



CENTRO SUPERIOR DE ESTUDIOS DE LA DEFENSA NACIONAL

**DOCUMENTOS
DE SEGURIDAD Y DEFENSA**

49



**TECNOLOGÍAS ASOCIADAS
A SISTEMAS DE ENJAMBRES
DE μ UAV**



MINISTERIO
DE DEFENSA

CENTRO SUPERIOR DE ESTUDIOS DE LA DEFENSA NACIONAL

TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A SISTEMAS DE ENJAMBRES DE μ UAV

Abril de 2012



MINISTERIO DE DEFENSA

CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES
<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

Edita:



NIPO: 083-12-112-2 (edición en línea)

Fecha de edición: julio 2012

NIPO: 083-12-111-7 (libro-e)

ISBN libro-e: 978-84-9781-747-9



Las opiniones emitidas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de los autores. Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del © Copyright.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	7
<i>Daniel Acuña Calviño</i>	
PROSPECTIVA MILITAR SOBRE CAPACIDADES DE μ UAV EN ENJAMBRE	11
<i>Carlos Vera Sibajas</i>	
LOS VEHÍCULOS AÉREOS	19
<i>Miguel Ángel Barcala Montejano</i>	
LA CARGA ÚTIL	45
<i>Francisco Muñoz Sanz</i>	
PROPULSIÓN Y ENERGÍA	53
<i>Francisco Muñoz Sanz</i>	
COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA	61
<i>Pablo González Sánchez-Catalejo</i>	
CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV	101
<i>Daniel Acuña Calviño</i>	
CONCLUSIONES	149
<i>Daniel Acuña Calviño</i>	
COMPOSICIÓN DEL GRUPO DE TRABAJO	155
DOCUMENTOS DE SEGURIDAD Y DEFENSA.....	157

INTRODUCCIÓN

En el devenir de las tecnologías asociadas a los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV), una vez que disponemos de tecnologías relativamente maduras que permiten operar vehículos de una amplia gama de tamaños y cargas útiles pilotados remotamente, aparecen nuevos retos para los sistemas a desarrollar en los próximos años.

Entre los retos tecnológicos identificados en el ámbito de esas tecnologías, hay que destacar dos que merecen reseñarse de forma especial: la miniaturización de las plataformas y cargas útiles y la evolución de los sistemas de control de los vehículos. Ambos retos tecnológicos están en la base del presente Documento de Seguridad y Defensa.

Los progresos conseguidos en las tecnologías asociadas a la construcción de sensores, integración de elementos de proceso y sistemas de propulsión y almacenamiento de energía, han hecho posible el desarrollo de Micro Vehículos Aéreos no Tripulados (μ UAV). Aunque ya se han dado pasos significativos en la reducción de tamaño de los distintos elementos que componen un vehículo no tripulado, todavía queda mucho camino por recorrer hasta llegar a disponer de vehículos que tengan tamaños comparables a pequeñas aves o insectos y que puedan transportar cargas útiles tales como cámaras, sensores, detectores, etc., y que además puedan comunicarse para trasladar dicha información a centros en donde pueda ser consumida.

Quizá sea todavía un reto de más envergadura el construir sistemas de vehículos no tripulados que tengan un comportamiento que denominaremos de «enjambre». Este nombre está tomado de la Naturaleza ya que las claves de dicho comportamiento las podemos encontrar en ciertos insectos como abejas u hormigas que trabajan de forma cooperativa, sin ningún control superior aparente, para realizar las tareas que permiten su supervivencia tales como la búsqueda de comida o el trabajo en las colmenas.

INTRODUCCIÓN

Primero es necesario disponer de vehículos autónomos que no necesiten operadores en tierra para su pilotaje. Actualmente los UAV actúan como sistemas independientes, cumpliendo misiones previamente definidas antes de su despegue y con rutas de vuelo construidas a partir de puntos de control (waypoints). Conseguir que los vehículos sean capaces de volar autónomamente es un paso relevante que significa disponer de una nueva generación de pilotos automáticos capaces de conocer con precisión su posición, gestionar los actuadores de vuelo para dirigirse a puntos concretos y corregir las desviaciones debidas a factores meteorológicos. Y todo ello, con un tamaño muy pequeño.

Un segundo aspecto es el desarrollo de sus capacidades cooperativas, de manera que actúen coordinadamente, con decisiones autónomas y de forma reactiva a las condiciones del entorno en tiempo real. Se pretende que a partir de comportamientos individuales relativamente simples, pueda surgir un comportamiento emergente que debe llegar a ser altamente inteligente para las tareas que pretenderían llevar a cabo dichos «enjambres».

En resumen, el presente Documento tiene como objetivo llevar a cabo un análisis con un cierto detalle, de los retos tecnológicos asociados al diseño y desarrollo de conjuntos de pequeños UAV que vamos a denominar «enjambres» con el comportamiento asociado descrito anteriormente.

A la hora de organizar el trabajo en el presente Documento, los componentes del grupo de trabajo que han formado parte del mismo, han decidido abordar sucesivamente los diferentes retos tecnológicos que aparecen en los enjambres de μ UAV.

En una primera parte de este Documento, se hace una reflexión sobre cuáles son los requisitos exigibles a estos enjambres para que resulten útiles en los escenarios que parecen más plausibles para las operaciones militares del futuro. Se analizan escenarios posibles y misiones previsibles, así como las características que los enjambres deberían tener para ser útiles en ese tipo de misiones.

Tras el análisis de los requisitos operativos, se van sucesivamente abordando los retos tecnológicos asociados a los diferentes elementos de los enjambres. Primero se trata el problema de la plataforma, su miniaturización, formas y materiales, etc.

A continuación se aborda el problema de la propulsión en pequeños vehículos no tripulados. Desde las tecnologías actualmente disponibles se hace un análisis prospectivo sobre los futuros tipos de propulsores, el uso de los motores eléctricos o el problema del almacenamiento de energía.

INTRODUCCIÓN

Luego se analiza el problema de las cargas útiles y su miniaturización. Se estudian los diferentes tipos de sensores, tecnologías y la visión actual sobre su evolución futura.

El siguiente aspecto abordado son los sistemas de navegación y las redes de comunicaciones que harán viable el vuelo autónomo de los vehículos y la transmisión de información entre sí y con centros de control en tierra.

El último aspecto contemplado son los sistemas de gestión y control. Se analizan diferentes esquemas para el control de conjuntos de UAV que actúen coordinadamente para la realización de una tarea y se identifica el comportamiento de enjambre como diferencial respecto a otras aproximaciones de control. Se analizan los retos tecnológicos pendientes y las tareas para las que este tipo de sistema de control parece adecuado.

DANIEL ACUÑA CALVIÑO

Director de Sistemas de Defensa y Seguridad

PROSPECTIVA MILITAR SOBRE CAPACIDADES DE μ UAV EN ENJAMBRE

«Cuanto más y mejor conocemos, más y mejor queremos saber»

Introducción. Marco de empleo

La finalidad principal de este capítulo es realizar una prospectiva acerca de las capacidades con que deberían contar los Micro Vehículos Aéreos no Tripulados (μ UAV) para ser utilizados desde un uso puramente militar y, particularmente, ser operados en enjambre. Por lo tanto, en las siguientes páginas se expondrán en forma de ideas qué capacidades necesitarían las fuerzas en combate que fueran cubiertas por estos medios en los años futuros. Puntualizar en todo caso que estos datos sólo deben ser vistos en forma de prospectiva, ya que el futuro deparará situaciones no previstas en la actualidad.

Como introducción al tema exponer cual debe ser el punto de partida. Se debe de establecer un marco de empleo que presente cómo será el campo de batalla futuro en el cual se combatirá.

Sin olvidar que los ejércitos deben de estar preparados para entornos convencionales, en la actualidad estamos inmersos en operaciones que pueden ser similares a las que se lleven a cabo en un futuro a medio y largo plazo¹. El combatiente de hoy día desarrolla sus misiones frente a un enemigo asimétrico, en muchas ocasiones en entornos urbanos y bajo amenazas diversas. A menudo se ve involucrado en todo tipo de

¹ El concepto guerra de cuarta generación ha tomado fuerza en estos últimos años. En este tipo de guerras no hay enfrentamiento entre ejércitos regulares ni necesariamente entre Estados, sino entre un Estado y grupos violentos o mayormente entre grupos violentos de naturaleza política, económica, religiosa o étnica.

operaciones militares, desde conflictos de baja intensidad², operaciones de mantenimiento de la paz o incluso de apoyo a las autoridades civiles en situaciones de catástrofe³.

La participación de las Fuerzas Armadas en organizaciones internacionales obliga a que los procedimientos operativos, el equipo, el armamento y el material cuenten con una tecnología de vanguardia y que ésta sea altamente interoperable.

El campo de batalla futuro «hablará» virtualmente al soldado, ya que es de suponer una automatización en las tareas de combate más sencillas, de tal forma que se producirá una gran sensorización del área de operaciones.

Por lo tanto, y para centrar esta primera idea, nos debemos imaginar un campo de batalla principalmente urbano, contra un enemigo asimétrico y combatiendo en un entorno en donde la población civil continúe desarrollando sus actividades habituales.

Capacidades a mejorar

Establecido un espacio de batalla, ¿necesitamos nuevas capacidades que incrementen y mejoren nuestras posibilidades de información del entorno y del enemigo? Obviamente la respuesta es sí. Reseñemos algunas de las capacidades a cubrir:

- Necesitamos que esta información sea lo más continua posible y, en el caso de imágenes, que sea continua desde diferentes puntos de vista. Imaginemos un edificio, no sólo vigilado por una de sus fachadas, sino que gracias a la operación simultánea de diferentes sensores, éstos nos den una información continua de todas ellas. Es una información «3D» en donde no se busca tener una visión en profundidad sino capacidad de ver «por todos lados».
- Necesitamos información a diferentes niveles: superficie, subterráneo y aéreo (desde pocos centímetros hasta llegar a nivel de los tejados).

² LIC (*Low Intensity Conflict*).

³ *Three Block War* o guerra de las tres manzanas, en donde los escenarios pueden ser absolutamente diferentes en el mismo espacio de batalla, ya que el combatiente puede estar enfrentándose en combate en una manzana, estar en operaciones de mantenimiento de la paz en el barrio adyacente y realizar ayuda humanitaria en otra parte de la misma población.

PROSPECTIVA MILITAR SOBRE CAPACIDADES DE μ UAV EN ENJAMBRE

- Necesitamos sensores que puedan moverse dentro y fuera de edificios y que tengan la capacidad de gestionar su movimiento evitando colisiones con paredes u objetos. Si nos imaginamos las calles o los pasillos y habitaciones de los edificios como estrechas vaguadas quizás pudiéramos tener una imagen aproximada⁴.
- Necesitamos tener una información lo más completa posible, reduciendo las incertidumbres y, por tanto, esa «niebla» que tiene el mando sobre lo que está pasando realmente.
- Necesitamos estar seguros que no habrá fuego fratricida, ni por fuego de apoyo (artillería y morteros principalmente) ni por confusión entre elementos de las unidades (esto último común en operaciones en entornos urbanos).
- Necesitamos discriminar entre combatientes y resto de la población de forma que se eliminen las bajas colaterales.

Capacidades de los μ UAV

Con las anteriores premisas, ¿serán los μ UAV útiles? Para responder a esta pregunta pensemos en las ventajas que el tamaño reducido puede tener.

La primera es obvia, un peso reducido. Esto, unido a un menor volumen, hace pensar que un solo combatiente pudiera llevar junto con su equipo todo lo necesario para operar en estos aparatos.

El sistema que nos apoye debe tener un peso y un volumen adecuado para ser transportado por un solo combatiente junto con el resto de su equipo.

A su vez, esta miniaturización puede significar un incremento en el uso de estos dispositivos. La simplicidad de los dispositivos, unidos a una alta tasa de fabricación, hará que su coste sea reducido en comparación con sus hermanos mayores.

El desarrollo de los micro o nano UAV introducirá capacidades no desarrolladas hasta la fecha. Un μ UAV sería capaz de llevar a cabo una amplia variedad de misiones, tanto al aire libre como en interiores, utilizando micro o nano sensores. Una de ellas será de la de poder realizar misiones de reconocimiento o de vigilancia dentro de los edificios.

⁴ Es lo que se ha denominado combate en un entorno de *urban canyons*.

Actualmente el apoyo a nivel compañía o sección de ver detrás de la colina (o detrás del muro en entornos urbanos) viene de la mano de los mini UAV. Éstos dan una gran capacidad de reconocimiento, pero los procedimientos de empleo no son lo suficientemente flexibles como para mostrar de forma inmediata al mando una imagen continua del campo de batalla. Un jefe de compañía o un jefe de sección no pueden estar anclados a la imagen que llega del mini UAV mientras desarrollan su labor de mando y coordinación de sus unidades, sino que ésta debe ser retransmitida por el jefe del equipo mini UAV, lo que conlleva las lógicas pérdidas de información, no aprovechando todas las capacidades que las imágenes pueden ofrecer al personal que se encuentra combatiendo. Esto se maximiza en aquellas situaciones en que se opera desde el interior de los vehículos y éstos son diferentes para el puesto de mando y el equipo de UAV. Por lo tanto, el aumento de capacidades a niveles inferiores multiplicará el conocimiento que del entorno y del enemigo tengan las diferentes unidades, pudiendo individualizar sus misiones con una gran posibilidad de éxito, ya que ese jefe de sección o de pelotón tendrá a su disposición la posibilidad de ver el objetivo, no como ahora que su descripción tiene que ser retransmitida vía radio.

En cuanto a la instrucción en el empleo de estos sistemas, su manejo será tan sencillo como cualquier sistema de armas a nivel compañía.

Otro de los aspectos a destacar es que su uso no implicará tomar medidas especiales de control aéreo. En la actualidad, el procedimiento en caso de que se pida apoyo aéreo, es segregar espacios aéreos y éstos son controlados por equipos TACP⁵. Su poco peso y poca velocidad hace que la energía en caso de choque con una aeronave sea mínima. Por lo tanto es de suponer que no requerirán de esta coordinación.

Capacidades de los μ UAV operados en enjambre

Dando un paso más ¿qué les podemos pedir si los utilizamos en enjambre?

Pensando en un periodo de tiempo de no más de cinco a siete años, es seguro que un solo operador podrá operar varios aparatos.

El concepto de enjambre consistirá en un grupo de μ UAV parcialmente autónomos operados por un solo hombre. Posteriormente la tecnología debería permitir elegir operar tanto en grupo como individualmente.

⁵ *Tactical Air Control Party* (Equipo de Control Aerotáctico).

Incluso necesitamos que los μ UAV sean realmente autónomos y verdaderamente *unmanned*⁶, o sea, que operando según los parámetros que les hayamos configurado, un enjambre cree una red de órdenes internas entre los diferentes elementos, invisibles para el operador, que nos den el resultado buscado. Si pensamos en los UAV de mayor tamaño como el PASI⁷, el SIVA⁸ o el RAVEN⁹, el acrónimo a utilizar en estos casos no debería ser UAV sino RPA¹⁰ mientras que los únicos y verdaderos UAV serían los μ UAV.

Los μ UAV deberían volar al área de interés de forma autónoma intercomunicando entre ellos para evitar colisiones, procesar la información y detectar amenazas y objetivos a través del uso de inteligencia artificial. Las técnicas de enjambre deben permitir crear una red de comunicación internas que discrimine la mejor respuesta en cada caso. Por lo tanto la «mano» del piloto operador queda en un segundo plano, dejando al enjambre actuar de forma autónoma y automática según lo que hayamos programado. Obviamente estas capacidades serán usadas por UAV de mayor tamaño, pero en el caso de los μ UAV utilizados en enjambre, deben ser imprescindibles.

Otra capacidad podrá ser el equipar a los diferentes μ UAV del mismo enjambre con diferentes tipo de sensores (ópticos, guerra electrónica, químicos, etc.), de forma que den al operador diferentes informaciones del campo de batalla en función de cómo van apareciendo, o bien que el operador pueda elegir uno de ellos en el momento que estime oportuno¹¹.

Habrán ocasiones en que queremos una permanencia en unas determinadas zonas y, como es de suponer, la autonomía de estos dispositivos será escasa. Una solución puede ser el llevar un número determi-

⁶ La traducción literal sería no tripulado. El termino *unmanned* se aplica a los aparatos que no transportan al personal que los opera, por lo que la expresión *unmanned* no es del todo correcta ya que realmente están siendo operados a distancia.

⁷ Plataforma Autónoma Sensorizada de Inteligencia. UAV modelo *Seacher MkIIIJ* fabricado por Israel y adquirido por España en el año 2008. Actualmente en apoyo a las fuerzas desplegadas en zona operativa.

⁸ Sistema Integrado de Vigilancia Aérea desarrollado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial y actualmente utilizado por el Regimiento de Artillería de Campaña 63 como demostrador tecnológico.

⁹ *Mini UAV* modelo RQ-11 *Raven* de fabricación norteamericana adquirido por España en el año 2008 y en apoyo a las fuerzas desplegadas en zonas de operaciones.

¹⁰ *Remotely Piloted Aircraft*.

¹¹ Esta capacidad es denominada *Pool of Sensors*.

nado de μ UAV a una zona, posarlos y activarlos de manera sucesiva permitiendo un mayor tiempo de vigilancia continua del área.

En otros casos podríamos desplegar en profundidad un enjambre con diferentes sensores (infrarrojos, acústicos, de movimiento, etc.) interconectados con UAV de mayores dimensiones que hicieran de relé. Pensemos en una patrulla en profundidad desplegada en la retaguardia del enemigo y que disperse este tipo de aparatos, lo cuales actuarían autónomamente con la capacidad añadida de poder enlazar, a través de otros UAV que realizarían la labor de relé, a cientos de kilómetros.

Estas capacidades reseñadas se pueden denominar como «familia de sistemas».

Los enjambres también tienen otra particularidad: la pérdida de una individualidad no debiera suponer merma para el enjambre, de forma que el objetivo se alcanza porque el resto de aparatos han suplido la falta de uno de ellos, y la misión será cumplida gracias a esta capacidad de poder absorber por el resto de aparatos la tarea asignada al que ya no la puede cumplir.

Este aumento de capacidades supondrá un aumento en la función mando y control. Se podrá obtener una visión del campo de batalla infinitamente más completa que ahora y llegar incluso a poder decidir en operaciones a nivel pelotón. Este *micromanagement* debe ser llevado a cabo con cautela, pues la sobreinformación es tan negativa como la falta de ella.

Por último, añadir otra idea: siendo, como suponemos, un material con un coste pequeño, podríamos incluso enviar sensores que una vez cumplida su función no tuviéramos que retornar o que ir a recogerlos. Sería darles un tratamiento de material fungible. Las ventajas serían de tipo logístico (no existe mantenimiento del material) y también desde el punto de vista de la protección de la fuerza.

Aplicaciones militares de los μ UAV operados en enjambre

Algunos ejemplos de aplicaciones típicamente militares en que operaríamos μ UAV en enjambre podrían ser:

- Reconocimientos urbanos: tanto fuera como también dentro de los edificios¹².

¹² Utilizando la nomenclatura inglesa: *Reconnaissance beyond horizon, over the hill, behind the building, inside the building, imagery through trees.*

PROSPECTIVA MILITAR SOBRE CAPACIDADES DE μ UAV EN ENJAMBRE

- Vigilancia: imaginemos un enjambre de μ UAV que son lanzados desde la linde de un poblado al interior del mismo y se posan como insectos en las paredes creando una red que permita vigilar los movimientos de un cruce o de una calle. Esta capacidad es la que se denomina de *perch and stare*¹³.
- Detectar e identificar objetivos, dar una evaluación de daños, detectar agresivos químicos, biológicos o nucleares o detectar alguna presencia de explosivos que en forma de trampa estuvieran desplegadas por el enemigo.
- Realizar interferencias en las comunicaciones.
- Llevar algún tipo de medio letal.
- Introducirse en las comunicaciones de mando y control enemigas y realizar un ciberataque.

Prospectiva de desarrollos en el campo de los μ UAV en los próximos años

De la información obtenida en los diferentes foros y tomando como base la hoja de ruta del Ejército norteamericano¹⁴ se podrían establecer tres periodos de tiempo. Uno relativamente cercano y en donde las posibilidades que están siendo desarrolladas en la actualidad se implementaran en estos cinco años futuros; otro a un medio plazo entre los años 2016 y 2025 y, finalmente, establecer un futuro hasta el año 2035 con estimaciones de lo que puede ser operado en ese entorno.

- En los próximos cinco años se espera que se desarrollarán μ UAV que puedan llevar a cabo misiones de vigilancia limitadas en tiempo y espacio dentro de edificios. Puede haber también algún desarrollo de μ UAV armados, con lo que se tendrán que implementar procedimientos legales adecuados para ser empleados en estas misiones.
- Para el año 2025 se espera poder operar μ UAV con capacidad para reconocer el interior de una edificación evitando colisiones en estos espacios. A finales de este periodo, probablemente se fa-

¹³ Se puede traducir como «anclarse y vigilar», complementado por actividades de *stakeout* o vigilancias de tipo policial.

¹⁴ US Army. UAS Roadmap 2010-2035, *Eyes of the Army*.

PROSPECTIVA MILITAR SOBRE CAPACIDADES DE μ UAV EN ENJAMBRE

- briquen μ UAV que permanezcan en zona de forma durmiente o bien que se tenga la posibilidad de adquirir energía extra de fuentes externas (por ejemplo, de la red eléctrica).
- Entre los años 2026 y 2035, los avances tecnológicos permitirán ejecutar las complejas maniobras que debe tener un enjambre para cumplir con las misiones que, desde el punto de vista militar, se necesitan. Los μ UAV colaborarán entre sí para crear enjambres que puedan cubrir grandes áreas tanto en espacios abiertos como en interiores. Los enjambres tendrán un nivel de autonomía y de autoconocimiento que les permitirá cambiar las formaciones con el fin de maximizar la cobertura completando la información en aquellas zonas muertas. Poseerán la capacidad de volar, ajustar sus posiciones, y navegar cada vez de una forma más compleja dentro de espacios cerrados. Incluso los avances tecnológicos en inteligencia artificial permitirán a los μ UAV ejecutar decisiones de forma autónoma, para lo cual habrá que desarrollar un marco jurídico apropiado para implementarlas.

A medida que avance la tecnología, las máquinas podrán realizar de forma automática algunas reparaciones en vuelo e incluso rutinas en tierra sin contacto humano.

CARLOS VERA SIBAJAS

Teniente coronel del Ejército de Tierra

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

Configuración física y formas

La tecnología aeroespacial y el creciente interés del hombre por el ambiente en el que vive han puesto en servicio los UAV (del inglés *Unmanned Aerial Vehicles*), que se caracterizan por ser aeronaves que pueden llevar a cabo gran variedad de misiones con una amplia flexibilidad, un rápido tiempo para reaccionar, con un mínimo impacto ambiental y un mínimo costo de operación.

Estas aeronaves, cada vez más, ofrecen una gama de beneficios en seguridad y defensas, sociales, económicos y ambientales de tal magnitud que han generado e impulsado la necesidad de nuevos requerimientos de los UAV para lograr los estándares de seguridad y rendimiento necesarios para operar en todo el espacio aéreo y desarrollar el escenario normativo que dé cabida, en el espacio aéreo no segregado, a este tipo de operaciones.

Este impulso está estimulando la Investigación, Desarrollo e innovación (I+D+i) en este sector, consiguiendo la optimización del diseño en ciertos sistemas-subsistemas utilizados, como son: sensores de observación, comunicaciones de imágenes y datos, propulsores, circulación, navegación, etc., incluyendo el segmento tierra.

Se hace, por tanto, necesario una optimización del diseño que fusione la forma, los materiales, la misión, la carga de pago y ciertos parámetros aerodinámicos para que la configuración, geometría y dispositivos de control y/o mejora de eficiencia aerodinámica de los UAV sepan responder a las necesidades descritas en el párrafo anterior y estén al nivel de exigencia de los sistemas-subsistemas comentados.

Las diferencias entre la geometría y configuración, incluso entre sus actuaciones, son muy elevadas en los UAV actuales y mucho más en

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

los venideros, variando, por ejemplo, entre UAV de peso superior a las 14 toneladas y carga útil superior a los 1.300 kilogramos, hasta UAV capaces de ser transportados y lanzados a mano, o incluso los múltiples diseños de micro UAV de dimensiones muy reducidas, con posibilidad de volar en recintos cerrados.

El objeto de este capítulo es aportar una visión estratégica de los UAV desde el punto de vista de las configuraciones y formas idóneas, así como la manera de determinar las variables de diseño más adecuadas para cumplir los diferentes objetivos impuestos por las misiones a desarrollar por micro UAV en un futuro cercano, quizá en los años 2015-2020.

Estado del arte

En primer lugar y dada la diversidad de los diseños y aplicaciones de los UAV actuales, es conveniente decir que aunque en estos momentos la tecnología permite pensar en lo que quizá acabe siendo nano UAV no es el momento de ocuparse de aeronaves de pesos y dimensiones inferiores a 0,2 kilogramos, siendo, por tanto, necesario establecer una clasificación contrastada.

De la simple observación del *Diccionario* de la Real Academia de la Lengua Española y del acrónimo UAV definimos μ UAV como una aeronave «no tripulada» «muy pequeña». (Nota del autor: término «no tripulada» mal utilizado, debiendo ser «pilotada en remoto» con lo que se volvería a la acepción de RPV o incluso RPA «pilotada en remoto») necesitando, por tanto, concretar el término «muy pequeña».

De entre las muchas y complicadas clasificaciones de UAV encontradas por dimensión-operación, se ha seleccionado la clasificación descrita en el cuadro 1, propuesta en el Documento Visión Estratégica Española. Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS) presentada en junio de 2010 por la Plataforma Aeroespacial Española.

Se entiende, entonces, en este Documento que un μ UAV es una aeronave no tripulada de menos de un kilogramo de Peso Máximo al Despegue (MTOW). Como información complementaria las características de vuelo que lo definen son: un alcance, R (*Range*) de 10 kiló-

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

Cuadro 1.— *Categoría UAS de acuerdo al Documento Visión Estratégica Española. Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS) presentada en junio de 2010 por la Plataforma Aeroespacial Española.*

Categorías de UAS	Alcance (kilómetros)	Altitud vuelo (metros)	Autonomía de vuelo (horas)	Peso máximo al despegue (kilogramos)
Estratosféricos	> 2.000	20.000-30.000	48	< 3.000
Gran altitud y larga duración (HALE)	> 2.000	20.000	48	15.000
Media altitud y larga duración (MALE)	> 500	14.000	24-48	1.500
Baja altitud y larga duración (LALE)	> 500	3.000	aprox. 24	aprox. 30
Baja altitud y amplia penetración (LADP)	> 250	50-9.000	0,25-1	350
Medio alcance	70 a > 500	8.000	6-18	1.250
Corto alcance	10-70	3.000	3-6	200
Mini	< 10	< 300	< 2	< 30

metros máximo, un nivel de vuelo en el entorno de 250 metros de altura sobre el nivel del suelo (H_{AGL}) y una autonomía, E (*Endurance*) máxima del orden de una y dos horas (E).

Los UAV semejantes, cuadro 2, p. 22, que se han tomado como μ UAV de referencia para definir los parámetros de diseño preliminar, en las diferentes configuraciones que se están utilizando en estos momentos.

De entre las referencias del cuadro 2, la configuración más utilizada y conocida son aeronaves con geometría convencional, en las que el control direccional es responsabilidad del estabilizador vertical al final del fuselaje, junto con el adecuado comportamiento lateral dado por el diedro del ala, mientras que el estabilizador horizontal no existe en algunos.

Otra configuración que empieza a ser frecuente entre los micro UAV son alas volantes de alargamientos diferentes en función de la utilización y operación para la que se han diseñado específicamente; el estabilizador vertical suele estar presente en el diseño.

Por último y dentro de las configuraciones habituales encontramos aeronaves de alas rotatorias con disparidad de solución en el número de rotores y situación, siendo la solución más frecuente encontrada los polirotores, fundamentalmente cuatro rotores o dos rotores coaxiales.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

No se han incluido como referencia a los UAV con aspecto de insecto al considerarlos dentro del grupo de nano UAV, categoría por delimitar, y entender que en un futuro cercano el desarrollo de los materiales y formas darán un aspecto diferente a este tipo de UAV.

Con estos datos preliminares de los vehículos aéreos que podemos encontrar en el mercado, es consecuente asumir el poco valor añadido aportado hasta la fecha por lo que se denomina, más comúnmente plataformas, sin embargo, si queremos ofrecer un producto útil, los μ UAV deberán tener una amplia gama de posibles entornos operativos como bosques, desiertos, medio urbano, tanto *indoor* como *outdoor*, y medio marino; además, deberán estar preparados para operar en todo tiempo y condición.

En ese caso los vehículos aéreos en su forma y geometría tienen que dar un salto cualitativo y aportar al sistema el valor añadido que se merecen.

Cuadro 2.— μ UAV de referencia tomados para definir los parámetros de diseño preliminar, en las diferentes configuraciones que se están utilizando en estos momentos.

	Country	Producer(s)-Developer(s)	System Designation
1	Canada	CropCam	CropCam
2	Germany	EMT	Aladin
3	Israel	IAI-Malat	Bird Eye 100
4	Italy	A2Tech	RV-02
5	Italy	Selex Galileo & U.T.R.1	Otus
6	South Korea	Ucon Systems	RemoEye 002
7	Taiwan ROC	Chung Shan Inst. of Science & Technology	Blue Magpie
8	Turkey	Vestel	Ari
9	UK	Tasuma	Hawkeye
10	USA	AeroVironment	Dragon Eye-Swift
11	USA	AeroVironment	Wasp III
12	USA	L3 - BAI Aerosystems	Evolution-XTS
13	USA	Lockheed Martin	Desert Hawk
14	USA	Procerus Technology	Unicorne
15	USA	UAV Solutions	Talon 45
16	Germany	EMT	Francopter
17	Switzerland	Skybotix	RB-Sky-01
18	USA	Lite Machines Corporation	Voyeur
19	Australia	Cibertechonology	Cyberquad
20	Canada	Draganfly	X6
21	USA	Flightglobal	MD4-200

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

El reto en el campo de los vehículos aéreos será disponer de una forma, una geometría, unos requerimientos aerodinámicos y unas exigencias operacionales que nos permitan estar al nivel de necesidades de los nuevos sistemas-subsistemas embarcados o terrestres y ofrecer un valor importante en el conjunto del UAS.

Requerimientos de mejora

Hablar de requerimientos de mejora en este apartado es definir la forma y geometría necesaria para conseguir la mayor eficiencia posible en la operación que se va a signar a la aeronave concreta, siendo, por tanto, deseable contar con μ UAV de forma cambiante, que se adapten a la situación de la misión a realizar en cada instante. De manera genérica, las misiones de los μ UAV, sin pretender describir todas, son:

- Inspección de infraestructuras terrestres.
- Intervención y apoyo a la coordinación en catástrofes naturales.
- Vigilancia de fronteras.
- Vigilancia y apoyo a la Marina mercante y actividades industriales en alta mar.
- Identificación y seguimiento de áreas de cultivo.
- Rastreo y control del tráfico terrestre.
- Control de edificaciones en zonas urbanas y rústicas.
- Cualquier otro tipo de vigilancia aérea o marítima.

Lógicamente, estas actividades se verán ampliadas con la utilización de un sistema de múltiples μ UAV coordinados, que cooperan entre ellos con diferentes niveles de autonomía para la realización de la misión encomendada.

Definido el escenario de partida de los μ UAV, los datos preliminares de diseño, más representativos, que tienen que reunir las aeronaves de interés en este *Documento* se describen a continuación.

Para estas aeronaves de menos de un kilogramo de peso máximo al despegue podremos disponer de un peso de Carga Útil (PL) máximo inferior a 250 gramos, de acuerdo con el gráfico 1: PL y MTOW para los distintos UAV de referencia, cuadro 2, y un Peso Vacío Operativo (OEW) que no exceda los 500 gramos, según gráfico 2: MTOW y OEW para los distintos UAV de referencia, cuadro 2.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

En referencia a las dimensiones de los μ UAV, tomando como referencia los UAV semejantes, estarán en concordancia también con los gráficos 3, p. 26 y 4, p. 27, PL, Envergadura y MTOW respectivamente.

Con esta información las dimensiones de la Envergadura de las aeronaves que nos ocupan no serán superiores a un metro de envergadura. Como consecuencia de las aportaciones de los estudios propios realizados y relacionados en los gráficos anteriores las cualidades aerodinámicas vendrán marcadas por la combinación de pequeñas dimensiones y baja velocidad, estas contribuciones dan como resultado un régimen de vuelo a muy bajos números de Reynolds entre 10.000 y 100.000.

Tal y como indica el gráfico 5, p. 28, donde se representa la relación entre la masa y el número de Reynolds de los insectos, aves y aeronaves incluidas en este caso los μ UAV, los estudios aerodinámicos estarán entre la aerodinámica de los insectos y las aves de peso y geometría medias.

Como finalización de los requerimientos de mejora es necesario complementar lo anterior con los requerimientos específicos que per-

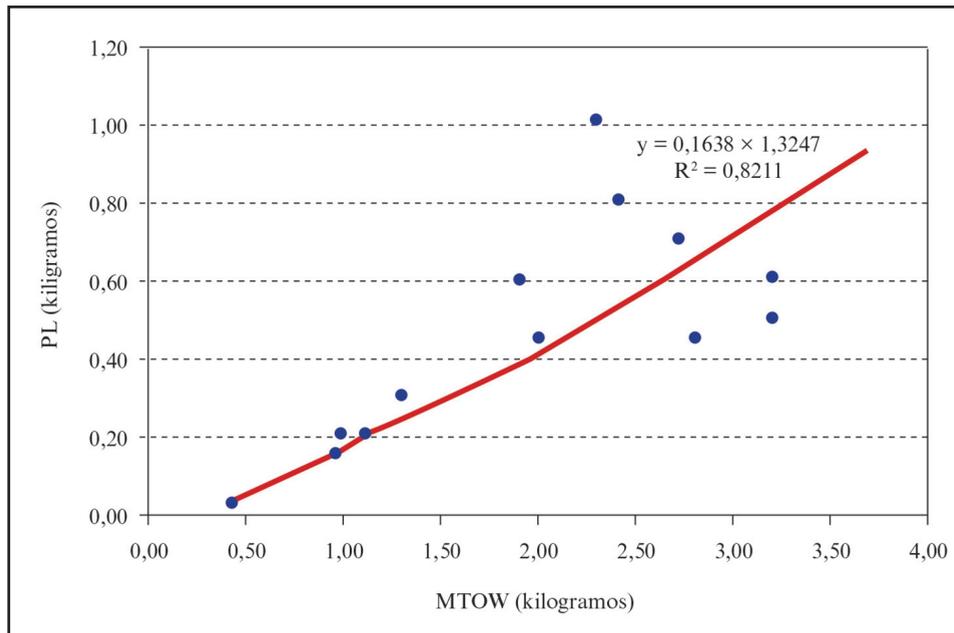


Gráfico 1.— PL y MTOW para los distintos UAV de referencia.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

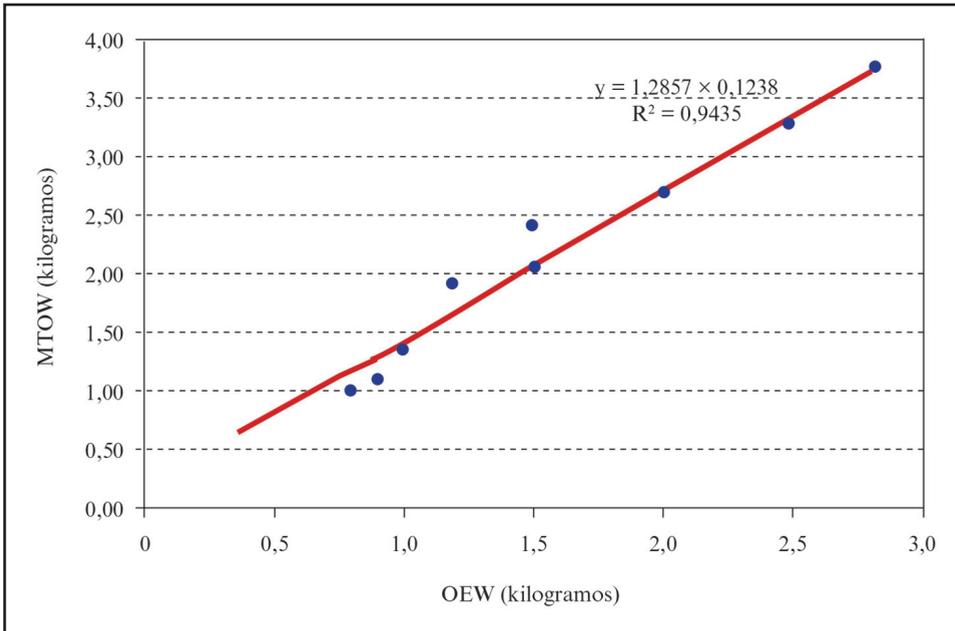


Gráfico 2.— *MTOW y OEW para los distintos UAV de referencia.*

mitan conseguir las actuaciones más características de los μ UAV. Que son:

- Despegue y aterrizaje muy corto y crucero eficiente (CE-VSTOL).
- Elevado tiempo en vuelo (E).

Estas dos condiciones llevan asociadas las siguientes características geométricas y aerodinámicas:

1. Despegue y aterrizaje corto (STOL):

- La longitud de despegue disminuye al disminuir la carga alar, (W/S).
- La longitud de despegue disminuye al aumentar el coeficiente de sustentación máximo (C_{LMax}).
- La longitud de despegue disminuye al aumentar la relación Tracción-peso al despegue, T-WTO.
- El crucero será eficiente con el aumento de la eficiencia aerodinámica y también la disminución de la resistencia inducida de la aeronave.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

2. Elevado tiempo en vuelo (E):

- La autonomía aumenta al aumentar $[(C_L)^{3/2}/C_D]$.
- La autonomía aumenta al aumentar el Rendimiento Propulsivo Hélice (η_{pr}).
- La autonomía aumenta al disminuir la W/S.

Propuestas de mejora

Dejando de lado los temas propulsivos, reflejados en un capítulo aparte, podemos concluir que la aeronave de máxima eficiencia y elevada autonomía debe tener un coeficiente de resistencia lo menor posible, que interiorizando algo más da como resultado un coeficiente de resistencia parásita mínima $(C_{Do})_{min}$ y un coeficiente de resistencia inducida mínima $(C_{Di})_{min}$, que, en primera aproximación podríamos traducir en un μ UAV en forma de ala volante sin fuselaje ni estabilizadores y un alargamiento máximo $(AR)_{max}$ limitado por la penalización del peso estructural de la aeronave.

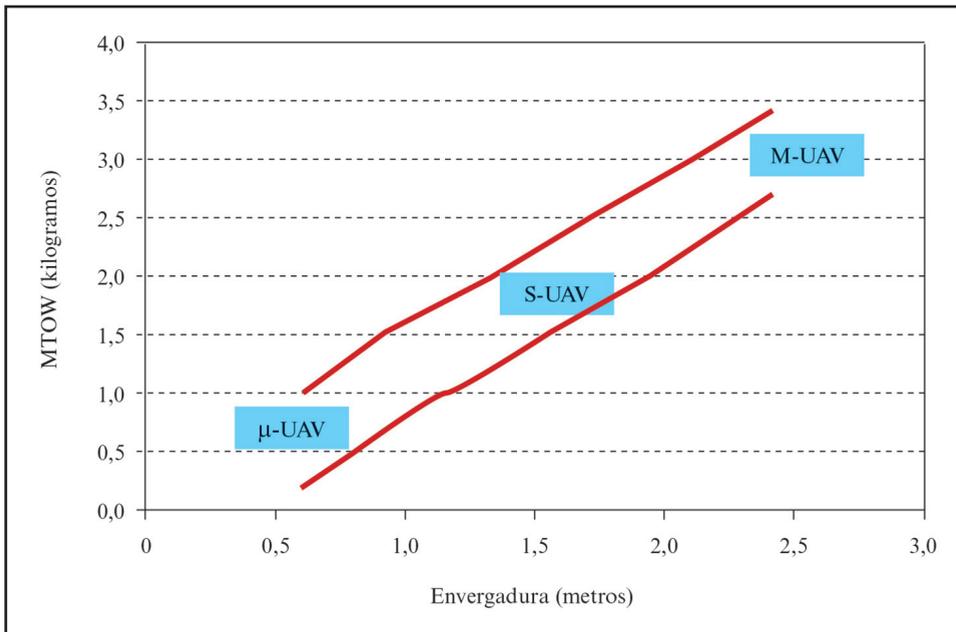


Gráfico 3.— MTOW y Envergadura para M-UAV (medios), S-UAV (pequeños) y μ -UAV (micros).

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

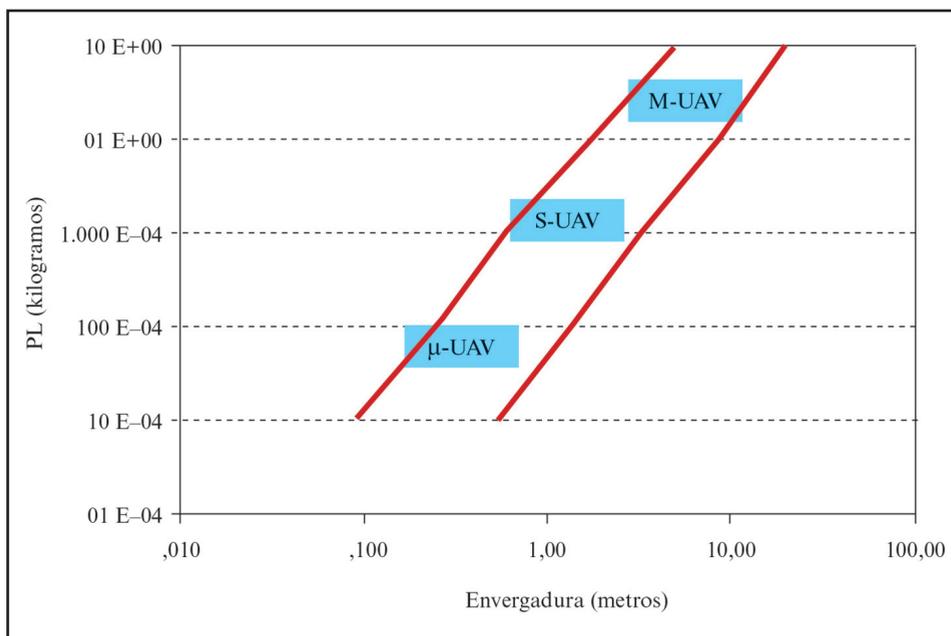


Gráfico 4.— *PL y Envergadura para M-UAV (medios), S-UAV (pequeños) y μ-UAV (micros).*

Las necesidades de despegues muy cortos y la necesidad de aeronaves muy rígidas, que no se dañen en el aterrizaje, modifican la geometría expuesta en el apartado anterior. Se necesitan μ UAV de elevado $(C_L)_{\max}$ y de forma distinta a la que se dispone en vuelo de crucero, independientemente de comentarios posteriores, una buena solución son alas volantes de alargamiento medio o bajo con elevada flecha de borde de ataque y radio de borde de ataque muy pequeño. En este caso hay que estar dispuesto a penalizar la autonomía de la aeronave.

Si, como es lógico, se pretende el cumplimiento con todas las posibilidades de maniobras y operaciones del μ UAV la investigación que nos conduzca a propuestas de mejora de los futuros vehículos aéreos de los μ UAV venideros a medio/largo plazo define la frontera, y por tanto, los caminos de la investigación en el campo de los vehículos aéreos:

- Tecnologías que mejoren las características aerodinámicas de los μ UAV en cada una de las misiones encomendadas y que optimicen todas y cada una de las actuaciones del vehículo aéreo.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

- Tecnologías que permitan diseñar y construir aeronaves de forma cambiante según las necesidades de la operación.

TECNOLOGÍAS QUE MEJOREN LAS CARACTERÍSTICAS AERODINÁMICAS DE LOS μ UAV

Las tecnologías que mejoren las características aerodinámicas de los μ UAV y que optimicen las actuaciones del vehículo aéreo tienen que dirigirse hacia sistemas de incremento de sustentación y disminución de resistencia, que actúan únicamente en el momento que son necesarios para el óptimo desarrollo de la misión.

Sin poder relacionar todos, los dispositivos sobre los que se está trabajando en estos momentos para los μ UAV proviene, lógicamente, de la investigación y desarrollo aplicada a los aviones de transporte y son.

DISPOSITIVOS DE BORDE MARGINAL

En estos momentos se están investigando y en desarrollo un gran número de dispositivos, las tendencias indican que los relacionados a continuación serán los más empleados en un futuro cercano en el sector de los μ UAV:

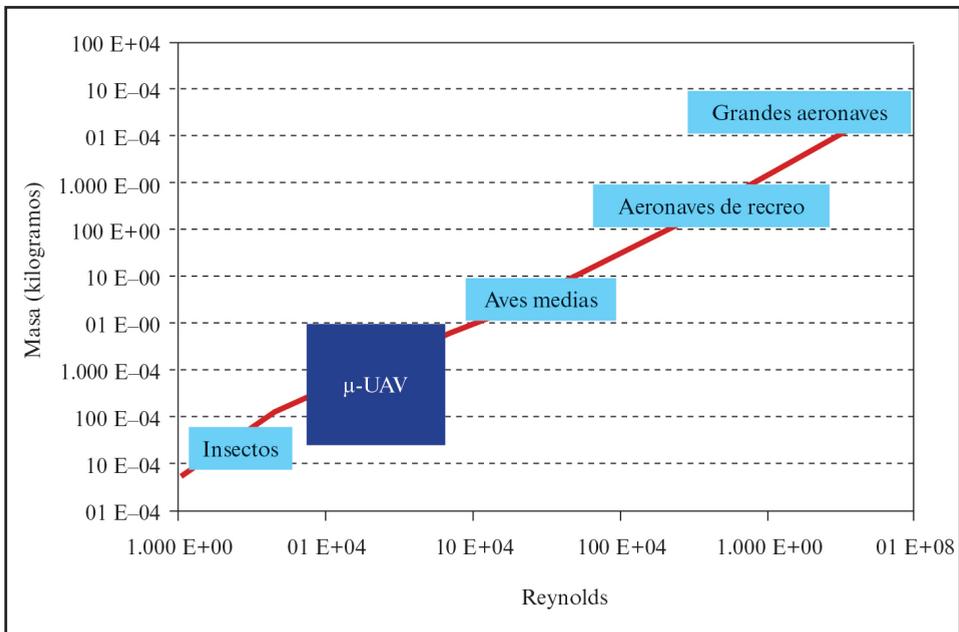


Gráfico 5.— Masa y Reynolds para diferentes insectos, aves y aeronaves.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

1. *Winglets (Blended Winglet, Spiroid Winglets, Morphing Winglets, Wingtip Fences, Blended Winglet)*. Mejoran la eficiencia aerodinámica de un ala. Se clasifican en muchos tipos y todos ellos tienen como objetivo principal la reducción de la resistencia inducida. Las mejoras más destacables de los *winglets* son:
 - Contribución a acelerar el flujo de aire en la punta de tal manera que genera sustentación y mejora la distribución de carga en el ala.
 - Ligera disminución del ángulo de ataque para un mismo coeficiente de sustentación.
 - Incremento de la eficiencia aerodinámicas sin perjudicar también considerablemente el momento flector y torsor en el encastre del ala.
 - Aumento de las características de ascenso.
 - Menor tracción del motor/es en la operación de despegue.

En general los *winglets* reducen la resistencia inducida con un peso menor que cuando esto mismo se obtiene con un incremento de la envergadura; en concreto, algunos estudios avalan que el uso de los *winglets* consigue reducir la resistencia aerodinámica entre un 4% y un 7%, porcentaje que puede incrementarse hasta el 15% en caso de que se utilicen *winglets* activos (*winglets* con ángulos de ataque, de inclinación, de diedro y de flecha variables):

1. *Raked Wingtip*. Es una extensión del ala a distinta flecha, que realiza la misma labor que un *winglet*; reducir la resistencia aerodinámica y, con ello, mejorar la eficiencia. El *raked wingtip* supera a los *winglets* convencionales en la reducción de resistencia, si bien hay que tener en cuenta que, al tener una mayor flecha en la punta de ala, ésta puede sufrir una torsión que haga reducir el ángulo de ataque. Las últimas investigaciones hacen hincapié en que los *raked wingtip* reducen la carrera de despegue y mejora la relación de ascenso (R/C) de la aeronave.
2. *C-Wing*. En los últimos años hay estudios de alas con una geometría que produzca la menor resistencia total. El ala en C está exhibiendo en sus inicios que aumenta la reducción de resistencia en un 3% respecto a un ala con y sin *winglets* sencillos y se considera una buena alternativa para mejorar la eficiencia de los *winglets* en un *Blended Wing Body*. También tiene su aplicación en alas

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

volantes utilizándose un *C-wing* en despegue que se transforma en *winglet* convencional en vuelo de crucero.

3. *Wingtip Sails*. Son unas pequeñas aletas dispuestas en la sección transversal de la punta del ala, que tiene como objetivo reducir la resistencia inducida e incrementar la estabilidad estática longitudinal. Son pequeñas superficies aerodinámicas que utilizan el flujo local de aire en la punta de las alas para generar sustentación, disminuyendo así la resistencia inducida del ala.

Estos dispositivos de borde de salida logran una mayor eficiencia aerodinámica cuando el ala posee un coeficiente de sustentación alto, ya que se incrementa la resistencia por fricción, de forma más significativa en alas con bajo coeficiente de sustentación. Los estudios revelan que para alas desplazándose con un coeficiente de sustentación por debajo de 0,4, los *Wingtip Sails* aumentan también la resistencia.

Hay que indicar que el ángulo de diedro de cada uno de los dispositivos debe ser diferente para reducir en la medida de lo posible la interferencia entre cada uno de ellos:

1. *Wing Grid*. Este dispositivo consiste en una serie de pequeñas alas a lo largo del perfil en la punta del ala, teóricamente, un ala con *Wing Grid* tendría mejor relación L/D que un ala de la misma envergadura sin *Wing Grid*, lo que permitiría el empleo de alas de menor envergadura con la misma eficiencia aerodinámica. Sin embargo, los estudios llevados a cabo a día de hoy reflejan que el uso de *Wing Grid* empeoran la eficiencia aerodinámica a bajas velocidades y se espera que a altas velocidades produzcan una mejora aerodinámica.

Estos dispositivos se están desarrollando a partir del conocimiento del vuelo de las aves y que muchos de ellos son a imagen y semejanza de un ala de pájaro, como se observa en la figura 1.

DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES

En este apartado se relacionan aquellos que pudieran aportar un incremento de sustentación en determinados regímenes de vuelo de los μ -UAV, no considerando los sofisticados dispositivos de las aeronaves tripuladas, que aunque se podrían utilizar encarecerían el producto final:

LOS VEHÍCULOS AÉREOS



Figura 1.— Dispositivo de borde marginal Wing Grid y borde marginal de un ave en vuelo de planeo.

1. *Gurney Flaps*, figura 2, p. 32, dispositivo proveniente de la automoción, consistente en una pestaña vertical, situada en el intradós del borde de salida del perfil, es el dispositivo hipersustentador de borde de salida más simple. Los estudios realizados indican que la altura idónea de un *Gurney Flap* varía entre 0,005 y 0,05 veces el tamaño de la cuerda según el espesor de la capa límite del caso concreto en estudio.
2. De entre las características que aportan los *Gurney Flaps* podemos destacar: el aumento del coeficiente de sustentación del perfil hasta en un 30%, la disminución del ángulo de sustentación nula unos tres grados, el incremento del coeficiente de momento de picado (CM) y el coeficiente de resistencia (CD), especialmente a bajos ángulos de ataque; sin embargo, si la altura del *Gurney*, basándose en el espesor de la capa límite, está correctamente dimensionado, se puede obtener un beneficio neto en la eficiencia (CL/CD) y para perfiles de elevado espesor además una reducción en la resistencia.
3. En el gráfico 6, p. 33, están representadas la curva de sustentación y la polar de un perfil simétrico NACA 0018 con *Gurney Flaps* $h/c = 5\%$ comparada con la del mismo perfil sin ningún dispositivo y en el gráfico 7, p. 34, la eficiencia aerodinámica del perfil NACA 0012 en las condiciones ensayadas.
4. *Microtab*, pequeña pestaña, con una altura del orden de 1% de la cuerda del ala, puede ir tanto en el extradós como en el intradós y actúa tanto en la sustentación como en la resistencia. El *Microtab* es desplegable y se sitúa a determinada distancia del borde de salida según las características necesarias en la etapa del vuelo con-

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

siderada. Los estudios realizados hasta la fecha indican que hay un incremento de la eficiencia aerodinámica debido a *Microtabs* a altos ángulos de ataque y adhieren la capa límite retrasando su desprendimiento, figura 3, p. 35.

5. *Pop-up Feather*, figura 4, p. 36, son dispositivos de control de capa límite a semejanza de las plumas cobertores de las aves, evitan que el desprendimiento de la capa límite, que se inicia por el borde de salida en perfiles gruesos, avance hasta el borde de ataque del ala, el sistema es autónomo y se activa por depresión.
6. Otros dispositivos hipersustentadores traídos de la aerodinámica de las aves con posibilidades de incorporarse en ensayos en vuelo de μ UAV experimentales son: borde de ataque inflable y álulas, figura 5, p. 37, que es autodesplegable y controla el flujo de aire en el extradós del ala retardando el desprendimiento de la misma forma que lo hace el *slat* en las aeronaves convencionales.

TECNOLOGÍAS QUE PERMITAN DISEÑAR Y CONSTRUIR AERONAVES DE FORMA CAMBIANTE

Las tecnologías que permitan diseñar y construir aeronaves de forma cambiante según las necesidades de la operación están orientadas hacia la investigación en materiales inteligentes.

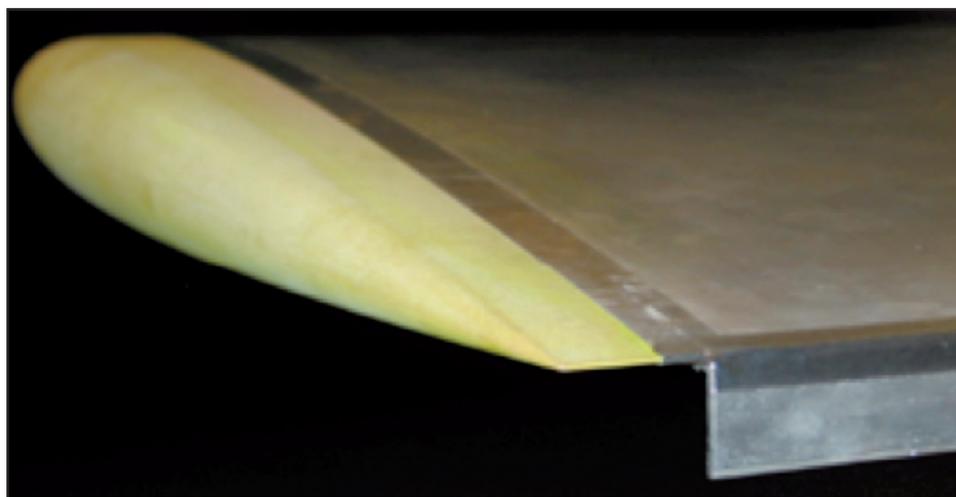


Figura 2.— Detalle de un ala con *preparada para ensayar en un túnel aerodinámico.*

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

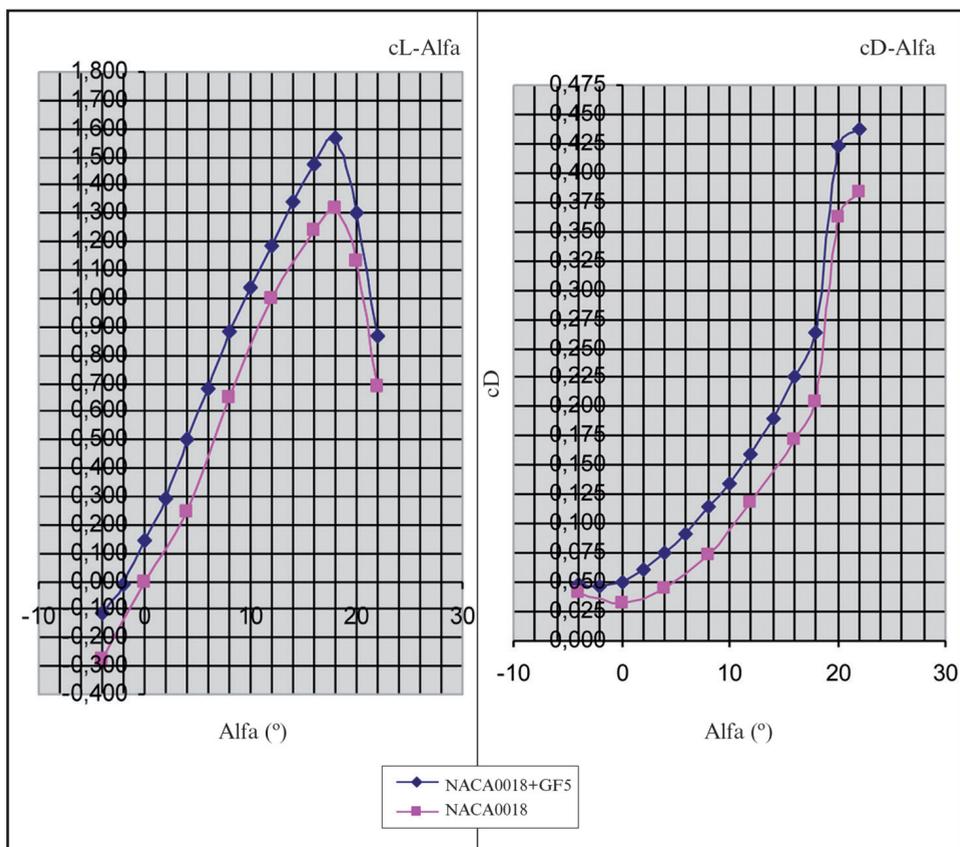


Gráfico 6.— Curvas de sustentación y polar de un perfil simétrico NACA 0018 con Gurney Flaps $h/c = 5\%$ comparada con la del mismo perfil sin ningún dispositivo.

Los materiales tienen una fuerte relación con la industria aeroespacial, ya que ellos determinan el peso, la resistencia, eficiencia, coste y dificultad de mantenimiento de una aeronave. Por lo tanto, el descubrimiento de nuevos materiales generalmente conlleva un salto en las actuaciones de una aeronave. En el futuro, el interés de los investigadores por las cualidades clásicas de los materiales se verá acrecentado, tal y como se ha comentado, por lo que se ha venido en llamar «biomimética» (volar como lo hacen las aves) que son «hoy en día» mucho más maniobrables que nuestros aviones e incluso, ambas, menos maniobrables que los insectos. El UAV no iba a quedarse fuera de estas tenden-

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

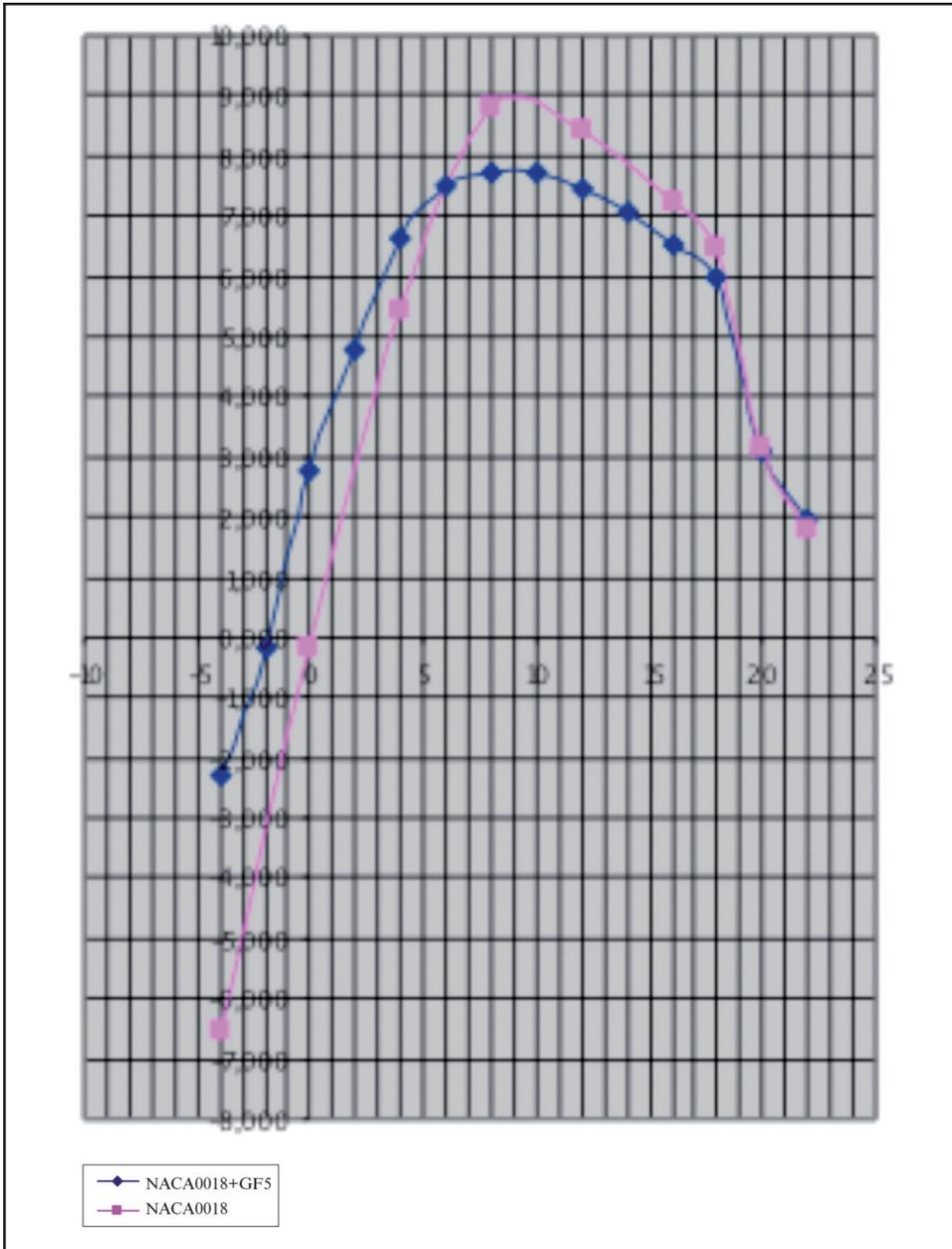


Gráfico 7.— Eficiencia aerodinámica de un perfil simétrico NACA 0018 con Gurney Flaps $h/c = 5\%$ comparada con la del mismo perfil sin ningún dispositivo.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

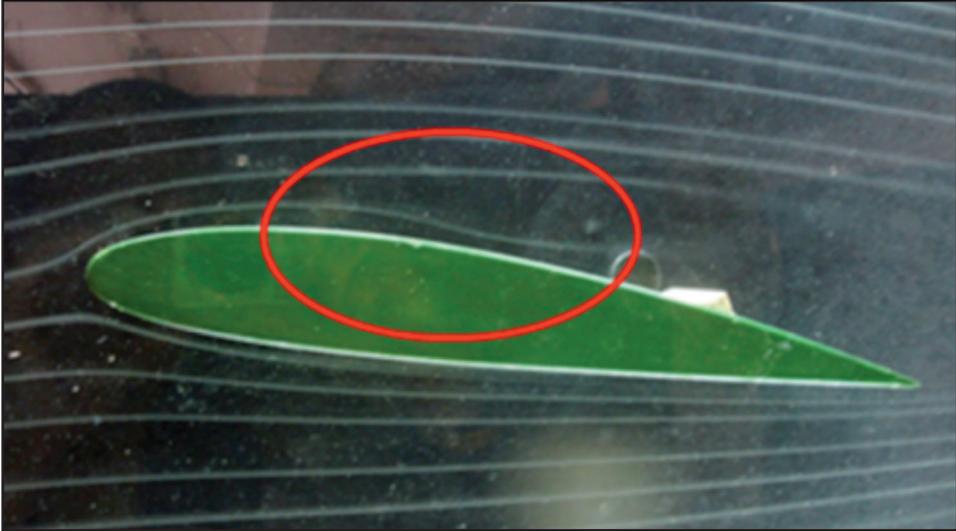


Figura 3.— *El Microtab adhiere la capa límite retrasando la entrada en pérdida.*

cias, siendo como es, además, un excelente laboratorio de ensayos que permite alcanzar retos sin atentar contra la seguridad de sus pasajeros, por razones obvias.

Los proyectos de hoy hacia el futuro en esta materia se centran en desarrollar y evaluar tecnologías avanzadas que permitan la adaptación de los componentes a la configuración deseada en cada momento, es decir, se están desarrollando proyecto de investigación sobre «materiales inteligentes», entre otros, que permitan introducir conceptos «biomiméticos» en la optimización y control de las operaciones.

No hay una definición estándar para los materiales inteligentes, y se definen, generalmente, como un material que puede cambiar una o más de sus propiedades como respuesta a un estímulo externo. La forma del material cambiará como respuesta, en general, al estímulo y a su propia respuesta, los «materiales inteligentes» se pueden catalogar en tres grupos principales: *termo-a-mecánico*, (estímulo: variar temperatura), *eléctrico-a-mecánico* (estímulo: aplicación de carga eléctrica) y *magnético-a-mecánico* (estímulo: crear-variar un campo magnético). Por otra parte, existen otro tipo de materiales que también suelen incluirse dentro del término de materiales inteligentes: los materiales con la propiedad de autoreparación, que responden con una acción especial como réplica a

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

alguna condición específica (alta-baja temperatura, alta tensión, alto-bajo pH), etc.; pero no entran dentro del objetivo de este *Documento*.

Es el estudio de los materiales inteligentes, que aporten una función especial o propiedad que permita mejorar las prestaciones de la aeronave, la clave para la innovación en la industria aeroespacial. La razón es que un sistema automático convencional tiene limitaciones comparadas con el sistema inteligente. Las limitaciones son múltiples: conversión de energía, gran cantidad de piezas, vulnerabilidad, etc. que hace que sean sistemas con mayor peso, tamaño y probabilidad de fallo. Por el contrario, los actuadores inteligentes son mucho más eficientes. Ade-



Figura 4.— *Plumas cobertores de las aves, evitan que el desprendimiento de la capa límite, que se inicia por el borde de salida, avance hasta el borde de ataque del ala, el sistema es autónomo.*

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

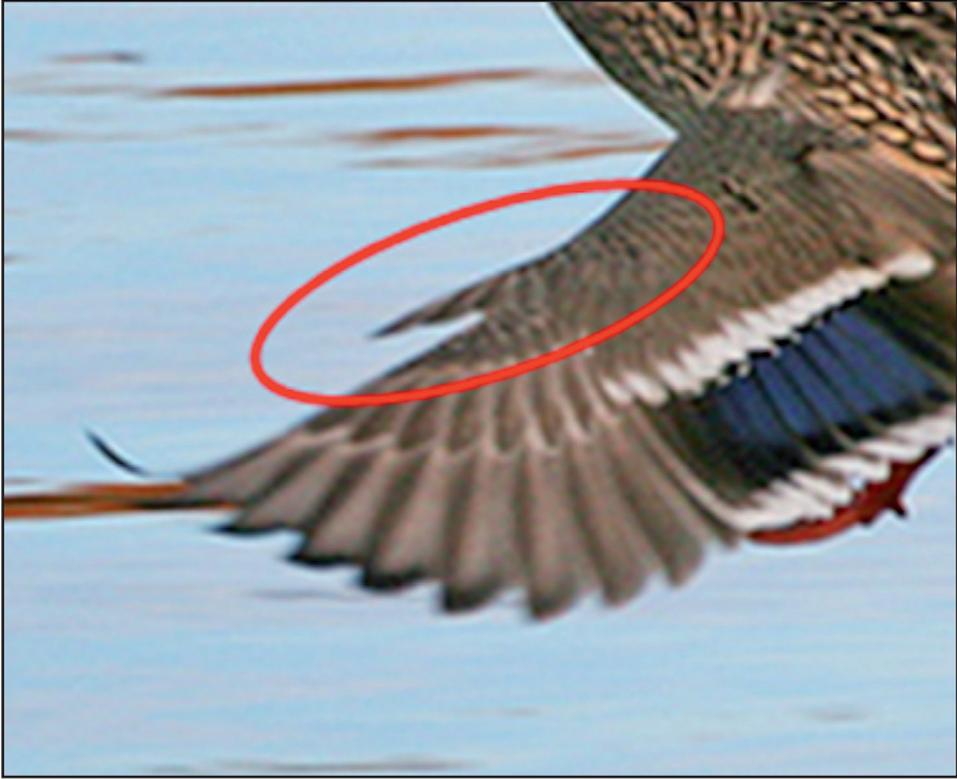


Figura 5.— *Álula autodesplegable que controla el flujo de aire en el extradós del ala retardando el desprendimiento.*

más, el tamaño compacto y peso ligero de estos actuadores no aumentan la carga o restricciones de la estructura de la aeronave y por tanto se obtiene mayor libertad en el diseño de la aeronave. Esto se traduce en que el estudio de los materiales inteligentes es necesario para mejorar las actuaciones de las aeronaves.

El campo más prometedor de los materiales inteligentes es el de las estructuras activas, que consisten en estructuras que contienen una serie de actuadores y sensores acoplados a un controlador. En caso en el que los actuadores y sensores se localicen en puntos determinados de la estructura, se pueden tratar de forma separada, por lo que tienen un alto grado de integración dentro de la estructura.

Desde un punto de vista mecánico, los materiales estructurales clásicos quedan completamente definidos por sus constantes elásticas y su

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

relación entre la tensión y deformación, así como su coeficiente de expansión térmica y su relación con la deformación y la temperatura. Los materiales inteligentes son materiales donde la deformación también puede generarse por diferentes mecanismos que incluyen la temperatura, el campo eléctrico o magnético, etc. como resultado de algunos acoplamientos en sus ecuaciones constitutivas. Los materiales inteligentes más significativos, se describen a continuación:

1. Aleaciones con memoria de forma SMA (*Shape Memory Alloys*). Las SMA pueden recuperar hasta un 5% de deformación mediante el cambio de fase inducido por la temperatura. Aunque hay dos formas posibles de aplicación después del entrenamiento, las SMA son las más adecuadas para tareas con cargas unidireccionales. En cualquier caso, pueden utilizarse sólo a baja frecuencia y para aplicaciones de poca precisión, principalmente por su dificultad de enfriamiento. Otro problema añadido es la fatiga térmica. Las SMA se utilizan poco en el control de vibraciones.
2. Materiales piezoeléctricos. Un material piezoeléctrico tiene la propiedad de tener una polarización eléctrica debido a deformaciones mecánicas producidas por las tensiones, y viceversa. Por ello, pueden utilizarse como sensores para detectar la tensión mecánica mediante el efecto directo. O de otra forma, mediante un incremento significativo de tamaño debido a la carga eléctrica, pueden utilizarse como actuadores. Tienen una recuperación de deformación del 0,1% bajo un campo eléctrico; pueden utilizarse como actuadores, así como sensores. Se trata de dos grandes grupos de materiales piezoeléctricos utilizados en el control de vibraciones: cerámicos y poliméricos. Los polímeros piezoeléctricos, o piezopolímeros, se utilizan principalmente como sensores, ya que requieren altos voltajes y tienen una autoridad de control limitada; el más conocido es el fluoruro de polivinilideno (PVF₂). Las cerámicas piezoeléctricas, o piezocerámicas, se utilizan ampliamente como actuadores y sensores, para un rango amplio de frecuencias que incluyen las aplicaciones ultrasónicas; son adecuadas para alta precisión, por ejemplo en el rango de nanómetros (1 nanómetro = 10⁻⁹ metro). El piezocerámico más conocido es el titanato circonato de plomo (PZT).
3. Materiales magnetostrictivos. Los materiales magnetostrictivos tienen una deformación recuperable del 0,15% en presencia

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

de campo magnético; la máxima respuesta se obtiene cuando el material esta bajo cargas de compresión. Los actuadores magnetostrictivos pueden utilizarse como elementos que soportan carga (sólo en compresión) y tienen una amplia vida útil. También pueden usarse en aplicaciones de alta precisión.

4. Polímeros conductores. El polímero conductor es un material inteligente descubierto hace 30 años. Es un nuevo tipo de material que tiene las características de metales y polímeros. Así tiene un peso ligero con una alta conductividad eléctrica; es ampliamente utilizado en la industria aeroespacial. Los elementos disponibles para medir posición, velocidad, aceleración y deformación tienden a ser cada vez más, particularmente en optomecánica. Los desplazamientos pueden medirse por medios inductivos, capacitivos u ópticos; los dos últimos tienen una precisión en el rango de los nanómetros. Los acelerómetros piezoeléctricos son muy populares pero no pueden medir una componente de corriente continua. La deformación puede medirse con galgas extensométricas, piezocerámicas, piezopolimericos y fibra óptica. La última puede estar embebida en una estructura y dar una medida global promedio de la deformación.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

ACRÓNIMOS UTILIZADOS

AR: Alargamiento (*Aspect Ratio*).
CD: Coeficiente de Resistencia.
CDi: Coeficiente de Resistencia Inducida,
CDo: Coeficiente de Resistencia Parásita.
CL: Coeficiente de Sustentación.
E: Autonomía (*Endurance*).
HAGL: Altura sobre el nivel del suelo (*Height Above Ground Level*).
I+D+i: Investigación y Desarrollo e innovación.
MTOW: Peso Máximo al despegue (*Maximun Takeoff Weight*).
μUAV: Micro Vehículo Aéreo no Tripulado (*Micro Unmanned Aerial Vehicles*).
OEW: Peso Vacío Operativo (*Operating Empty Weight*).
PL: Carga Útil (*Pay Load*).
R: Alcance (*Range*).
Re: Número de Reynolds.
SMA: Aleaciones con Memoria de Forma (*Shape Memory Alloys*).
STOL: Despegue y aterrizaje corto (*Short Take-off and Landing*).
T: Tracción-Empuje (*Traction-Thrust*).
UAS: Sistema Aéreo no Tripulado (*Unmanned Aerial Systems*).
UAV: Vehículo Aéreo no Tripulado (*Unmanned Aerial Vehicles*).
VTOL: Despegue y aterrizaje vertical (*Vertical Take-off and Landing*).
WTO: Peso al despegue (*Takeoff Weight*).
W/S: Carga alar.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

Referencias bibliográficas

- Advanced Technologies & Engineering*, (n.d.), *Road Runner Mini UAV*, en: www.ate-aerospace.com
- ARNOLD, E.: *Aerodynamics for Engineering Students* (4th Edition), Houghton and Carpenter, Gran Bretaña, 1993.
- BARCALA HERREROS, Á. y GANDÍA AGÜERA, F.: *Aerodinámica y mecánica del vuelo*, volumen II, Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Madrid (España), 1996.
- BAKER, J. P.; STANDISH, K. J. and VAN DAM, C. P.: *Two-Dimensional Wind Tunnel and Computational Investigation of a Microtab Modified S809 Airfoil*, AIAA (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*), 2005-1186, (s.n.), Reno, 2005.
- BARCALA, M.; CUERNO-REJADO, C.; GIUDICE, S. del; GANDÍA-AGÜERA, F. and RODRÍGUEZ-SEVILLANO, A. A.: *Experimental investigation on box-wing configuration for UAS*, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, Aeronáutica, ETSI Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, (España).
- BENNET, David: *The Wing Grid: A New Approach to Reducing Induced Drag*, 2001.
- BOURDIN, P.; GATTO, A and FRISWELL, M. I.: *The Application of Variable Cant Angle Winglets for Morphing Aircraft Control*, Bristol (England), 24th Applied Aerodynamics Conference, 2006, AIAA, 2006-3660.
- CHOW, R. and VAN DAM, C. P.: «Unsteady Computational Investigations of Deploying Load Control Microtabs», *Journal of Aircraft*, 2006.
- CUERNO-REJADO, C. and ALONSO-ALBIR, L. Gehse: *Conceptual design of a medium-sized joined-wing aircraft*, p. 2.010, Proc. Inst. Mech. Eng. Part G, Journal of Aerospace Engineering, (en prensa).
- DARA AVIATION INC. (n.d.): *D-1 Unmanned Systems*, Dara Aviation, en: www.daraviation.com
- DRAGOS VIHERU; JIAN TANG; YONGSHENG LIAN; HAO LIU and WEI SHYY: *Flapping and Flexible Wing Aerodynamics of Low Reynolds Number Flight Vehicles*, University of Florida, Gainesville, FL, 32611, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 48109, U.S.A. and Chiba University, Chiba, Japan.
- GÓMEZ-PÉREZ, J. P.; RODRÍGUEZ-SEVILLANO, A. A.; GÓMEZ-PÉREZ, I.; GANDÍA-AGÜERA, F. y BARCALA-MONTEJANO, M. A.: *Airfoil Rapid Prototyping for UAV's Aerodynamics Modeling: Wind Tunnel, Simulation and Flight Tests*, Universidad Politécnica de Madrid, (España).
- KROO, Ilian: *Innovations in Aeronautics*, AIAA 2004-0001 (s.n.), Reno, 2004.
- LIEBECK, R. H.: «Design of subsonic airfoils for high lift», *Journal of Aircraft*, volumen 15, pp. 547-561, 1978.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

- MARK D. and BRAMESFELD, Götz: «Experimental Investigation of Gurney Flaps», Maughmer, *Journal of Aircraft*, volume 45, Pennsylvania, 2008.
- MARK D. and KUNZ, Peter J.: *Saint Auban, Sailplane Winglet Design*. Maughmer (s.n.), Francia.
- MATTOS, B. S. de; MACEDO, A. P.; FILHO, Silva and DURVAL, H.: *Considerations about winglet design*, Orlando, Florida (s.n.), 2003.
- MAYDA, E. A.; DAM, C. van P. and YEN NAKAFUJI, D.: *Finite Width Microtabs for Aerodynamic Load Control*, 2005-1185, AIAA, 2005.
- MUSHTAK, Al-Atabi: «Aerodynamic of Wing Tip Sails», Selangor, Malaysia, *Journal of Engineering Science and Technology*, volume 1, 2006. SHYY, W.; LIAN, Y.; TANG, J.; VIHIERU, D. and LIU, H.: *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*, Nueva York, USA: Cambridge University Press, Nueva York, 2008.
- NIKOLIC, VOJIN R.: «Planform Variations and Aerodynamics Efficiency of Movable Tip Strakes» (s.l.), *Journal of Aircraft*, volumen 44, 2007.
- NING, S. Andrew and KROO, Ilan: *Tip Extensions, Winglets and C-Wings: Conceptual Design and Optimization*.
Reverse Engineering and Aerodynamic Analysis of a Flying Wing UAV, Navabalachandran s/o Jayabalan, Low Jun Horng, G. Leng; Aeronautical Engineering Group, Department of Mechanical Engineering; National University of Singapore.
- RODRÍGUEZ SEVILLANO, Ángel Antonio; GANDÍA AGÜERA, Fernando; BARCALA MONTEJANO, Miguel Ángel y PÉREZ ÁLVAREZ, Javier: *The design of an aircraft: using the final research projectwork to develop multidisciplinary skills and general competences in engineering studies*, International Conference on Engineering and Mathematics, ISBN: 978-84-612-5331-9.
— *The design and building of an UAV: an actual engineering project for student cooperative work*, International Technology, Education and Development Conference, ISBN: 978-84-612-0190-7.
- SALCEDO, S.; MONGE, F.; PALACIOS, F.; GANDÍA, F.; RODRÍGUEZ, A. and BARCALA, M.: *Gurney Flaps and Trailing Edge Devices for Wind Turbines*, EWEC, Atenas, 2006.
- SEATTLE, Louis B.: *Blended Winglet*. Gratzler, United States Patent, 2004.
- SHEVELL, R. S.: *Fundamentals of Flight*, segunda edición, Englewood Cliffs, Prentice-Hall Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1989.
- SELIG, M.; GUGLIELMO, J.; Broeren, A. and GIGUÈRE, P.: *Summary of Low-Speed Airfoil Data*. Virginia Beach, Soar Tech Publications, Virginia (Estados Unidos), 1995.
- TORRES, Gabriel E. and MUELLER, Thomas J.: *Low-Aspect-Ratio Wing Aerodynamics at Low Reynolds Numbers*, University of Notre Dame, Indiana 46556, Notre Dame.

LOS VEHÍCULOS AÉREOS

- TURAN, Mustafa; CANELD, Robert A. and HARMON, Frederic G.: *Tools for Conceptual Design and Engineering Analysis of Micro Air Vehicles*, Air Force Institute of Technology, Dayton, OH.
- URSACHE, N. M.; MELIN, T.; ISIKVEREN, A. T. and FRISWELL, M. I.: *Morphing Winglets for Aircraft Multi-phase*, 7813, 2007.
- UHLMAN, John M. and LIAW, Paul: *Winglets on low aspect ratio wings*, West Virginia University.
- UIUC Airfoil Coordinates Database, (n.d.). UIUC Applied Aerodynamics Group, en: http://www.ae.illinois.edu/m-selig/lads/coord_database.html
- Unmanned Aircraft Systems. UAV's Design, Development and Deployment*, Chichester, Reino Unido, John Wiley & Sons Ltd., Austin, 2010.
- Visión Estratégica Española: Sistemas de Vehículos Aéreos no Tripulados*, Plataforma Aeroespacial Española, enero de 2010.
- WOLKOVITCH J.: «The joined-wing: an overview», *Journal of Aircraft*, volume 23, number 3, pp. 161-178, 1986.
- WANG, Tung; HUNG-CHU, Chou and KUEI-WEN, Lien: *Aerodynamic Efficiency Study of Modern Spiroid Winglets*, Tamkang University, Taiwan (s.n.).
- YUEWEN, Jiang; ZHENGYN, Ye, and ZHAN, Zhengke: *A Method of Inflatable Leading Edge for High Lift, Deicing and Noise Reduction* (s.l.), Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2009.

MIGUEL ÁNGEL BARCALA MONTEJANO
Director de la Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos

LA CARGA ÚTIL

Concepto de carga útil.

La carga útil en un Micro Vehículo Aéreo no Tripulado (μ UAV)

La carga útil (comúnmente *Payload*, P/L) de un vehículo aéreo se define como: «La capacidad de una aeronave para transportar carga».

Este concepto aunque parece suficientemente claro e intuitivo, para que sea funcionalmente válido para la operación de una aeronave, debe ser convenientemente matizado y definido con precisión.

Si la llamada carga de pago es la máxima carga comercialmente viable, es decir la carga del pasaje y/o la carga comercial en bodega, lo

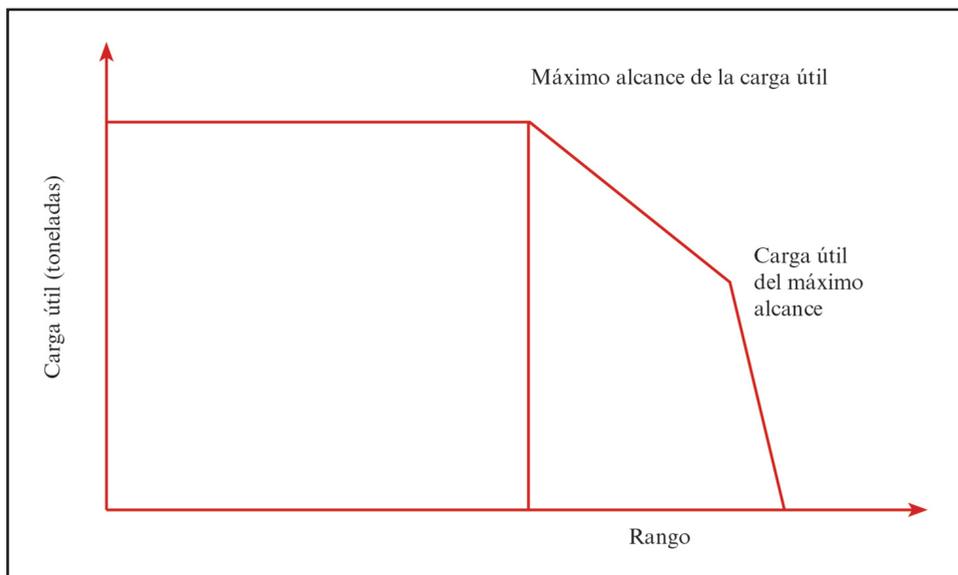


Figura 1.— Máximo alcance de la carga útil.

LA CARGA ÚTIL

cierto es que casi todos los diseños de aeronave civil o militar permiten cambiar parte de esa carga por una mayor cantidad de combustible en función de las necesidades de la misión a realizar, en concreto del alcance máximo, figura 1.

Es decir, que la carga útil es la carga de pago más una cantidad (sin precisar) del combustible; o, en una generalización extrema:

Carga útil = carga de pago + combustible.

Se ve, por tanto, que la carga útil no es un concepto unívoco y que hay que definirlo en cada caso.

En los μ UAV parecería que no cabe dicha ambigüedad ya que no hay parte de carga de pago que se pueda traspasar a combustible o viceversa, máxime teniendo en cuenta que el concepto normal de combustible no existe, es decir, no se consume parte del peso durante la ejecución de la misión. Podemos decir, tomando como estándar la misión de observación, que:

P/L: suele designarse como el conjunto de sensores que sirven para realizar la misión.

Pero, de nuevo podemos incurrir en ambigüedades, ya que el concepto de sistemas de misión es también bastante variable y subjetivo. ejemplo, ¿La transmisión de imágenes, es decir, el enlace de datos, es carga útil? Algunos fabricantes de Sistema Aéreo no Tripulado (UAS) lo consideran (y lo publicitan) así. Pero no lo sería si ese enlace datos incluye aquellos elementos imprescindibles para que el avión pueda volar con seguridad (telemetría-telecomando).

Tipología de las cargas útiles

Tomando como una definición válida para la carga útil, con las precisiones señaladas, la del subsistema o conjunto de elementos que realizan la función originalmente asignada (observación, combate, etc.), se pueden establecer varias posibles clasificaciones de las cargas útiles atendiendo a distintos criterios.

1. Desde un punto de vista funcional:

- *Pasivas*: los sensores. Este es el ejemplo más común de P/L en los μ UAV y, por extensión, en los UAS. Así pues el μ UAV es un vehículo aéreo portador de un sensor o conjunto de sensores

LA CARGA ÚTIL

que se desplazan hasta una zona llamada de observación para cubrir un cierto territorio de forma mucho más eficaz que con esos mismos sensores emplazados en tierra.

- *Activas*: cargas útiles que interactúan con el entorno para dañar o simplemente excitar las condiciones que ese medio posee cuando está en reposo. Para ello pueden descargar energía o productos de diversas formas de manera que desencadenan la reacción deseada:
 - Perturbadores de señal.
 - Designadores.
 - Emisores de productos, materias diversas.
 - Letales. En el caso extremo es el propio μ UAV la carga útil letal. Este es, precisamente, uno de los primeros usos detectados en el ámbito de la defensa para los enjambres de μ UAV: el actuar de forma suicida, provistos de explosivos, para atacar los sistemas de mando y control enemigos, radares, direcciones de tiro, etc.
- *Mixtas*: relé de comunicaciones. Participan de las características funcionales de los dos casos anteriores.

2. Por la tecnología involucrada:

- Particularizando en el caso de los sensores, estos pueden pertenecer a alguno de los siguientes grandes grupos significativos:
 - De imagen: visible. Infrarroja.
 - Radioeléctricos.
 - Radáricos.
 - Sensores de agentes químicos, biológicos o nucleares.
 - Sensores medioambientales (presión, temperatura, humedad, radiación lumínica, UV, etc.).
 - Acústicos.
 - Magnéticos.

En virtud del tamaño o de las necesidades de potencia a bordo no todos son viables para ser utilizados a bordo de los μ UAV en un futuro próximo. No obstante hay aplicaciones que son más fáciles de realizar en modo coordinado en enjambre, que actuando en solitario. Por ejemplo, estableciendo una red en que cada vehículo o pequeño grupo actúa en una frecuencia, como red de escucha o de perturbación. El desarro-

LA CARGA ÚTIL

llo de los enjambres potenciará la creación de nuevas aplicaciones de este tipo.

Parámetros fundamentales en las cargas útiles de los μ UAV

Aunque lógicamente son los mismos que en cualquier sistema embarcado en una aeronave, la especificidad del tamaño de los μ UAV hace que no tengan, en muchos casos, la misma importancia relativa que en aquéllas:

- *Tamaño*: las dimensiones no sobrepasan, en general, el 20% de cualquier dimensión característica del vehículo. Hay notables excepciones como se ha señalado en los casos en que el propio vehículo al completo o una parte sustancial del mismo, hace las veces de carga útil.
- *Peso*: en los μ UAV se le asigna un peso inferior al de P/L en otras aeronaves.
- *Potencia consumida*: su porcentaje es, casi siempre marginal, comparada con otros elementos del sistema, como propulsión, comunicaciones, actuadores.
- *Simplicidad*: las cargas útiles de los μ UAV suelen ser simples, especializadas en unas pocas acciones y optimizando esas prestaciones básicas. Ello deriva del factor coste y de que no se pueden alimentar mecanismos complejos o proceso a bordo «pesado».
- *Compromiso en prestaciones*: muchas veces se establecen requisitos conflictivos que lo son mucho más en el caso de aeronaves tan ligeras. Se pide por ejemplo, gran calidad de imagen con una plataforma muy ligera, dotación simultánea de sensores de espectro visible e infrarrojo, etc. Las soluciones de compromiso, tan típicas en ingeniería, tendrán aquí un nuevo «más difícil todavía».
- *Precio*: muchos μ UAV serán consumibles y usados en grandes cantidades. Eso hace que las cargas útiles deban ser necesariamente, de bajo coste. (¿Qué es bajo coste?: según NASA y Marina norteamericana, ≤ 2.000 dólares norteamericanos, para todo el μ UAV; y la carga útil no es el elemento de mayor coste). Es decir que. La carga útil en los μ UAV:

LA CARGA ÚTIL

- *Aunque...*
«Es el elemento primario facilitador de la misión».
- *No ha sido...*
«El más relevante tecnológicamente». Hasta ahora no se han dedicado similares esfuerzos (recursos) a las P/L que al resto de componentes de los μ UAV.
- *No es...* «el más exigente en cuanto a consumos/interfaces, etc.».
- *No es...* «el más pesado».
 - En aviones comerciales, P/L ~ 30%.
 - En aviones militares, P/L ~ 25%.
 - En UAV P/L ~ 15 al 40%.
 - En μ UAV P/L ~ 5 – 25%.

La relación importancia (eficacia)-coste es altísima en el caso de la carga útil de los μ UAV.

La carga útil de observación

La carga útil de imagen visible ha sido la más solicitada en las aplicaciones iniciales de los μ UAV (al igual que en otras categorías de UAS) y, debido a ello, cuenta con la tecnología más madura de entre los microsensores. De ahí que exista *gran variedad de P/L para observación*, de muy simples, a completamente integradas, figura 2.

Las características de las cámaras de aplicación en μ UAV han conseguido un grado de prestaciones y calidad impresionante. Como ejemplo de un sistema comercial, figura 3, p. 50.

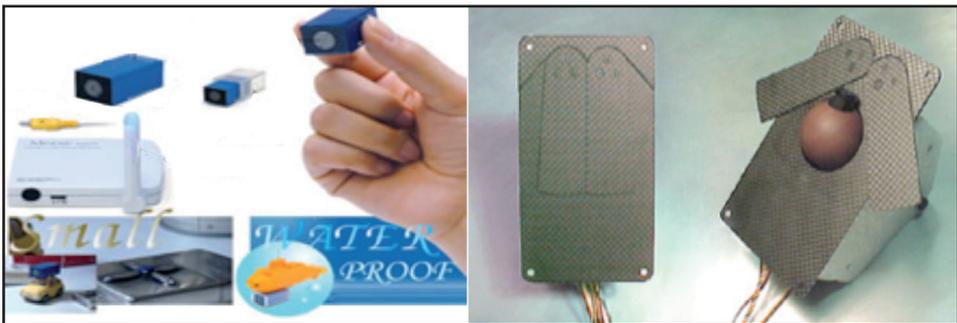


Figura 2.— *Gran variedad de P/L para observación.*

LA CARGA ÚTIL

<p><i>Peso y tamaño</i></p> <p>Peso bruto RTF (recinto inferior): 65 gramos Bastidor desnudo con mecánicos PAN): 15 gramos Caja opcional como se muestra: 11 gramos</p> <p><i>Azimut</i></p> <p>Velocidad: + 360° en menos de un segundo μUAV Rango: $\pm 180^\circ$ del cente</p> <p><i>Elevación</i></p> <p>Velocidad: 90° en menos de medio segundo Rango: 10° a 90° hacia abajo</p> <p><i>Sensor de luz natural:</i> 0,9 Lux <i>Día opcional-noche:</i> 0,0003 Lux</p> <p>Las opciones de lentes</p> <table><tr><td><i>Luz del día:</i></td><td><i>Día-noche:</i></td></tr><tr><td>3,0 milímetros 60°</td><td>4,3 milímetros 78°</td></tr><tr><td>4,0 milímetros (estándar) 40°</td><td>6,0 milímetros 53°</td></tr><tr><td>6,0 milímetros 30°</td><td>8,0 milímetros (estándar) 40°</td></tr><tr><td>8,0 milímetros 22°</td><td>12,0 milímetros 28°</td></tr><tr><td>12,0 milímetros 15°</td><td>16,0 milímetros 19°</td></tr></table>	<i>Luz del día:</i>	<i>Día-noche:</i>	3,0 milímetros 60°	4,3 milímetros 78°	4,0 milímetros (estándar) 40°	6,0 milímetros 53°	6,0 milímetros 30°	8,0 milímetros (estándar) 40°	8,0 milímetros 22°	12,0 milímetros 28°	12,0 milímetros 15°	16,0 milímetros 19°	
<i>Luz del día:</i>	<i>Día-noche:</i>												
3,0 milímetros 60°	4,3 milímetros 78°												
4,0 milímetros (estándar) 40°	6,0 milímetros 53°												
6,0 milímetros 30°	8,0 milímetros (estándar) 40°												
8,0 milímetros 22°	12,0 milímetros 28°												
12,0 milímetros 15°	16,0 milímetros 19°												

Figura 3.— Características del P/L para observación.

Se comprueba la gran variedad de configuraciones (lente y sensor), la calidad de las ópticas y las prestaciones funcionales que se ofrecen en una plataforma integrada de menos de 100 gramos e integrable directamente en un pequeño vehículo aéreo.

La carga útil y el enjambre de μ UAV

Entre las condiciones de utilización de un enjambre de μ UAV las más interesantes y novedosas están en la aplicación del *vuelo cooperativo y la misión distribuida*. Esto significa tareas distribuidas entre varios individuos del enjambre. A efectos de carga útil, que se pueden *diversificar la cargas útiles y/o las aplicaciones de las mismas*.

Operación más habitual: *master-slave* que impone restricciones sobre las P/L embarcadas, dependiendo unas de la funcionalidad de las otras.

LA CARGA ÚTIL

Otra forma de operación de cargas útiles especializadas es la operación de *sensores* «durmientes». Sensores activados por tiempo o desencadenados por alguna acción; orden superior de otro miembro del enjambre, vibraciones próximas ausencia-presencia de luz, etc. Pueden ser autónomos o desprendidos del enjambre.

Un ejemplo: en operaciones urbanas, los μ UAV, actuando en pequeños grupos cooperativos, proveerán las tareas de reconocimiento, vigilancia sobre la zona, vigilancia especializada más cercana, incluso en interiores, servicio de relé para las comunicaciones, de otra manera imposibles, saturación de sistemas de tiro o de comunicaciones del adversario, etc., figura 4.

En esta aplicación se incorporan:

- P/L de observación (varios tipos).
- P/L de comunicaciones relé.

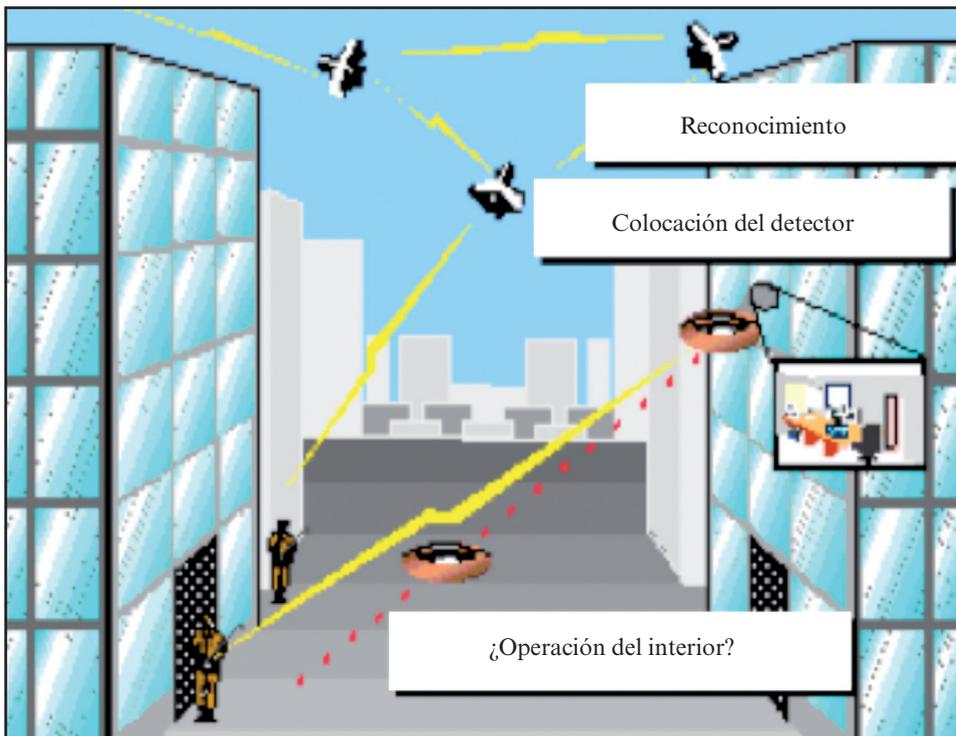


Figura 4.— Tareas de reconocimientos.

LA CARGA ÚTIL

- P/L de saturación.
- P/L de detección de contaminantes, etc.

Actuando todos ellos en cooperación para proporcionar apoyo a las fuerzas en combate.

FRANCISCO MUÑOZ SANZ

Director del Departamento de Programas Aeronáuticos

PROPULSIÓN Y ENERGÍA

Consideraciones generales

En general, el sistema propulsor de una aeronave y el sistema de combustible que lo nutre se suelen tratar aparte, aunque no tienen razón de ser el uno sin el otro. Ello es debido a que, por razones históricas, el sistema relevante era el propulsor y el sistema de combustible simplemente aspiraba a cumplir su función «auxiliar» de alimentación del motor y su problemática era aprovechar al máximo el volumen disponible a bordo, después de haber alojado convenientemente los demás elementos de la aeronave, propulsión, sistemas y carga útil.

También eran muy distintos los campos de la técnica en que se movían el desarrollo de un propulsor (materiales a altas temperaturas, procesos termodinámicos, fluidodinámica y termoquímica) y el desarrollo de un sistema de combustible (almacenamiento seguro de fluidos, bombas y máquinas hidráulicas, sellado de tanques).

La funcionalidad del propulsor, motor o grupo motor-hélice, está íntimamente ligada a las prestaciones de la aeronave y forma parte del diseño básico de la misma mientras que la funcionalidad del sistema de combustible está ligada casi exclusivamente a la autonomía en vuelo.

Esta relación de importancia sólo se invierte en el caso de la propulsión por motor cohete en que los dos componentes (sólidos o líquidos) de la combustión se han de transportar a bordo y el volumen y peso son mucho más significativos que cualquier otro elemento del vehículo aeroespacial, formando parte esencial de la estructura y del diseño y funcionamiento del propio propulsor.

Hasta aquí la reseña histórica de lo que ha sido el desarrollo clásico de los sistemas propulsores basados en la energía almacenada en forma de combustibles fósiles, u otros componentes consumibles crea-

PROPULSIÓN Y ENERGÍA

dos artificialmente. Los motores basados en procesos de combustión, interna o externa, con aire o sin él, han sido prácticamente los únicos viables para el transporte aéreo y el desarrollo de la aeronáutica en todas sus vertientes. Ello ha sido debido, fundamentalmente a:

- *Las masas a transportar.* Tanto en la vertiente militar como en aviación civil es un parámetro primordial la capacidad de transportar grandes cargas, incluyendo el combustible, que facilita la realización de misiones de largo alcance. La capacidad energética del combustible químico y la energía que es capaz de liberar en procesos de combustión es casi imbatible para esas aplicaciones. Sólo la aparición de futuros métodos revolucionarios de generación, aplicación y liberación de energía (por ejemplo, electromagnética) permitirá rebajar esta dependencia de la energía de base química.
- *Las velocidades.* El objetivo básico del desarrollo de la aviación ha sido, hasta tiempos muy recientes, el aumento de la velocidad de transporte. Esto ha impulsado el fenómeno del transporte de masas hasta el punto que ha significado, junto con las telecomunicaciones, la revolución global del siglo XXI. Estas velocidades sólo se consiguen, hasta hoy en día, con los efectos de reacción al poner grandes masas de aire en movimiento a grandes velocidades, típicos de los motores de chorro externo frío (hélice, fan) o interno a alta temperatura (turborreactor puro).

La propulsión eléctrica

La aparición reciente de, por una parte, motores eléctricos de nueva generación con rendimientos altos y relaciones peso-potencia aceptables y, por otra, de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica que permiten autonomías suficientes para ciertos cometidos, ha hecho volver de nuevo la mirada hacia este tipo de energía como fuente básica para la propulsión de móviles con masas importantes (por ejemplo, en automoción). La posibilidad de generación a bordo de la energía eléctrica necesaria para la propulsión (pila de combustible) ha ampliado todavía más el horizonte de la propulsión de base eléctrica, aunque ello comporta nuevos retos tecnológicos y de coste.

Tipos de propulsores para Micro Vehículos Aéreos no Tripulados (μ UAV)

Al disminuir el tamaño de la aeronave, la propulsión clásica en aviación va dando paso a una multiplicidad de posibilidades, muchas de las cuales han sido exploradas en los últimos años. Así se ha encontrado aplicación en forma de micromotores en casi todas las tipologías, figura 1.

MOTOR DE PISTÓN LIBRE

Basados en procesos de combustión:

- Motores de combustión interna (dos tiempos, pistón libre y rotativo).
- Microturbinas.
- Cohetes.

Basados en otros métodos de almacenamiento de energía:

- Motores eléctricos. Alimentados con diversas fuentes de energía:
 - Baterías. Tipos, etc.
 - Pila de combustible.
 - Fotovoltaica.
- Otros motores:
 - Volante de inercia.
 - Neumático.
 - Energía elástica.

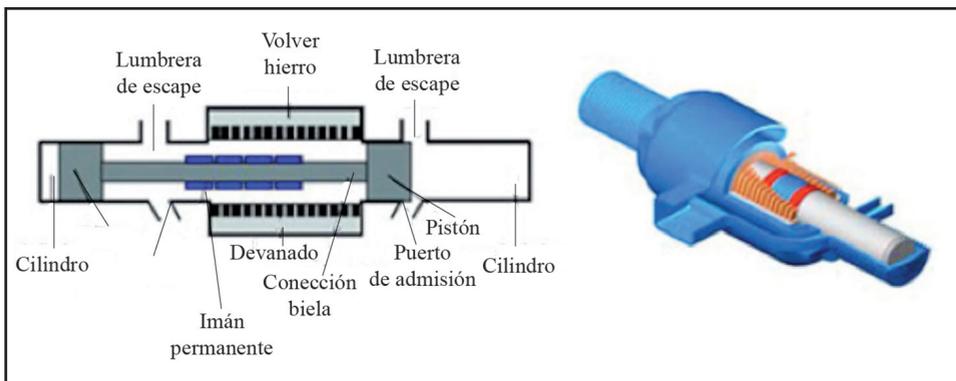


Figura 1.— Motor de pistón libre.

PROPULSIÓN Y ENERGÍA

Pero ocurre que:

- Con números de Reynolds muy bajos, característicos de las aeronaves pequeñas o muy pequeñas, la importancia de la impulsión frente a la sustentación aumenta.
- Existen muy pocos motores térmicos de combustión interna de los tamaños adecuados.
- A su vez la impulsión es menos efectiva para diámetros de turbina muy pequeños que son los que corresponderían a aeronaves de esos tamaños.
- Por otra parte las pequeñas aeronaves no suelen requerir vuelo a gran velocidad debido a la inmediatez física que sugiere su uso en la mayor parte de los casos y la dificultad de control en recorridos razonables.

Todo ello significa que la importancia relativa de los nuevos tipos de propulsores y sus sistemas de almacenamiento-generación de energía asociados, aumenta al disminuir el tamaño total del vehículo aéreo. Es por todo ello que, definitivamente, pierde importancia el concepto de propulsor como sistema aislado y pasa a ser primordial el sistema energía a bordosistema propulsivo.

Es decir que, si por una parte la *hélice* se presenta como candidato principal a hacerse cargo de la impulsión de esas aeronaves, la *propulsión eléctrica* para moverla pasa a ser preferente debido a mayor facilidad de desarrollo de micromotores eléctricos frente otros tipos de motor y mayor facilidad de control, especialmente en configuraciones de multimotores o multirrotores. Otro factor fundamental es la existencia de tecnología disponible en el almacenamiento de energía eléctrica en esos tamaños, proveniente de la electrónica de consumo, aunque la optimización de prestaciones demanda un aumento de la eficiencia y disminución del peso de las baterías.

La progresiva aparición de:

- Motores eléctricos de alto rendimiento (relación potencia-peso).
- Sistemas de almacenamiento eficientes.
- Perspectivas de generación eléctrica a bordo: pila de combustible, otros procesos químicos o químico-físicos.

Hace que sea una alternativa a considerar en automoción, y después en aeronáutica.

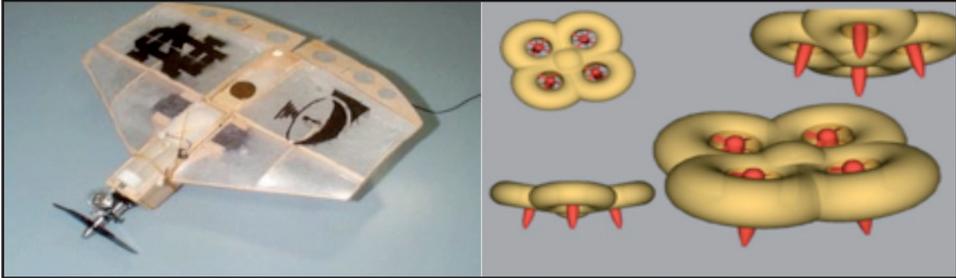


Figura 2.— Características que favorecen al uso de motores eléctricos.

Algunas características que favorecen el uso de motores eléctricos en estas pequeñas potencias y para esta aplicación son:

- Directamente aplicables (comercializados).
- Ligeros.
- Buen nivel de potencia disponible (y la entrega inmediatamente).
- Buenos rendimientos.
- Silenciosos.
- Bajo nivel vibraciones.
- Relación potencia-peso (motor + baterías) alta, figura 2.

Requisitos de diseño

Se establece a continuación una breve introducción a las consideraciones de diseño de un sistema de aeronave pequeña, con propulsión eléctrica, figura 3, p. 58.

Los parámetros principales que miden la capacidad de un sistema motopropulsor son:

- Potencia (vatio).
- Potencia específica (vatio/kilogramos).
- Energía específica (vatio-hora/kilogramos).

Sin entrar en detalles relativos al cumplimiento de una misión específica, podemos establecer unos requisitos mínimos de diseño de una planta propulsora de un μ UAV.

La hipótesis de partida es diseño de un μ UAV de vuelo vertical de, por ejemplo:

- Un kilogramo de peso máximo. Naturalmente, la exigencia de vuelo a punto fijo y exceso de potencia para tener una cierta ca-

PROPULSIÓN Y ENERGÍA

pacidad ascensional y/o vuelo de avance demanda mucha mayor energía que para vuelo horizontal basado en ala portante.

- Rotor(es). Las configuraciones más usuales para las dimensiones reducidas de un μ UAV son las de dos rotores contra rotatorios o las versiones multi rotor (tres o más).

Hay que determinar, pues, las características siguientes:

- Motores eléctricos:
 - Número.
 - Revoluciones por minuto.
 - Potencia.
 - Eficiencia.
 - Peso. Volumen.
- Hélices:
 - Diámetro.
 - Paso.
 - Factor de rendimiento.
- Baterías:
 - Densidad de potencia.
 - Potencia total.

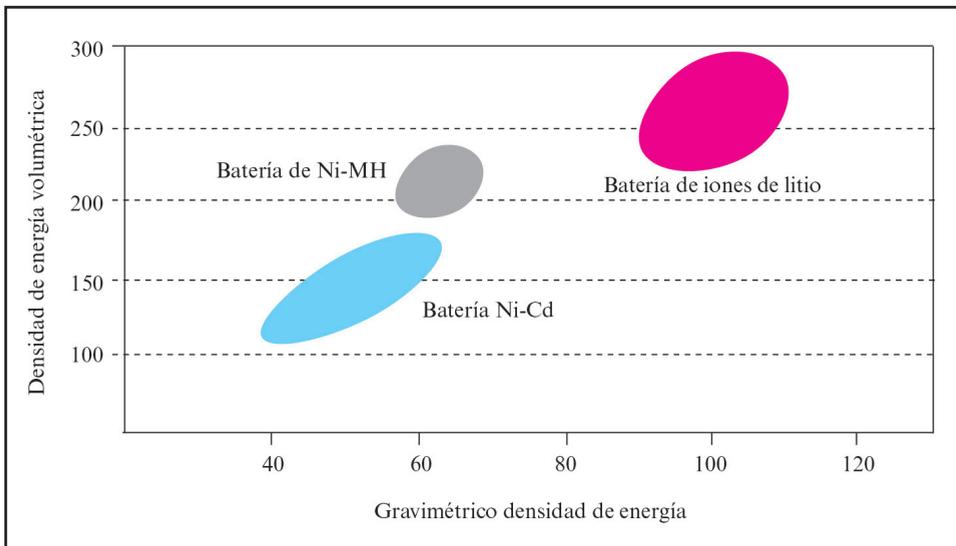


Figura 3.— Comparación con la densidad de energía.

- Intensidad máxima.
- Voltaje.
- Peso. Volumen.

Balance de potencia necesaria. Evaluación preliminar

Las prestaciones (aproximadas) requeridas del vehículo aéreo son:

- Aeronave de vuelo estacionario, autonomía: mínimo 30 minutos.
- Peso máximo: 1.000 gramos.
- Motores: tres o cuatro, necesarios para vuelo estacionario y control sin superficies de mando. Se elige por ejemplo la configuración de tres motores.

Suponiendo unos conjuntos motor hélice capaces de dar unos 0,1 newton-vatio de tracción o empuje vertical (datos normales conseguibles actualmente. Un objetivo de diseño es mejorar esa relación), se necesitan unos 90 vatios efectivos de empuje para vuelo a punto fijo. Se dispondrá de un exceso de potencia sobre este dato para conseguir velocidad ascensional o vuelo de crucero, por ejemplo unos 120 vatios en total

La potencia resultante, necesaria para propulsión es:

- 120 vatios a 11,1 voltios (voltaje que suministran las baterías *Li-Po* (3 por 3,7 voltios), los motores admiten un rango de tensión de 8 a 12 voltios).
- La potencia estimada necesaria para equipos a bordo es: 10 vatios a 7,4 voltios (2 por 3,7 voltios).

Si además tenemos en cuenta la autonomía pedida la capacidad de las baterías deberá ser de, al menos, 6.500 metros/amperios/hora.

Con la tecnología más eficiente actual, usando baterías *Li-Po*, las necesidades se cubren con un peso de 600-700 gramos, lo que dejaría apenas 300 gramos para el resto del vehículo aéreo. Estos serían los parámetros de comparación para una tecnología de sustitución.

FRANCISCO MUÑOZ SANZ

Director del Departamento de Programas Aeronáuticos

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Introducción

Los progresos en tecnologías de sensores, almacenamiento de alta densidad de potencia, y procesamiento de datos han hecho que el desarrollo de Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) sea posible. Los micro UAV y mini UAV desarrollados hasta ahora actúan como sistemas independientes cumpliendo misiones lineales previamente diseñadas por el usuario mediante la introducción de puntos de paso (*waypoints*) y de estrategias de vuelo entre puntos y en cada uno de ellos. La capacidad de utilizar dichos UAV de forma autónoma y cooperativa para llevar a cabo todo tipo de misiones supone un reto tecnológico que combina numerosas tecnologías.

La agrupación de Micro UAV (μ UAV) para realizar una misión común, se denomina «enjambre» o *swarm*, debido a su analogía con ciertos insectos como abejas u hormigas que trabajan de forma cooperativa, repartiendo las tareas y los roles entre el grupo.

Un enjambre equivale a una colección de individuos autónomos locales que dependen de sensores y comportamientos reactivos que interactúan de tal manera que un comportamiento global emerge de las interacciones entre ellos.

Además, todos los miembros tienen un comportamiento controlado localmente, limitado por reglas simples y todos tienen comportamientos reactivos predefinidos.

Por el hecho de considerar μ UAV se presentan una serie de limitaciones en relación con el tamaño, el peso y el consumo de potencia de los diferentes subsistemas:

- La carga útil tendrá una funcionalidad y alcance limitado, por lo que se necesitarán varios μ UAV para llevar a cabo una misión.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

- Las comunicaciones no permitirán grandes alcances ni grandes anchos de banda, por lo que será necesario utilizar nodos intermedios (otros μ UAV) retransmisores de información entre el nodo fuente y el nodo destino.
- La navegación deberá basarse en un conjunto muy limitado de sensores. El actual grado de miniaturización de los *chips* de Navegación por Satélite (GNSS) sitúa esta tecnología como la más apropiada para zonas de vuelo exteriores. En edificios será necesario usar repetidores o triangular con otros μ UAV evitando colisiones entre los mismos.

Por lo tanto, la utilización futura de μ UAV hace necesario el uso cooperativo de un número importante de aeronaves, capaces de trabajar con un alto grado de coordinación tanto en cuanto a la misión (carga útil), como en cuanto al establecimiento de un sistema de comunicaciones en red.

Si bien el control de un único μ UAV desde una estación de tierra es una tecnología madura y se encuentra una amplia gama de productos comerciales disponibles, la interoperabilidad y cooperación entre múltiples plataformas es una tecnología en fase de desarrollo.

Desde el punto de vista de la arquitectura de red, un enjambre de μ UAV representa un escenario con múltiples y cuantiosos nodos formados por μ UAV. Estos nodos tendrán una arquitectura completamente dinámica al encontrarse en continuo movimiento por lo que, *a priori*, no habrá una geometría clara sino más bien una geometría en forma de malla (*mesh*).

Sistema de navegación. Estado del arte y evolución futura

Los Conceptos de Operación (CONOPS) de los enjambres de μ UAV pueden ser muy diversos. Se contempla la operación tanto de día como de noche, en condiciones ambientales extremas y diversas (temperatura, viento, etc.), dentro de entornos urbanos y en campo abierto, volando a la altura de colisión con múltiples obstáculos y con relieves de terreno variables, funcionamiento en interiores de edificios o en exteriores, etc. El área de misión a cubrir dependerá de la cantidad de nodos o componentes del enjambre, el alcance de las comunicaciones de los

enlaces nodo-estación de tierra o nodo-nodo y el área predefinida en el CONOPS (edificios, zonas delimitadas, etc.).

Los sistemas de navegación para enjambres de μ UAV tienen que tener en cuenta las limitaciones en el tamaño, peso, consumo energético y coste de los componentes del sistema, tanto en lo que respecta a la unidad de procesado como a los distintos sensores. En este tipo de UAV es imposible conseguir la fiabilidad de navegación requerida mediante redundancia de sensores. También surge la necesidad de integrar todos los cálculos en un solo ordenador de a bordo que deberá encargarse de las funciones de navegación, guiado y control del Sistema Aéreo no Tripulado (UAS), así como de la gestión de su carga útil y de las comunicaciones encargadas de transmitir los datos recopilados por la misma.

También es necesario tener en cuenta el entorno de vuelo: si se volará en exteriores o interiores y si es necesario evitar colisiones con obstáculos o con otros μ UAV del enjambre.

Las tres opciones básicas de navegación posibles para enjambres de μ UAV son:

1. La miniaturización de los sensores y de los ordenadores para procesado a bordo.
2. La colaboración entre los distintos μ UAV del enjambre combinando la información de posiciones relativas entre ellos.
3. La utilización de sensores externos.

Estas tres aproximaciones no son excluyentes y los sistemas específicos de navegación para enjambres de μ UAV deberán ser una combinación de todas ellas.

Para el vuelo en exteriores, se puede utilizar un sistema de navegación convencional, GNSS+IMU, que combina ambos tipos de sensores. Este tipo de sistemas de navegación se utilizan actualmente en todos los UAV operativos y existen versiones cada vez más reducidas tanto en tamaño como en consumo de potencia que integran los sensores y el ordenador de navegación. La capacidad de procesado a bordo aumenta con cada nueva generación de procesadores haciendo posible la integración de todos los ordenadores de vuelo en uno único de tamaño y consumo reducido.

En el caso de operación dentro de edificios (*indoor*) o en entornos urbanos cerrados con dificultad o imposibilidad de recibir la GNSS,



Figura 1.— *Escenario indoor desarrollado por FADA CATEC en sus instalaciones de Sevilla. Navegación mediante cámaras fijas.*

el escenario va a ser muy diferente con respecto al presentado para espacios libres. El uso de navegación por satélite es imposible dentro de edificios por lo que es necesario trabajar con otro tipo de sensores, y realizar triangulaciones de señal proveniente de estaciones base, etc. para conocer la posición de cada μ UAV de la red. A su vez habrá otros factores importantes como un Sistema *Collision Avoidance* para prevenir daños debidos a choques, y la necesidad de una topología de red tipo Redes Móviles *Ad Hoc* (MANET) que se adapte a las características de las potencias, reflexiones de onda, etc que se hallan en redes interiores, figura 1.

Las principales alternativas para navegación en interior de edificios para enjambres de μ UAV son:

1. Vuelo basado en visión, mediante cámaras de video, IR, láser o radar, localizados en puntos fijos del edificio o integrados en las aeronaves. Dentro de la economía de medios necesaria en los μ UAV, dichos sensores de navegación pueden ser al mismo tiempo la carga útil de observación de las aeronaves.
2. Navegación basada en las señales de comunicación de corto alcance como WiFi u otros protocolos inalámbricos (*ZigBee*, *Ultra Wideband*) que constituyan la capa física y enlace de una red IP.

El concepto de enjambre, lleva implícito que los distintos elementos del mismo colaboren y realicen funciones diferenciadas y complementarias que sirvan para la supervivencia de la comunidad y para

hacer posible que se complete la misión común. De este modo, algunos elementos del enjambre podrían estar diseñados para posarse en las esquinas y actuar como sensores fijos que ayuden a la navegación de los otros μ UAV, portando cámaras, radares o emitiendo una señal de radiofrecuencia concreta. También resulta posible combinar las señales y estimaciones de posición de las distintas aeronaves para mejorar la precisión de la estimación de posiciones relativas o realizar un mapa virtual del interior del edificio combinando la información recogida por todos los miembros del enjambre.

La necesidad de implementar una función de *sense&avoid* para evitar colisiones con el entorno, con las otras aeronaves o con otros objetos en vuelo hace necesario contar con sensores ópticos, IR, láser o radar que determinen la presencia de dichos obstáculos y con capacidad de procesado a bordo suficientemente rápido para adaptar el control de la aeronave y evitar las colisiones. También existe la posibilidad de transmitir la información de los sensores a un centro de procesado único para todo el enjambre en el que se concentre la capacidad de cálculo necesaria.

Arquitectura de red de comunicaciones. Estado del arte y evolución futura

En este apartado se realiza un análisis de las diferentes arquitecturas de red de comunicaciones, centrandó el análisis en las más apropiadas para su empleo con enjambres de μ AV. Se describen los enlaces, protocolos y estándares de comunicaciones aplicables. Posteriormente, se citarán el estado del arte y evolución futura de los diferentes proyectos llevados a cabo por empresas y entes públicos de investigación

ARQUITECTURAS GENERALES DE COMUNICACIONES

Existen cuatro arquitecturas básicas de comunicación que pueden utilizarse en aplicaciones de UAS: enlaces directos, satelitales, celulares o redes de mallas, figura 2.

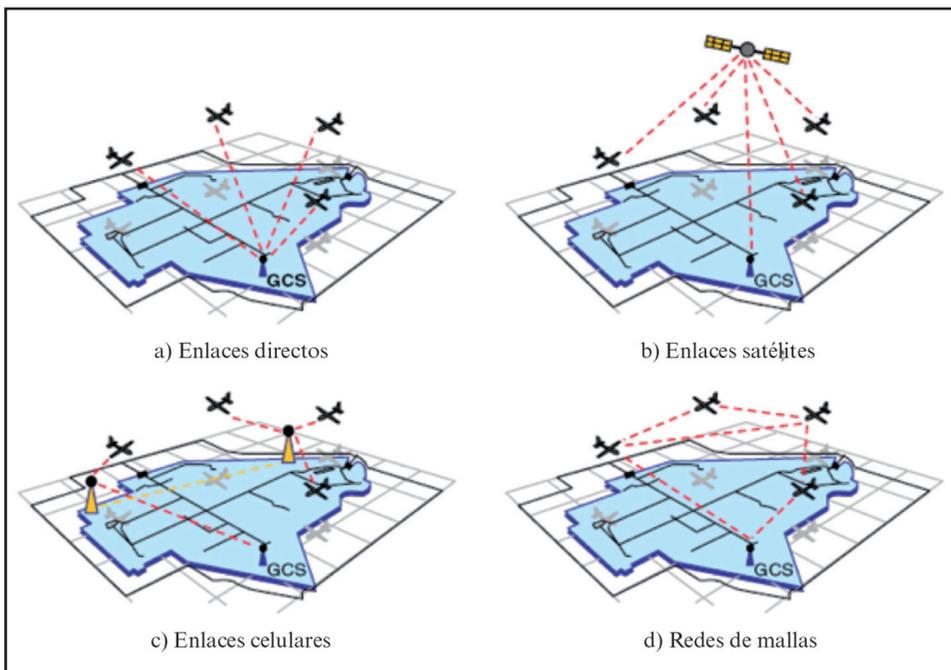


Figura 2.— Tipos de arquitecturas de UAS.

Los *enlaces directos* (punto a punto como se ha visto para enlaces IC2DL y HDRDL) son enlaces dedicados entre la Estación de Control Terrestre (GCS) y el UAV que constituyen la arquitectura más simple posible. Estos enlaces definen una arquitectura centralizada en las estaciones GCS, las cuales necesitan estar en permanente comunicación con LOS (*Line-Of-Sight*). Los relieves y obstrucciones, pueden bloquear la señal y para distancias mayores, el UAV necesitará transmisores de alta potencia, antenas directivas o un ancho de banda significativo para soportar enlaces de bajada de alta tasa de datos. Finalmente los enlaces directos no explotarán las características de cooperación entre aviones en la misma área.

Los *enlaces satelitales* proveen una mayor cobertura que los enlaces directos, aunque continúan teniendo una topología centralizada. Los enlaces sufren un cierto retraso en la transmisión de la señal debido a la distancia entre GCS-UA-satélite. Además, para aplicaciones de alta tasa de datos, es necesario antenas directivas voluminosas con tamaño, peso y coste inapropiado para su uso en μ UAV.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Los *enlaces celulares* se refieren a una infraestructura de torretas similar a la infraestructura de telefonía móvil ubicua actual. La arquitectura celular tiene ciertas ventajas, que pueden proveer buenos niveles de conectividad de red y entrega de datos fiable:

- En primer lugar, la cobertura puede extenderse sobre amplias áreas a través de múltiples estaciones base. Los UAS realizarían el *handover* entre diferentes estaciones base, en función de las necesidades durante el vuelo.
- En segundo lugar, las múltiples estaciones base proveen una redundancia natural, por lo que si un enlace es malo, puede aparecer otro que sea mejor.
- En tercer lugar, el ancho de banda puede ser reutilizado varias veces en una región, a medida que se incrementa el número de estaciones base.
- Por último, la infraestructura puede ser compartida por diferentes UAS.

Estas ventajas deben ser sopesadas con el coste debido a la instalación de repetidores tierra, el equipamiento radio y la asociada infraestructura de red. Esta arquitectura puede ser amortizada por un uso frecuente de vuelo de UAV en un área concreta. Existe la posibilidad de desplegar una red dedicada de μ UAV, dotados de repetidores que se situarían en puntos estratégicos y que podrían utilizarse también para navegación (*véase* solución propuesta en este apartado). La red de telefonía actual no es suficientemente segura para cubrir estos aspectos y asegurar la seguridad de vuelo del enjambre.

Las *redes de mallas* son arquitecturas de red donde cada nodo (es decir, un UAV o nodo de tierra) puede actuar como un nodo repetidor que retransmite los datos. La comunicación entre un UAV y una estación GCS puede tener saltos, a través de varios nodos intermedios, y la comunicación avión-avión puede ser directa, y también beneficiarse de los protocolos de enrutamiento de la malla, empleando tantos nodos *relays* adicionales como sean necesarios para mantener la comunicación. Las MANET son un ejemplo concreto de una arquitectura de malla compuesta por una autoconfiguración de los routers de la red móvil que son libres de moverse al azar en todo el medio.

Las redes de mallas también pueden aprovechar las otras tecnologías descritas anteriormente. Un enlace directo, satelital, o celular de cualquier nodo en una red de malla permite la comunicación con todos los

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

nodos proporcionando redundancia adicional en la comunicación y enlaces con otras redes o con un centro de control remoto. Además, el mallado combinado con la movilidad puede extender el alcance. Por ejemplo, a medida que un grupo de μ UAV se mueve más allá del alcance de un enlace directo en línea de vista, alguno de los μ UAV se puede asignar para quedarse atrás formando una cadena de enlaces directos que permita la comunicación entre dos nodos lejanos. En una forma extrema este μ UAV puede volar en ida y vuelta para transportar los datos entre los nodos que ahora se hallan muy separados (mediante el uso de redes DTN). Es esta flexibilidad, robustez y alcance añadido, el que hace de las redes de malla parte esencial de cualquier operación con enjambres de μ UAV.

ENLACES DE COMUNICACIONES

La arquitectura de red considerada incluye una red de malla con los siguientes enlaces a tener en cuenta.

ENLACES UAV-GCS

Los enlaces radio necesarios para poder operar con los UAV son los siguientes:

- *UAV Primary Up Link Control*. En este vínculo de la GDT con la UAV, proporciona el control para el UAV y el *payload* durante las operaciones de vuelo.
- *UAV Secondary Up Link Control*. Este enlace de GDT o L/R (*Launch and Recovery*) al UAV, proporciona el control para los UAV y el *payload* durante las operaciones de vuelo si el principal enlace de control se pierde.
- *UAV Telemetry Down Link*. Constituye la señal del video en tiempo real desde el UAV al MPS (*Mision Planning Station*)-GCS, LRS (*Launch and Recovery Station*) y RVT (*Remote Video Terminal*). También puede mostrar el control downlink de datos del vuelo al GCS y LRS.
- *UAV Command Net (VHF-UHF)*. Esta red es utilizada para coordinar el UAV entre los equipos del GCS, LRS y RVT. Un sistema de telefonía inalámbrico está instalado como principal medio de comunicación entre el GCS, LRS y RVT (s)-Unidad de apoyo (s), siempre que sea posible.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

- *Tactical Air Direction (UHF-VHF)* o *TATC (Tactical Air Traffic Control) (UHF-VHF) Net*. Hay dos redes de radio en el link principal entre el control aéreo y el GCS-LRS-MPS. Estas redes pueden ser utilizadas en la misión o para coordinar las operaciones aéreas del UAV durante el vuelo.
- *LF INTEL (Landing Force Intelligence) (HF-VHF-UHF-SATCOM)*. Esta red es usada para el mando de misiones al UAV.

En el caso de una red en forma de enjambre de μ AV, prácticamente sólo se utilizará el primero y segundo de los enlaces, simplificando enormemente la red utilizada con respecto a la de UAV de tipo HALE y MALE. El tercero de los enlaces dependerá del uso y misión que se determine a los μ UAV.

ENLACES UAV-UAV

Las comunicaciones entre diferentes UAV puede deberse a la necesidad de cooperación entre sendas aeronaves de información tipo *sense&avoid* o navegación, o simplemente de información de retransmisión hacia otros nodos de red que no poseen enlace directo con tierra (GCS).

ENLACES UAV-SATÉLITE Y SATÉLITE-GCS

Este enlace no es compatible con el uso de μ UAV. Sin embargo, puede establecerse un enlace satélite entre un repetidor en tierra o en vuelo (UAV tipo MALE), que enlace con la malla y permita integrar la misma en una red superior. El uso de Comunicaciones Basadas en Satélites (SATCOM) y sistemas de navegación, puede aportar una cantidad importante de ventajas, debido al bajo coste que conlleva:

- Facilita la integración de UAS en el espacio aéreo no segregado al confiar las comunicaciones ATC y la vigilancia a distancia de las operaciones relacionadas.
- Facilita la información al piloto al mando a distancia a través de un enlace por satélite fiable.
- Permite misiones más allá de la línea de visión (BLOS) mediante transmisión del mando y control y comunicaciones de la carga útil al segmento terreno ya sea directamente o a través de la malla GEE.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Enlaces UAV-ATC. Se constituyen entre la aeronave y estación de control de aviación civil. En el caso de enjambres de μ UAV, sólo tiene sentido este enlace entre un nodo central y el ATC. Dado que los enjambres operarán habitualmente en entornos urbanos y a baja altura, la capacidad de este enlace será muy limitada.

ESTÁNDARES DE COMUNICACIONES PARA MÚLTIPLES UAV

En primer lugar, cabe destacar que no existe aún un estándar global de interoperabilidad para los UAV sino un conjunto de varios aspirantes focalizados en los diferentes medios y características de los sistemas. De este modo, es necesario encontrar una convergencia entre todos los estándares actuales a modo de encontrar un modelo capaz de manejar flotas masivas de UAV de todo tipo, ya sean terrestres, aéreos o submarinos.

Existen multitud de estándares en el mundo de los UAV principalmente dedicados a cada uno de los medios en donde se desenvuelven: tierra, mar y aire. Dentro de estos estándares cabe destacar:

- JAUS (*Joint Architecture for Unmanned Systems*).
- STANAG 4586.
- ASTM F41 y sus cuatro estándares de UMV: 2541-06, 2594-07, 2595-07 y WK11283.
- MIL-STD-1760.
- UAI (*Universal Armament Interface*), figura 3.

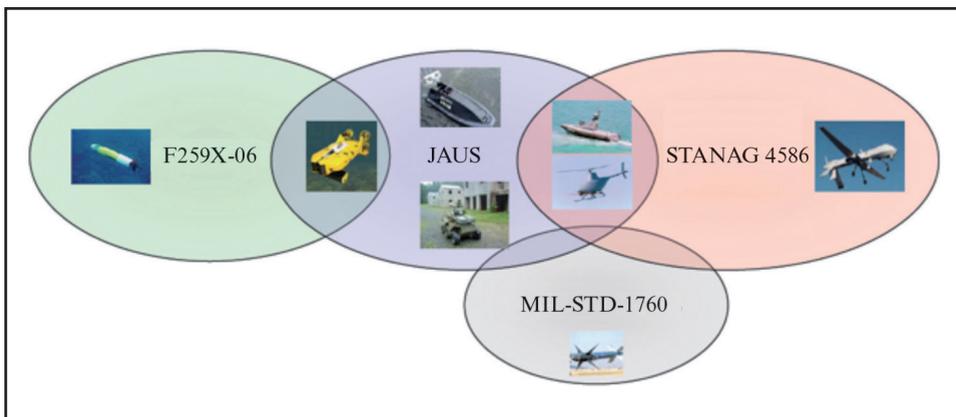


Figura 3.— Convergencia entre estándares de vehículos no tripulados.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Entre los estándares anteriores caben destacar JAUS y STANAG 4586, sin embargo, véase en los cuadros del Anexo A, pp. 85-90, las características principales de cada uno de los cinco estándares citados anteriormente.

JAUS y STANAG 4586 son estándares basados en mensajes, sin embargo JAUS dedica la mayor parte de su énfasis en el comando y control de sistemas no tripulados, mientras que el STANAG 4586 hace más hincapié en los datos de *payloads* de UAV. En consecuencia, JAUS actualmente soporta algunas capacidades diferentes a STANAG 4586 en términos de representar el entorno que rodea a los sistemas no tripulados y proporcionando funcionalidad para evitar obstáculos. Otra diferencia técnica entre los dos estándares es que JAUS trata los sistemas no tripulados como activos genéricos, mientras que el STANAG 4586 emplea Módulos Específicos de Vehículos (VSM) dentro de la norma.

Con el objetivo de ofrecer el mejor camino para la futura interoperabilidad de los sistemas no tripulados se ha creado la denominada Arquitectura Orientada a Servicios (SOA). Tanto JAUS como STANAG 4586 (en la edición 4.0) están documentando su implementación de una SOA. Se espera que próximamente se muestren resultados sobre la interoperabilidad mediante SOA.

USO DE OSI Y ESTÁNDARES COMPATIBLES

Debido a la expansión en el mundo de la telemática del modelo OSI y en su defecto, el protocolo TCP-IP en Internet, se hace imprescindible para cualquier intento de interoperabilidad el uso de este modelo. El STANAG 4586 únicamente define dos interfaces y los mensajes consecuentes para llevar a cabo la interoperabilidad consecuente. Sin embargo, este STANAG se soporta bajo los enlaces definidos en los STANAG 4660 y 7085 para la interfaz AV-UCS (GCS). En el STANAG 4660 se toma como referencia la pila de protocolos OSI dejando varias capas vacías como son: sesión y presentación (similar al modelo TCP-IP). Por otro lado el STANAG 7085 realiza una variación del modelo OSI aunque siguiendo las primitivas de servicio especificadas en el STANAG 4250 (modelo de referencia de la OTAN para OSI).

JAUS al igual que el STANAG 4586 está basado en mensajes para lograr la interoperabilidad entre vehículos y define para ello una estructura muy simple del modelo OSI como se puede observar en la figura 4.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

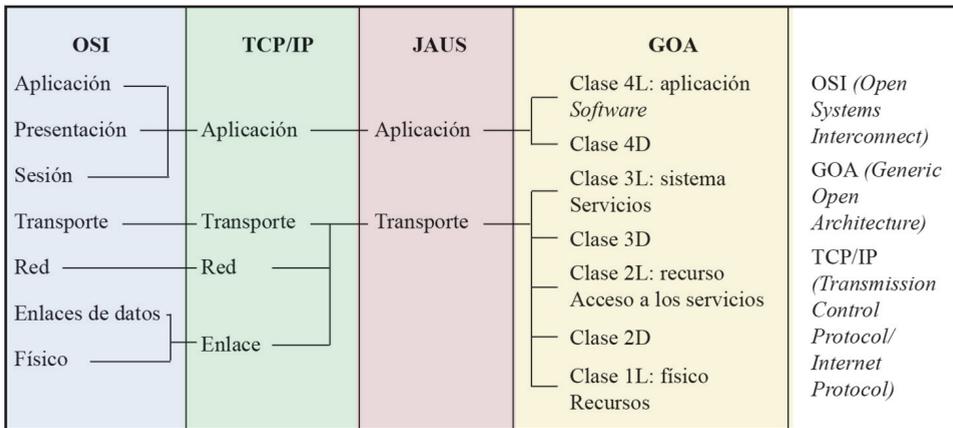


Figura 4.— Capas del estándar JAUS.

La integración de JAUS y el STANAG 4586 (a través del STANAG 4660 y 7085) en el modelo OSI es clave para la interacción futura con otros protocolos de red como pueden ser DTN o MANET (véase los Anexos B, pp. 91-95 y C, pp. 95-98). Sin embargo, es clave especialmente en el terreno militar establecer protocolos fiables y seguros para misiones ISR o de cualquier otro tipo.

ESTADO DEL ARTE

Existen multitud de proyectos orientados hacia la cooperación de múltiples UAV y micro UAV, sin embargo estos proyectos podrán ser divididos en dos tipos principales: proyectos de entes privados y proyectos de universidades.

Entre los *proyectos de entes privados*, destaca desde el punto de vista de las comunicaciones y arquitectura de red, el uso de STANAG 4586 y JAUS debido principalmente a acuerdos con el Ejército de Estados Unidos y por ser empresas cuya sede se halla en países pertenecientes a OTAN. En otros países no pertenecientes el uso de los diferentes STANAG no está permitido, por tanto es necesario recurrir a estándares abiertos globalmente para poder lograr una interoperabilidad total en el uso de múltiples UAV.

Por otro lado, el uso del STANAG 4586 y JAUS implica el uso únicamente de mensajes entre los diferentes nodos de red, sin embargo,

queda en manos del usuario la elección de la topología de red y los enlaces pertinentes.

El *payload* utilizado generalmente en los proyectos de empresas normalmente será sofisticado y constará de antenas y radares tipo micro SAR, sistemas de imágenes tipo cámaras y alto nivel de procesamiento para las funciones de retransmisión y procesamiento de imágenes. De esta manera las funciones de *sense&avoid* serán llevadas a cabo de forma muy precisa aparte de otras prestaciones como misiones de ISR.

En los *programas universitarios*, la investigación se ha centrado más en el comportamiento que tendrían los μ UAV como conjunto en forma de enjambre y el uso de sistemas alternativos al GPS u otros sistemas de navegación de coste y peso elevado, que son desarrollados por las empresas privadas. A través del Protocolo 802.11 o WiFi, es posible calcular posiciones relativas mediante el uso de Tiempo de Llegada (TOA), Diferencia de Tiempo de Llegada (TDOA), Ángulo de Llegada (AOA) o el Indicador de Potencia de Señal Recibida (RSSI). De esta manera, igualmente es posible evitar la necesidad de utilizar un sistema de imágenes para realizar la tarea de *sense&avoid* con otros μ UAV en vuelo, lo cual conlleva a un gran ahorro computacional y de ancho de banda.

En general, los protocolos y estándares utilizados por proyectos universitarios serán de carácter libre y sencillo, evitando las complejidades asociadas al uso de STANAG 4586, JAUS u otros estándares asociados.

En cuanto a los escenarios utilizados, principalmente se han establecido zonas al aire libre para llevar a cabo las misiones, debido a la utilización en incendios, vigilancia de costas, monitorización de diferentes elementos, etc. Sin embargo, cada vez con más frecuencia se está trasladando el escenario del CONOPS a lugares interiores (*indoor*). En estos casos las aeronaves utilizadas generalmente son de ala rotatoria y generalmente cuadrotores debido a su gran estabilidad en el aire y su sencillez de manejo.

Evolución futura

No existen actualmente enjambres de μ UAV en estado operativo. Sin embargo, sí que se están realizando numerosos proyectos de demostración tecnológica y operativa. A partir de dichos estudios podemos extrapolar las tendencias futuras de este segmento de mercado.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

NÚMERO DE μ UAV

En primer lugar, cabe destacar el aumento progresivo del número de μ UAV en los últimos años, que componen el enjambre a medida que la miniaturización y la autonomía de cada aeronave van aumentando. Por otro lado, el aumento de μ UAV provoca irremediablemente que la red cada vez sea más compleja y por tanto, el diseño de la arquitectura cada vez vaya teniendo más peso. De esta manera el diseño deberá tener en cuenta la topología que más se adapte a los enlaces necesarios entre aeronaves y aeronaves-GCSS además del ancho de banda necesario para llevar a cabo las comunicaciones.

COMPORTAMIENTO EN VUELO

En segundo lugar, como se ha podido observar en los programas de investigación en universidades, se está tratando de aplicar teorías de biología sobre comportamiento de enjambres de insectos para luego adaptarlas en la mayor medida posible al mundo de los μ UAV. A medida que la miniaturización de los μ UAV sea extensiva y aparezcan modelos muy pequeños, el movimiento y navegación con varias decenas o centenas de nodos al mismo tiempo será una tarea a tener en consideración. Por ello será necesario tener en cuenta diferentes patrones de movimiento basados en patrones animales como hormigas o bandadas de pájaros, ya que se consideran como ejemplos de alta perfección.

AUTONOMÍA

Los Sistemas de UAV actuales difieren drásticamente en la medida en que el control de vuelo está automatizado. En algunos casos, la aeronave se guía de forma manual utilizando *joysticks* y controles de timón, con el operador que recibe las imágenes visuales de una cámara montada en el vehículo. En otros casos el control es parcialmente automatizado, de modo que el operador selecciona los parámetros deseados a través de una interfaz en la GCS. Finalmente en algunos casos, los UAV se controlan de forma totalmente automática, de modo que un piloto automático mantiene el control de vuelo utilizando las coordenadas *fly-to* programadas (caso común en los UAV de diferentes tamaños actualmente en servicio).

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El aumento de la automatización en los μ UAV va a ser esencial para el control de múltiples aeronaves al mismo tiempo y la realización de tareas complejas en común. El reto futuro es la definición de una misión común para el enjambre que se traducirá en la asignación dinámica de diferentes misiones a los distintos μ UAV del enjambre, los cuales estarán dotados de un alto grado de autonomía para tomar las decisiones relativas a la misión, reduciendo la carga de trabajo del operador que actúa como supervisor del enjambre y no como prescriptor de las trayectorias de vuelo de cada una de las aeronaves en operación. Para poder volar autónomamente con toda garantía, va a ser necesario el uso de algún tipo de sistema de navegación que cumpla las condiciones de *sense&avoid*, de manera que no exista peligro para el resto de aeronaves y entes terrestres, de impacto o colisión.

Por otro lado, el incremento de la automatización y la precisión de la carga de pago, permitirán al operador centrarse únicamente en el control de cámaras, radares u otros sensores así como funciones de red, y olvidarse parcialmente de la navegación de cada μ UAV. Además con el incremento de las capacidades de cálculo y sensores integrados en el control del UAS se espera que los μ UAV sean capaces asumir progresivamente un mayor procesado a bordo de la información adquirida por la carga útil y de llevar a cabo misiones cada vez más completas y con una mayor coordinación con el resto de iguales.

USO DE REDES DTN Y MANET

La necesidad de una cooperación comunicativa entre los diferentes nodos de una red de μ UAV y el pequeño coste y tamaño de los componentes embebidos de los μ UAV provoca que múltiples líneas de trabajo futuras, se centren en las redes MANET (*Mobile Ad hoc Networks*) y DTN (*Delay Tolerant Networks*).

Los dispositivos de redes MANET y DTN tienen la necesidad de colaborar a pesar de que no pueden basarse en ninguna infraestructura de comunicación estable. Por lo tanto una red *Ad Hoc* debe crearse sobre la marcha. Cabe señalar que las configuraciones resultantes de redes MANET y DTN son enormemente flexibles y versátiles.

Con tal configuración, se plantea una serie de problemas entre los que la seguridad y control de flotas son primordiales. Ambos se plantean en varios proyectos, actualmente en ejecución, y sus consecuencias

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

prácticas podrán ser vistas en unos cuantos años, (véase referencias bibliográficas [4] y [5]).

Retos tecnológicos relacionados con las comunicaciones

Desde el punto de vista de las comunicaciones y la arquitectura de red, la reducción de tamaño, consumo de potencia y costes tiene una serie de implicaciones importantes que se verán en los siguientes subpartados, figura 5.

CONSUMO ENERGÉTICO

Debido a que el peso y coste que se requiere para las baterías serán muy reducidos, las comunicaciones deberán estar muy optimizadas, tanto en consumo energético como en la duración de las mismas.

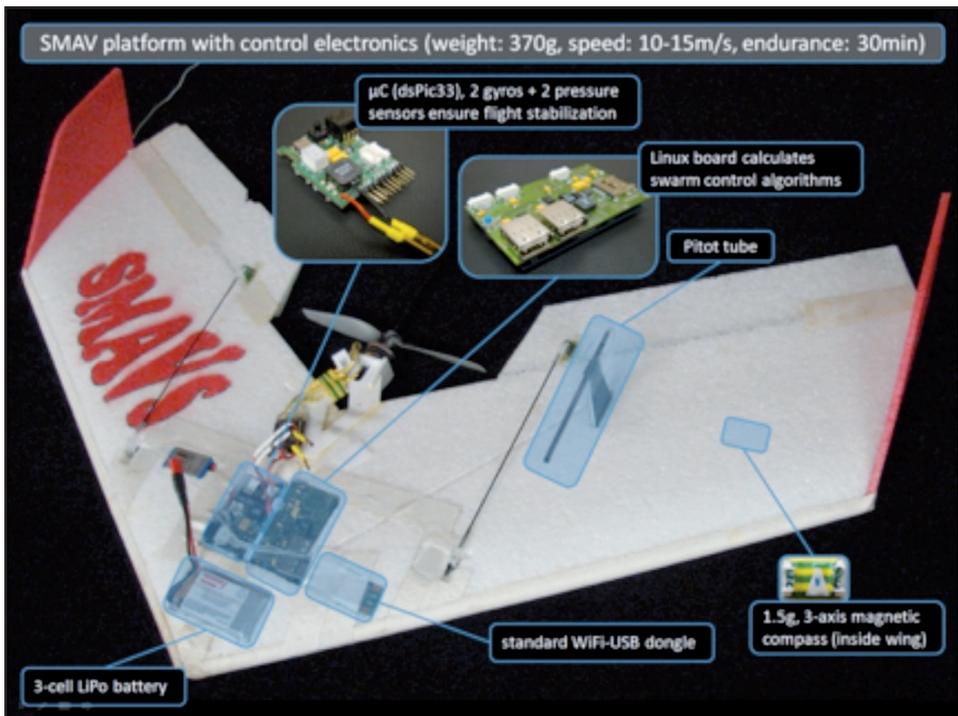


Figura 5.— Ejemplo de materiales y electrónica de un μ UAV.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La búsqueda de protocolos y estándares de comunicación eficientes energéticamente será clave para el desarrollo de enjambres de μ UAV.

Debido al bajo consumo energético, las comunicaciones no podrán ser de largo alcance por lo que se deberá plantear una arquitectura de red en la cual sea frecuente no tener enlace con muchos otros nodos. De esta manera, se hace adecuado una MANET, en la cual sea posible la cooperación entre los diferentes nodos de red.

ESTÁNDARES APROPIADOS

La utilización de estándares de comunicaciones de bajo coste energético deberá ser compatible con el mantenimiento de una estructura IP y una amplia interoperabilidad. Un estándar existente y ampliamente difundido que cumple con estas características es el WiFi. Dicho estándar permite también su utilización para navegación y posicionamiento relativo mediante triangulación de estaciones base y parámetros del estándar WiFi como TOA y RSSI, en aquellos entornos en los que no se disponga de señal GPS. Sin embargo, existen otras alternativas, fáciles de integrar en redes IP como pueden ser *ZigBee* y *Ultra WideBand*. Sin embargo, el uso de todos ellos se halla en fase experimental, aunque se espera la maduración del concepto y su disponibilidad operativa en poco tiempo.

SIMPLICIDAD DE LA CARGA DE PAGO

La carga de pago, capaz de ser transportada por un μ UAV deberá ser muy reducida en tamaño, peso y consumo de energía. Esto redundará en un volumen de datos a transmitir menor que para otros UAV de mayor tamaño. La información global se conseguirá como una suma de las informaciones locales transmitidas desde los diferentes nodos. En cualquier caso, gracias a la miniaturización, el payload embarcado cada vez es de mejor calidad y prestaciones, pese al pequeño tamaño.

DURACIÓN DE LA MISIÓN

Actualmente la autonomía que se consigue en las misiones de mini y micro UAV apenas sobrepasa la hora de funcionamiento. Esto se debe a las limitaciones en peso y rendimiento de las baterías que deben alimentar tanto al motor como a los mandos de la plataforma, a su carga

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

útil y a su equipo de comunicaciones. Sin embargo, en un futuro, gracias a la miniaturización y a nuevas fuentes energéticas se espera conseguir una autonomía en el aire del orden de horas e incluso días gracias a tecnologías como paneles solares.

Para las arquitecturas de red propuestas, una mayor autonomía en el aire por parte de los nodos μ UAV provocará una red más consistente.

ESTRATEGIAS DE VUELO COOPERATIVO

Desde el punto de vista de las comunicaciones y la arquitectura de red, el desarrollo y puesta en servicio de enjambres de μ UAV va a tener repercusiones en la cooperación entre los diferentes nodos que conforman la red. Debido a la capacidad limitada de las comunicaciones y al corto alcance de éstas, es necesaria la coordinación de varios nodos para tener comunicaciones entre nodos distantes. Para ello generalmente se utilizarán MANET, en las cuales los nodos autónomamente se comuniquen con los nodos vecinos cuando necesiten transmitir a un nodo distante. De esta manera, además se consigue una mejora de la señal recibida debido a que es posible que llegue información a través de múltiples nodos, lo cual se asemeja a un sistema de antenas MIMO (*Multiple-Input and Multiple-Output*), figura 6.

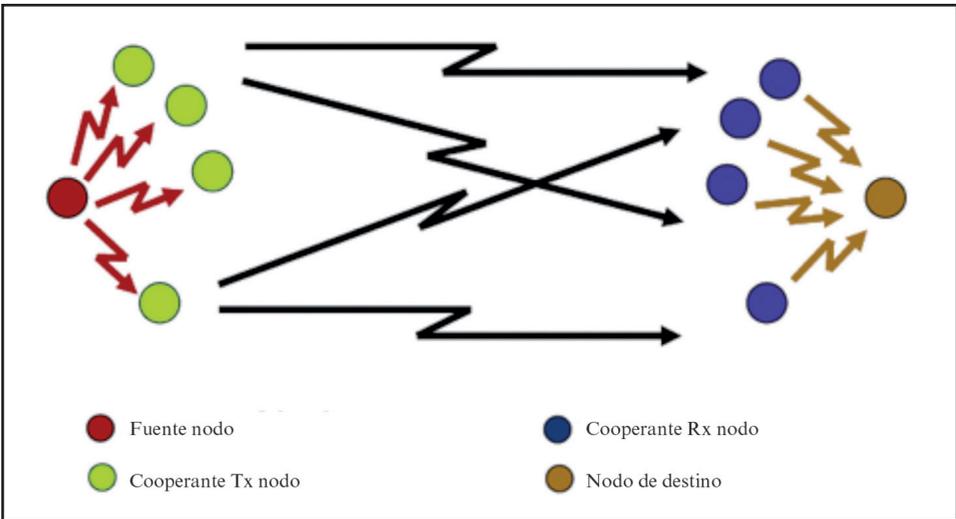


Figura 6.— Ejemplo de arquitectura cooperativa.

Los enlaces de retransmisión o *relay*, los cuales son los nodos intermedios presentes en las cercanías ya sea el origen o el destino, forman la base para la comunicación cooperativa en la cual colaboran para la transmisión. A continuación se mostrarán los modelos básicos de retransmisión a partir de los cuales se establece el sistema de comunicación cooperativa.

MÉTODOS DE RETRANSMISIÓN

Decodificar y reenviar: en el método *Decode and Forward*, un nodo cooperativo primero decodifica las señales recibidas de una fuente y, a continuación las retransmite. El receptor en el destino utiliza la información retransmitida por varios *relays* y la fuente (si está disponible) para tomar decisiones. Cabe señalar que es posible para un nodo cooperativo decodificar los símbolos de error que resultan de fallos en la propagación. La regeneración perfecta en los *relays* pueden requerir la retransmisión de los símbolos o el Uso de Corrección de Errores (FEC), dependiendo de la calidad de la canal entre la fuente y los *relays*. Esto puede no ser adecuado para las redes limitadas por retrasos.

Amplificar y reenviar: en este método cada nodo cooperativo recibe las señales transmitidas por el nodo de origen, pero no los decodifica. Estas señales en su forma ruidosa se amplifican para compensar la atenuación sufrida entre los enlaces de origen a *relay* y posteriormente retransmite. El nodo destino requiere el conocimiento del estado del canal entre los enlaces de origen a *relé*, para decodificar correctamente los símbolos enviados desde la fuente, lo cual conlleva al uso de pilotos. Además, el muestreo, amplificado y retransmisión de valores analógicos es una tarea no trivial para la implementación en tiempo real.

Arquitecturas de retransmisión: la figura 7, p. 80, muestra las diferentes arquitecturas de retransmisión, (véase referencia [6]). En el corazón de la comunicación cooperativa se encuentra la arquitectura clásica de retransmisión, como se muestra en la figura 7a, el cual también se llama el «problema de los tres cuerpos». En la figura, S es la fuente, R es el *relay* y D es el terminal de destino. La fuente emite la señal tanto al *relay* como el destino. Posteriormente el *relay*

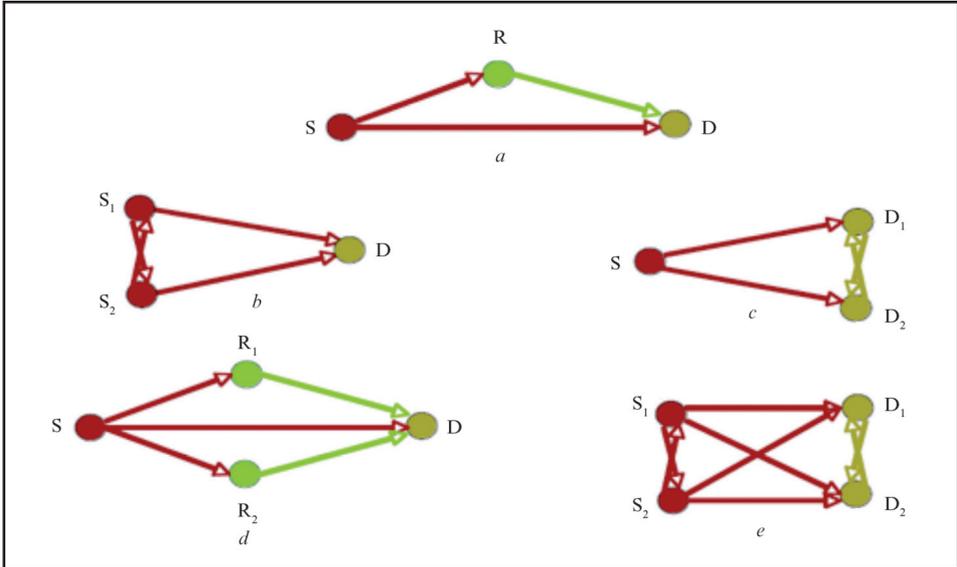


Figura 7.— Tipos de arquitecturas de retransmisión.

retransmite la información a destino igualmente. Cuando el destino es incapaz de escuchar a la fuente directamente, la arquitectura se reduce al caso de comunicación en cascada a través de varios saltos (*multihop*). Cuando la fuente y el *relay* cooperan entre ellos para transmitir la información al mismo tiempo a su destino, la situación se reduce a un canal de múltiple acceso como se muestra en la figura 7b. Cuando el *relay* y el destino cooperan el escenario se reduce a un problema de difusión, como se muestra en la figura 7c. La figura 7d muestra un caso simple multirama retransmitiendo con dos ramas paralelas de *relays*. Cuando los *relays* de cerca de la fuente y los *relays* de cerca del destino cooperan, el caso se reduce a una simple comunicación de *cluster* a *cluster* con interferencias, como se muestra en la figura 7e. Esto se puede ver como los nodos en el clúster de origen haciendo *broadcasting* y los nodos en el receptor en modo de acceso múltiple.

La situación de cooperación durante el vuelo va a ser dinámica, por lo que es probable que la situación dependiendo del área a cubrir, la velocidad del μ UAV, y el número de aeronaves existentes, cambie rápidamente. Para ello es necesario, que haya un rápido y constante cono-

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

cimiento de los vecinos que se hallan en la cercanía de cada aeronave. Esto puede ser llevado a cabo a través de mensajes de estándares como STANAG 4586 y JAUS o protocolos de adherencia de nuevos nodos a la red como en redes de tipo MANET.

Una vez que los nodos se hallan en la red es importante no olvidar la función de *sense&avoid*, para evitar posibles colisiones entre diferentes aeronaves de la red.

CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE COMUNICACIONES

En los apartados anteriores, y sin ánimo de ser exhaustivos, se ha recogido una descripción de los enlaces y las diferentes topologías de red de comunicaciones que se plantean en la actualidad. Sin embargo, uno de los retos del futuro es que estas comunicaciones sean lo más óptimas posibles según los siguientes parámetros que definen las comunicaciones de un sistema.

ANCHO DE BANDA

El ancho de banda para un enjambre de μ UAV va a venir determinado por el ancho de banda de cada una de los enlaces de cada uno de los nodos del enjambre. Este ancho de banda total va a verse incrementado de forma exponencial, por tanto, con el número de aeronaves del sistema.

SEGURIDAD

La seguridad en las comunicaciones va a ser un aspecto de alta importancia en aplicaciones de enjambres de μ UAV, especialmente en el contexto militar donde parte de la información será probablemente de alta importancia. En cualquier caso, también será de vital importancia para evitar problemas de interferencias tanto entre los nodos de la misma red como en elementos externos. Técnicas como encriptación y claves públicas y privadas serán ampliamente utilizadas en este sentido para garantizar unas comunicaciones seguras y fiables. Para más información, referencia [7].

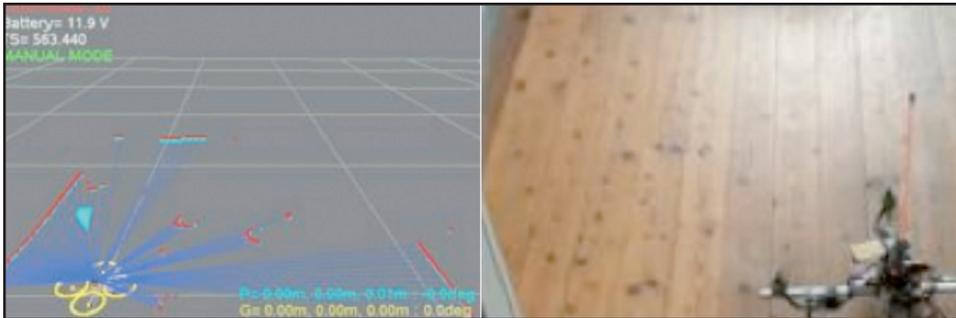


Figura 8.— Monitorización indoor de un cuadrirrotor.

PROCESADO

El procesado de las comunicaciones en los nodos origen y destino, así como en nodos intermedios o relés, será un factor a tener en cuenta para conocer el estado de la señal y su calidad. Normalmente, debido al carácter cooperativo de las comunicaciones la información es probable que llegue al destino por múltiples nodos por lo que será necesaria la combinación de las señales recibidas en recepción.

ALCANCE

El rango de las comunicaciones determinará el alcance de éstas. Como se ha citado en apartados anteriores, debido al bajo coste de los materiales usados y al escaso tamaño de las antenas, las comunicaciones no serán de gran alcance sino que abarcarán en general pocos kilómetros en el mejor de los casos, figura 8.

Impacto en teatro de operaciones

La puesta en marcha de un enjambre de μ UAV en una zona determinada, tiene una serie de consecuencias a tener en cuenta, desde el punto de vista de las comunicaciones y arquitectura de red que se verán a continuación.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

IMPACTO SOBRE OTRAS AERONAVES

Las comunicaciones de un enjambre de UAV requieren unas ciertas características como se especificaron con anterioridad. La interferencia con otras aeronaves puede tener unas consecuencias negativas para el funcionamiento de ambas. Por ello es imprescindible de antemano conocer el ancho de banda, la frecuencia, la encriptación a utilizar antes de llevar a cabo la misión.

Por otro lado, también es de vital importancia en el caso de misión civil, en espacio no-segregado, comunicar la misión a las autoridades aeroportuarias (especialmente el área a cubrir, altura de vuelo y tipo de vuelo a seguir).

IMPACTO SOBRE OTRAS REDES DE μ UAV

Dependiendo del área a cubrir, las comunicaciones implementadas, etc., puede darse el caso de que varias redes de μ UAV se interfieran entre sí. Por ello, nuevamente, es imprescindible de antemano conocer el ancho de banda, la frecuencia, la encriptación a utilizar antes de llevar a cabo la misión.

Además de las comunicaciones, igualmente importante será también la funcionalidad de *sense&avoid* que debe llevar el *payload* para evitar colisiones con otras aeronaves tanto μ UAV como de otro tipo.

IMPACTO SOBRE INFRAESTRUCTURAS

Finalmente, es importante tener en cuenta el impacto que causa el uso de enjambres de μ UAV sobre interiores o exteriores de infraestructuras. Para evitar colisiones con paredes u otros objetos es importante el uso de cargas útiles de infrarrojos o microcámaras ya que el sólo uso de la posición puede ser insuficiente.

La operación de enjambres de μ UAV implica el uso de al menos una GCS que debe estar situada lo suficientemente cerca de al menos uno de los nodos para que pueda establecer contacto a través de retransmisiones con el resto de la red. Es posible que en esta GCS únicamente se tenga control de las cargas útiles de los μ UAV ya que el control de vue-

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

lo es realizado por el autopiloto y el guiado individual de cada μ UAV se definirá automáticamente por el sistema para asegurar el cumplimiento de la misión y la disponibilidad, figura 9.



Figura 9.— *Ejemplo de estación terrestre.*

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Anexo A.— Principales estándares de UAV.

Evaluation Criteria	Primary Standards being evaluated				
	Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS)	STANAG 4586	ASTM F41 has 4 UMV Standards: 2541-06, 2504-07, 2595-07 and WK11283	MIL-STD-1760	Universal Armament Interface (UAI)
Supporting agencies	OSD AT&L (JGRE), Army, Navy, NII, NBSCAB, TSWG, Air Force	OSD AT&L (UAS), Army, Navy and Marine Corps (UAS)	Navy	USAF	USAF
Mandates and Requirements	FCS (UGV, UAV, UGS, UM), Navy mandate (UGV, USV, UUV), NBSCAB (EOD Non-DoD robots), OSD JGRE	Army, Navy and Marine Corps (UAS) Public Law 109-163 Jan 6 2006 mandates use of STANAG 4586 for UAS	None	None official; however, for new weapons, on all the jets, and for new jets, it's the interface on most of the weapons	None
Target domains	UGV, USV, UUV, UAV, US, UM	UAS, USV	UUV, USV	«Smart» Strike Weapons	«Smart» Strike Weapons
Current domains	UGV, USV, UAV	UAS, USV	UUV, USV	«Smart» Strike Weapons	«Smart» Strike Weapons
Standard Owner	SAE AS-4	NATO, JCGUAV	ASTM F41	SAE AS-1	UAI Industry Team

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Anexo A.— (Continuación).

Primary Standards being evaluated					
Evaluation Criteria	Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS)	STANAG 4586	ASTM F41 has 4 UMV Standards: 2541-06, 2504-07, 2595-07 and WK11283	MIL-STD-1760	Universal Armament Interface (UAI)
Current document revision	Reference Architecture 3.3	Edition 2	Each of the 4 standards has its own revision (all in 1st or 2nd release)	D (though E is imminent)	R01
Classification	UNCLASSIFIED	NATO UNCLASSIFIED (NATO countries only)	UNCLASSIFIED	UNCLASSIFIED	UNCLASSIFIED/ for Official Use Only (FOUO- not releasable to NATO & Allied nations expected «any day»)
Restrictions	Open	NATO controlled	Open	Distro A: public release	Currently USDoD/ Contractor only, expected release to NATO & Allied nations expected «any day»

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Anexo A.— (Continuación).

		Primary Standards being evaluated			
Evaluation Criteria	Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS)	STANAG 4586	ASTM F41 has 4 UMV Standards: 2541-06, 2504-07, 2595-07 and WK11283	MIL-STD-1760	Universal Armament Interface (UAI)
Adopción audience	Multi-industry (DoD, Domestic, Response, International)	UAS centric, multinational, government and industry	Industry, Academia, Government	UAV-centric (Used by all US DoD and most NATO fighters, bombers, and smart weapons)	Low, emerging standard, in «pathfinder» phase
Security Implication	Security outside scope of standard	Security outside scope of standard	Security outside scope of standard	Security outside scope of standard	Security outside scope of standard
Primary «transport» medium	Messages independent of transport. UDP/IP most common transport	Messages independent of transport. UDP/IP most common transport	N/A: Except the ASTM Communications Standard F2594-07. This standard does cover multiple mediums (i.e. RF, Acoustic and Light)	MIL-STD-1553, but messages were recently separated from the data bus, allowing the messages to be used by other standards. Msgs may be routed/forwarded via other media, max 512 bits/msg (32 wd x 16 bit)	Wpn-to-pitfm & wpoto-cockpit mags; defined at wpn's 1780 I/F. Msgs may be routed/forwarded via other media, max 512 bits/msg (32 wd x 16 bit)

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Anexo A.— (Continuación).

Evaluation Criteria	Primary Standards being evaluated				
	Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS)	STANAG 4586	ASTM F41 has 4 UMV Standards: 2541-06, 2504-07, 2595-07 and WK11283	MIL-STD-1760	Universal Armament Interface (UAI)
Secondary «transport» medium	See above	See above	N/A	Fibre Channel	Fibre Channel
Transport Bandwidth limitations	Acceptable to all domains, not ideal for underwater communications	Acceptable to all domains, not ideal for underwater communications	Acceptable to all domains, not ideal for underwater communications	Acceptable to all domains, not ideal for underwater communications	Acceptable to all domains, not ideal for underwater communications
Messages currently support basic teleoperation	Yes	Yes	N/A-these are not messaging standards	N/A	N/A
Messages currently support basic waypoint following	Yes for UGV, USV, UAV, UUV waypoints are currently being investigated. Some missing functionality	Yes, for UAS, USV, and UGV	N/A-these are not messaging standards	N/A	N/A

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Anexo A.— (Continuación).

Evaluation Criteria	Primary Standards being evaluated				
	Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS)	STANAG 4586	ASTM F41 has 4 UMV Standards: 2541-06, 2504-07, 2595-07 and WK11283	MIL-STD-1760	Universal Armament Interface (UAI)
Messages support basic payloads	Yes	Yes	N/A-these are not messaging standards	N/A	N/A
Messages support basic world modeling	Yes	No. No requirement for full raster images at this point	N/A-these are not messaging standards	N/A	N/A
Messages support mission planning	Yes	Yes	N/A-these are not messaging standards	Yes	Yes
Messages support weapons	Adopting MIL-STD-1760	Defining messages to support 1760 and UAI. Will be implemented in Edition 4.0	N/A-these are not messaging standards	Yes	Yes

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Anexo A.— (Continuación).

Primary Standards being evaluated					
Evaluation Criteria	Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS)	STANAG 4586	ASTM F41 has 4 UMV Standards: 2541-06, 2504-07, 2595-07 and WK11283	MIL-STD-1760	Universal Armament Interface (UAI)
Messages support discovery and dynamic registration	Yes	Probably in Edition 4.0	N/A: Except ASTM Communications Standard F2594-07 plans to specify this capability	N/A; msgs designed for single-layer I/F architecture	IR/IT mags will support if managed at platform layer, though mags now designed for single-layer I/F architecture
Current architecture	Message Protocol with optional architectural components	Message Protocol	N/A-these are not messaging standards	Single-layer, weapon-to-platform/cockpit	Single-layer, weapon-to-platform/cockpit
Future architecture	Service-Oriented Architecture in development	Evaluating SOA for future Edition 4.0	N/A-these are not messaging standards	Will support future architecture, if routing protocols are managed at platform layer	Will support future architectures, if routing protocols are managed at platform layer

Anexo B.– *Uso de redes DTN*

La arquitectura de DTN ha sido diseñada para redes con alguna o todas las siguientes características: conectividad intermitente, retardo variable y/o largo, tasas de datos asimétricas y altas tasas de error. Para mitigar los problemas asociados con estas características, las redes DTN se basan en la conmutación de mensajes de almacenamiento y reenvío (*store-and-forward*). En concreto, cada nodo DTN almacena localmente cada mensaje transmitido (o un fragmento del mismo) antes de transmitir el mensaje a lo largo de una ruta a su destino.

Cabe señalar que la duración de almacenamiento de cada nodo DTN es significativamente mayor que lo que normalmente se asocia con routers IP (es decir, en el orden del retraso de las colas y de transmisión). Como tal, todos los nodos DTN emplean alguna forma de almacenamiento no volátil (por ejemplo, disco duro, memoria flash) para almacenar los mensajes transmitidos. En nuestro caso, todos los nodos (estaciones terrenas y UAV) utilizarán uno de los almacenamientos establecidos por el STANAG 7024 y el STANAG 4575.

La arquitectura DTN implementa la conmutación de mensajes de almacenamiento y reenvío (*store-and-forward*) mediante la creación de una capa superpuesta en la parte superior de la estructura de red dada. Esta capa superpuesta extremo-a-extremo, conocida como capa *bundle*, puede existir en cualquier lugar entre las capas de transporte y aplicación del modelo OSI. Un protocolo de capa *bundle* único, se utiliza en todas las redes que abarca la red DTN, figura 1, p. 92.

Los mensajes que son almacenados y transmitidos por cada nodo DTN también son conocidos como *bundles*. Estos *bundles* contienen tres tipos de información: datos de usuario de la aplicación origen (*source-application*), control de información que será proporcionada por la aplicación origen para la aplicación de destino (esta información de control describe cómo controlar los datos del usuario), y un encabezado de *bundle* que se inserta en la capa *bundle*. Estos *bundles* se transmiten entre los nodos de DTN, a través de sesiones caracterizadas por un mínimo tiempo de *round-trip*, con el fin de marginar el impacto del retraso del enlace.

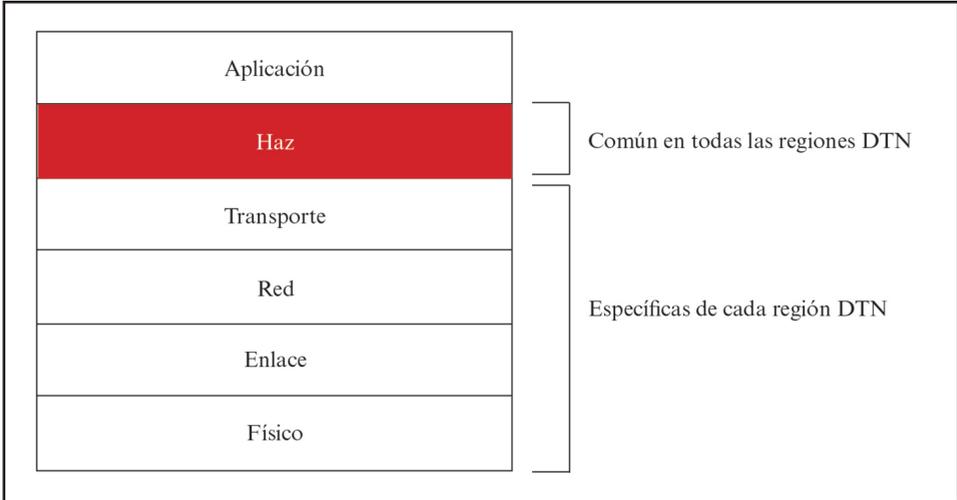


Figura 1.— Pila de protocolos para redes DTN.

Debido a la intermitencia del enlace dentro de una red, las redes DTN soportan la retransmisión nodo-a-nodo de datos perdidos y/o dañados en el transporte y/o en la capa *bundle*. La retransmisión nodo-a-nodo en la capa *bundle* se puede realizar a través de «transferencias de custodia», figura 2. El objetivo de la transferencia de custodia es para mover el punto de retransmisión más cerca del destino con el fin de

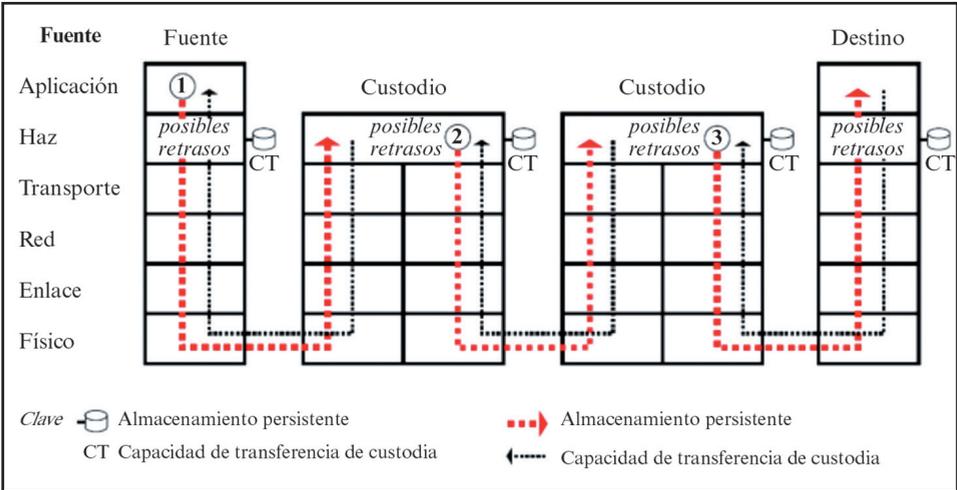


Figura 2.— Proceso de envío de mensajes en redes DTN.

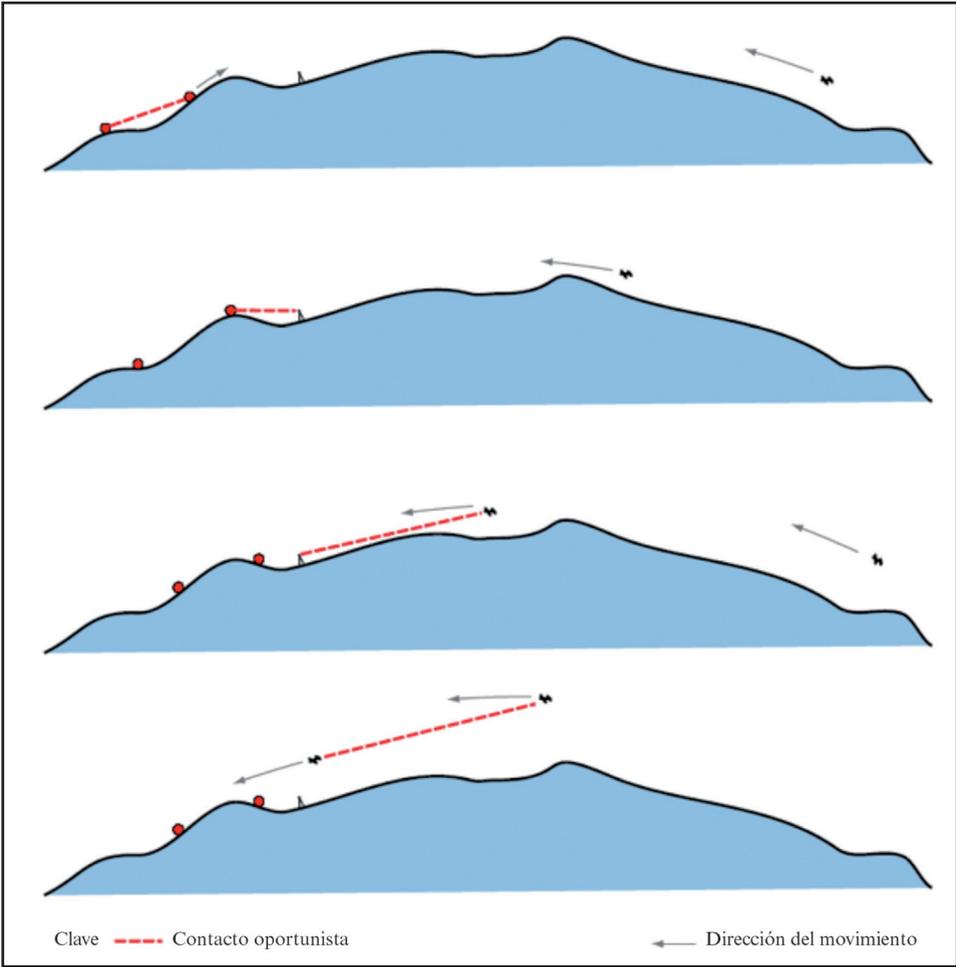


Figura 3.— Ejemplo de transferencia de información sin LOS.

minimizar el número potenciales saltos de retransmisión, reduciendo así la carga de red y el retraso de transmisión total, figura 3.

Las transferencias de custodia se aplican entre las capas *bundle* de nodos intermediarios, a petición de la aplicación origen. En concreto, cuando una capa *bundle* intermediaria dada envía un *bundle* al nodo intermediario siguiente en una ruta determinada, también se solicitará una transferencia de custodia. Esta transferencia de custodia también está asociada con un temporizador de retransmisión *time-to-ac-*

knowledge. Si la capa *bundle* del siguiente salto acepta la custodia en el plazo fijado por el temporizador de retransmisión, la capa *bundle* del siguiente salto devuelve un acuse de recibo (*acknowledgement*) al remitente. De lo contrario, el remitente intenta volver a retransmitir el *bundle*.

Así, cada nodo intermediario almacenará cada *bundle* hasta que otro nodo acepte la custodia o el *time-to-live* del *bundle* expire (el *time-to-live* normalmente es mucho más largo que el *time-to-acknowledge* del intermediario).

A fin de garantizar fiabilidad extremo a extremo, el nodo origen debe solicitar tanto la transferencia de la custodia como el acuse de recibo, figura 4.

Las redes DTN garantizan la interoperabilidad entre las redes con DTN activado mediante la utilización de un esquema de nombres flexibles. En concreto, cada nodo tiene un nombre DTN de dos partes que consta de una *Region ID* y una *Entity ID*. El enrutamiento de interre-

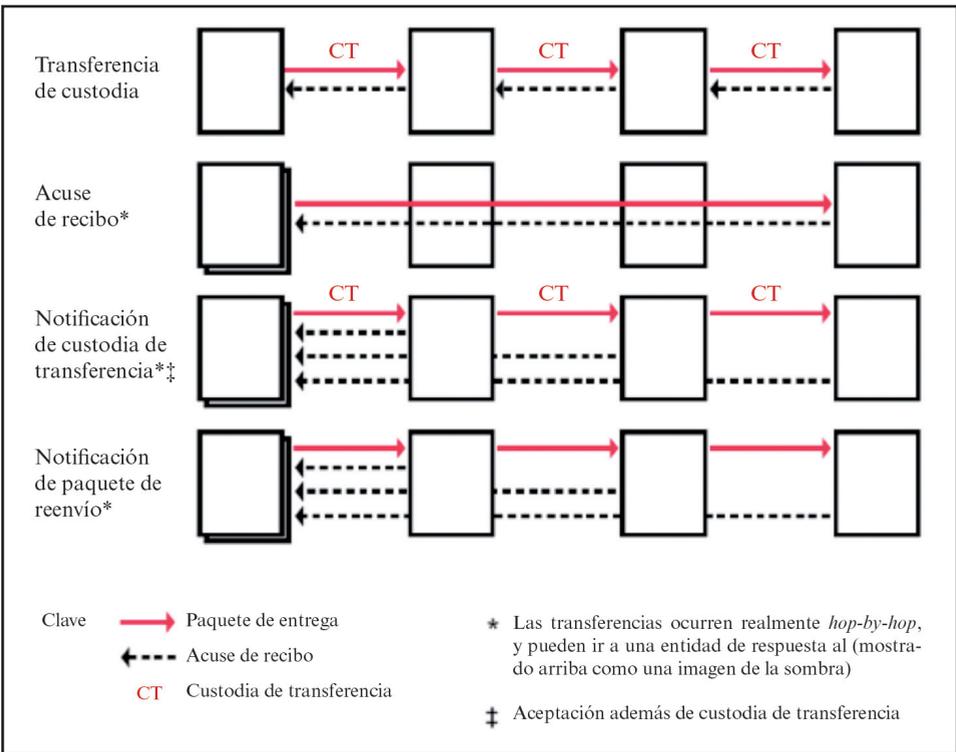


Figura 4.— Tipos de envío de información en redes DTN.

gional se basa en Region ID, mientras el enrutamiento de intraregional se basa en los *Entity ID*.

Anexo C.– *Uso de redes MANET*

El enfoque de MANET es prometedor para aplicaciones de UAS donde la infraestructura no está disponible y múltiples UAV están operando en forma cooperativa. La transmisión de datos en MANET reduce las necesidades de conectividad ya que los nodos fuente y destino sólo necesitan estar conectados a través de los nodos intermedios. Debido a la disminución de la potencia de transmisión radio, y por lo tanto la capacidad de la comunicación, con una distancia de separación, la presencia de los nodos de retransmisión intermedios pueden realmente mejorar el rendimiento de entrega de datos aportado por los enlaces directos. Además, ya que las MANET están diseñadas para autotransmitirse, pueden responder bien a las topologías de red dinámica que resultan del movimiento del UAV. El descubrimiento de servicios en redes MANET es más importante y más complejo que el de otras arquitecturas ya que la red tiende a ser fracturada por periodos de tiempo y no existe ningún nodo central para coordinar las actividades de la red.

PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO

Los protocolos de enrutamiento se pueden clasificar en dos grandes grupos:

1. *Proactivos*: buscan rutas periódicamente, suponiendo que serán útiles.
2. *Reactivos* (bajo demanda): buscan una ruta sólo cuando se necesita.

PROTOCOLOS PROACTIVOS

Son aquellos en los que los algoritmos mantienen en cada nodo información actualizada acerca de la topología de la red, la cual es almacenada en tablas de enrutamiento que son actualizadas de forma periódica u originada por eventos.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Este tipo de protocolos están basados en los protocolos de vector distancia y de estado de enlace. Un protocolo característico dentro de este grupo es: DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*).

PROTOCOLO DSDV

En este protocolo los paquetes de señalización son intercambiados entre nodos vecinos a intervalos regulares de tiempo o emitidos por eventos.

DSDV proporciona básicamente la obtención de rutas sin bucles mediante la introducción de números de secuencia, suministrando una sola ruta para cada destino, siendo esta la ruta con la trayectoria más corta posible.

Este protocolo utiliza dos tipos de mensajes de señalización:

1. *Full dump*: este tipo de mensajes envía toda la información contenida en la tabla de enrutamiento de cada nodo. El uso de este tipo de mensaje es reducido y se dan cuando existen grandes cambios en la topología de red.
2. *Incremental*: este tipo de mensaje es enviado con mayor frecuencia debido a que transporta únicamente la información contenida en la tabla de enrutamiento de un nodo que ha variado desde que el último paquete *full dump* fue enviado. Este tipo de mensaje optimiza el uso de ancho de banda debido a que no es enviado de forma periódica con información de las tablas de enrutamiento enteras.

PROTOCOLOS REACTIVOS

Son aquellos en los cuales se usan algoritmos, donde sólo se crean rutas únicamente cuando un nodo fuente desea enviar información hacia un nodo destino, utilizan mecanismos de descubrimiento y mantenimiento de ruta.

- Descubrimiento de ruta: este procedimiento comienza con el envío de un paquete llamado petición de ruta RREQ (*Route Request*), que es enviado en modo broadcast a toda la red. En el caso de que un nodo recibiera este paquete y sea el destino o conozca la ruta hacia él, este enviará un paquete denominado petición de

respuesta RREP (*Route Reply*) al nodo fuente con la información de ruta requerida.

- Mantenimiento de ruta: este proceso únicamente se da durante el envío de datos y se origina cuando un nodo que se encuentra involucrado en la transmisión, detecta la pérdida del enlace, emitiendo un mensaje denominado error de ruta RERR (*Route Error*) al nodo que está originando la transmisión (nodo fuente), el cual al recibir este mensaje, buscará una ruta alterna que pueda tener almacenada o comenzará un nuevo proceso de descubrimiento de ruta. Los nodos intermedios que reciban el mensaje RERR eliminarán la ruta de su registro o tabla de enrutamiento según sea el caso.

Los protocolos reactivos a su vez se pueden clasificar en:

- Basados en la fuente: en este tipo de protocolos los paquetes de datos transportan la ruta completa de la fuente al destino.
- Salto a salto: los protocolos basados en este concepto, únicamente llevan en la cabecera de los paquetes de datos la dirección del destino y la dirección del próximo salto.

Dentro de los protocolos reactivos los principales son:

- DSR (*Dynamic Source Routing*).
- AODV (*Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*).

PROTOCOLO DSR

DSR es un protocolo reactivo basado en la fuente, y básicamente crea las rutas únicamente en el caso de que un nodo fuente necesite enviar datos hacia un nodo destino (descubrimiento de ruta). Se diseñó para optimizar el uso del ancho de banda dentro de una red *Ad Hoc*, al eliminar los mensajes de actualización periódica que usan los protocolos proactivos. Previene los lazos de enrutamiento a través del identificador de RREQ.

Este protocolo hace que los nodos no posean una tabla de enrutamiento, debido a que la ruta viaja en el paquete de datos, y sólo mantiene un registro de rutas. Cada nodo asocia un temporizador a la ruta con el fin de poderla eliminar en el caso de que esté inactiva por un cierto periodo tiempo.

COMUNICACIONES, NAVEGACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Mediante un único proceso de descubrimiento de ruta, el nodo origen puede aprender varias formas de llegar hacia el mismo destino (uso de múltiples rutas). Los nodos poseen una función denominada *Promiscuous Listening* que permite recibir y procesar paquetes de datos o de información a nivel de capa dos que no estén dirigidos particularmente a ellos, con el fin de que los nodos puedan actualizar las rutas almacenadas en su registro con la información contenida también en estos paquetes.

Por otro lado, utiliza el proceso de mantenimiento de ruta en el caso de ocurrir algún problema en la comunicación entre nodos durante la transmisión de datos.

PROTOCOLO AODV

Es un protocolo reactivo salto a salto y establece rutas bajo demanda, es decir, no mantiene actualizaciones periódicas entre nodos, sino que descubre y mantiene rutas solamente cuando son necesarias, a través de los procesos de descubrimiento y mantenimiento de ruta.

La característica principal de AODV es el uso de tablas de enrutamiento en cada nodo para de esta manera evitar transportar las rutas en los paquetes de datos. Utiliza números de secuencia para evitar los lazos de enrutamiento que pudieran darse. Además, cada cierto intervalo de tiempo se envían paquetes *Hello* a los vecinos para informarles que el nodo sigue activo, de esta forma los vecinos actualizan los temporizadores asociados a dicho nodo o en su defecto, deshabilitan las rutas que utilicen el nodo suprimido.

Una particularidad de AODV es la reparación a nivel local de un enlace caído que forma parte de una ruta activa. En este caso, el nodo que detecta la caída de un enlace que está siendo utilizado, procede a intentar repararlo comenzando un proceso de descubrimiento de ruta hacia el destino y encola los paquetes de datos recibidos para el destino, hasta localizar una nueva ruta. En el caso de que este intento resulte fallido, se dará lugar al proceso normalmente establecido, con el envío del mensaje de error RERR hacia el nodo origen.

Referencias bibliográficas

- [1] CLOUGH, B.: «Uav swarming? so what are those swarms, what are the implications, and how do we handle them?» in *Proceedings of 3rd Annual Conference on Future Unmanned Vehicles*, Air Force Research Laboratory, Control Automation, 2003.
- [2] «CONOPS»: Department of Health & Human Services, Retrieved, 23 de junio de 2008.
- [3] En: <http://www.aviationtoday.com/lav/categories/military/1139.html>
- [4] CHAUMETTE, S.; LAPLACE, R.; MAZEL, C. and GODIN, A.: *Secure Cooperative Ad Hoc Applications Within UAV Fleets*, IEEE, Communications Society, 2009.
- [5] REIDT, S. and WOLTHUSEN, S. D.: «Exploiting UAV's Capabilities» in *Tactical MANETS*, U.S. Army Research Laboratory and the U.K., Ministry of Defence, 2009.
- [6] LANEMAN, J. Nicholas: *Cooperative Diversity in Wireless Networks: Algorithms and Architectures*, PhD dissertation, septiembre de 2002.
- [7] YAVUZ A. A.; ALAGÖZ F. and ANARIM, E.: «A new multi-tier adaptive military MANET security protocol using hybrid cryptography and signcryption», *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, volume 18, number 1, 2010
- [8] OLLERO, A. and MAZA, I: *Multiple Heterogeneous Aerial Vehicles*, Springer STAR, 2007.

PABLO GONZÁLEZ SÁNCHEZ-CATALEJO
Director de Sistemas no Tripulado

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE UAV

Antecedentes en la utilización de enjambres

En un remarcable artículo de la Rand Corporation, referencia bibliográfica [1], John Arquilla y David Ronfeldt hacen una interesante aproximación al concepto de los «enjambres», con carácter genérico, y lo asocian a la evolución histórica de los conflictos.

Según este modelo, la forma de luchar de los humanos, a través de las diferentes civilizaciones y culturas que se han desarrollado a lo largo de la historia ha evolucionado de forma significativa, figura 1.

Así, en los conflictos más antiguos, la forma más habitual en que las guerras se llevaban a cabo era mediante *melés*. Este término francés



Figura 1.— Formaciones militares en combate.

identifica la lucha cuerpo a cuerpo de grupos de combatientes de forma totalmente desorganizada. No existían formaciones identificables y el mando y control era prácticamente imposible durante la batalla. Cada combatiente actuaba de forma individual sin considerar el comportamiento de los demás.

Con la capacidad de ejercer un cierto mando y control, aparecen las agrupaciones masivas de combatientes (*massing*). Los combatientes se agrupan en formaciones, con formas geométricas definidas en donde ya se identifica un frente, una retaguardia y el combate suele suceder en oleadas. Para esta forma de combate ya es necesaria la capacidad de poder dar órdenes en tiempo real y disponer de un cierto sistema de señalización para que la formación, desde un mando centralizado, ejecute las órdenes recibidas.

Otro tipo de combate es el que podemos denominar de «maniobras». Aquí las operaciones militares son complejas, necesitan bastante sincronización, rapidez en la ejecución y capacidad de penetración, explotando el efecto sorpresa. Siguen empleándose agrupaciones masivas que actúan en los momentos oportunos de la batalla. Para este tipo de combate es necesario disponer de una capacidad de mando y control mucho mayor que en el caso anterior y unas comunicaciones más elaboradas. En la guerra moderna, podemos considerar que las telecomunicaciones ha sido la tecnología habilitante de este tipo de enfrentamiento.

Frente a estas formas «clásicas de enfrentamiento», la utilización de enjambres podemos considerarla una forma emergente de plantear los conflictos. Sus características diferenciales son las siguientes:

- Se componen de unidades autónomas o semiautónomas que convergen en el asalto a un blanco común.
- El enfrentamiento es aparentemente amorfo pero al mismo tiempo coordinado y desde muchas direcciones.
- Intervienen muchas unidades, habitualmente con pocas capacidades individuales, dispersas pero interconectadas mediante algún tipo de red de comunicaciones.
- Existe una capacidad común, no propietaria de ninguna unidad en concreto, para la sensorización, vigilancia y posiblemente el mando y control.
- Coexisten capacidades de actuar en conjunto o de forma individual en cada una de las unidades.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

En resumen, se trata de un modelo en el que un conjunto de unidades con bastante grado de autonomía y pocas capacidades individuales, son capaces de coordinarse para promover enfrentamientos complejos y de un grado de inteligencia muy superior a la disponible en cada unidad de forma individual.

Este modelo, también es trasladable a otros ámbitos distintos al de la defensa y veremos como es posible aplicarlo en multitud de tareas y aplicaciones en los que este tipo de comportamiento representa una ventaja frente a modelos de trabajo en equipo más organizado y con un mando y control centralizado.

En el ámbito de este capítulo, nos centraremos en el caso particular de que las unidades sean Sistemas Aéreos no Tripulados (UAV) que trabajen de acuerdo con este modelo básico establecido. Sus aplicaciones veremos que pueden ser diversas, tanto en el campo de la Defensa como en otras actividades que requieran habilidades semejantes.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS «ENJAMBRES» DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

El concepto de «enjambre» en el contexto de sistemas artificiales formados por algún tipo de vehículo o robot producido por el hombre, no es realmente un concepto tan novedoso. Ya por el año 1987, Reynolds propuso un método para simular mediante ordenadores el vuelo de los pájaros, referencia [2]. El término ahora ampliamente utilizado de «enjambres inteligentes» ha sido propuesto por Beni y Wang en el año 1989, referencia [3] y el «comportamiento colaborativo» ha sido propuesto por Parker en un trabajo que data de 1993, referencia [4].

A partir de estos trabajos iniciales, se han ido desarrollando los conceptos que poco a poco han ido tomando cuerpo en la simulación, desarrollo y experimentación de los sistemas de enjambres de robots en general y de enjambres de UAV en particular.

Los primeros que introdujeron el concepto de «agente» para identificar cada uno de los componentes de un enjambre fueron Beni y Wang, referencia [3]. Estos agentes actúan de determinadas formas en respuesta a estímulos internos y del entorno que los rodea. El concepto novedoso es que aparece un «comportamiento emergente» del enjambre de agentes como consecuencia de la interacción de todos sus miembros.

Los modelos de la Naturaleza

La Naturaleza presenta muy diversos modelos de comportamiento que están sirviendo de base para los estudios, que están teniendo lugar en la creación de enjambres de agentes autónomos desarrollados por el hombre.

En todos los casos, en apariencia parece que todas las actividades que se realizan en el ámbito de determinados grupos de animales no necesitan ninguna supervisión. Sin embargo, presentan un comportamiento altamente coordinado que surge únicamente de la interacción entre los miembros del grupo. Este comportamiento es el que se ha venido a denominar «inteligencia del enjambre» (*swarming intelligence*).

Sin ánimo de ser exhaustivos, vamos a destacar algunos ejemplos que pueden ser ilustrativos de comportamientos y modelos que luego veremos en los enjambres artificiales basados en principios similares.

LOS LOBOS. UN MODELO DE CAZA

Para capturar a sus presas, las manadas de lobos actúan de una manera coordinada, rodeando su presa para conseguir impedir su fuga, procediendo luego a atacarla de forma sucesiva hasta que consiguen su inmovilización y captura. Podemos considerar que la manada actúa de manera inteligente sin que existan mecanismos de comunicaciones complejos ni de gran alcance, ni complicadas estrategias de caza. Algunos comportamientos son tan simples como cazar manteniendo una adecuada distancia entre los lobos adyacentes. Mediante simulaciones, se ha podido comprobar que si la presa reacciona tratando de alejarse lo más posible del lobo más próximo, la estrategia de los lobos conduce a una solución que lleva a los lobos a rodear la presa y capturarla.

BANDADAS DE PÁJAROS. COORDINACIÓN EN VUELO

Muchas especies de aves viajan en bandadas que consiguen disminuir el esfuerzo del vuelo y aumentar así la autonomía del mismo. El algoritmo mediante el cual permanecen en una formación, establecen turnos y evitan chocar unos con otros es bastante simple. Cada ave trata de mantener una separación determinada respecto a las aves

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

más próximas y mantener su misma velocidad de vuelo. Con esta conducta consiguen formar bandadas que actúan de forma coordinada. Este mismo tipo de problemas aparecen en el control de tráfico aéreo o marítimo y probablemente se puedan encontrar algoritmos para su gestión siguiendo procedimientos similares.

LAS HORMIGAS. BÚSQUEDA DE ALIMENTO

Las hormigas son capaces de construir redes de caminos que unen el hormiguero con las fuentes de comida disponibles. Para ello, las hormigas disponen de dos clases de feromonas (marcadores naturales que generan muchos insectos). Una feromona se denomina «feromona-casa» y la produce cada hormiga desde que abandona el hormiguero buscando comida y otra se denomina «feromona-comida» y la segregan las hormigas siempre que han encontrado comida y vuelven con ella al hormiguero.

El comportamiento global de las hormigas se consigue por el hecho de que cualquier hormiga puede utilizar los rastros de feromonas que hayan dejado otras hormigas consiguiendo así el efecto global deseado. La tendencia natural de las feromonas a evaporarse consigue que, si un rastro no se actualiza por nuevas hormigas, termina perdiéndose, de manera que la información permanece actualizada. Este mecanismo puede ser utilizado para todo tipo de enjambres de vehículos cuya misión principal sea la búsqueda y seguimiento de cualquier tipo de blancos.

DIVISIÓN DEL TRABAJO

En los hormigueros, diversas tareas específicas son realizadas por individuos especializados en esas tareas precisamente, en una especie de mecanismo de división del trabajo. Una característica fundamental de este comportamiento es que es flexible en el sentido de que el número de individuos realizando las diferentes tareas varía en función de perturbaciones externas. Lo consiguen disponiendo de dos umbrales. Si son estimuladas por encima de un primer umbral, realizan una tarea determinada, si el estímulo de los trabajadores baja por debajo de un segundo umbral dejan de realizarla. De esa manera, el conjunto adapta

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

su esfuerzo a las necesidades de la colonia. De nuevo, este mecanismo puede ser replicado en sistemas artificiales de manera que el número de agentes involucrados en cada tarea se adapte a las necesidades sobrevenidas en cada momento.

Los ejemplos en la Naturaleza son muchos y no está en el ánimo de este informe ser exhaustivo al respecto, sino simplemente dar algunos ejemplos ilustrativos de cómo este comportamiento ha formado parte de la Naturaleza en múltiples casos como los que hemos visto anteriormente. A modo de resumen, cuadro 1, un conjunto más completo de ejemplos de la Naturaleza con el tipo de comportamiento que presentan.

En general, estos comportamientos en la Naturaleza presentan características de persistencia y adaptación a los cambios en el medio ambiente que son propiedades muy deseables en muchas actividades militares. Además, no es menor el efecto de confusión, frustración o desmoralización que este tipo de comportamiento suele provocar en sus víctimas, efectos que, como todos sabemos, resultan ser de vital importancia en el concepto moderno de conflicto que también estamos manejando.

Es evidente que el comportamiento de enjambre es, en muchos aspectos, opuesto al concepto de comando, control, comunicaciones e inteligencia, centralizado que habitualmente se usa en las operaciones militares. Tampoco son desdeñables las limitaciones tecnológicas, como por ejemplo el gran ancho de banda de comunicaciones, que aparecen

Cuadro 1.— *Algunos ejemplos de modelos de enjambre en la Naturaleza.*

Comportamiento de «enjambre»	Animales
Generación de patrones	Bacterias
Generación de ruta	Hormigas
Cooperación en transporte	Hormigas
División del trabajo	Hormigas y avispas
Búsqueda de alimento	Hormigas y abejas
Coordinación en vuelo	Aves
Caza cooperativa	Lobos
Construcción de nidos	Abejas, avispas y termitas
Sincronización	Luciérnagas
Construcción de redes	Arañas
Coordinación natatoria	Bancos de peces

al intentar construir sistemas que emulen este comportamiento natural. Por ello, no debemos pensar que el paradigma del enjambre representa una solución para todos los tipos de tareas que deben ejecutarse en el ámbito de un conflicto u otro ámbito cualquiera. Más bien, debemos entender las ventajas e inconvenientes de este modelo, así como sus limitaciones tecnológicas, para poder aplicarlo en aquellos casos en que su uso represente una ventaja estratégica frente a nuestros posibles adversarios o se adapte mejor que otros modelos al tipo de tarea que pretendemos realizar.

Conceptos básicos

¿QUÉ ENTENDEMOS POR ENJAMBRES DE UAV?

Podemos definir en general un enjambre de UAV como un conjunto de éstos que vuelan de acuerdo a un modelo inspirado biológicamente en el vuelo de las bandadas de pájaros y/o el comportamiento de los insectos sociales.

Este tipo de definición se corresponde al modelo elaborado por biólogos como por ejemplo encontramos en la referencia [5] y su traslación a sistemas artificiales lo popularizaron Beni, Hackwood y Wang a finales de los años ochenta, referencia [6].

En realidad, este modelo se aplica a conjuntos de agentes autónomos que disponen de capacidad sensora propia y conducta reactiva frente a los estímulos del entorno y del resto de los individuos de forma que, emerge una conducta colectiva a partir de la suma de las conductas de los agentes individuales.

Si analizamos lo que se ha escrito desde el punto de vista estrictamente militar y entendiendo un enjambre como una forma de hacer la guerra, una definición de fuerzas en enjambre serían aquellas que se comportan como un conjunto de unidades dispersas pero interconectadas, que luchan o disparan a un enemigo desde todas las direcciones simultáneamente. Es decir, se entiende que se refiere a un ataque que converge en un mismo blanco realizado por diversas unidades autónomas o semiautónomas.

Independientemente de la definición que cojamos, hay algunos elementos comunes que todos los modelos incluyen y que nos pueden ser-

vir para identificar claramente lo que entendemos como un modelo en enjambre. Esos elementos son los siguientes:

1. *Utilidad.* El conjunto de individuos que forman el enjambre tienen que tener un comportamiento que resulte útil para la función que se desea realizar. Si se trata de una función militar, deben tener un comportamiento que resulte apropiado para realizar la misión para la que han sido diseñados, bien sea el ataque, la vigilancia, las comunicaciones, etc. Lo mismo podríamos decir si se trata de aplicaciones en el campo civil.
2. *Autoorganización.* Quizá esta definición es la que marca una clara diferencia entre una estructura de control centralizada y un enjambre. En un enjambre, sus elementos son autónomos y actúan respondiendo a estímulos no organizados. Este tipo de organización puede resultar sorprendente en un entorno militar en el que siempre se enfatiza la estructura de mando pero, no obstante, veremos como puede ser posible realizar misiones militares con este tipo de organización. Resumiendo, la estructura de mando y control del enjambre no es centralizada desde un puesto de mando de orden superior sino que surge del comportamiento y la interacción de los miembros individuales que lo forman. Si además entendemos que esos agentes pueden ser artificiales, la conclusión inmediata es que el control de un enjambre requerirá mucho menos personal que una estructura de control centralizada para cada uno de sus miembros y ésta es una de las principales ventajas que se vislumbran en la utilización de los mismos. Otra importante ventaja del modelo es que el control del enjambre se consigue a base de interacciones locales entre sus componentes y no son necesarias comunicaciones con ningún centro de mando ajeno al mismo. Esto, cuando se trata de misiones en puntos lejanos a donde se encuentra el centro de operaciones, representa que no son necesarios costosos y a veces inviables enlaces de comunicaciones para mantener el control del enjambre durante la misión.
3. *Diversidad.* Los enjambres presentan un comportamiento diverso. Primero porque las plataformas utilizadas pueden ser diversas y luego porque el tipo de información que manejan también lo puede ser. Obviamente las funciones que en cada momento pueden realizar sus miembros también pueden ser diferentes.

4. *Distribución en las comunicaciones.* Un modelo centralizado de control supone la disponibilidad de un conjunto de enlaces de banda ancha, casi siempre vía satélite, en un número creciente. Sin embargo, en los escenarios de conflictos modernos, esto supone un problema importante y no siempre se puede disponer de estos canales de comunicaciones de banda ancha. El modelo de enjambre supone un alivio para estos requerimientos en tres aspectos:
 - Las comunicaciones entre agentes del enjambre son fundamentalmente con sus vecinos, por lo que necesitan muy poca potencia y una disminución de los requerimientos de comunicaciones de larga distancia.
 - Los agentes del enjambre funcionan como repetidores, transmitiendo los mensajes a larga distancia a través de pequeños saltos.
 - La información geográfica suele necesitarse fundamentalmente en donde se genera. Si de una manera distribuida, se almacena en los agentes, se disminuye notablemente el tráfico necesario.
5. *Descentralización.* La naturaleza del enjambre es descentralizada. Los agentes individuales toman decisiones propias dentro del ámbito de responsabilidad que les ha sido asignado. Esto es un modelo alternativo al mando y control centralizado, más propio de las organizaciones militares. Actualmente, un modelo centralizado suele suponer uno o dos operadores para controlar cada uno de los agentes que participan en una operación. Este modelo resulta claramente inviable cuando el número de agentes es muy elevado. Por otra parte, los retardos asociados al procesamiento de la información de los sensores de un conjunto grande de agentes resultaría inviable en una operación con un entorno que puede variar muy rápidamente para poder manejar dichos retardos. Por otro lado, la vulnerabilidad de un único centro de control es muy superior a la que presenta un control más descentralizado propio de un enjambre de agentes con un alto grado de autonomía.
6. *Dinamismo.* El entorno de los escenarios en los que se podrían desplegar los enjambres son altamente cambiantes y con un conocimiento de los mismos que es siempre incompleto e incierto

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

entre los miembros del enjambre. La propia naturaleza adaptativa de los enjambres los hace especialmente aptos para desenvolverse en este tipo de escenarios.

Se han hecho muchos estudios y simulaciones del comportamiento de tipo enjambre en pequeños vehículos terrestres o robots desde el año 1970; sin embargo, los estudios de cómo emular el comportamiento de los enjambres en UAV no comienzan con seriedad hasta la década de los años noventa.

En los estudios sobre enjambres de UAV, los investigadores buscan que un conjunto de pequeños y relativamente simples UAV tengan prestaciones similares a las que se consiguen en grandes UAV o aviones tripulados, siendo capaces de realizar y completar misiones reservadas hasta ahora sólo a vehículos de gran tamaño. Actuando como un conjunto de UAV entrelazados mediante una red de comunicaciones, se busca que realicen misiones de vigilancia del campo de batalla y en general aquellos tipos de misiones que requieren gran esfuerzo, persistencia o son extremadamente peligrosas. Incluso en ocasiones, pueden realizar dichas misiones con mayor eficacia que un único UAV de gran tamaño.

Una ventaja inherente al modelo de enjambre es que los UAV individuales son comparativamente baratos y que disponemos de una gran redundancia. Por ello, la pérdida de un pequeño subconjunto de elementos no pondrá en riesgo la misión que puede ser ejecutada por el resto de los elementos del enjambre.

Esta última consideración también nos conduce a un análisis más economicista del problema. Detrás del interés de realizar tareas complejas a partir del comportamiento emergente de un conjunto de agentes, sean UAV u otros, aparece en ocasiones el interés económico. Si puedo sustituir una compleja y cara máquina por un conjunto de pequeños y baratos agentes que sean capaces de realizar las mismas actividades, obtendré un beneficio económico que también está detrás del interés en su utilización.

Por último, hay que indicar que los enjambres de UAV no necesariamente han de estar formados por micro o mini UAV. Aunque lo anterior parece lo más natural, es posible definir enjambres de UAV en los que sus elementos sean UAV de gran tamaño o una combinación

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

de UAV de diferentes tamaños. Algunos experimentos realizados hasta la fecha corroboran esta posibilidad.

ENJAMBRES FRENTE A OTRAS ESTRUCTURAS ORGANIZADAS

Es necesario diferenciar claramente el comportamiento de un enjambre frente a otras estructuras orgánicas que pueden ser utilizadas por un conjunto de agentes para llevar a cabo una misión militar o cualquier otro tipo de tarea en el campo civil.

En un enfoque clásico de una misión militar, tenemos siempre un «mando y control centralizado». Con este enfoque existe un «comandante» que dirige la misión y posee la inteligencia y conocimiento necesarios para llevarla a cabo. El resto de individuos obedecen las órdenes del comandante a través de una estructura de mando que puede ser más o menos compleja dependiendo de la estructura de la que hablemos.

En el modelo de mando y control centralizado, la mayor parte de la inteligencia y conocimiento se le supone al comandante que dirige la misión. Si comparamos algunas características de este modelo con las que hemos identificado en el apartado anterior respecto a los enjambres, encontramos algunas coincidencias y también algunas diferencias significativas. Veamos:

- Respecto a la *utilidad* del modelo, ambos modelos son obviamente útiles aunque en el campo de los inconvenientes del mando y control centralizado hay que indicar los habituales retardos asociados al modelo de toma de decisión centralizado, que en escenarios muy cambiantes pueden suponer un problema para la correcta ejecución de la misión.
- En cuanto a la *autoorganización* son modelos esencialmente diferentes. En el modelo de mando y control centralizado, la organización la define el mando y se impone de arriba hacia abajo a todos los elementos de dicha organización.
- En cuanto a la participación de *entidades diversas* y debido fundamentalmente al *span* de atención que el ser humano es capaz de gestionar, cuando el número de elementos es grande, en los modelos centralizados es necesario establecer algún tipo de jerarquía de mando para poder gestionar la misión y transmitir las tareas que cada uno de los agentes debe realizar.

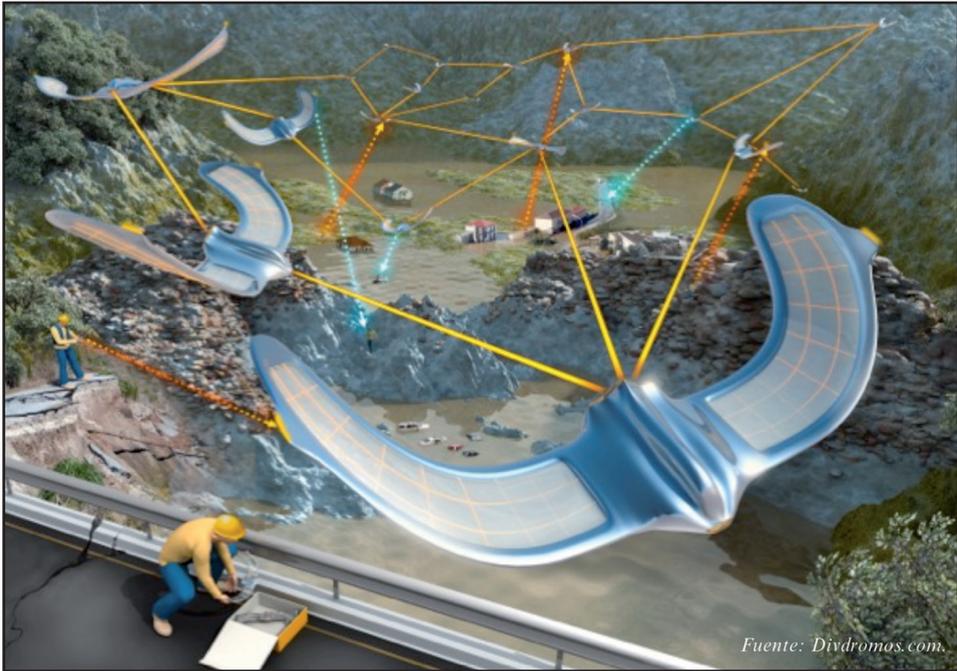


Figura 2.— Enjambre de UAV realizando una tarea.

- El modelo de *comunicaciones* es esencialmente distinto en ambas aproximaciones. Mientras que en el modelo centralizado suele ser frecuente la necesidad de disponer de potentes enlaces de larga distancia y gran ancho de banda para hacer posible que el mando transmita las órdenes a todos sus subordinados, en el modelo de enjambre suele ser necesario únicamente disponer de comunicaciones locales de corta distancia entre agentes próximos del enjambre, figura 2.

Pero si hacemos de alguna manera una abstracción del sistema de mando y control que utilizemos, todavía debemos identificar la diferencia que hay entre un enjambre y un equipo de agentes de acuerdo con un determinado plan que se ha definido previamente y que realicen una cierta tarea, pues aquí también encontramos diferencias significativas. Vamos a ver cuales son dichas diferencias:

- En cuanto a la forma de actuar en el tiempo. Los equipos son predictivos, actúan de acuerdo con un plan determinado y cada uno

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

en cada momento sabe que tarea tiene que realizar. Los enjambres sin embargo, son reactivos, su comportamiento no está prefijado y depende de las variaciones que puedan detectar en su entorno y en sus compañeros de enjambre.

- En cuanto a su composición, los enjambres están formados por conjuntos homogéneos de individuos (o al menos con muy pocas variaciones). Sin embargo, un equipo puede estar formado por conjuntos de individuos muy diferentes y que son capaces de hacer tareas esencialmente distintas y muy variadas.
- En lo que tiene que ver con las interacciones entre miembros del grupo, los mensajes intercambiados entre los miembros de un enjambre son simples y la mayoría de las veces son de «difusión», es decir no van dirigidos a un individuo en concreto sino hacia cualquier miembro del enjambre que sea capaz de recibirlo. En un equipo organizado sin embargo, los mensajes suelen ser más complejos y con un mayor contenido semántico que en el caso de los enjambres. Además suelen ser mensajes dirigidos hacia individuos concretos del equipo y muy raramente son mensajes difundidos al conjunto del equipo.
- En cuanto a su predictibilidad, los enjambres tienen un comportamiento probabilístico. Al no existir un plan, no sabemos a ciencia cierta cual será su comportamiento. Por el contrario, un equipo con un plan, tiene un comportamiento predecible. En cada momento, cada miembro del equipo sabe lo que tiene que hacer y cual es el conjunto de acciones que debe realizar, aunque este conocimiento sea en ocasiones parcial.
- También aparecen diferencias en cuanto a la criticidad de cada elemento que forma parte del enjambre o del equipo. En un enjambre, la pérdida de un elemento del mismo no suele suponer una distorsión significativa en el comportamiento del enjambre, siempre hay otro miembro que puede sustituirlo fácilmente. Sin embargo, en un equipo, la pérdida de uno de sus miembros puede tener una gran importancia, pudiendo incluso poner en riesgo la finalización con éxito de la misión.
- En lo que tiene que ver con la eficiencia, hay también que indicar que el comportamiento de un enjambre es en general mucho más ineficiente que el comportamiento de un equipo. En un enjambre, no hay individuos especializados para cada tarea

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

a realizar y muchas tareas se duplican necesariamente por la falta de un control centralizado que conozca todas las actividades que se están realizando en cada momento. En un equipo, la utilización de individuos especializados en diferentes tareas de forma sinérgica aumenta la eficiencia del conjunto de forma significativa.

No obstante, hay que indicar que esta falta de eficiencia no es necesariamente negativa pues se puede encontrar un compromiso entre eficiencia y supervivencia (*véase* el caso de las hormigas). Muchas veces esta falta de eficiencia es la que permite que el conjunto del enjambre sobreviva a pesar de la existencia de bajas entre sus miembros.

TIPOS DE TAREAS APROPIADAS PARA LOS ENJAMBRES

Las consideraciones anteriores nos conducen a identificar un comportamiento que puede ser útil para determinado tipo de tareas pero evidentemente no para cualquier tarea. De hecho, tras el análisis realizado hasta ahora, podríamos concluir que el modelo de un enjambre es útil para realizar tareas complejas a partir de elementos simples y de comportamientos relativamente primarios, cuadro 2.

Ahora nos preguntamos ¿en qué tipo de tareas es útil este comportamiento? De acuerdo con las características expresadas hasta ahora, identificamos los siguientes tipos de tareas:

- Actividades reactivas, es decir que responden a determinados estímulos.

Cuadro 2.— *Comparación entre el comportamiento de los enjambres y los equipos.*

Atributo	Enjambre	Grupo
Comportamiento temporal	Reactivo	Predictivo
Composición	Homogénea	Heterogéneo
Interrelación	Simple	Complejo
Predictibilidad	Probabilística	Determinístico
Criticidad individuos	Desechable	Crítico
Eficiencia	Baja	Alto

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

- Tareas simples.
- Tareas que requieran muchos agentes de comportamiento similar.
- Tareas que deban ser realizadas pese a que se pierda un gran número de agentes.

Los enjambres no son apropiados para realizar tareas que requieran una secuenciación entre unas y otras, es decir, que obedezcan a un plan preestablecido. De acuerdo a este razonamiento, se podría pensar que los enjambres no son adecuados para su utilización en los conflictos pues los comportamientos en los mismos siempre obedecen a algún tipo de planificación establecida.

Eso es así visto desde un punto de vista macroscópico, pero cuando observamos tareas concretas que es necesario realizar en el ámbito de un conflicto bélico, veremos que aparecen muchas que cumplen con las características que un enjambre requiere para ser útil para su ejecución.

En realidad, el comportamiento de los enjambres no los inhabilita para realizar tareas deterministas y con una cierta planificación. Para ser exactos, debemos indicar que su comportamiento en este tipo de tareas no será el óptimo sino que probablemente será ineficiente. A pesar de ello, puede ser útil utilizar enjambres en este tipo de tareas en determinadas circunstancias.

Posteriormente, identificaremos con más detalle en qué tipo de tareas, tanto militares como civiles, se vislumbra que el comportamiento de un enjambre puede ser útil para llevarlas a cabo.

El modelo de enjambre

MODELOS TEÓRICOS DE SISTEMAS

Sobre la base de los conceptos definidos en el apartado anterior, vamos a profundizar un poco en los elementos básicos que constituyen un enjambre. Para ello, debemos tener un modelo sobre cuáles son las características que debe de tener un enjambre de «agentes» que lo diferencien de otras agrupaciones de elementos que pudiesen definirse.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

Ya en el año 1994, Kelly introdujo el concepto de «redes de enjambres» y realizó un análisis sobre las características que deberían tener teóricamente los sistemas de esa naturaleza, así como los patrones de comportamiento de los agentes que forman un enjambre. A partir de ahí, en numerosos lugares se han realizado modelos y simuladores para emular el comportamiento esperable de los enjambres. Merecen destacarse los simuladores realizados en el Santa Fe Institute de Estados Unidos y en el Center for Naval Analysis del mismo país. En todos ellos, se identifica una «inteligencia del enjambre» emergente a partir del comportamiento relativamente simple de los agentes que lo forman.

En todos estos trabajos, se identifican unos elementos comunes que podríamos identificar como:

- Unos agentes autónomos que forman el enjambre.
- La capacidad de conectarse de forma significativa con otros agentes del enjambre aunque generalmente a distancias cortas, es decir, con los agentes que tienen en sus proximidades.
- Un comportamiento individual que obedece a reglas básicas o instrucciones sencillas por lo que no necesitan un complejo programa para programarlas.
- La inexistencia de un control centralizado del enjambre ni un controlador central de las comunicaciones.

Aunque estos son los paradigmas que, como veremos, están siendo utilizados en la actualidad, no debemos pensar que tenga que ser necesariamente así en el futuro. Por ejemplo, no necesariamente debemos pensar que los enjambres deban por fuerza estar formados por agentes totalmente autónomos o que carezcan completamente de un sistema centralizado de gestión y control. Las ineficiencias que ello puede producir, especialmente en operaciones militares, podría conducirnos a una reevaluación de este modelo para crear modelos de enjambres en donde puedan coexistir simultáneamente una cierta autonomía y simplicidad en sus componentes con un cierto mando y control centralizado que de coherencia y coordinación superior a las operaciones del enjambre.

Diversos ejemplos de técnicas de enjambres aplicadas a la insurgencia civil y en el plano militar pueden encontrarse en el Documento *Swarming: The Future of Conflict* de la Rand Corporation, referencia [1].

Componentes de los enjambres

UAV AUTÓNOMOS

Un elemento básico para conseguir implementar enjambres de UAV será evolucionar los UAV controlados remotamente por un modelo que tenga una cierta autonomía en su vuelo. En esta transformación, el elemento más crítico es el piloto automático.

En realidad, no podemos decir que existan pilotos automáticos comerciales que permitan una navegación autónoma del vehículo, especialmente para UAV de pequeño tamaño y que por tanto disponen de poco espacio para albergarlo.

Los pilotos automáticos disponibles no ofrecen la capacidad de maniobrar vehículos en entornos urbanos o compensar la navegación en presencia de vientos fuertes. En realidad los sistemas que existen actualmente están pensados para realizar una navegación hacia una serie de puntos de control que previamente se hayan programado desde una estación de control por un operador del sistema. No está previsto que desde un elemento de control, gobernado por los sensores del propio vehículo, pueda realizarse un control automático del vuelo del UAV.

Para conseguir un vehículo autónomo en su vuelo, tal y como percibimos que debería ocurrir en el seno de un enjambre deberían desarrollarse los siguientes elementos:

- Un piloto automático avanzado capaz de reaccionar rápidamente a las entradas que provengan de los elementos de control del vehículo.
- Un controlador de vuelo que tenga prioridad en adquirir el control del vehículo y que se encargue de tareas como evitar las colisiones, vuelo en formación o seguimiento del terreno.
- Un mecanismo de arbitraje que regule el control del piloto automático propiamente dicho y el controlador de vuelo descrito anteriormente.

Disponiendo de estos elementos, es posible conseguir un control avanzado de un vehículo autónomo que permita realizar las funciones y misiones que podrían estar encomendados a un enjambre de vehículos de esta naturaleza.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

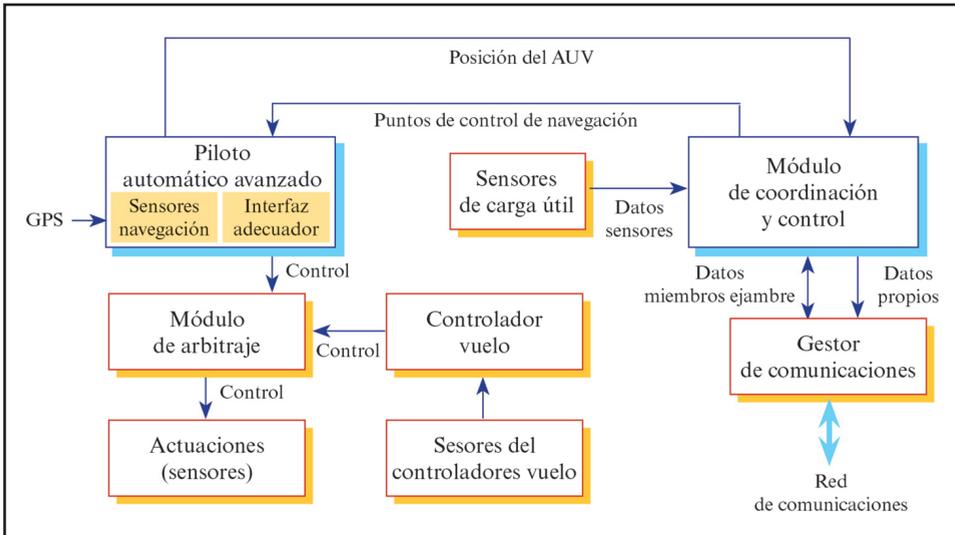


Figura 3.— *Composición del sistema de control de un vehículo autónomo avanzado.*

En la figura 3 podemos ver los elementos básicos que compondrían un sistema de control como el descrito en este apartado.

Se están haciendo esfuerzos en el desarrollo de estos elementos, referencia [7] y se están probando diferentes tecnologías. Podemos decir que estamos frente a los primeros esfuerzos que todavía tienen que demostrar su viabilidad más allá de las simulaciones, los ensayos y las pruebas de campo.

RED DE COMUNICACIONES

El modelo de enjambre también tiene implicaciones para la red de comunicaciones que debe soportar el comportamiento de los UAV que lo componen. La red de comunicaciones que soporte la actuación de un enjambre debe ser suficientemente robusta para permitir la ejecución de tareas críticas que no permitan la pérdida de las características del comportamiento del enjambre al mismo tiempo que tenga capacidad de recuperación y reconfiguración frente a posibles pérdidas de «nodos» que puedan desaparecer de dicha red durante el desarrollo de una misión determinada.

Por otro lado, en muchas ocasiones ya hemos comentado que los desarrollos de enjambres que se están ideando, suponen que los ele-

mentos del mismo deben ser sencillos y en última instancia de bajo coste. Esto, en términos de requisitos de la red de comunicaciones, nos lleva a la necesidad de que sea una red muy resistente a fallos que necesariamente se producirán en sus nodos.

A favor de la red tenemos la posibilidad de que se pueda disponer de un gran número de vehículos que, aunque en condiciones normales no aporten ningún papel en la red de comunicaciones más allá de ser miembros de la misma, en condiciones de fallos o pérdidas de recursos de la misma, pueden ser reconfigurados para tomar un papel activo en la recuperación de dicha red. Es decir disponemos de un potencial de redundancia extremadamente alto en teoría.

Se están desarrollando algoritmos de redes de comunicaciones basadas en *clusters* de nodos, con capacidad de autoconfiguración y robustos frente a degradaciones en cuanto a la operatividad de los nodos que la forman. Es resaltable el trabajo *Diversity-Inspired Clustering for Self-healing MANET*, desarrollado por Ann T. Tai y otros, referencia [8].

Este tipo de redes están basados en las denominadas *Mobile and Ad Hoc Wireless Networks* denominadas MANET. Los «racimos» de nodos están formados por un nodo central, un conjunto de miembros del racimo y otros nodos que actúan como pasarelas (*gateway*) hacia otros racimos.

En un enjambre de UAV tendremos muchos racimos, entendiendo que hay una red central formada por los nodos centrales y las pasarelas, que permite la comunicación interracial a través de todo el enjambre. Esa red central es la que es configurable y resistente a degradaciones.

Una arquitectura de comunicaciones de este tipo es modular y formada por múltiples capas. Esta arquitectura incorpora diversas funciones, incluyendo la capacidad de identificar UAV en las proximidades, con los que se dispone de cobertura en la red de comunicaciones así como «conocer» el tamaño del enjambre. También existen capacidades de recopilar estadísticas y hacer *logging* en la red y distribuir esa información entre todos sus miembros.

Este tipo de arquitectura es adaptable a diferentes configuraciones y en general no necesita un establecimiento de la red manual ni un administrador que la gestione pues no es necesario, para realizar estas operaciones, un conocimiento completo de los detalles completos de la configuración.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

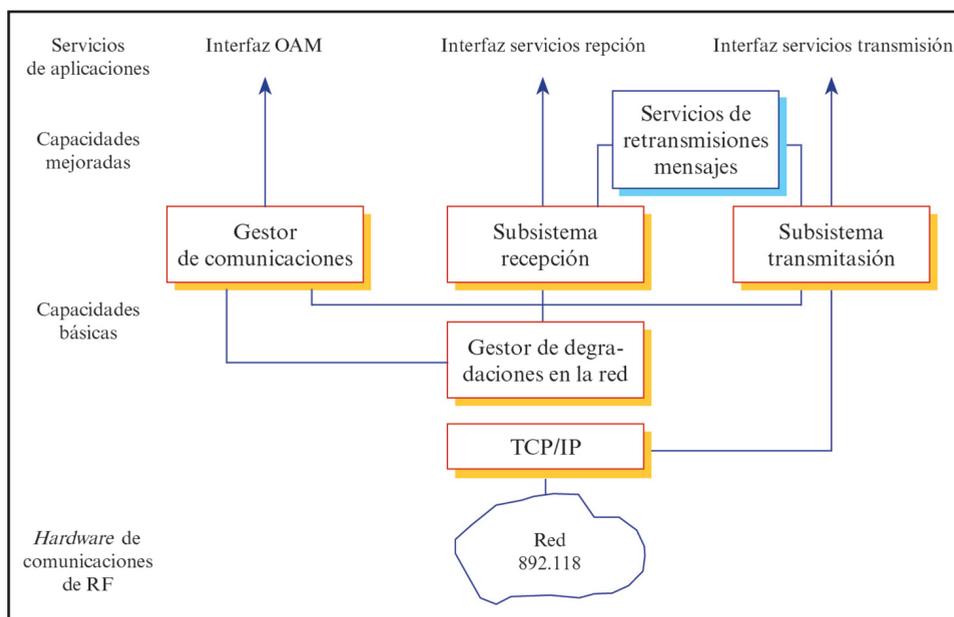


Figura 4.— *Arquitectura de comunicaciones de un enjambre de UAV.*

Los protocolos de la red de comunicaciones además deben diseñarse para utilizar recursos de proceso y de comunicaciones limitados para ahorrar en el consumo de energía.

En la figura 4 se puede observar una estructura básica de un sistema de comunicaciones que recoge las ideas anteriormente expresadas. En el módulo «Gestor de degradaciones en la red» se gestionarían todas las configuraciones de la red en función de la operatividad o no de los diferentes nodos que la componen. En el módulo de «Servicios de retransmisiones de mensajes» se dan servicios de la red orientados a la actuación como relé del sistema, facilitando las comunicaciones entre nodos que no tienen cobertura directa.

SISTEMAS DE GESTIÓN Y CONTROL

Como ya hemos indicado anteriormente, el concepto de utilización de los enjambres de UAV diferirá en el futuro bastante del actualmente existente en lo relativo al control y ejecución de las operaciones de forma centralizada y controlada por operadores. Los UAV tendrán un comportamiento más autónomo debido a los previsibles avances en los

campos de capacidades de comunicaciones de las redes, la miniaturización y el desarrollo de nuevos materiales. Utilizando protocolos de conducta cooperativa será posible desarrollar lo que hemos denominado «conducta emergente» del enjambre a partir de comportamientos relativamente sencillos en los UAV individuales.

En este modelo, el elemento sencillo y barato ya no es un subsistema del UAV sino que es el propio UAV. Es un agente que forma parte de un enjambre multiagente y la inteligencia no se va a poner en cada uno de los agentes sino en el comportamiento del enjambre en su conjunto.

Para que los UAV cooperen en un enjambre hay dos procedimientos básicos. El primer método consiste en la utilización de UAV diferentes en el enjambre, con un alto grado de especialización y que cooperan unos con otros para realizar una tarea compleja.

El segundo modelo, para conseguir un comportamiento cooperativo será necesaria la utilización de UAV idénticos, capaces de adaptarse a cualquier rol y que posiblemente utilizarán sensores menos sofisticados que en el caso anterior para reducir costes.

Existen estudios y experimentos realizados, referencia [9] que demuestran que, en algunas misiones, un enjambre de UAV de bajo coste y con sensores de bajas prestaciones consigue mejores resultados que los conseguidos con un UAV de gran tamaño, costes elevados y sensores de prestaciones muy sofisticadas. Pensemos que, en cualquier aplicación militar que signifique un riesgo significativo de la pérdida de la plataforma, un sofisticado UAV deberá situarse mucho más lejos de las zonas de riesgo que lo que podrán situarse los económicos UAV que forman parte de un enjambre como los que estamos describiendo.

Los procedimientos concretos de cómo implementar un comportamiento de enjambre varían según las diferentes propuestas que están siendo desarrolladas en diferentes universidades y centros de investigación a lo largo de todo el mundo. Entre las técnicas más prometedoras podemos citar las siguientes:

- Modelo de UAV maestro y subordinados.
- Modelo de trabajo en equipo.
- Modelo de variables de consenso.
- Modelo de agentes inteligentes.
- Modelo de campos computacionales (*Co-fields*).

En el siguiente apartado haremos una descripción de cada uno de estos modelos, indicando en que estadio de desarrollo y pruebas se encuentra cada uno de ellos.

Modelos de gestión y control

MODELO DE UAV MAESTRO Y SUBORDINADOS

Este modelo es una aproximación híbrida al modelo de enjambre. En él, coexiste un modelo centralizado con un enjambre. Uno de los UAV, generalmente de más tamaño y mayor carga útil, utiliza un modelo centralizado de control, disponiendo de un enlace con una estación de control en tierra, de donde recibe las órdenes oportunas y a quién reporta los resultados obtenidos en la misión. A su vez, dicho UAV está conectado con un enjambre de pequeños UAV que tienen una cierta autonomía para realizar las tareas que les son encomendadas, dirigiendo de esa forma las operaciones. Estos pequeños UAV se comunican entre sí, con el UAV central y puede que también con la estación en tierra.

Este modelo permite que, por ejemplo en operaciones de vigilancia, un UAV central equipado con radares y sensores pueda primero determinar una zona de vigilancia para obtener información sobre los blancos de interés y luego reparta la labor entre un enjambre de pequeños UAV que, con menos capacidades, inicien la misión, coordinados por el UAV principal.

Parece lógico que el UAV central, que poseerá la inteligencia del sistema y que tendrá un coste elevado, comparativamente con los UAV subordinados, se sitúe en una zona de poco peligro y a salvo de posibles ataques de los adversarios. La pérdida de algún UAV subordinado es de menor importancia para el funcionamiento del sistema, que podrá fácilmente reconfigurarse para repartir también la carga de trabajo entre los restantes.

Las principales características del UAV maestro serán:

- Gran autonomía de vuelo.
- Capacidad de vuelo autónomo.
- Elevada capacidad de carga útil.
- Comunicaciones de larga distancia.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

En cuanto a los UAV subordinados, sus características serán:

- Autonomía de vuelo menor.
- Capacidad de vuelo autónomo.
- Carga útil adaptada a la misión a realizar.
- Comunicaciones para distancias cortas.

TRABAJO EN EQUIPO

El modelo de trabajo en equipo trabaja sobre las mismas hipótesis que venimos comentando a lo largo de este capítulo. Se trata de poder realizar misiones complejas a través de la cooperación de pequeños UAV de bajo coste y que, por ello, tienen una capacidad limitada de proceso. Además debe tener la flexibilidad para adaptarse a configuraciones cambiantes por posibles cambios o bajas en los elementos del enjambre.

Las cargas útiles que llevan estos UAV son de tipo *plug and play* con los interfaces adecuados para la plataforma y con las restricciones de peso y volumen que imponga la misma.

Este modelo representa una aproximación que todavía no presenta un comportamiento emergente en el enjambre. Se trata de un conjunto de UAV en donde cada uno de ellos tiene asignada una tarea o un conjunto de tareas predeterminado, de manera que entre todos realizan la misión encomendada. Dicha misión requiere la realización de las tareas individuales y la cooperación entre todos los elementos del enjambre.

Las características principales de este modelo son las siguientes:

1. Los UAV que forman el enjambre podrán ser iguales o diferentes y tener las mismas cargas útiles o diferentes pero en cualquier caso, cada uno de ellos tendrá asignadas una serie de tareas y dispondrá de los elementos adecuados para realizarla.
2. Los UAV tendrán capacidad de tener un comportamiento autónomo tanto en su navegación como en sus tareas. No será necesario que exista un operador controlando la misión mientras esta se esté llevando a cabo. No obstante, el comportamiento del UAV estará predefinido y programado de antemano. No hay comportamiento emergente.
3. Existirá la posibilidad de que en caso de pérdida de un UAV que realice una determinada tarea, otro pueda realizar la misma, reconfigurándose la asignación de tareas del enjambre.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

4. Los comportamientos de los UAV, es decir la forma de hacer su tarea, estará preprogramada. La teoría de autómatas finitos puede ser útil para programar este tipo de aparatos.

En esta aproximación, una misión compleja deberá ser descompuesta en tareas más sencillas, susceptibles de ser programadas en ordenadores de abordo que serán relativamente sencillos y de baja capacidad.

En el artículo de la referencia [7] se describe un experimento realizado con UAV con esta aproximación de control. Se trata de localizar un emisor de RF en una determinada zona y en caso de encontrarlo, grabar imágenes del mismo para proceder a una identificación positiva.

Para llevar a cabo dicha misión, los UAV están equipados con sensores de RF y uno de ellos lleva una cámara como carga útil. Este enjambre fue capaz de realizar las siguientes tareas:

1. Realizar la navegación desde la base hasta la zona de operaciones.
2. Dividir la zona de búsqueda entre diferentes UAV, de acuerdo a un patrón de búsqueda previamente establecido.
3. Cuando un UAV encuentra una emisión que pudiese corresponder con un posible blanco, avisar al enjambre de la existencia de dicho blanco.
4. Un segundo UAV deja su patrón de búsqueda y procede a comprobar que la emisión existe realmente en el punto definido por el primer UAV.
5. En caso de que el segundo UAV confirme la existencia del blanco, el UAV dotado de la cámara de video procede a grabar imágenes del mismo. En caso contrario se reanudan los patrones de búsqueda.
6. Cuando se da por terminada la misión, el enjambre de UAV regresa a la base.

Este experimento ha sido realizado, en condiciones controladas, dando un resultado satisfactorio.

MODELO DE VARIABLES DE CONSENSO

Esta aproximación permite la cooperación entre los elementos de un enjambre de UAV a partir de la definición en común de lo que

se denomina una «variable de consenso» que es compartida entre todos los UAV.

La idea es encapsular la cantidad mínima de información necesaria para coordinar el comportamiento de los UAV en un vector, variable en el tiempo, que es lo que denominamos variable de coordinación o consenso. Cada UAV posee internamente un valor de dicha variable de consenso que compara con los valores que de dicha variable le envían otros UAV, con los que se comunica en tiempo real. Como consecuencia de dicha comparación, actualiza los valores de dicha variable.

Para que el valor de dicha variable converja entre todos los miembros del enjambre, es necesario definir adecuadamente los elementos de dicha variable de consenso así como las reglas para la actualización de los valores de la misma.

Una ventaja de esta aproximación es que, para que funcione, no es necesaria una conectividad total entre todos los miembros del enjambre. Simplemente hace falta que de una forma más o menos aleatoria y en distintos instantes de tiempo, cada UAV pueda comunicarse con el enjambre a través de comunicaciones «vecino a vecino». No obstante, si asumimos que es viable disponer de comunicaciones por difusión (*broadcasting*), las cosas serán más sencillas.

Esta aproximación ha sido validada en una prueba de campo por APL en un escenario que han denominado DSN (*Dynamic Surveillance Network*). En dicha prueba, un enjambre de pequeños UAV ha sido capaz de localizar un conjunto de sensores, distribuidos en un entorno urbano y captar información de dichos sensores.

El enjambre de UAV primero se distribuye para localizar la red de sensores, cuyas posiciones desconoce, utilizando un algoritmo de búsqueda con un patrón determinado. Una vez que se van encontrando sensores, los UAV del enjambre negocian entre ellos, mediante la aproximación de variables de consenso, cuales son las trayectorias óptimas entre ellos para realizar la vigilancia y búsqueda de sensores, mientras extraen los datos de los que han descubierto.

En este escenario, si uno de los UAV del enjambre desaparece, porque queda fuera de servicio o regresa a la base para entregar datos que ha tomado de la red de sensores, mediante la variable de consenso, el resto de UAV del enjambre reconfiguran sus trayectorias para adaptarse a la nueva situación y seguir repartiéndose la tarea de captación de los datos de los sensores que han sido descubiertos, figura 5.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

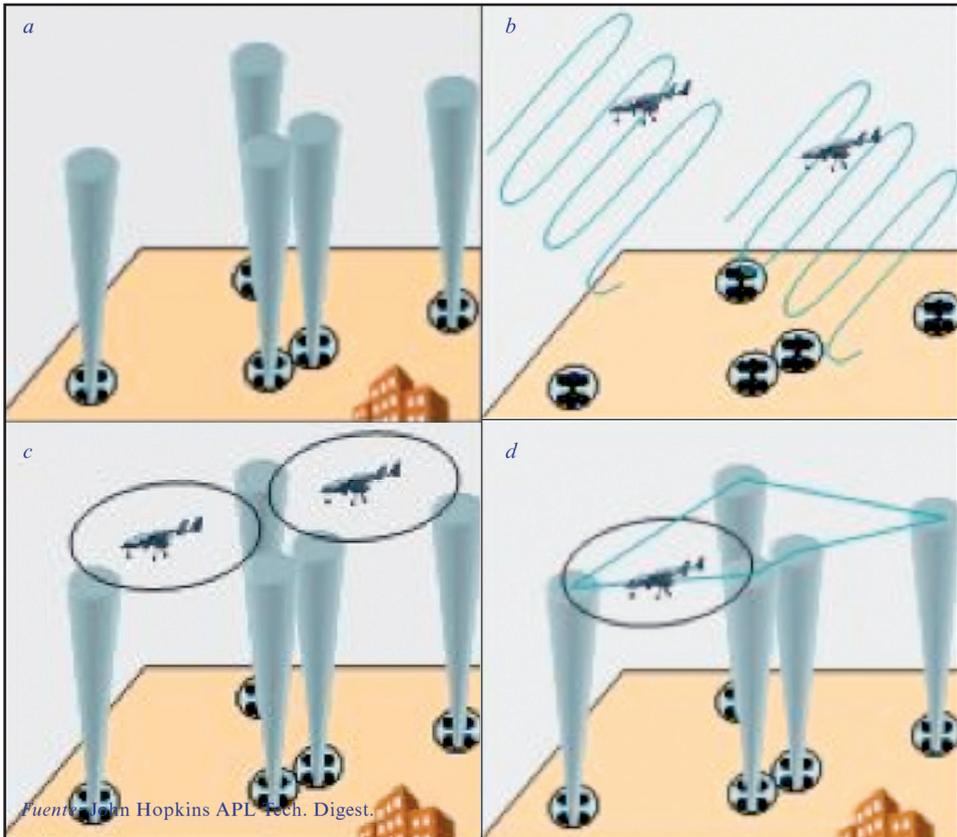


Figura 5.— *Modelo de variable de consenso.*

Detalles de este experimento pueden encontrarse en el artículo «Flight demonstrations of Unmanned Aerial Vehicle swarming Concepts» de Robert J. Bamberger jr. y otros, referencia [7].

MODELO DE AGENTES INTELIGENTES

Un enjambre de UAV que trabaje mediante el modelo de agentes inteligentes estará basado en UAV individuales que poseerán una cierta inteligencia, en el sentido de que son capaces de tomar decisiones autónomas en relación con las tareas que les hayan sido encomendadas.

Hasta ahora, las aproximaciones que se han realizado a este modelo, suponen que el comportamiento de cada UAV individual puede carac-

terizarse mediante una máquina de estados-finitos. La idea es que todos los UAV, en cada momento de su misión, se encontrarán en un estado de entre todos los posibles definidos para dicho agente y que evolucionará hacia otro estado diferente en función de eventos que sucederán, bien en el propio UAV o que detectará del entorno que lo rodea.

Sobre el modelo básico, se han definido algunas evoluciones de la teoría de autómatas finitos que parecen bastante prometedoras para la aplicación en UAV en misiones militares. Las tres más destacables son las siguientes:

1. Uso de *indeterminaciones en las evoluciones entre estados*. En la teoría clásica de autómatas finitos, la evolución entre estados es determinística y depende únicamente de un conjunto de eventos que permiten dicha evolución. Sin embargo, pueden diseñarse sistemas que presenten un cierto grado de indeterminación en la evolución entre los estados. Se ha podido demostrar, referencias [10] y [11], que introduciendo este tipo de indeterminaciones se consiguen enjambres de UAV más robustos y adaptables.
2. Utilización de *arquitecturas jerarquizadas* de estados-finitos. En estos modelos existen diversos subconjuntos de estados. Inicialmente el UAV funciona actuando mediante transiciones entre un subconjunto de dichos estados pero pueden cambiarse dichas transiciones hacia nuevos subconjuntos de estados si se reciben los estímulos adecuados. Esta arquitectura se usa en el modelo Rand Prawn de enjambres de UAV, referencia [12].
3. Los *modelos de mercado* permiten la negociación entre UAV en términos económicos. Mediante estos modelos, los UAV al principio de la misión definen unos comportamientos iniciales denominados «red de contratos». Los UAV encargados de las tareas de más alto nivel publican descripciones de tareas de más bajo nivel que son asignadas a UAV en función de sus capacidades. La dinámica de «mercado» racionaliza la asignación de tareas entre los UAV. Esta aproximación se puede encontrar en la referencia [13].

La ventaja de este modelo de agentes inteligentes es que los humanos somos capaces de entender fácilmente la descripción de los diferentes estados en los que se encuentra cada UAV y también las transiciones entre los mismos. Este modelo puede encargarse tanto del vuelo y trayectorias de los UAV como de las tareas propias de la misión que

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

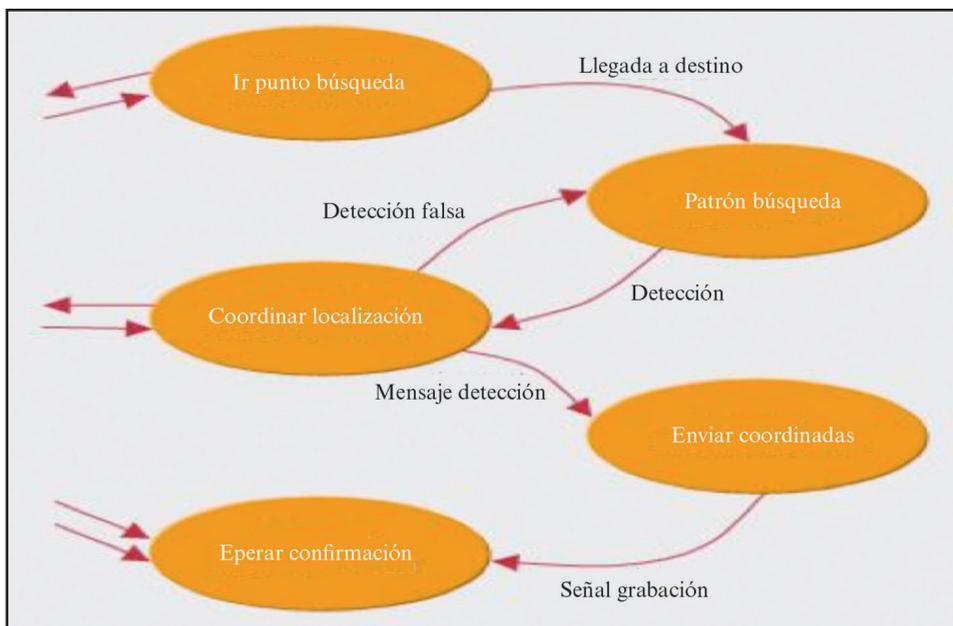


Figura 6.— Ejemplo de algoritmia del modelo de agentes inteligentes.

se les haya encomendado. Puede utilizarse en enjambres con diferentes plataformas sin mayor problema, figura 6.

Entre los inconvenientes de este modelo, hay que indicar que una de sus vulnerabilidades es que, si en el entorno aparecen variables no previstas en la transición entre los estados, el comportamiento será impredecible. Hay que tener en cuenta que para tareas complejas, el número de estados y transiciones puede llegar a ser tremendamente elevado. Por otro lado, los UAV del enjambre tienden a pasarse órdenes, más que negociar entre ellos y eso conduce a esquemas de reparto de tareas con esquemas bastante rígidos. Por otro lado, a medida que el número de UAV crece la coordinación se hace progresivamente más compleja, siendo extremadamente difícil cuando se trata de grandes enjambres de UAV.

MODELO DE CAMPOS COMPUTACIONALES (*Co-FIELDS*)

Este modelo representa la aproximación más novedosa y sorprendente para el control de enjambres de UAV. Es un modelo basado en el comportamiento de algunos enjambres de insectos y en especial de las

hormigas y resulta en un comportamiento emergente del enjambre más allá del comportamiento individual de sus componentes.

Como ya hemos indicado anteriormente en este capítulo, el comportamiento de los enjambres en la naturaleza ha sido una fuente de inspiración. Estos enjambres son capaces de resolver una gran variedad de tareas como encontrar comida o encontrar el camino más corto hacia el nido u organizar las tareas que deben realizar colectivamente.

Estos modelos de la Naturaleza son robustos en el sentido de que las tareas y habilidades de los miembros del enjambre se realizan con independencia de que algunos miembros del enjambre puedan morir o desaparecer en algún momento. También son flexibles en el sentido de que el reparto de tareas no es fijo y varía en función de los valores de las variables del entorno que vayan produciéndose en cada momento. Este comportamiento está en el origen del concepto de «inteligencia del enjambre» que emerge del comportamiento de sus componentes más allá de la conducta individual de cada uno de los agentes que lo forman, figura 7.

Sin embargo, el trasladar este comportamiento al desarrollo de un *software* con procedimientos de ingeniería y sistematizado no es una tarea trivial. De hecho, podemos decir que todavía no existe un marco



Fuente: Opinion Forum.

Figura 7.— El comportamiento de las hormigas inspira el modelo *Co-fields*.

de desarrollo adecuado para este tipo de sistemas. No obstante, existen modelos parcialmente desarrollados que resultan prometedores para desarrollar en el futuro sistemas de este tipo.

Uno de los modelos más desarrollados por diversos investigadores a lo largo y ancho de todo el planeta es el modelo denominado de Campos Computacionales (*Co-fields* en sus siglas inglesas). Podemos definir los campos computacionales como estructuras de datos distribuidas que se encuentran distribuidas a lo largo de una zona geográfica definida y que representan una abstracción del mundo que será la que perciban los componentes del enjambre y por otro tipo de agentes denominados «de influencia» y que definirán el comportamiento de dichos componentes del enjambre.

En este modelo, se considera al enjambre como un todo, en el que cada componente realizará una serie de tareas que sólo tienen sentido en el contexto del comportamiento colectivo. La misión tendrá éxito no por las tareas individuales de los componentes sino por el comportamiento emergente de todo el enjambre.

En este modelo identificamos cuatro puntos básicos:

1. El entorno se modela mediante campos (denominados computacionales) cuyos valores pueden ser definidos por otros agentes o por el propio entorno. Los valores de dichos campos tienen información valiosa para los miembros del enjambre y permiten la coordinación de tareas entre los mismos.
2. Las políticas de coordinación se basan en que los agentes tengan comportamientos autónomos que vendrán influidos por los valores de dichos campos.
3. Las características propias del entorno y las actuaciones de los miembros del enjambre introducirán cambios en los valores de los campos.
4. La realimentación entre las actuaciones de los miembros del enjambre y los valores de los campos, forman un bucle realimentado que está en la base de la coordinación entre los miembros del enjambre y el comportamiento emergente que presenta.

De nuevo se puede observar que este modelo guarda una gran similitud con modelos que funcionan en la Naturaleza en enjambres de insectos y otros animales.

Tipos de problemas a resolver con enjambres de UAV

En este apartado se pretende dar una visión del tipo de tareas que, con la perspectiva actual de los desarrollos que se están realizando en este ámbito, parece que resultarán apropiadas para los enjambres de UAV.

Ya se ha indicado anteriormente que no todas las tareas son adecuadas para esta aproximación, al menos con las limitaciones tecnológicas previsibles en el corto y medio plazo y por ello, coexistirán estos modelos con otros que puedan ser más eficientes y razonables en según qué tareas y qué entornos.

Pero antes de abordar el conjunto de tareas y/o aplicaciones para las que resulta apropiada la aproximación de modelos de enjambre, vamos a resaltar algunos de los problemas «comunes» a la mayoría de dichas aplicaciones y los procedimientos para resolverlos.

En concreto trataremos de:

- El problema de las colisiones.
- Planeamiento de rutas.
- Patrones de búsqueda.
- Adquisición y seguimiento de blancos.
- Respuestas a órdenes humanas.

EL PROBLEMA DE LAS COLISIONES

En cualquier misión que le podamos encomendar a un enjambre de UAV, cada UAV individual debe de ser capaz de volar en la proximidad de otros UAV y no colisionar con ellos.

La aproximación más habitual a este problema es suponer que el enjambre es un grupo descentralizado en el que, cada UAV del grupo es capaz de realizar las maniobras necesarias para evitar colisionar con otros UAV que se encuentren en sus proximidades. Es un problema similar al de la actuación de los conductores en una carretera donde, de acuerdo a unas reglas de tráfico, cada conductor realiza las maniobras necesarias para no colisionar con el resto de vehículos con los que se encuentra en esta carretera.

Se ha realizado un trabajo reseñable en este campo por parte del Korea Advanced Institute of Science and Technology, en donde se ha simulado un comportamiento de UAV en enjambre, basado en mantener las distancias entre miembros del grupo y copiar el comportamien-

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

to de las aves cuando vuelan en bandadas a la misma velocidad y con patrones de incorporación al enjambre. En dicha investigación, se ha podido demostrar que, manteniendo una distancia de unas 15 veces el tamaño del UAV, se evitan en gran medida las colisiones.

Se han propuesto diversas aproximaciones para solucionar el problema como son el uso de videocámaras y algoritmos geométricos o la navegación proporcional, utilizada en el guiado de misiles. No obstante, el problema no está resuelto totalmente y queda mucho trabajo por realizar en este campo.

PLANEAMIENTO DE RUTAS

Superado el problema de que el enjambre de UAV pueda volar sin colisiones, en general, para realizar cualquier misión, el enjambre debe ser capaz de viajar hasta un área de destino donde realizar su misión. Para ello, deberá considerar la distancia y el consumo de combustible para que sea viable el desplazamiento.

En diversos grupos de estudio, se han desarrollado algoritmos para la obtención de las rutas óptimas entre una base y una zona de operaciones que sea aplicable a enjambres de UAV. Algunos de ellos utilizan las mismas técnicas utilizadas por las hormigas para establecer caminos entre las fuentes de comida y el hormiguero.

Muchas veces el reto es cómo establecer rutas en territorio enemigo que resulten óptimas, al mismo tiempo que presenten baja probabilidad de interceptación del enjambre. En este sentido, se han desarrollado técnicas orientadas por ejemplo a la supresión de Sistemas de Defensa Aérea y misiles en territorio enemigo. El reto de estas técnicas es que puedan ser soportadas por vehículos autónomos y que también puedan soportar cambios en tiempo real en la misión inicialmente encomendada.

PATRONES DE BÚSQUEDA

De cara a optimizar el uso del combustible disponible y minimizar el tiempo de permanencia del enjambre de UAV en territorio enemigo, se deben definir patrones de búsqueda que sean lo más eficientes posible y que cubran la mayor cantidad de terreno que sea viable en un

tiempo determinado. Por esta razón, se han desarrollado algoritmos con este fin para aplicarlos en muchas de las tareas que los enjambres pudiesen presumiblemente realizar y que veremos en los próximos apartados.

Se han desarrollado muchos algoritmos óptimos para realizar búsquedas en una determinada zona. El problema es que muchas veces dichos algoritmos son complejos y por ello no responden adecuadamente a cambios que se puedan producir en el entorno y la misión que, como ya hemos explicado, son propios de los enjambres (cambios en la capacidad de los enjambres o pérdidas de agentes individuales). Por ello, se buscan algoritmos que sean computacionalmente simples aunque no sean óptimos para su aplicación en enjambres que estén realizando misiones de búsqueda.

En la implementación práctica de estos algoritmos influyen de forma notable las capacidades tecnológicas, como la capacidad de proceso en cada elemento del enjambre o los alcances de las comunicaciones entre sus miembros. Incluso, se han realizado experimentos con algoritmos que contemplen la posibilidad de la pérdida de comunicaciones entre miembros del enjambre y por tanto, la falta de conocimiento de los resultados de la búsqueda de otros miembros del enjambre.

ADQUISICIÓN Y SEGUIMIENTO DE BLANCOS

Normalmente, el propósito de la vigilancia en las aplicaciones militares de los UAV es la detección e identificación de blancos de interés. Las etapas de una adquisición de un blanco suelen ser la detección, clasificación, reconocimiento e identificación.

Cuando se detecta un blanco, se pretende que se suministren datos que permitan su localización con un cierto margen de error. Esto es básicamente una función de los sensores de que disponga el enjambre de UAV pero también de los patrones de búsqueda que se empleen en el mismo.

En los sucesivos pasos de clasificación, reconocimiento e identificación, se pretende ser capaces de dar indicaciones progresivamente precisas sobre la naturaleza de la detección realizada, sus características, la posibilidad de que sea amigo, neutral o enemigo y, en última instancia, dar todas las características posibles del mismo de forma que sea po-

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

sible determinar las siguientes acciones a realizar en función de dicha información.

El realizar estas tareas puede suponer para el enjambre la captación de información adicional sobre el blanco, bien mediante una mayor persistencia en la toma de datos, una mayor cercanía a éstos o mediante la utilización de sensores de mayor resolución y prestaciones. Todas estas tareas requerirán una coordinación de las acciones de los UAV del enjambre y el desarrollo de la algoritmia que permita realizar todas estas acciones de forma óptima.

Una vez detectado un blanco puede ser necesario realizar un seguimiento del mismo. Este seguimiento puede ser continuo o no y ser realizado por un único UAV del enjambre o realizado por diversos miembros del mismo. Esto implicará acciones del tipo:

- Mantener una traza de cada blanco lo que implica predecir su trayectoria y velocidad para no perderlo.
- Posicionar a los miembros del enjambre para no perder el seguimiento del blanco.
- Realizar maniobras que permitan mantener oculto al enjambre de la detección del enemigo.
- Intercambio de información entre miembros del enjambre de manera que se permita el seguimiento global con la participación de muchos de los UAV que forman el enjambre.

RESPUESTA A COMANDOS HUMANOS

En la mayoría de las aplicaciones, no sólo se desea que los enjambres actúen de forma autónoma sino que puedan reaccionar a órdenes que les puedan ser dadas en tiempo real desde un centro de mando y control por parte de personal humano.

En el caso de enjambres, las órdenes suelen ser más complejas que en el caso de tratarse de un único UAV. Por ello, suele ser útil utilizar plantillas de órdenes que estén precargadas en los miembros del enjambre y que por tanto, puedan ser trasladadas a acciones concretas para cada uno de sus miembros.

También es importante que el enjambre sea capaz de mantener y poner a disposición de un posible control humano una visión única del escenario. Es lo que en términos militares se suele denominar COP (*Common Operational Picture*).



Figura 8.— *Los enjambres de UAV en aplicaciones militares.*

Aplicaciones de los enjambres de UAV

Hemos clasificado las aplicaciones que se vislumbran para los enjambres de UAV en tres tipos:

1. Aplicaciones militares.
2. Aplicaciones de seguridad.
3. Otras aplicaciones.

En los siguientes subapartados veremos algunos detalles de cada una de estas clases de aplicaciones, figura 8.

APLICACIONES MILITARES

APLICACIONES ISTAR

Aquí incluimos todas las aplicaciones orientadas a la localización, identificación, seguimiento y asignación de blancos u otros objetos.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

En una primera etapa, estas aplicaciones requieren la distribución de los miembros del enjambre en una zona geográfica amplia con el fin de detectar blancos para posteriormente orientar sus acciones hacia la identificación y el seguimiento de los blancos detectados.

Para realizar correctamente esta misión, es necesario que el enjambre, de alguna forma, sea capaz de mantener un mapa de la situación actualizado. También para la identificación puede ser necesaria la participación de diversos UAV con diferentes tipos de sensores.

En las labores de seguimiento, los movimientos del enjambre estarán condicionados por los movimientos de los blancos a los que intenta seguir.

GUERRA ELECTRÓNICA

Hasta nuestros días, las aplicaciones de los UAV en guerra electrónica han consistido en cargas de pago, más o menos miniaturizadas, que se sitúan en plataformas de tamaño mediano o grande. Por ejemplo, la empresa sueca Saab ha desarrollado junto con la Defense Science and Technology Organisation de Australia una carga de pago de guerra electrónica que permite la transmisión en tiempo real de marcaciones procedentes de emisores e información sobre sus pulsos hacia una estación en tierra, todo ello en un UAV de 2,9 metros de envergadura.

Para utilizar enjambres de UAV en este tipo de aplicaciones, parece obvio que los futuros desarrollos de cargas de pago deberán por un lado reducir drásticamente su tamaño para permitir su inclusión en plataformas de pequeño tamaño y por otro lado deberán desarrollarse los algoritmos que permitan el trabajo cooperativo de múltiples agentes para permitir la localización de emisores, el análisis de las señales y su clasificación e identificación.

Otro campo de desarrollo consiste en la inserción de toda esta información de guerra electrónica en la información global sobre el campo de operaciones que pudiese aparecer en lo que habitualmente se conoce como COP dentro de un contexto NEC (*Network Enabled Capability*).

Otro campo de trabajo en guerra electrónica, está en la perturbación de señales de radiocomunicaciones en bandas de VHF-UHF, satélite, comunicaciones móviles, radares, etc. Además, este tipo de actividad es especialmente apropiada para poder ser realizada por enjambres de UAV en donde la falta de potencia de salida de las señales interferentes

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

puede ser suplida por la actividad simultánea de múltiples plataformas sobre el mismo blanco.

BÚSQUEDA Y ATAQUE

En este tipo de aplicaciones, el enjambre se utilizará para la supresión de elementos activos del enemigo con el fin de que exista una alta probabilidad de destruirlos si los activan o al menos conseguir que no se activen para evitar dicha circunstancia. El caso más típico es el de las defensas aéreas que si activan sus radares pueden también provocar su destrucción.

Utilizar enjambres para este tipo de aplicaciones supondría disponer de enjambres dispersos, dotados de sensores muy orientados al tipo de blanco activo que pretenden suprimir. Una vez detectado un blanco, otros miembros del enjambre se encargarían del ataque al mismo o bien pasarían la información a un centro de mando y control que tomaría las medidas previstas para cuando esto suceda.

La propia naturaleza de los enjambres, especialmente si son μ UAV, hace impredecible por el enemigo la detección de los mismos.

APLICACIONES NEC

En un contexto NEC, los enjambres de UAV pueden ser utilizados para interrumpir o destruir componentes de la red de información de nuestros adversarios. Hasta ahora, diversas armas inteligentes se postulan como el instrumento más adecuado para destruir los sistemas de mando y control del enemigo. Sin embargo, los enjambres de UAV pueden terminar siendo una alternativa razonable para realizar esta actividad.

Un enjambre de UAV puede ser utilizado muchas veces en diferentes misiones para proceder a destruir o al menos impedir el uso correcto de instalaciones de mando y control. Además, su capacidad de modificar sus objetivos en tiempo real le dan gran versatilidad para adaptarse a sistemas que pueden variar sus ubicaciones, frecuencias de uso, configuraciones, etc.

Parece no obstante, que la destrucción física de instalaciones de mando y control podría necesitar grandes recursos y resultar dificultosa en la práctica. Un objetivo más razonable podría ser el impedir tem-

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

poralmente el uso de instalaciones o dificultar su utilización de forma que las capacidades del enemigo se reduzcan sustancialmente.

GUERRA PSICOLÓGICA

La propia utilización de la palabra «enjambre» infunde un cierto temor en los humanos. Por ello, es previsible, que la simple presencia de elementos de un enjambre pueda influir en el ánimo de los ejércitos enemigos y también de la población civil. Por ello, pueden utilizarse los enjambres contra unidades irregulares, milicias o muchedumbres hostiles con el ánimo de atacarlas o dispersarlas.

ENGAÑO Y DISTRACCIÓN

Cuando estamos comiendo al aire libre y una avispa nos está molestando, llega un momento que estamos más pendientes de deshacernos de la avispa que de la comida. De la misma forma, un enjambre puede molestar y engañar a los comandantes y combatientes en una operación militar, distrayéndolos de su principal misión en la conducción de las operaciones.

Este tipo de acciones será más efectivo entre la población civil o tropas poco entrenadas pero también pueden tener su utilidad entre combatientes más entrenados, figura 9.

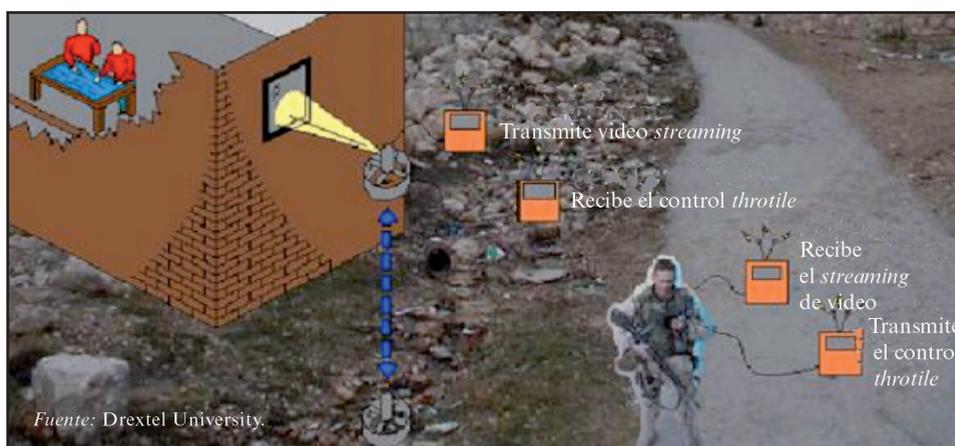


Figura 9.— Los enjambres de UAV en aplicaciones de seguridad.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

APLICACIONES DE SEGURIDAD.

PROTECCIÓN CIVIL

Los enjambres de UAV podrían realizar muchas actividades que podríamos enmarcar dentro de lo que cabría nombrar como protección civil o la lucha contra cualquier tipo de desastre natural o provocado por el hombre. Así, sin ánimo de ser exhaustivos, podríamos citar las siguientes aplicaciones:

- Desastres relacionados con la energía atómica, tanto en su uso civil como militar. Para ello, enjambres de UAV, equipados con detectores de rayos gamma podrían adentrarse en zonas potencialmente contaminadas para determinar el nivel de contaminación y hacer posible la generación de un mapa de radiación que sirviese para planificar también la respuesta de los equipos de emergencia.
- Con ayuda de enjambres de UAV se podrán monitorizar zonas con desastres naturales para la evaluación de daños o localización de supervivientes.
- Otra aplicación podrá ser la monitorización de eventos multitudinarios o el tráfico como ayuda a los Cuerpos y Fuerzas de Seguridad del Estado.
- También podrán utilizarse enjambres de UAV para monitorizar grandes superficies marinas y ser utilizados por ejemplo para la lucha contra vertidos o problemas de contaminación marina.

LUCHA CONTRATERRORISTA

Una de las tareas básicas de la lucha urbana antiterrorista es la identificación y distribución de personas dentro de edificios. En esta actividad los enjambres de UAV pueden ser utilizados con eficacia.

Sensores de detección a través de muros pueden ser utilizados en dichos enjambres o incluso pueden introducirse dentro del propio edificio aprovechando su pequeño tamaño.

En este tipo de aplicaciones, también hay que indicar que pueden ser las organizaciones terroristas las que utilicen este tipo de tecnologías contra la población civil o como parte de sus operaciones. Pensemos en la facilidad que tendría un enjambre de UAV para ser utilizado para lanzar un ataque con armas químicas o biológicas.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

Por ello, habrá que estar muy atento no solo a la utilización de enjambres de UAV sino también a como podría contrarrestarse su uso por este tipo de organizaciones.

OTRAS APLICACIONES

VIGILANCIA EN APLICACIONES NO MILITARES

El número de aplicaciones de vigilancia en la que podrían utilizarse los enjambres de UAV es muy amplio. Así podríamos citar:

- Vigilancia de gaseoductos y oleoductos.
- Aplicaciones de catastro.
- Vigilancia en edificios o instalaciones, etc.

AGRICULTURA

Se pueden vislumbrar múltiples aplicaciones en el campo de la agricultura para los enjambres de UAV. Un conjunto de ellas estarían en relación con el control de plagas en cultivos y en la monitorización del correcto desarrollo de los mismos.

Pueden utilizarse enjambres de UAV también para dispersar pesticidas u otras sustancias sobre cultivos de la misma forma que ya se están utilizando UAV trabajando de forma individual, para la misma tarea por ejemplo en Japón.

Con ayuda de cargas de pago que contengan detectores multiespectrales, los enjambres se pueden utilizar para realizar mapas de superficies cultivadas, identificación del tipo de cultivos existentes en un área o detectar plantaciones ilegales de droga, por ejemplo.

VIGILANCIA MEDIOAMBIENTAL

En el terreno del medio ambiente, el número de aplicaciones también puede llegar a ser elevado. Los enjambres de UAV podrían por ejemplo adentrarse en zonas próximas a la erupción de un volcán para determinar los efectos que pudiese producir.

De forma similar podríamos proponer aplicaciones como:

- Detección de sustancias en el aire.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

- Contaminación en mares, ríos o lagos.
- Vigilancia del cumplimiento de la normativa medioambiental, etc.

METEOROLOGÍA

Los enjambres de UAV pueden utilizarse en múltiples aplicaciones en meteorología. A veces un UAV puede llegar hasta zonas en las que vehículos pilotados no podrían adentrarse. Así podrían evaluar situaciones con condiciones meteorológicas difíciles. No obstante, habrá que determinar qué tipo de plataformas son las que podrían ser capaces de volar en este tipo de condiciones ambientales dificultosas.

También pueden utilizarse plataformas que sean capaces de permanecer en el aire durante mucho tiempo (con el uso de células solares, por ejemplo) para tomar datos meteorológicos útiles, para hacer predicciones o cualquier otra utilidad en este campo.

En general, las propiedades de bajo coste y gran capacidad de permanencia en vuelo serán determinantes en el desarrollo también de estas aplicaciones.

Retos tecnológicos en el desarrollo de los enjambres de UAV

A lo largo del presente análisis sobre sistemas de control para enjambres de UAV hemos ido desgranando un conjunto de «problemas» que deben ir solucionándose a lo largo de los próximos años para avanzar en la obtención práctica de este tipo de sistemas. Las buenas noticias son que en este momento, en muchas universidades y centros de investigación de todo el mundo se está trabajando en avanzar en este tipo de algoritmos y sistemas.

Vamos en los siguientes subapartados a destacar algunos de los problemas más relevantes sobre los que se están desarrollando trabajos de investigación y que deberían dar frutos en las próximas décadas.

GENERACIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO

La concepción de los enjambres como sistemas cuyos componentes tienen un comportamiento altamente autónomo y que en su conjunto

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

presentan un comportamiento emergente, es un concepto novedoso y que no dispone de metodologías de desarrollo definidas.

El comportamiento del enjambre no es determinístico sino heurístico. Por ello, la única posibilidad en este momento para desarrollar estos sistemas es plantear el comportamiento del enjambre en su conjunto, definir a continuación el comportamiento individual de cada uno de sus componentes, programar dicho comportamiento y evaluar el comportamiento del conjunto, bien mediante simulación o mediante pruebas.

Lo normal es que este modelo de desarrollo conduzca a una espiral de pruebas, nuevas versiones y no siempre a resultados satisfactorios.

Volviendo a la naturaleza, parece que el ser capaces de generar un método de desarrollo evolutivo en donde los comportamientos no deseados del enjambre puedan ser eliminados mediante la evolución de los algoritmos implementados puede ser un modelo altamente deseable y sugerente.

Ya existen grupos de trabajo desarrollando en esta línea y aunque no existen todavía resultados concretos, habrá mucha labor en esta línea en el próximo futuro.

MINIMIZACIÓN DE COMPORTAMIENTOS NO DESEADOS

Al ser no determinístico, el comportamiento de los enjambres no es predecible en su totalidad. Esto significa que no siempre vamos a estar seguros de su comportamiento en cada una de las situaciones que se puedan presentar.

Esto en algunas aplicaciones puede ser aceptable pero en otras no es así. Pensemos en aplicaciones que tengan que ver con la seguridad en vuelo o de las personas. En estos casos debemos asegurarnos que el comportamiento «emergente» del enjambre no pone en peligro algo importante; y ello, con una conducta que, como hemos dicho, es heurística en su naturaleza.

El trabajo está aquí en los sistemas de verificación y validación. Los disponibles actualmente están pensados para algoritmos determinísticos. Debemos evolucionarlos hacia procedimientos que contemplen el que los sistemas serán probabilísticos. Ello seguramente nos conducirá a que no podremos asegurar al 100% que nuestros enjambres siempre funcionarán bien sino que funcionarán «suficientemente» bien para la

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

aplicación para la que se han diseñado. El término suficiente, lógicamente dependerá de la aplicación para la que hayamos desarrollado el enjambre.

PROBLEMA DE IDENTIFICACIÓN AMIGO-ENEMIGO

Cuando pensamos en enjambres en entornos militares que además puedan tener una cierta capacidad de ataque, un problema importante a resolver es cómo asegurarse de que sólo atacan a quién tienen que atacar. Esto es especialmente importante cuando estamos hablando de comportamientos heurísticos.

Ya se están proponiendo diferentes métodos para «marcar» a los amigos mediante etiquetas de algún tipo. Por ejemplo podrían ser algún tipo de feromonas definidas mediante variables computacionales, que permitan saber a los miembros del enjambre a quién pueden atacar y a quién no.

No obstante, el problema dista mucho de ser sencillo y se está trabajando en posibles procedimientos para abordarlo.

EFICIENCIA VERSUS ROBUSTEZ

A lo largo de los apartados anteriores, hemos indicado que los enjambres de UAV eran por su propia naturaleza ineficientes y que en muchas aplicaciones se estaba dispuesto a pagar el precio de esta falta de eficiencia a cambio de la robustez que suponía la capacidad de perder elementos del enjambre sin que su comportamiento se viese afectado y en su comportamiento autónomo que le daba gran versatilidad en su uso sin comprometer muchos recursos humanos.

Sin embargo, sería deseable que el comportamiento del enjambre pudiese ser igual de robusto y al mismo tiempo más eficiente. ¿Es esto posible? En general parece que no, puesto que estamos hablando de un compromiso. Si se quiere mayor capacidad operacional, deberá ser a costa de bajar su resistencia a pérdidas de elementos y en general a la redundancia de sus sistemas.

En cualquier caso, parece necesario formalizar procedimientos para medir la ineficiencia y la resistencia a ataques de los enjambres, para ser capaces de definir compromisos aceptables y adecuados a cada una de las aplicaciones en los que usemos nuestros enjambres de UAV.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE MIEMBROS DE UN ENJAMBRE

En principio, la generación de enjambres de UAV se hace en el supuesto de que la tecnología nos permitirá en un futuro más o menos próximo disponer de UAV que sean suficientemente baratos para permitir su fabricación en masa y que por tanto hagan viable el principio de que la pérdida de elementos del enjambre sea viable y asumible.

No obstante lo anterior, es necesario determinar cuantos miembros deben componer un enjambre para que su comportamiento sea el óptimo. Esto es así porque aunque el bajo coste de los UAV es un objetivo tecnológico, no sabemos cuando se podrá conseguir y en cualquier caso debemos disponer de modelos teóricos que nos indiquen dicho número.

En la actualidad no disponemos de modelos que nos indiquen cuando el comportamiento emergente de un enjambre será el óptimo en función del número de elementos que lo componen. Existen modelos de simulación que, fundamentalmente basados en modelos de prueba y error, nos indican números adecuados para realizar determinadas tareas en escenarios concretos. Se deberá hacer un esfuerzo para disponer en el futuro de estos modelos y por tanto dimensionar adecuadamente el tamaño de nuestros enjambres de UAV.

COMPORTAMIENTO DE LOS ENJAMBRES EN TIEMPO REAL

Las misiones para las que estamos tratando de desarrollar modelos de enjambres de UAV, por su propia naturaleza, pueden cambiar sus condiciones y entorno en tiempo real. Cuando en el bucle están operadores humanos, estos pueden asumir la «inteligencia» de cambiar el comportamiento en función de la evolución de dichas condiciones.

Sin embargo, cuando se trata de enjambres autónomos de UAV, esperamos que sea el propio enjambre el que perciba dichos cambios y pueda realizar los cambios en su comportamiento que se correspondan con los cambios producidos en el entorno de operación.

Para hacer esto posible, existen dos métodos básicos. O bien soy capaz de predecir *a priori* cuales pueden ser los cambios en el entorno e introducir en mis enjambres la programación necesaria para que cuando aparezcan, el comportamiento del enjambre cambie consecuentemente.

mente o soy capaz de construir métodos para que pueda cambiar dicho comportamiento en tiempo real cuando se produzca.

Se está trabajando en ambos métodos. El primero de ellos requerirá más memoria en los agentes del enjambre así como mayor capacidad de proceso para los algoritmos necesarios para hacer frente a todos los cambios que se puedan producir. El segundo requerirá la capacidad de introducir en los agentes del enjambre nuevos comportamientos cuando el entorno los haga necesarios. En este caso, debemos tener en cuenta la posibilidad de que no todos los miembros del enjambre puedan realizar esta carga y que por tanto el comportamiento del enjambre pueda ser diferente según tengamos mayor o menor éxito en esta carga de datos.

Ambos métodos requerirán desarrollo en los próximos años y un intenso trabajo en definir los procedimientos para llevarlos a cabo en entornos de operaciones. También será necesario realizar todos los trabajos de simulación imprescindibles para llevar a buen puerto este tipo de algoritmia adaptativa en tiempo real a las condiciones del entorno de las operaciones.

Referencias bibliográficas

- [1] ARQUILLA, John and RONFELDT, David: *Swarming: The future of conflict*, Rand Corporation.
- [2] CRAIG, W.: *Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model*, Reynolds, Computer Graphics, 21 de julio de 1987.
- [3] BENI, Gerardo, and WANG, Jing: *Swarm intelligence in cellular robotic Systems*, Proceedings of the NATO advanced Workshops on robotics and biological Systems, 1989.
- [4] PARKER, Lynn: *Designing control laws for cooperative agent teams*, Transactions of the IEEE on robotics and automation, 1993.
- [5] BONABEAU, E.; DORIGO, M. and THERAULAZ, G.: *Swarm intelligence: From natural to artificial Systems*, Oxford University Press, Nueva York, 1999.
- [6] BENI, G.: *The concept of cellular robotic Systems*, Proceedings of IEEE Int. Symp, On Intelligent Control, Los Alamitos CA, IEEE Computer Society Press, 1988.
- [7] BAMBERGER, Robert J. jr.; WATSON, David P.; SCHEIDT, David H. and Moore, Kevin L.: «Flight Demonstrations of unmanned aerial Vehicle swarming Concepts», *Johns Hopkins APL Technical Digest*, volume 27, number 1, 2006.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

- [8] TAI, Ann T.; TSO, Kam S. and SANDERS, William H.: *Diversity-Inspired clustering for self-healing MANETs: Motivation, protocol and performability evaluation*, IA Tech, Inc., And University of Illinois.
- [9] FINN, Anthony; BROWN, Kim and LINDSAY, Tony: *Miniature UAV's & future Electronic warfare*, Australian Department of Defense Science and Technnology Organization, 2005.
- [10] WEISKOPF, F.; GION, T.; ELKISS, D.; GILREATH, H.; BRUZEK, J. and BAMBERGER, R.: *Control of cooperative autonomous unmanned aerial vehicles*, Proceedings of first AIAA (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*), Technical conference and Workshops on UAV, Systems, Technologies and operations, 2002.
- [11] WEISKOPF, F. and SCHEIDT, D.: *Cooperative autonomous UAV team. Presentation at swarming entibies-Joint C4ISR DSC study plan conference*, Johns Hopkins University, 2002.
- [12] FRELINGER, D.; KVITKY, J. and STANLEY, W.: *Proliferated autonomous weapons: An example of cooperative behavior*, DB-239-AF, RAND Corporation, 1998.
- [13] THAYER, S.; DIGNEY, B.; DIAS, M. B.; STENTZ, A.; NABBE, B. and HEBERT, M.: *Distributed robotic zapping of extreme enviroments*, Proceedings of SPIE: Mobile robots XV and telemanipulator and telepresence Technologies VII, URL, 2000.
- [14] MILLER, Patrick M.: *Mini, micro, and swarming unmanned aerial vehicles: A baseline study*, Library of Congress Washington D.C., Federal Research Div., 2006.
- [15] JAIMES, Aldo; KOTA, Srinath and GÓMEZ, José: *An approach to surveillance an aera using swarm of fixed wing and quad-rotor unmmaned aerial vehicles UAV(s)*, University of Texas.
- [16] MAMEI, Marco; ZAMBONELLI, Franco and LEONARDI, Letizia: *Co-fields: Towards a unifying approach to the engineering of swarm intelligent systems*, Univ. di Modena e Reggio Emilia.
- [17] HADDAD, Mary-Kathryn and SAUTER, John A.: *Swarming concept development and utility study*, Joint C4ISR Decision Support Center, 2004.
- [18] BONABEAU, Eric and THÉRAULAZ, Guy: *Swarm smarts*, Scientific American, marzo de 2000.
- [19] GAUDIANO, Paolo; SHARGEL, Ben; BONABEAU, Eric and CLOUGH, Bruce T.: *Swarm intelligence: A new C2 paradigm with an application to control of swarms of UAV's*, 8.º ICCRTS Command and Control Research and Technology Symposium.
- [20] BARROWS, G. L.: *Future visual microsensors for minimicro-UAV applications*.
- [21] PRICE, Ian C. and LAMONT, Gary B.: *GA directed self-organized search and attack UAV swarms*, Proceedings of the 2006 winter simulation conference.

CONTROL EN LOS ENJAMBRES DE μ UAV

- [22] MCCAULEY, Michael, E. L.T. and MATSANGAS, Panagiotis: *Human systems integration and automation issues in small unmanned aerial vehicles*, Naval Postgraduate School, Monterrey, California, 2004.
- [23] ABATTI, James M.: *Small power: The role of micro and small UAV's in the future*. Center for Strategy and Technology, Air War College, Air University. noviembre de 2005.
- [24] OH, Paul Y.: *Intelligent near-earth UAV's*, Drexel university autonomous systems lab. Presentation for CERDEC S&T Communications Directorate, 2005.
- [25] CHAUMETTE, Serge; LAPLACE, Rémi; MAZEL, Christophe and GODIN, Aurélien: «Secure cooperative ad hoc applications within UAV fleets-position paper», *Paper ID# 901028*.
- [26] NOVAK, Dustin J.; PRICE, Ian and LAMONT, Gary B.: *Self organized UAV swarm planning optimization for search and destroy using swarmfare simulation*, Proceedings of the 2007 winter simulation conference.
- [27] HEXMOOR, Henry; McLAUGHLAN, Brian and MATT, Baker: *Swarm control in unmanned aerial vehicles*, Computer Science and Computer Engineering Department, University of Arkansas.
- [28] BRUECKNER, Sven A.: *Swarming coordination of multiple UAV's for collaborative sensing*, Second AIAA unmanned unlimited systems technologies and operations aerospace land and sea conference and workshop & exhibit, San Diego (California), 2003.
- [29] BRONZ, Murat; MARC, Jean; PASCAL, Moschetta and MICHEL GORRAZ, Brisset: *Towards a long endurance MAV*, Institut Supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse (Francia).
- [30] CLOUGH, Bruce: *UAV swarming? So what are those swarms? What are the implications, and how do we handle them?* Control Automation Air Force Research Laboratory, Estados Unidos.

DANIEL ACUÑA CALVIÑO

Director de Sistemas de Defensa y Seguridad

CONCLUSIONES

Tras el análisis prospectivo realizado a lo largo del presente *Documento de Seguridad y Defensa*, resulta evidente que estamos ante un nuevo y prometedor paradigma de cómo llevar a cabo tareas mediante el uso cooperativo de pequeños vehículos autónomos no tripulados. Como siempre sucede cuando nos encontramos ante un nuevo concepto, las incertidumbres y los retos son numerosos y queda un largo camino por recorrer. No obstante, el esfuerzo de investigación, tanto en universidades, organismos públicos y privados como por la propia industria es notable, como resulta evidente tras la lectura del presente *Documento*.

No nos resistimos a presentar aquí un conjunto de conclusiones que se ponen encima de la mesa para que puedan servir de guía a todos aquellos que pretendan trabajar en este tipo de tecnologías, esperando que puedan resultar de utilidad.

Desde el punto de vista militar y como resumen de los puntos tratados, se podría concluir que los Micro Vehículos Aéreos no Tripulados (μ UAV) tienen un gran interés.

En la actualidad esta tecnología está en fase desarrollo, por lo que sólo se han podido dar opiniones que, en forma de prospectiva, puedan poner soluciones a los problemas planteados.

El uso de estos sistemas en enjambre conlleva unos desarrollos complejos, los cuales no estarán implementados para un uso militar antes del año 2030.

En todo caso, es probable que la utilización de UAV en enjambre empiece por aparatos de mayor tamaño, ya que la miniaturización aumenta la complejidad de fabricación, por lo que los procedimientos de combate que se establezcan en estas situaciones puedan ser utilizados por los enjambres de μ UAV.

CONCLUSIONES

Los vehículos aéreos hasta la fecha en el sector de los UAV es lo que menor valor añadido aporta al sistema, será necesario dar un salto tecnológico importante en el *desarrollo de las plataformas* si se quiere dar satisfacción a las necesidades militares en el campo de los μ UAV.

Estas necesidades operativas de los μ UAV deben estimular la investigación, desarrollo e innovación en la geometría y la forma de los vehículos aéreos si se quiere dar respuestas a los adelantos tecnológicos que se están produciendo en el campo de los sistemas y subsistemas embarcados en los UAV en general y en los micros en particular.

Si se pretende vehículos aéreos que dispongan de los dispositivos imprescindibles para dar satisfacción a todas las necesidades operativas de los futuros μ UAV es irremediable fijarse en la naturaleza y volar como las aves.

Las líneas de investigación que se deberán seguir para optimizar el vuelo, si son necesarias actuaciones para diferentes configuraciones aerodinámicas y geométricas de un mismo μ UAV que implican soluciones contrapuestas, deberán conducir a la mejora de las:

- Tecnologías que mejoren las características aerodinámicas de los μ UAV en cada una de las misiones encomendadas y que optimicen todas y cada una de las actuaciones del vehículo aéreo.
- Tecnologías que permitan diseñar y construir aeronaves de forma cambiante según las necesidades de la operación.

Estas tecnologías tendrán como objetivo proporcionar a los μ UAV la capacidad de volar como lo hacen las aves o los insectos, o sea, deberán ser vehículos aéreos biomiméticos

Se debe destacar que la gran variedad de diseños y los diferentes requerimientos exigidos en el desarrollo de los Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS) es un campo abonado en el progreso y evolución de los vehículos aéreos, tanto en el aspecto de la seguridad como en el de la disminución de pesos y consumos, en definitiva en los costes de la operación que se verá minimizado con este tipo de dispositivos y materiales. Pudiéndose traspasar estas tecnologías, una vez suficientemente contrastadas en estos vehículos, a los vehículos aéreos convencionales.

Siendo imprescindibles todos los sistemas que conforman un μ UAV, la *carga útil* es, inevitablemente, el más directamente relacionado con el logro de la misión; es decir el más necesario en términos de prestación del servicio requerido.

CONCLUSIONES

Aun siendo así, en el campo de los micros, a diferencia de los grandes UAS, no se ha prestado gran atención hasta ahora a la consecución de diseños específicos de cargas útiles para esta aplicación. La existencia de pequeñas cámaras en el mercado procedentes de aplicaciones generales o de la electromedicina ha hecho que se haya dedicado menor esfuerzo en esas cargas útiles de observación que el dedicado al diseño de la propia aeronave u otros sistemas especiales (control de vuelo). Otros sensores especializados (contaminantes, nucleares, biológicos y químicos, etc.) también han sido tomados prestados de otras aplicaciones. No ha sido hasta muy recientemente que las cargas útiles para μ UAV han comenzado una andadura propia y ahora ya se están dedicando grandes recursos al desarrollo de suites de sensores, de observación u otros, para aplicación en las pequeñas aeronaves en vuelo.

Los micros también se consideran vehículos ideales para transportar y, en su caso, lanzar otros tipos de cargas útiles, de saturación o anulación de capacidades de las fuerzas adversarias sin más límite que el coste; éste debe ser siempre mínimo para poder utilizarlos en grandes cantidades. Y aquí está, precisamente, el campo de actuación de los μ UAV operando en enjambre.

Respecto a los llamados *sistemas generales* de una aeronave y, aplicándonos al caso tan particular de los μ UAV, el más importante es, sin duda, el de la propulsión. Otros sistemas generales clásicos como el hidráulico para actuadores de potencia, el sistema antihielo, etc., son difícilmente aplicables o, por definición inexistentes, como en el caso de los sistemas de cabina y supervivencia a bordo.

Para pequeños vehículos aéreos se convierte en especialmente importante el sistema eléctrico que será el responsable de proveer de energía a los sistemas embarcados y, muy generalmente también, a la propulsión. Se hace así, en este caso, inseparable el sistema propulsivo del concepto de energía disponible a bordo; es decir, la suma de planta motriz más el combustible o depósito energético que la alimenta.

La propulsión eléctrica es la de mayor y más fácil aplicación en esta categoría de vehículos aéreos y ello por doble motivo: la facilidad de su uso y de almacenamiento de energía a bordo y la madurez de los motores eléctricos de los que ya ha habido varias generaciones de motores muy eficientes en las aplicaciones de la electrónica de consumo. No obstante, la ingeniería especializada ha producido prototipos de otros sistemas propulsivos, basados en procesos de combustión, muy impac-

CONCLUSIONES

tantes y que son de aplicación en casos concretos como aquellos en que se necesita un gran impulso específico. Éste se obtendrá mediante el uso de micro turbinas o microcohetes.

En el caso generalizado de propulsión eléctrica, el desafío tecnológico viene dado por la necesidad de disponer de grandes cantidades de energía eléctrica almacenada a bordo. Es decir la tecnología de pilas eléctricas de gran densidad energética, capacidad de gran número de ciclos de carga-descarga y buenas intensidades de consumo.

En relación con los *sistemas de navegación*, la tecnología GPS permite un gran nivel de miniaturización y precisión en exteriores. Para interiores es necesario desarrollar sistemas específicos basados en la distribución de repetidores de radiofrecuencia o en cámaras de seguimiento óptico. Existen actualmente demostradores tecnológicos de ambas tecnologías, aunque la mayor dificultad responde al despliegue de dichos repetidores en un ambiente real y dentro de un marco de misión cooperativa y no en un área de laboratorio calibrada.

La operación de múltiples UAV en una misma zona y su empleo en entornos urbanos o en el interior de edificios hace necesario contar con sistemas de detección de obstáculos y con algoritmos que eviten las colisiones entre vehículos y con el entorno. Una vez más la miniaturización de los sistemas de *sense&avoid*, actualmente en fase de definición y desarrollo aparece como la principal dificultad.

En cuanto a las *comunicaciones*, las limitaciones que el tamaño de los μ UAV impone en las dimensiones, pesos y consumo de potencia de los equipos de comunicaciones a bordo se traduce en el corto alcance de los mismos. Sin embargo, el hecho de disponer de un gran número de vehículos en una misma área permite establecer redes dinámicas de comunicaciones. Dichas tecnologías de redes existen actualmente, aunque el reto principal es la miniaturización de los terminales y la capacidad de adaptar la misión de los μ UAV al mantenimiento de una densidad de red y unas distancias entre nodos que garanticen la fiabilidad y mantenimiento de las comunicaciones.

En lo relativo a los Sistemas de Gestión y Control debemos destacar las siguientes consideraciones:

- Los modelos de enjambre, basados en paradigmas de la naturaleza, constituyen una aproximación novedosa al control y comportamiento de conjuntos, más o menos numerosos de μ UAV que, aunque seguramente no serán útiles en todo tipo de misiones, pro-

CONCLUSIONES

meten ser revolucionarias a la hora de enfocar otras, incluyendo bastantes misiones en el ámbito de los conflictos militares.

- Actualmente, existen diversos modelos simulados que emulan el comportamiento de los enjambres y algunos pocos sistemas experimentales que se han probado en condiciones controladas. Podríamos por tanto decir que estamos en las etapas incipientes de esta tecnología.
- Los retos tecnológicos subyacentes son numerosos y en su resolución estará la clave de la disposición de enjambres en un futuro más o menos próximo.
- El comportamiento de enjambre, junto con la nanotecnología puede ser una combinación que puede arrojar resultados sorprendentes y revolucionarios también en sistemas de sistemas no tripulados.

En resumen, los autores del presente *Documento* han pretendido realizar un análisis de las diferentes tecnologías que subyacen en el diseño y desarrollo de sistemas de enjambres de μ UAV. Si hemos conseguido despertar el interés de los lectores por estos sistemas e incentivar el trabajo de los investigadores e industria en estas tecnologías, hemos cubierto sobradamente nuestras expectativas.

DANIEL ACUÑA CALVIÑO

Director de Sistemas de Defensa y Seguridad

COMPOSICIÓN DEL GRUPO DE TRABAJO

Presidente: D. DANIEL ACUÑA CALVIÑO

*Director de Sistemas de Defensa y Seguridad,
Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España, S. A.*

Secretario: D. MANUEL NOCHE DOMECH

Coronel de Artillería DEM y profesor del CESEDEN.

Vocales: D. CARLOS VERA SIBAJAS

*Teniente coronel del Ejército de Tierra, Sección de Inteligencia y Seguridad,
División de Operaciones del Estado Mayor del Ejército.*

D. MIGUEL ÁNGEL BARCALA MONTEJANO

*Director de la Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos,
presidente de la Escuela de Ingeniería Aeronáutica y Espacio,
Universidad Politécnica de Madrid.*

D. FRANCISCO MUÑOZ SANZ

*Director del Departamento de Programas Aeronáuticos
del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.*

D. PABLO GONZÁLEZ SÁNCHEZ-CANTALEJO

Director de Sistemas no Tripulados de la empresa INDRA.

Las ideas contenidas en este trabajo son de responsabilidad de sus autores, sin que refleje, necesariamente el pensamiento del CESEDEN, que patrocina su publicación

DOCUMENTOS DE SEGURIDAD Y DEFENSA*

1. Visión española del África Subsahariana: seguridad y defensa
2. Futuro de Kosovo. Implicaciones para España
3. Actuación de las Fuerzas Armadas en la consolidación de la paz
4. El futuro de la OTAN después de Riga
5. La cooperación militar española con Guinea Ecuatorial
6. El control de los flujos migratorios hacia España: situación actual y propuestas de actuación
7. Posible evolución de Afganistán. Papel de la OTAN
8. Modelo español de Seguridad y Defensa
9. Posibles escenarios de los battlegroups de la Unión Europea
10. Evolución geopolítica del norte de África: implicaciones para España
11. La aportación de las Fuerzas Armadas a la economía nacional
12. Reflexiones sobre la evolución del conflicto en Irlanda del Norte
13. Fuerzas Armadas y medio ambiente
14. La configuración de las Fuerzas Armadas como entidad única en el nuevo entorno de seguridad y defensa
15. Seguridad y defensa en Iberoamérica: posibilidades actuales para la cooperación
16. España y el conflicto del Líbano
17. La aproximación estratégica a la Europa del Este
18. La crisis energética y su repercusión en la economía. Seguridad y defensa nacional
19. Seguridad y estabilidad en la cuenca mediterránea

* Los Documentos de Seguridad y Defensa están disponible en las bibliotecas especializadas y en el Centro de Documentación del Ministerio de Defensa.

20. La intervención de las Fuerzas Armadas en el apoyo a catástrofes
21. Medidas de confianza en el campo de la seguridad en el área euromediterránea
22. Las Fuerzas Armadas y la legislación tributaria
23. Dimensión ético-moral de los cuadros de mando de los Ejércitos
24. La iniciativa norteamericana de misiles y su repercusión en la seguridad internacional
25. Hacia una estrategia de seguridad nacional para España
26. Cambio climático y su repercusión en la economía, la seguridad y la defensa
27. Respuestas al reto de la proliferación
28. La seguridad frente a artefactos explosivos
29. La creación de UNASUR en el marco de la seguridad y la defensa
30. El laberinto paquistaní
31. Las nuevas tecnologías en la seguridad transfronteriza
32. La industria española de defensa en el ámbito de la cooperación internacional
33. El futuro de las fuerzas multinacionales europeas en el marco de la nueva política de seguridad y defensa
34. Perspectivas del personal militar profesional. Ingreso, carrera y sistema de responsabilidades
35. Irán como pivote geopolítico
36. La tercera revolución energética y su repercusión en la seguridad y defensa
37. De las operaciones conjuntas a las operaciones integradas. Un nuevo desafío para las Fuerzas Armadas
38. El liderazgo motor del cambio
39. El futuro de las relaciones OTAN-Rusia
40. Brasil, India, Rusia y China (BRIC): una realidad geopolítica singular

41. Tecnologías del espacio aplicadas a la industria y servicios de la defensa
42. La cooperación estructurada permanente en el marco de la Unión Europea
43. Los intereses geopolíticos de España: panorama de riesgos y amenazas
44. Adaptación de la fuerza conjunta a la guerra asimétrica
45. Posible evolución del escenario AN-PAK ante las nuevas estrategias
46. Relaciones OTAN-Unión Europea a la vista del nuevo Concepto Estratégico de la Alianza
47. Los sistemas no tripulados
48. La lucha contra el crimen organizado en la Unión Europea