistema de encendido del motor o del generador en caso de que este exista,
- Temperatura elevada (Una ubicación desafortunada del sistema de control puede hacer que este se vea afectado por el calor generado por el motor de combustión)

En conclusión hay determinados elementos del sistema de control que son críticos para garantizar la estabilidad del vehículo por lo que se debe supervisar su funcionamiento y o dotarles de redundancia. Este es el caso concreto de la alimentación eléctrica y las medidas de actitud. Su fallo debe ser detectado y tratado en lo posible con procedimientos de emergencia. En los UAV de tamaño y precio más elevado, se utilizan sistemas redundantes en los procesadores de control e IMU, incluso algún modelo incorpora redundancia en el GPS.

4.2.3. Autonomía de vuelo

Se entiende por autonomía de vuelo el tiempo que el UAV puede permanecer en vuelo sin tener que tomar tierra por falta de combustible o alimentación eléctrica. De nuevo existe un compromiso entre autonomía de vuelo y capacidad de carga útil, pues un aumento del combustible transportado supone una disminución de la carga útil disponible.

Aun dependiendo de factores particulares de cada helicóptero (como son el tipo de motor, la aerodinámica, tipo de maniobras, carga a levantar, presencia de viento a favor o en contra) etc., puede establecerse que el consumo de combustible para un helicóptero de la categoría micro o mini UAV es del orden de 5 litros por hora de vuelo. De este modo es habitual que se pueda operar durante tiempos que oscilan entre 1 y 5 horas sin repostar gasolina.

Sin embargo, la limitación real en la autonomía de vuelo suele venir determinada por la duración de las baterías eléctricas, que si bien pueden ser recargadas mediante un generador, como se ha indicado anteriormente, raramente consiguen duraciones superiores a los 60 minutos.

Esta limitación del tiempo en que los UAV basados en helicópteros puede permanecer en el aire sin precisar reabasteciendo, debe ser muy tenida en cuenta en la planificación de la misión, limitando el tipo de misiones que pueden ser desarrolladas o el modo en que estas se llevan a la práctica.

4.2.4. Comunicaciones

Si bien se admite que los UAV puedan operar de manera totalmente autónoma, sin comunicación con el segmento tierra, habitualmente se hace uso de esta comunicación por diferentes motivos, que van desde la supervisión de la misión hasta el control directo del UAV en modo manual. Es relevante el conocer que buena parte de los sistemas comerciales, aún teniendo plena capacidad de vuelo autónomo, ejecutan rutinas de emergencia (típicamente retorno al lugar de despegue) cuando detectan que se pierde la comunicación con el segmento tierra, lo que pone de manifiesto la importancia que conceden a la conexión permanente con el segmento tierra. Por lo tanto, en casi todos los casos es preciso definir las prestaciones de esta comunicación en cuanto a alcance y ancho de banda.

Las misiones a realizar por los helicópteros autónomos pueden responder a misiones con o sin contacto visual con la estación tierra. De entre las primeras pueden considerarse la inspección de determinadas obras civiles (presas, puentes) o la fotografía o filmografía aérea, entre otras. De entre las que se desarrollan sin contacto visual se pueden citar la vigilancia o el levantamiento de mapas, toma de datos en desastres, naturales o provocados por el hombre (volcanes, contaminación radioactiva, etc.). En el caso de que la distancia permita el contacto visual, basta con enlaces radio de baja potencia, lo que con la tecnología actual se resuelve correctamente mediante conexiones WIFI acordes con el estándar 802.11 x, bien en conexión punto a punto o en TCP-IP.

Cuando se pretende llevar a cabo misiones de largo alcance (kilómetros) es preciso en recurrir a conexiones serie punto a punto, con antenas direccionales. Debe considerarse que la potencia de la emisora embarcada queda fuertemente limitada por la capacidad de transportar baterías del UAV. Esta circunstancia lleva a que los sistemas que pretenden operar con largas distancias entre el Segmento Tierra y el Aire utilicen sistemas de apuntamiento de las antenas del Segmento Tierra, lográndose así alcances de varias decenas de kilómetros, en visión directa.

4.2.5. Distribución de la carga.

La instalación de algunos sistemas de hardware a bordo es crítica, ya sea por el peso o por otros requerimientos específicos. Como antes se ha indicado, determinados elementos deben ser situados alejados de fuentes de calor (motor, escapes de gases) o de perturbaciones eléctricas o magnéticas.

Pero junto a esta consideración, es preciso lograr una distribución equilibrada de los pesos, de forma que el centro de gravedad del helicóptero no se vea desplazado demasiado del eje del rotor principal para no perder así las condiciones dinámicas del vehículo y evitar la aparición de inercias.

Algunos elementos como la IMU, el compás o la antena de GPS, están sometidas a ciertas restricciones en cuanto a su ubicación

4.3. Funcionalidades del segmento aire. Sub-sistemas

Una vez revisados los requisitos que debe satisfacer el sistema de control embarcado (segmento aire), se exponen a continuación las funcionalidades

que este debe cubrir. Estas funcionalidades son proporcionadas por los diversos subsistemas que lo componen. Estos subsistemas, en algunos casos, son por sí mismos sistemas comerciales cerrados, que mediante una interfase proporcionan el servicio para el que están destinados. Así ocurre por ejemplo con el sistema GPS, que mediante un protocolo determinado proporciona las coordenadas de posición y velocidad absolutas de su antena. Otros, por el contrario, son sistemas que deben ser diseñados de manera específica para el UAV. Por último algunos subsistemas admiten ambas opciones, como es el caso de la unidad de medida inercial, que en algunos UAV existentes es diseñada de manera específica para el UAV y en otros responde a un sistema comercializado con diferentes fines.

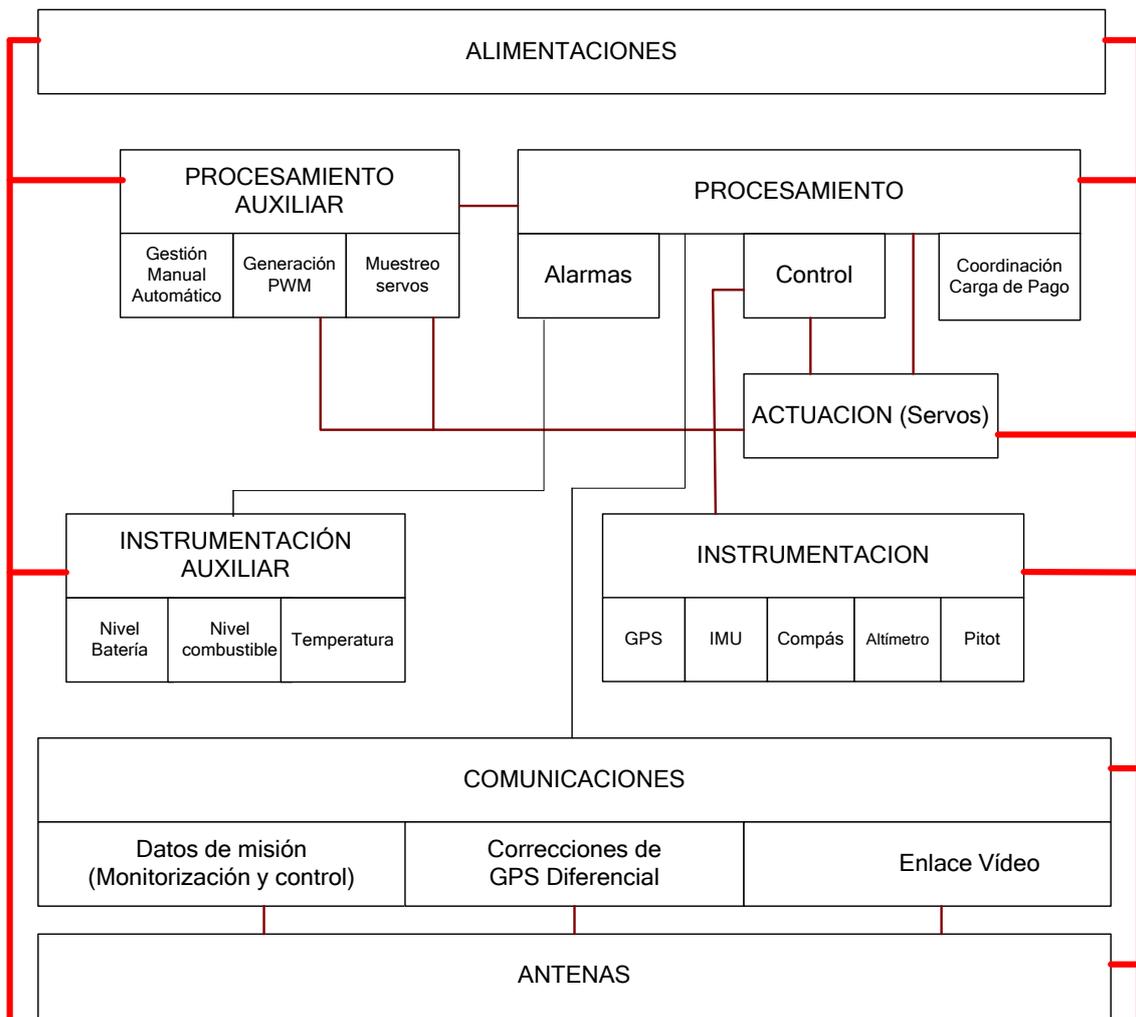


Figura 8. Subsistemas de control de un UAV

La Figura 8 representa los diversos subsistemas que pueden formar parte del sistema de control de un UAV. Se revisan a continuación las funcionalidades que deben cubrir cada uno de éstos, estando siempre sujetos a los requisitos anteriormente expuestos.

4.3.1. Alimentación

El sistema de alimentación está compuesto por baterías y ocasionalmente por un grupo generador (en el caso de UAV basados en aeroplanos y dirigibles, hay algunos desarrollos que utilizan energía fotovoltaica, mediante paneles solares extendidos sobre las alas del aeroplano o sobre el huso del dirigible). La rápida evolución de las tecnologías de las baterías ha originado cambios importantes en la duración y peso de estas.

Se debe considerar que se pueden necesitar alimentaciones a diferentes voltajes, lo que supone, bien la utilización de diferentes bloques de baterías, o bien el uso de fuentes de alimentación que generen las adecuadas tensiones. En cualquier caso es general el uso de baterías independientes para el sistema de control y los servos de los actuadores.

4.3.2. Instrumentación de vuelo

La instrumentación de vuelo es la responsable de obtener las medidas que permiten conocer el estado del UAV de la manera más precisa posible. Por lo general cada uno de las variables que definen el estado se mide con un sensor diferente, realizándose en ocasiones una fusión de varias medidas primitivas para dar una mejor estimación del estado real.

En concreto hay 2 grupos de variables que definen el estado. El primero incluya a las variables que definen la orientación espacial (actitud) con respecto a un sistema inercial y las velocidades y aceleraciones de ésta. El segundo incluye la posición, velocidad y aceleración absoluta del helicóptero, con respecto de un sistema de referencia. Las necesidades de precisión y frecuencia de cada una de ellos es diferente. Adicionalmente pueden ser necesaria información referente a la velocidad relativa con respecto del viento

La medida de la actitud se realiza mediante sensores inerciales basados en el uso combinado de acelerómetros y giróscopos y un adecuado tratamiento de las señales por ellos generados. Estos sistemas pueden desarrollarse especialmente para ser integrados en el sistema de control o pueden responder a equipos comerciales bajo las denominaciones de AHRS (Attitude and Heading Reference System), ISU (Inertial Sensor Unit) o IMU (Inertial Measure Unit), que a través de un puerto de comunicación proporcionan, a frecuencias comprendidas entre 100 y 200 Hz, información ya procesada y filtrada mediante la utilización de filtro de Kalman.

En cuanto la medida de la posición y la velocidad de desplazamiento se obtiene mediante el uso de sistemas de posicionamiento global por satélite (a día de hoy la única opción posible en España es la de la constelación GPS). La precisión de las medidas del GPS depende de múltiples factores, algunos compensables, como los derivados de factores atmosféricos, pudiéndose llegar a precisiones del orden del milímetro con el uso de correcciones diferenciales.

Junto a estos dos instrumentos se precisa incorporar un compás magnético que, en primer lugar, auxilia a la medida de la guiñada proporcionada por la Unidad de Medida Inercial corrigiendo los errores por derivas. Adicionalmente, mientras la IMU proporciona la medida del rumbo que sigue el helicóptero, el

compás proporciona información sobre la orientación del fuselaje respecto del norte, que en el caso del helicóptero no tiene porqué coincidir con el rumbo.

4.3.3. Instrumentación auxiliar (nivel batería, combustible, temperatura)

Como se ha indicado en el apartado de requisitos, determinadas funciones son críticas para garantizar el vuelo del UAV. De entre éstas, la disponibilidad de la alimentación eléctrica y de combustible es fácilmente monitorizable, por lo que se suele incluir elementos que proporcionen avisos cuando se alcancen valores por debajo de umbrales predefinidos. Estos avisos pueden ser comunicados a la estación de tierra, desde donde se deben tomar las acciones oportunas, o incluso desencadenar procedimientos de seguridad en el propio sistema embarcado, como el aterrizaje.

Menos frecuente es la medida de la temperatura del interior del alojamiento del sistema de control. Como se ha comentado, esta puede estar sometida a elevadas temperaturas motivadas por el propio funcionamiento de sus sistemas electrónicos y especialmente por el flujo de calor procedente del motor, Dada la sensibilidad de algunos de los instrumentos embarcados que pueden generar medidas erróneas o incluso dejar de funcionar ante temperaturas elevadas, es útil monitorizar la citada temperatura, para que de nuevo se tomen las acciones oportunas desde el puesto de mando en tierra o se disparen procedimientos automáticos de emergencia.

4.3.4. Comunicaciones

Segmento tierra y Segmento aire precisan mantener diferentes flujos de comunicación que pueden ser agrupados en:

- Comunicaciones de datos de monitorización y telemetría
- Comunicaciones de corrección GPS
- Comunicaciones de carga de pago

Dentro de las primeras se encuentran los datos de la misión a realizar por el UAV (punto de paso, velocidades, etc) o las órdenes directas de mando en caso de que se opte en determinados momentos por el control manual.

Los datos de la misión son comunicados mediante protocolos de aplicación propietario, soportados por un enlace radio bajo un estándar como puede ser RS232 o Ethernet.

Por su parte el control directo del vehículo, puede ejercerse desde un mando convencional de radio control o desde un mando gestionado por un ordenador de control. En el primer caso se utilizan los sistemas habituales de radio control, con un alcance del orden de 500 metros. En el segundo puede utilizarse el mismo enlace que el utilizado para enviar los datos de la misión.

Los datos de la instrumentación, o telemetría, son enviados desde el segmento aire al de tierra al objeto de supervisión, registro y en algunos casos control. Estos datos son transmitidos usando el mismo enlace que los de mando.

En el caso de que se utilice corrección diferencial para el GPS, esta es transmitida desde el segmento tierra por un canal particular que conecta la estación base con el GPS embarcado. Las correcciones diferenciales son transmitidas de acuerdo a determinados estándares (RTCA., RTCM, CMR).

Las comunicaciones de la carga de pago pueden, por lo general, ser incluidas dentro de los paquetes gestionados por el enlace utilizado para la especificación de la misión, salvo en el caso de que se requiera un ancho de banda importante, como es el caso de que la carga de pago incluya la adquisición de imágenes de vídeo. En esos casos pueden usarse enlaces específicos, enviando la señal de vídeo tal y como se adquiere para ser procesada en tierra.

4.3.5. Procesamiento

El procesamiento abarca todas las funciones de cálculo necesarias para el guiado, navegación y control del vehículo. Puesto que como se ha indicado en muchas ocasiones el procesamiento más complejo de la información de los sensores (IMU y GPS) se realiza mediante unidades especializadas incluidas en ellos mismos, las funciones que quedan por cubrir son las relativas al control, gestión de la misión, alarmas y eventualmente, la coordinación del movimiento del vehículo con las acciones de la carga de pago (por ejemplo la toma de muestras en coordenadas determinadas).

El examen de los UAV existentes muestra la existencia de dos tendencias, equilibradas, a la hora de definir el hardware del sistema de procesamiento:

Por un lado existen sistemas que utilizan unidades de procesamiento diseñadas específicamente para el UAV. Estas pueden contar con uno o varios microprocesadores, con redundancia doble o incluso triple. Presentan como principal ventaja una gran robustez desde el punto de vista mecánico y de software así como un reducido consumo eléctrico.

Alternativamente se pueden utilizar equipos de cálculo basados en uno o varios buses estándares (típicamente PC mono-tarjeta). En la actualidad es frecuente el uso del bus Pc104 que permite la expansión para agregar tarjetas funcionales (puertos de comunicaciones o entradas/salidas adicionales) así como fuentes de alimentación (está tendencia es coyuntural pudiendo variar con el mercado). La ventaja de ésta opción es la facilidad de desarrollo y de incorporación de periféricos especializados. En su contra presentan un mayor consumo y tamaño. Como se ha indicado es de gran importancia el considerar los problemas de robustez derivados de las temperaturas y tensiones mecánicas, debiéndose recurrir a equipos que cumplan con requerimientos muy estrictos en rangos de vibración y temperatura de funcionamiento.

4.3.6. Actuación

El sistema de actuación es el encargado de variar, mediante transmisiones y palancas, la orientación de las palas del rotor principal y del rotor de cola.

Por lo general se utilizan los denominados servos de radio control, que son unidades, dotadas de un motor de corriente continua, un potenciómetro para la realimentación interna y un reductor de salida. Regulan la orientación de su eje en función de una señal de mando en modulación de ancho de pulso (PWM). La señal PWM a los servos puede ser generada desde el procesador de control embarcado o, en aquellos momentos en que se esté controlando al UAV desde tierra, del demodulador, que demultiplexa y convierte la señal recibida por la emisora procedente del mando de tierra en las señales PWM para cada uno de los servos.

4.3.7. Otros sistemas auxiliares

Adicionalmente el sistema de control embarcado puede incorporar otras funcionalidades auxiliares. Entre estas se pueden incluir

- Muestreo de las consignas recibidas por los servos: Se trata de poder conocer y almacenar las referencias de movimiento dadas a los servos al objeto de un tratamiento con fines de modelado, identificación y control de la dinámica del vehículo.
- Generación de consignas PWM: Funciona a modo de un convertidor de la señal digital generada por el sistema de control, al formato PWM esperado por los servos
- Conmutación manual automático: El paso de un control manual a un control automático, y en menor medida el inverso, es en cualquier sistema de control un proceso arriesgado. En el caso de un helicóptero lo es aún más, pues su sensibilidad a las consignas de mando y dificultad de recuperar el control, una vez perdido éste, hacen que esta maniobra pueda tener consecuencias irreversibles. Por otro lado, pueden darse circunstancias de conflicto, en las que ambas vías de control (manual y automático) traten simultáneamente de fijar las consignas a los servos.

4.4. Requisitos del HW de control del segmento Tierra

El segmento tierra no está sometido a las limitaciones de peso y autonomía que tiene el segmento aire. No obstante y dado el uso exterior de los UAV, debe de ser fácilmente transportable, compacto y adecuado para el trabajo a la intemperie.

Considerando únicamente el uso civil, el segmento tierra está formado por uno o dos ordenadores, la emisora de radio control, un mando tipo joystick para el control manual del vehículo, la estación base GPS para el caso de se utilicen correcciones diferenciales y los enlaces de comunicaciones con el segmento aire.

Al objeto de facilitar el seguimiento de la misión es adecuado incluir capacidades gráficas y un suficiente nivel de procesamiento, que por lo general está suficientemente garantizado con los procesadores utilizados en los ordenadores personales.

Para aplicaciones militares, los requisitos de portabilidad (transportados por una persona) y robustez son mayores, encontrándose sistemas de diseño específico

4.5. Funcionalidades del segmento Tierra. Subsistemas

4.5.1. Alimentación

Salvo excepciones relacionadas con la portabilidad, la alimentación del segmento tierra puede ser resuelta con el uso de un grupo de generador y los adecuados adaptadores para alimentar a los diferentes subsistemas.

4.5.2. Interfase usuario

La interfase con el usuario debe permitir la definición de la misión, el seguimiento de la misma y la intervención en caso de necesidad, incluyéndose en esta última el control directo del vuelo mediante un mando manual.

La misión en sí se compone de una trayectoria o plan de vuelo a seguir por el vehículo, junto con las acciones que debe realizar la carga de pago. Generalmente ambos controles se ejercen y monitorizan de manera independiente, incluso mediante procesadores diferentes.

El plan de vuelo a seguir por el UAV se especifica habitualmente mediante la definición sobre cartografía digitalizada de los puntos de paso por los que se pretende que pase el UAV. No suele incluirse en esta definición detalles de la trayectoria, como la velocidad, el modo en que se deben enlazar los puntos de paso o la precisión con que se deben alcanzar. Estos aspectos quedan sometidos a parámetros internos del controlador.

La mayoría de los sistemas comerciales olvidan las necesidades de control de la carga de pago, que queda aislada del vuelo del UAV, de modo que no es inmediato conocer aspectos relativos al vuelo (como posición o altura) para disparar la toma de muestras o realizar las acciones asociadas a la misión. Por este motivo es interesante el desarrollo de sistemas de control del UAV que permitan la gestión integrada de la carga de pago o su sincronización con su controlador, así como de sistemas que permitan la definición de la misión de manera conjunta (plan de vuelo y carga de pago)

El seguimiento de la misión se realiza en base a las señales de telemetría (fundamentalmente la posición) y de los datos de la carga de pago (imagen de vídeo, medida de sensores, etc.) transmitidos por el segmento aire y habitualmente mostrados de manera integrada en una o varias pantallas.

En cuanto a la capacidad de intervención del operador sobre la misión, ésta puede realizarse mediante la redefinición de los puntos de paso o el control directo, pasando a modo manual. Habitualmente el control manual sigue estando auxiliado por el sistema de control, de modo que se facilita el pilotaje del helicóptero mediante un mando de tipo joystick en velocidad, quedando garantizada la estabilidad mediante los sistemas automáticos de control de actitud. Dado que este modo de control presupone el correcto funcionamiento del sistema de control embarcado, es conveniente considerar mantener operativo el control mediante la emisora de radio control que gobierne de manera directa los servos, al objeto de poder mantener el control del UAV aún en caso de avería del sistema de control.

4.5.3. Comunicaciones

Las comunicaciones entre los diferentes componentes del segmento tierra y aire se realiza con las mismas consideraciones que se hicieron en aquel, considerando en este caso que no existen las limitaciones de potencia derivadas de las restricciones de peso y espacio del segmento aire. De este modo pueden usarse antenas direccionales, que mediante sistemas de apuntamiento, consiguen mantener una comunicación de gran alcance.

4.5.4. Estación base para corrección Diferencial del GPS

En caso de ser necesario una precisión elevada en el control de posición del UAV (por debajo de la decena de metros) se hace necesario el disponer de correcciones que mejoren la calidad de la estimación de la posición del GPS. Las correcciones diferenciales tratan de compensar los errores que se ven influenciados por la zona en que se está operando, como son los errores de propagación por la atmósfera. Existen diferentes modos de obtener las correcciones que pueden ser suministradas bien por redes de estaciones comerciales o por estación base propietaria.

En el segundo caso se deberá disponer en el segmento tierra de una estación base consiste en un receptor GPS, de características que pueden ser idénticas al embarcado, y una emisora con su antena para transmitir las correcciones. Es de destacar que para que la corrección sea efectiva, la distancia entre estación base y UAV no debe ser elevada. Los límites de alcance habituales de las misiones que puede realizar un minihelicóptero autónomo (algunos kilómetros) suelen cumplir esta condición.

4.6. Arquitecturas SW del sistema de control de un UAV

Revisadas las características del HW de control de un minihelicóptero autónomo se aborda a continuación la arquitectura del SW dedicado al control del mismo. La dinámica de un minihelicóptero es compleja, intervienen en ella un gran número de variables fuertemente acopladas, relacionadas mediante parámetros que cambian con las condiciones y tipo de vuelo.

Lógicamente los sistemas comerciales se reservan los detalles de cómo resuelven el control del UAV, dando solo en algunos casos información generalista como la relativa a la técnica de control que utilizan. Se describe a continuación una posible arquitectura de control estructurada por capas dedicadas al control de los actuadores, de la actitud, velocidad, de trayectoria y de misión.

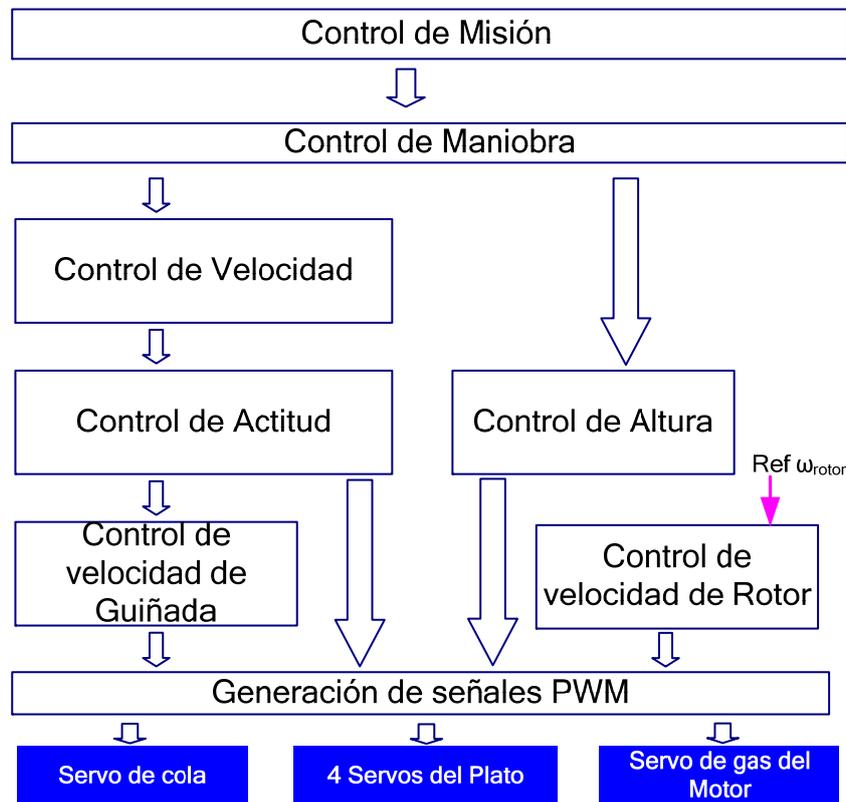


Figura 9 Arquitectura de control de un helicóptero autónomo

En la Figura 9 se muestra esta arquitectura, estructurada en 5 niveles. El nivel más bajo está compuesto por los servomotores del rotor principal, rotor de cola y gas del motor, mientras que el nivel más alto está constituido por el control de misión. Hay que hacer notar que el sistema de actuación está basado en servomotores comerciales, comúnmente utilizados en aeromodelismo, que reciben consignas en formato PWM.

4.6.1. Controles de Guiñada y Velocidad del rotor principal

El control de guiñada está encargado de mantener una velocidad angular de guiñada, siguiendo la referencia generada por el nivel de control superior, o por el uso de una de las palancas manejadas por el piloto, en caso de vuelo manual. Utiliza para ello un giróscopo, situado cerca de la cola del helicóptero. La Figura 10 ilustra su arquitectura.

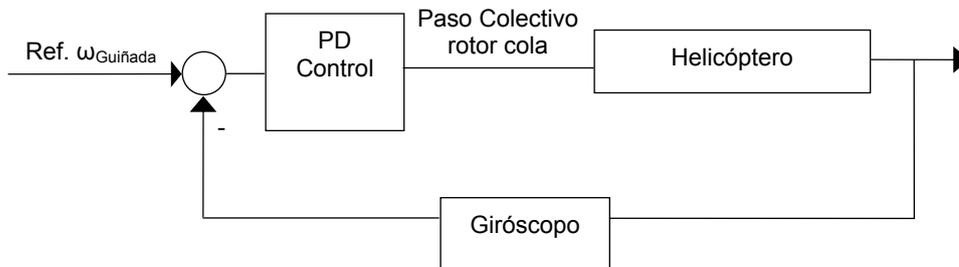


Figura 10. Control de velocidad de guiñada.

El control de velocidad del rotor principal utiliza la información de la velocidad de giro de éste, obtenida mediante tacómetro y actúa sobre el servo del gas con objeto de mantener constante la velocidad de giro de los dos rotores (principal y cola).

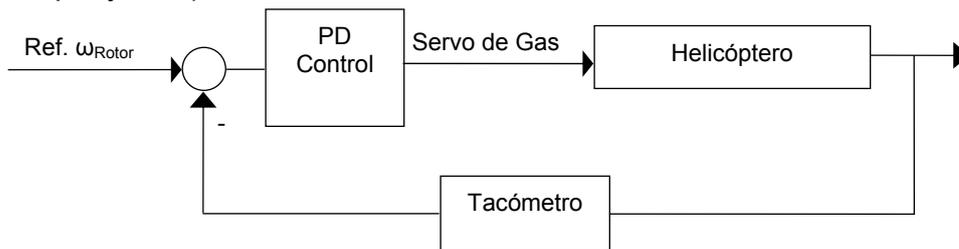


Figura 11. Control de velocidad de rotación.

4.6.2. Control de actitud.

El controlador de actitud tiene por objeto orientar al helicóptero en el espacio según le indican sus referencias. En general, se puede desacoplar el ángulo de guiñada de los ángulos de alabeo y cabeceo, pudiendo utilizarse una arquitectura como la mostrada en la Figura 12

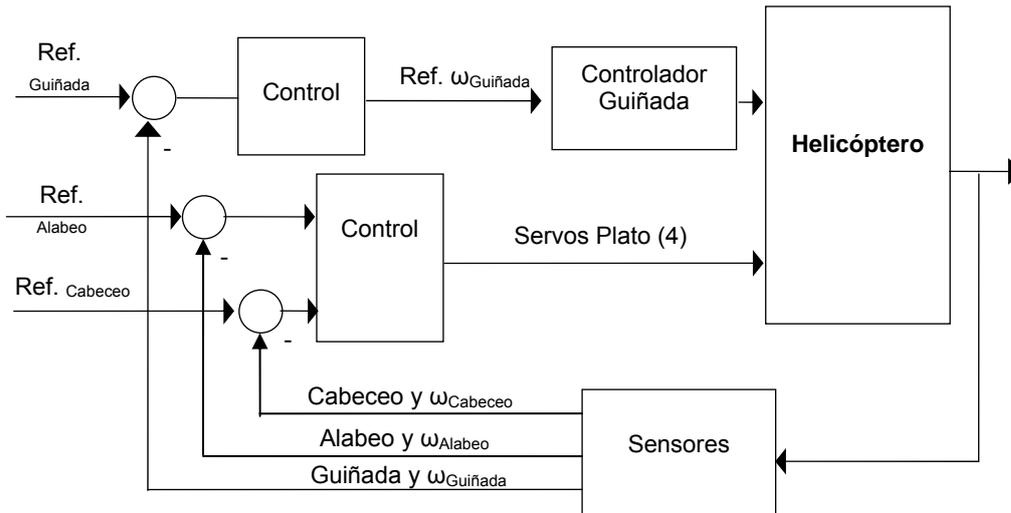


Figura 12. Control de Actitud.

4.6.3. Control de velocidad.

Mientras que la velocidad de translación del helicóptero se controla con el denominado paso cíclico (que varía con la posición angular de la pala), la velocidad de ascensión se controla mediante el paso colectivo (que define el ángulo de ataque medio de las palas del rotor principal). Por ello es razonable considerar desacoplado el control de la velocidad de avance del de la velocidad vertical, resultando el esquema de control mostrado en la Figura 13.

4.6.4. Control de maniobras.

El control de maniobra tiene por objeto proporcionar comandos de velocidad que consigan que la evolución espacial del UAV siga una determinada trayectoria. La Figura 14 muestra el correspondiente esquema de control. Este control combina el error de posición con el perfil de velocidad deseado (especificación de una trayectoria) para generar las referencias de velocidad y rumbo.

En las maniobras que no se demanda un control de posición, como por ejemplo la navegación según rumbo y tiempo, no se tiene en cuenta el error de posición, pues se entiende que el objetivo en este caso es minimizar el error de velocidad.

A modo ilustrativo, algunos de los tipos de maniobras que se pueden utilizar son:

- Vuelo hacia un punto sin control de rumbo o velocidad.
- Vuelos en un tiempo determinado con una velocidad y rumbo dados
- Vuelo estacionario sobre un punto.
- Vuelos en línea recta o circular.
- Fijar el helicóptero en una posición dada

Se hace notar que este tipo de control no es frecuente en los sistemas comerciales, que se limitan

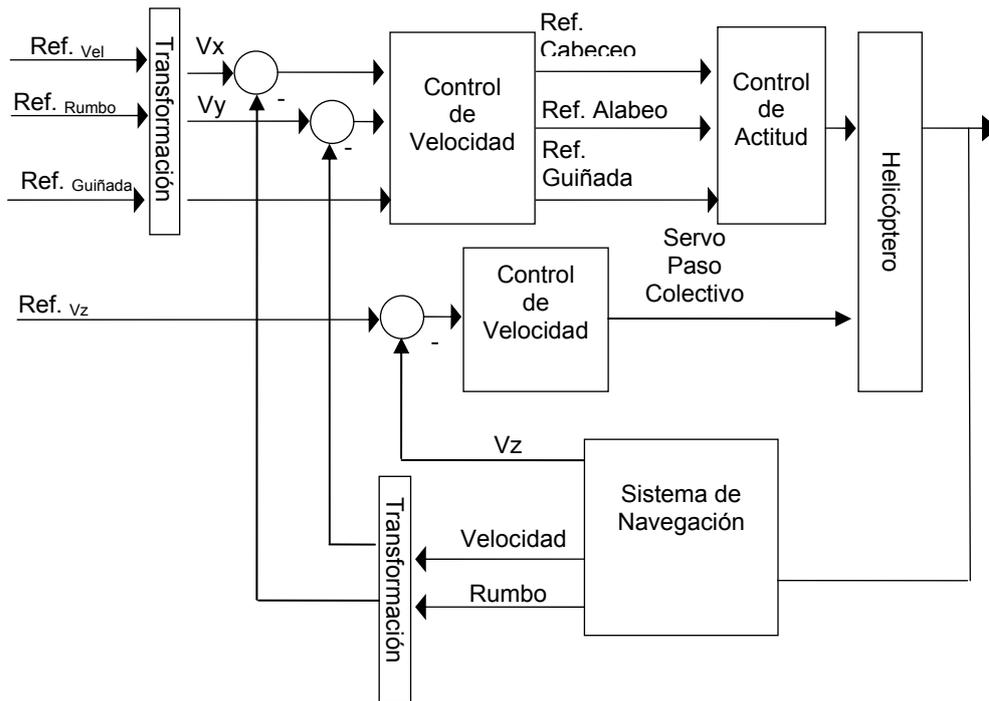


Figura 13. Control de Velocidad.

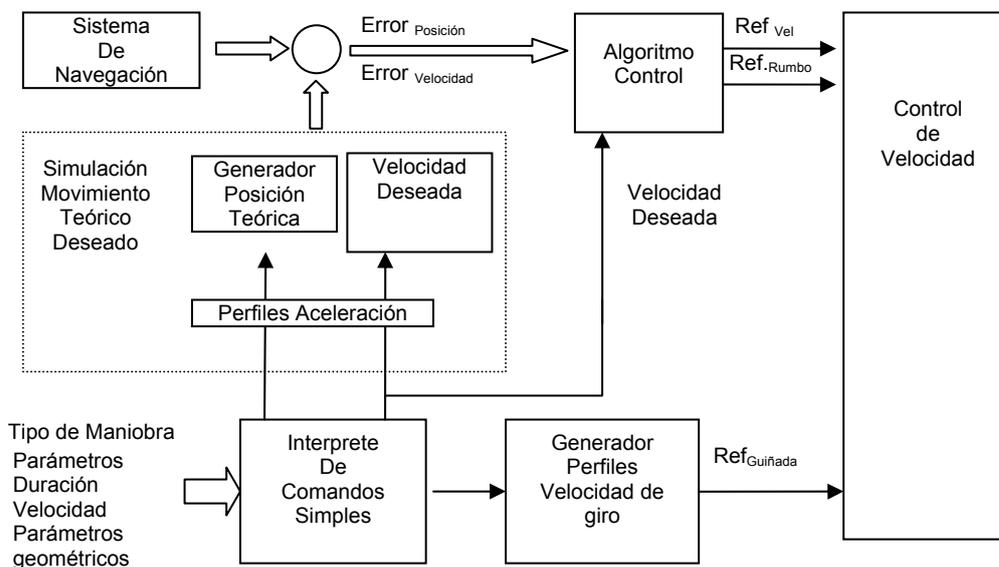


Figura 14. Control de Maniobra.

4.6.5. Control de misión.

En este nivel de control se detalla la misión a realizar por el UAV con el apoyo de herramientas gráficas GIS, que permiten visualizar el mapa de la misión real en 2D o 3D mediante la utilización de modelos digitales del terreno. Además debe contemplarse la posibilidad de modificar la misión una vez que está en ejecución. Junto con la especificación de la misión mediante puntos de paso, otros tipos de comandos que se pueden dar son

- Sobrevolar un punto (en el caso de un helicóptero se contempla el vuelo estacionario sobre el punto)
- Trayectoria predefinida (vuelos en zigzag para barrer zonas, en círculo, en línea recta).
- Aterrizaje o despegue.
- Retorno a un punto de referencia

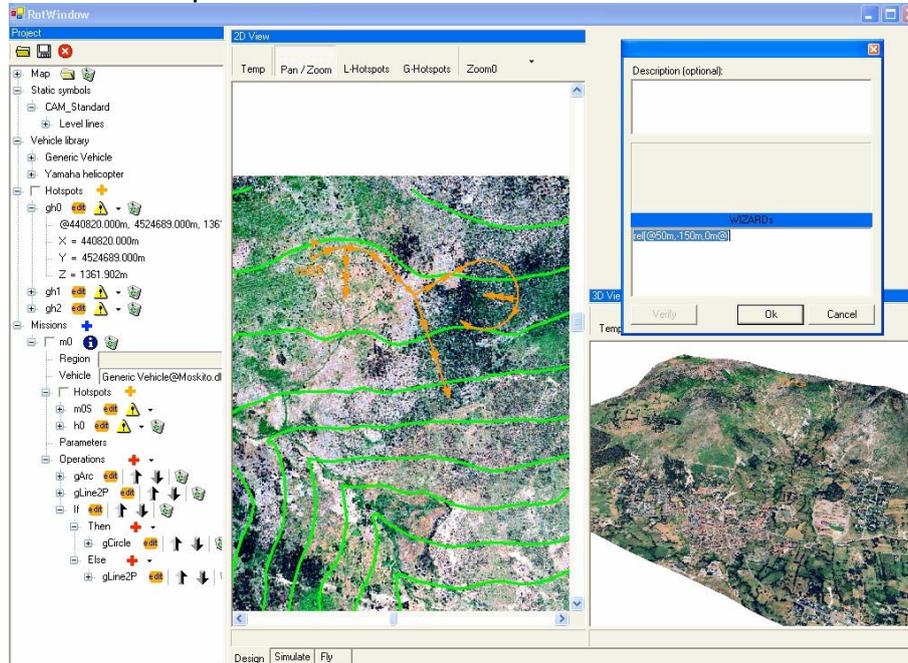


Figura 15. Control de Maniobra. (Cortesía Grupo de Robótica y Cibernética UPM)

El control de misión puede realizar una evaluación previa de la viabilidad de la misión, tanto desde el punto de vista del vehículo (autonomía, capacidad de realizar las maniobras pedidas, etc.) como del entorno (colisiones).

Habitualmente el controlador de la misión del UAV queda desacoplado del control de la carga de pago. Es no obstante deseable que ambas definiciones, la del vuelo del UAV y la de la misión, se hicieran de manera conjunta.

La Figura 15 muestra la interfase del planificador de misión en la que mediante el uso de herramientas gráficas interactivas se define la misión a realizar por el UAV.

5. Aspectos legales

La aplicación de los UAV en misiones civiles, supone el utilizar un espacio aéreo, cuyo uso está muy regulado y controlado para los vuelos tripulados. Además, la necesidad en algún tipo de misión de sobrevolar zonas habitadas, obliga a dotar a los UAV de una serie de medidas de seguridad que hasta la fecha no están definidas.

El control de tráfico aéreo (Air Traffic Control “ATC”), que se aplica a los vuelos civiles tripulados, pretende ordenar el tráfico de aeronaves con el máximo rendimiento, garantizando los adecuados niveles de seguridad. La aplicación de ésta control a los UAV precisa superar ciertos aspectos técnicos y normativos, que en el momento actual, están aún en fase de definición por las diversas autoridades internacionales. Por lo tanto en el momento actual, el uso de UAV para cualquier actividad civil es, cuanto menos, alegal.

Puesto que buena parte de los helicópteros autónomos para uso civil utilizan equipos de radio control (RC) dotados de autopiloto, conviene conocer que recomendaciones de uso son aplicables a estos sistemas. En este sentido, la FAA (EEUU) publicó en 1981 la circular AC91-57, donde se dan sugerencias para disminuir los peligros en la operación de aeronaves a escala. En ella se establecen ciertas recomendaciones, que de manera sintética se recogen a continuación:

- Volar en zonas suficientemente alejadas de zonas habitadas. Evitando zonas donde el ruido pueda ser motivo de molestias (colegios, hospitales, etc.)
- No volar con “espectadores” hasta que el vuelo del vehículo esté suficientemente probado.
- No volar por encima de 125 m. sobre el suelo
- Cuando se vuele a menos de 5 Km de un aeropuerto, notificarlo a las autoridades de control del tráfico aéreo del aeropuerto
- Evitar volar en las proximidades de aeronaves reales. Si es posible disponer observadores que vigilen esta situación

Una primera aproximación, propuesta por la UAV Task Force (grupo de trabajo organizado por JAA/Eurocontrol) plantea tomar como referencia los principios y restricciones aplicados a los aeroplanos ultraligeros.

Tomando éstos como punto de partida, la UAV-TF, propone una serie de medidas aplicables, solo a los que denomina “UAV ligeros”, siendo estos los que cumplen las características indicadas en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de los UAV ligeros (UAV-TF)

Máxima carga en despegue	Velocidad máxima	Alcance máximo de operación (distancia al puesto de mando)	Altura máxima
150 Kg	130 Km/h	500 m	125 m

La elección de estos límites en la aplicación de las medidas propuestas se justifica de la siguiente manera:

- **Carga máxima en despegue:** La competencia para la regulación de aeronaves con capacidad de carga en despegue inferior a los 150 Kg. corresponde a las autoridades nacionales y no a los organismos internacionales, quedando por ello fuera del alcance de esta propuesta de regulación.
- **Velocidad máxima:** Afecta, junto a la masa, a la máxima energía cinética del vehículo, relacionada directamente con los posibles daños originados por un impacto. Asimismo, junto a la distancia máxima al puesto de mando, afecta a la capacidad del piloto de poder supervisar el vuelo y actuar en caso necesario.
- **Alcance máximo de operación:** garantiza la capacidad del piloto de mantener contacto visual y así poder supervisar el vuelo.
- El límite en la **altura máxima** trata de disminuir el riesgo de colisión con el tráfico aéreo tripulado.

En la Tabla 8, se resume la propuesta del UAV – Task Force para la regulación en el uso de los UAV ligeros. A falta de legislación, su uso voluntario responde a una buena práctica en el uso de los UAV ligeros.

Tabla 8. Extracto propuesta regulación de uso de UAV ligeros (UAV-TF)

Aplicabilidad	Se aplica a vehículos que: a) Realicen operaciones aéreas sin tripulación b) No precisen certificados de navegabilidad por parte de la legislación nacional o extranacional. c) La carga máxima de despegue sea inferior a 150 Kg d) La velocidad máxima sea de 130 Km/h (70 nudos) e) La energía cinética en un impacto sea inferior a 95 KJ (considerando el máximo entre impacto a máxima velocidad e impacto por caída libre desde 125 m
Inspección	Se debe permitir la inspección por parte de la autoridad competente y proporcionar evidencias satisfactorias de que el vehículo responde a la categoría de UAV ligero
Operaciones peligrosas	a) No se debe operar un UAV de modo que cree peligro a otras personas o al mismo piloto b) No se debe permitir la caída de objetos desde el UAV, que causen peligro a personas o bienes c) No se deben realizar maniobras acrobáticas
Operación diurna	Se deberá operar solo entre la hora de salida y puesta del sol y siempre que las condiciones climatológicas permitan que el piloto pueda evitar posibles colisiones.
Operación cerca de aeronaves	Se debe mantener la vigilancia, al objeto de detectar y poder evitar posibles colisiones con otras aeronaves No se debe operar el UAV de modo que origine una colisión con otra aeronave No se debe superar la altura de vuelo de 400 pies (125 m)
Operación cerca de personas o propiedades	Durante su uso, el UAV no deberá de acercarse a menos de: a) 150 m de zonas habitadas b) 100 m de personas o bienes que no sean parte de la operación En el despegue y aterrizaje no podrá haber personas, a excepción del piloto, a menos de 50 m Se debe fijar una distancia de seguridad para operar en las cercanías de un objeto o instalación que origine una situación de riesgo ante un impacto (depósitos de combustible por ejemplo) No se debe utilizar un UAV en exhibiciones o demostraciones públicas, salvo si se cuenta con un permiso específico.
Operación en determinadas áreas	No se debe operar el UAV en áreas controladas, prohibidas o restringidas (global o temporalmente), salvo permiso del organismo regulador (ATC)
Operación bajo contacto visual	Siempre se debe operar con contacto visual directo entre estación tierra (piloto) y UAV
Sistemas de emergencia	El UAV debe estar dotado de un sistema de finalización del vuelo ante emergencia (Flight Termination System FTS) que haga terminar el vuelo de manera inmediata cuando se detecte un fallo en el sistema de control o en las comunicaciones con el segmento tierra. Antes de comenzar la operación se debe verificar el funcionamiento de este sistema

6. Bibliografía

- [1] Aguirre, I., “Modelado y control de un minihelicóptero en vuelo estacionario”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Madrid, 2001
- [2] Aguirre, I.; Del Cerro, J.; Barrientos, A. Attitude control of a minihelicopter in hover Using different types of control. *CARS & FOF 2004*
- [3] Barrientos A, , Aguirre I, del Cerro J, Portero P; “LQG Versus PID control of a unmanned aerial vehicle”; *10th International Conference on Advanced Robotics. ICAR 2001*, Budapest Hungría 2001
- [4] Barrientos A., San Martin R., Gutiérrez P., del Cerro J., “Neural Networks Training Architecture for UAV Modelling”, *World Automation Conference WAC'06*, Hungría, 2006.
- [5] Barrientos, A.; del cerro, J.; Gutierrez, P.; San Martín, R.; Rossi, C.; Martinez, Alexander Arquitectura de control del helicóptero autónomo “VAMPIRA”. *1er Workshop Arquitecturas de Control para Robots. Universidad Politécnica de Madrid. Red ROBOCITY 2030. Madrid, España, Febrero 2007.*
- [6] del Cerro J., Barrientos A., Artieda J., Lillo E., Gutiérrez P. , San Martin R.; Embeded Control System Architecture Applied to an Unmanned Aerial Vehicle; *IEEE Internacional Conference of Mechatronics, ICM06*, Budapest, Hungría, 2006.
- [7] Gutiérrez, P.; Barrientos, A.; del Cerro, J. ; San Martin., R. “Mission Planning and Simulation of Unmanned Aerial Vehicles with a GIS-based Framework”; *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit 2006. Denver, EEUU, 2006.*
- [8] Gutiérrez P.; Barrientos, A.; Del Cerro, J.; San Martín, R.; Rossi, C.; Martínez, A. Planificación de misiones de UAV mediante el lenguaje de control de vehículos aéreos. *2º Workshop “Robots de exteriores”. Red ROBOCITY 2030. Ávila, España. Julio 2007*
- [9] IABG, *CARE Innovative Action Preliminary Study on Integration of Unmanned Aerial Vehicles into Future Air Traffic Management*. Diciembre 2001
- [10] JAA/EUROCONTROL initiative on UAVs. *UAV TF final report: A concept for european regulations for civil unmanned aerial vehicles (uavs)*. Mayo 2004
- [11] San Martin R., Barrientos A., Gutiérrez P., Cerro J.del; Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Identification Using Supervised Neural Networks. *IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA 2006, Orlando, EEUU, 2006.*
- [12] Rossi, C.; Barrientos, A.; del Cerro, J.; Gutierrez, P.; San Martín, R.; Martinez, A. Pose estimation with multiple sources using evolutionary algorithms. *5th ieee international symposium on intelligent signal processing. Alcalá de Henares, España. WISP 2007.. octubre 2007.*