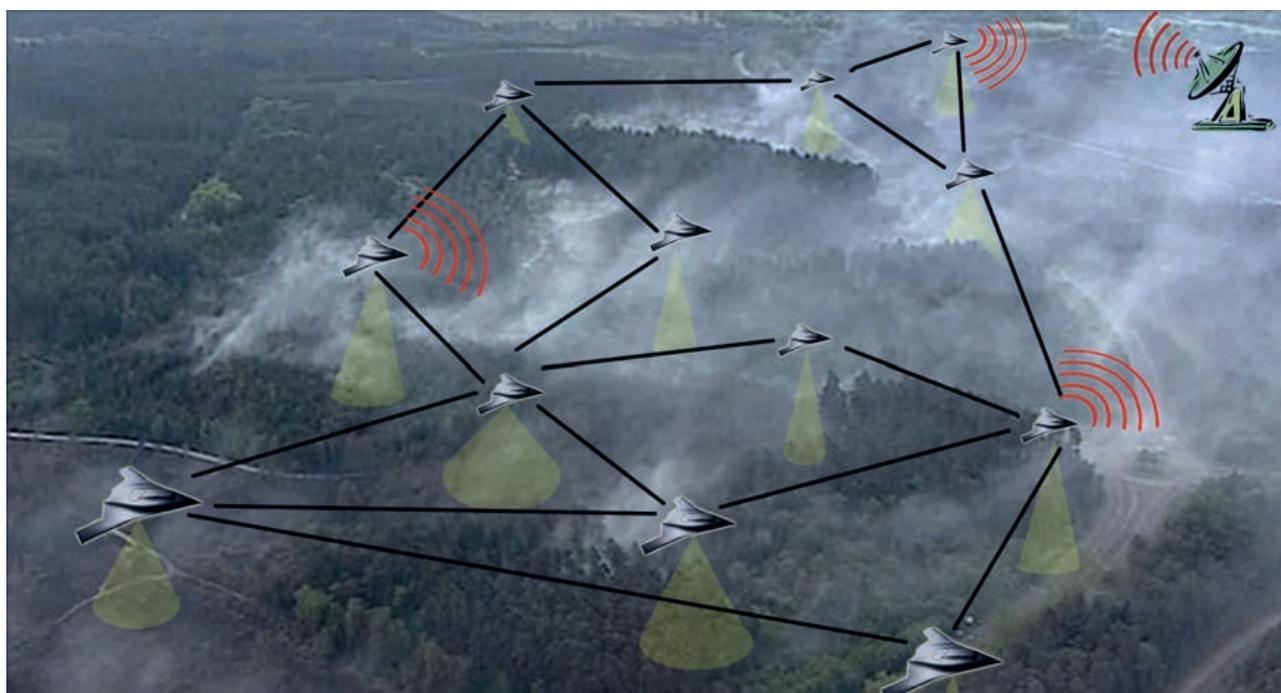


Enjambres de *RPA*s, una mirada al futuro

FERNANDO AGUIRRE ESTÉVEZ
Teniente coronel del Ejército del Aire

ENJAMBRE ES UNA PALABRA PROCEDENTE DE LA NATURALEZA, QUE DESCRIBE COMO UN GRUPO NUMEROSO DE ABEJAS, HORMIGAS U OTROS INSECTOS COMBINAN SUS HABILIDADES DE FORMA COOPERATIVA PARA ALCANZAR UN OBJETIVO CONCRETO. NO OBTANTE, MÁS QUE DE GRUPO SE DEBE HABLAR DE COMPORTAMIENTO COOPERATIVO, DE MANERA QUE UN CONJUNTO DE *RPA*s ACTÚE COORDINADAMENTE, ESTABLECIÉNDOSE UNA RELACIÓN ENTRE CONDUCTAS INDIVIDUALES SIMPLES DE CADA VEHÍCULO REMOTO Y UN COMPORTAMIENTO COLECTIVO INTELIGENTE DEL ENJAMBRE



Representación artística de un enjambre.

Nos encontramos inmersos en la era de los RPAs (Remotely Piloted Aircraft System), su desarrollo ha supuesto un importante avance en el campo de la aviación, se consolidan estructuras y conocimientos, y cada vez se ve más cerca la madurez de estos sistemas. Pero ya se trabaja en nuevos desafíos, las sucesivas mejoras en comunicaciones e inteligencia artificial (IA), y su aplicación a estas aeronaves ha propiciado la aparición de un nuevo elemento estratégico, el enjambre, cuyas capacidades se vislumbran impresionantes.

Aunque tradicionalmente se ha concebido el enjambre como aquel formado por RPAs de tipo micro o nano, del tamaño de pequeñas aves o insectos, actualmente este concepto se está abriendo a otras categorías, existiendo proyectos de tamaño mini (2-20 Kg). Esto supone un importante reto ya que estos vehículos deben operar sincronizadamente a través de una red de información, analizando el entorno y tomando decisiones, que permitan realizar misiones arriesgadas de un modo rápido y económico.

CONCEPTO DE ENJAMBRE

Descendiendo a un nivel más técnico, un enjambre puede definirse como un conjunto de RPAs autónomos que suelen disponer de capacidad sensora propia y conducta reactiva frente a los elementos del entorno y del resto de RPAs, de forma que emerge una conducta colectiva a partir de la suma de la conducta de los RPAs individuales.

La idea de emplear un grupo de individuos que sean capaces de operar de manera cooperativa para conseguir un fin no es nueva, constituye la base

del comportamiento de muchos animales en la naturaleza. Así, las hormigas y las abejas se dividen el trabajo y se organizan para la búsqueda de alimentos, los lobos y los leones cazan en manada, las aves han descubierto que la coordinación del vuelo disminuye la resistencia al avance y ahorra energía, etc.

Pero este tipo de comportamientos no es ajeno a la actividad humana; el hombre prehistórico tuvo que aprender a cazar para sobrevivir y se vio en la necesidad de adoptar estos procedimientos de caza en sus luchas. De este modo, a través de un proceso claramente evolutivo, este hombre aprendió que necesitaba la ayuda de más humanos para crear estas estrategias iniciales de emboscadas y sorpresas. Esta actitud sinérgica representa la base del nacimiento de los ejércitos, donde la suma de los soldados pertenecientes a una unidad militar incrementa la acción de estos soldados por separado.

Aunque en estos momentos se disponen de RPAs en estado suficientemente consolidados, el problema surge cuando se pretende integrar un conjunto de estas aeronaves dentro de una estructura organizada de carácter inteligente. Cada uno de estos vehículos debe ser autónomo o semiautónomo a la hora de tomar ciertas decisiones, pero además deben actuar como una entidad completamente sincronizada de manera que se puedan asignar misiones al sistema completo.

Los humanos hemos aprendido a realizar conductas cooperativas a través de nuestra educación, y los militares cumplimos nuestra misión de acuerdo con la formación militar que hemos recibido en las academias militares, pero dotar de esta capacidad a un enjambre de RPAs requerirá el desarrollo de algoritmos complejos en inteligencia artificial que permitan tender una red cognitiva entre estos aviones remotos, de tal modo que se genere un comportamiento colaborativo de apoyo mutuo.

Un enjambre reducirá notablemente el tiempo necesario para efectuar una misión ISTAR (Intelligence, Surveillance Target, Acquisition and Reconnaissance) siendo la información obtenida de mayor calidad y precisión. Estas plataformas tendrán una gran

versatilidad y capacidad de adaptación, combinarán sus capacidades de forma inteligente, evitarán colisiones mediante dispositivos "Sense & Avoid" y podrán asumir la pérdida de algunos de ellos en el teatro de operaciones.

PROGRAMA LOCUST

LOCUST (Low-Cost UAV Swarming Technology) es un programa de la ONR/USN (Office of Naval Research/United States Navy), actualmente en desarrollo, siendo el enjambre con la capacidad autónoma más avanzada hasta la fecha. Concebido para desplegar hasta treinta RPAs en un minuto tipo Coyote desde un lanzador multitubo; el sistema ha sido diseñado para alcanzar el objetivo y generar un efecto multiplicativo de desconcierto y decepción en el espacio aéreo del adversario.

El Coyote es un RPA de bajo coste no reutilizable con un peso de 5,9 Kg, 1,47 m de envergadura, 90 minutos de autonomía y carga de pago de 0,9 Kg. Ideado en sus comienzos como componente ISR (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) de los aviones/helicópteros MPA/ASW (Maritime Patrol Aircraft/Anti-Submarine Warfare), cada Coyote se lanza desde los tubos sonoboyas, se frena con un paracaídas mientras se abren las superficies de vuelo y la hélice, y entra en funcionamiento el motor eléctrico. Para realizar la función ISR transporta una cámara electróptica digital Sony FCB-IX10A (EO) o una cámara infrarroja (IR) no refrigerada BAE SCC500 (IR), además del data link y el GPS (Global Positioning System). Patrocinado por la ONR, esta aeronave ha sufrido muchas vicisitudes desde su creación, el primer proyecto partió



Programa LOCUST. Lanzador multitubo de Coyotes.



Programa LOCUST. Despliegue de las superficies de vuelo de un Coyote.



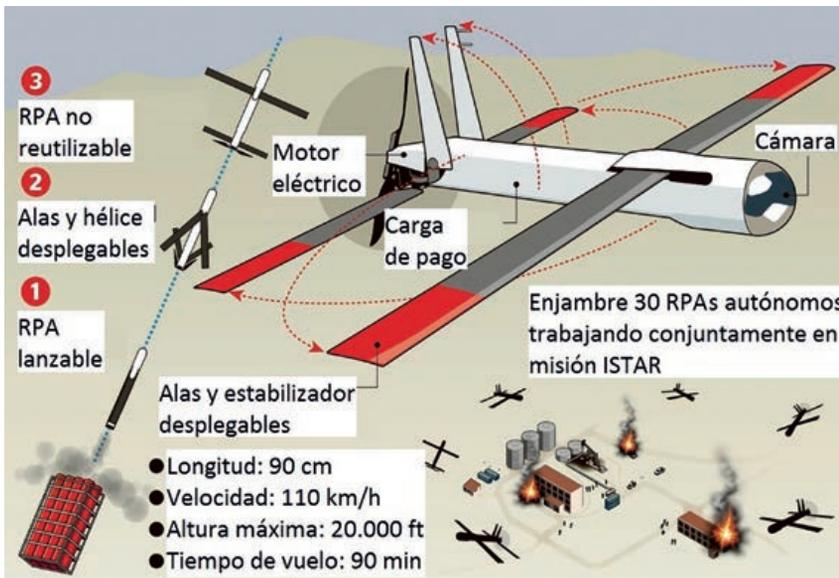
Coyote. Modelo.

Coyote en versión de lanzamiento desde aviones/helicópteros MPAASW (Maritime Patrol Aircraft Anti-Submarine Warfare).

de Advanced Ceramics Research; si bien esta compañía fue vendida a BAE Systems en 2009, Sensintel compró BAE Systems Unmanned Aircraft Programs en 2013 y finalmente Raytheon adquirió Sensintel en 2015, consciente de su potencial como parte del futuro LOCUST.

Al objeto de reducir costes, LOCUST utiliza un RPA ya probado como el Coyote, aunque la interconexión y sincronización entre ellos requiere una red de inteligencia artificial aún en fase de desarrollo y evaluación, pero cuyas posibilidades se prevén muy amplias y por explotar. Cada uno de estos vehículos tiene una firma radar muy pequeña, reduciendo por tanto el tiempo de alerta, lo cual unido a su elevado número produciría tal confusión que podría ser aprovechado por un misil para penetrar en un sistema de defensa aérea sorprendido y abrumado. De esta manera, un enjambre de estas características podría colapsar un sistema de defensa aéreo diseñado para repeler una agresión proveniente de aviones y misiles de mayor tamaño.

La USN está realizando múltiples simulaciones acerca del efecto que produciría uno de estos enjambres en su Sistema de Defensa de Misiles Aegis, considerado uno de los mejores del mundo, habiendo admitido que el Aegis tendría serias dificultades en repeler un número superior a ocho de estos vehículos remotos, por lo que treinta sería devastador. Incluso en un estadio más avanzado, la USN ya imagina un enjambre defensivo que sería desplegado en respuesta a una acción armada.



Coyote. Características.



Programa Gremlin. C-130 Hércules recuperando un enjambre.

PROGRAMAS DE LA AGENCIA DARPA

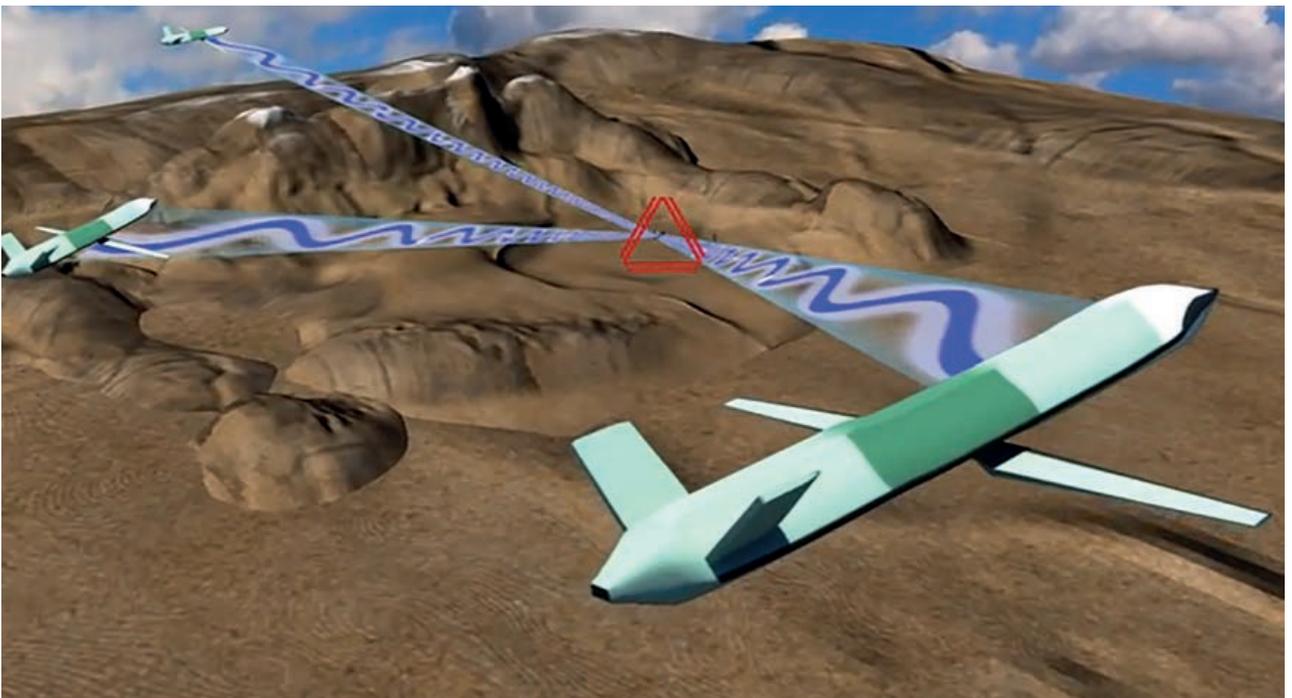
Aunque la USN se encuentra a la vanguardia de estos prototipos remotos con su LOCUST, la Agencia DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) del Departamento de Defensa de los Estados Unidos ya trabaja en

teorías aún más revolucionarias, siendo uno de estos programas punteros el Gremlin. Con este nombre se designa un enjambre de RPAs barato, reutilizable y lanzable desde diferentes tipos de aviones, para ser recuperados desde un C-130 Hércules. Esta nueva plataforma, sin ser completamente reutilizable, ha sido diseñada para

cumplir una veintena de misiones de alta peligrosidad, con un bajo nivel de mantenimiento, antes de ser retirada del servicio.

El Gremlin será configurable para distintas misiones ISR y EW (Electronic Warfare) con el objetivo de saturar las defensas enemigas e inutilizar las redes de comunicaciones. Formarán una red colaborativa de carácter cognitivo donde el éxito de la operación no se verá comprometido ante la ausencia de algún Gremlin. No se descarta disponer de diferentes tipos de aeronaves remotas.

Otro programa destacable de la Agencia DARPA es el denominado "system-of-systems", donde RPAs, misiles y aviones operan coordinadamente. En una simulación realizada por la propia Agencia, un avión de caza tripulado en misión SEAD (Suppression of Enemy Air Defenses) analiza el entorno y detecta una batería de misiles SAM (Surface to Air Missile). En ese momento, alerta a un avión nodriza que permanece en espera en lugar seguro para que lance un enjambre de RPAs como medio ISR, con el fin de acercarse a la zona de conflicto y recopilar información del enemigo, y a la vez interferir y perturbar sus rada-



Programa Gremlin. C-130 Hércules recuperando un enjambre.

res. Una vez procesada la información y confirmado que se trata de un elemento hostil, el avión nodriza lanza un enjambre de misiles LCCM (Low Cost Cruise Missile) hacia el blanco mientras los RPAs regresan para ser recuperados.

Un programa muy reciente de la Agencia DARPA es el CODE (Collaborative Operations in Denied Environment), diseñado para potenciar la autonomía colaborativa de varios RPAs en un área perturbada EMOE (Electromagnetic Operational Environment), incluso si fallara la conexión con la GCS (Ground Control Station). Entre las muchas posibilidades que ofrece, estaría reconocer y responder ante obstáculos y situaciones imprevistas, y poder actuar como misiles en última instancia.

ENJAMBRE “HONEYCOMB”

El enjambre “Honeycomb” es un desarrollo del ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) de Zúrich y se presenta aquí por el interés suscitado, no obstante, aún queda mucho trabajo por hacer hasta alcanzar un prototipo consolidado. Cada RPA, un cuadricóptero, se interconecta física y electrónicamente para volar en formación, pero se separa para acometer tareas independientes. Al no disponer de rotor antipar, el vuelo de cada aeronave es errático, pero al reunirse en un único ente, la mitad de los vehículos giran el rotor en un sentido y la otra mitad en el otro para compensar el torque, y la formación estabiliza su vuelo.

COMUNICACIONES EN ENJAMBRES

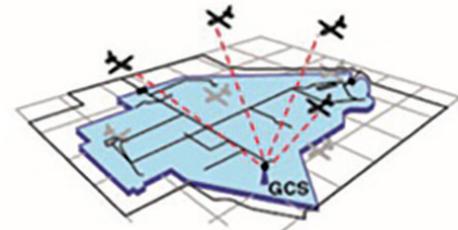
Una red de comunicaciones de un enjambre debe tener una serie de características mínimas como ser capaz de implementar tareas críticas, recuperarse de la pérdida de un vehículo remoto y ser muy resistente a fallos e interferencias o jamming. Para ello, se conocen cuatro arquitecturas básicas: enlaces directos, satelitales, celulares y redes de mallas.

Los enlaces directos entre la GCS y los RPAs componen una topología centralizada, si bien no son adecuados para hacer uso de las tecnologías de cooperación. Presentan el inconveniente de que no puede haber ningún obstáculo entre los enlaces, se necesitan transmisores de alta potencia y un considerable ancho de banda.

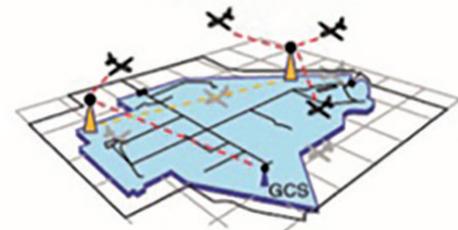
Los enlaces satelitales también tienen una arquitectura centralizada, presentan mayor cobertura que el directo, no tienen problemas de LOS (Line-Of-Sight) pero los medios requeridos son más caros y complejos.

Los enlaces celulares son similares a los que dispone la telefonía móvil con el coste asociado a la infraestructura de radios y repetidores. Sin embargo, esta arquitectura tiene importantes ventajas como una extensa cobertura, redundancia de repetidores, puede ser usada por otros RPAs, alta fiabilidad, etc.

Las redes de mallas son arquitecturas donde cada nodo, ya sea terrestre o bien un RPA, puede actuar como repetidor. Algunas ventajas son que la comunicación aeronave-aeronave puede ser directa, se pueden aplicar protocolos de



Enlaces directos



Enlaces celulares

Arquitecturas básicas de comunicación de enjambres.

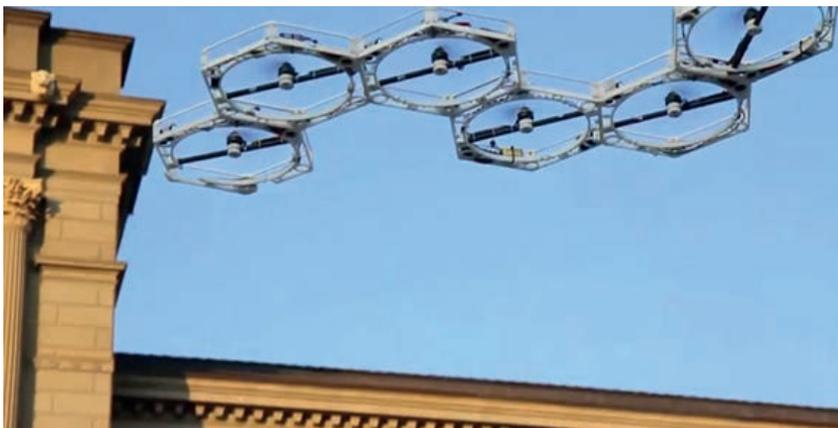
enrutamiento, son flexibles y robustos, son compatibles con las arquitecturas previas proporcionando redundancia adicional y el alcance podría extenderse esparciendo un par de RPAs como repetidores.

Un ejemplo de redes de malla son las MANET (Mobile and Ad Hoc Wireless Networks), basadas en clusters de nodos, con un nodo central y varios periféricos, así como nodos pasarelas (gateway) hacia otros racimos. Es modular, configurable, resistente a degradaciones y generalmente no necesita un administrador de red.

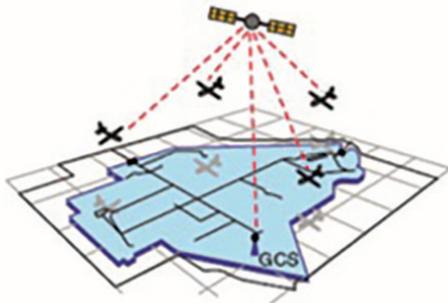
GESTIÓN Y CONTROL DE ENJAMBRES

La materialización del concepto enjambre requerirá dotar a los RPAs de cierto comportamiento autónomo, de tal modo que partiendo de acciones simples de vehículos remotos individuales y empleando protocolos de ayuda mutua con un alto carácter de reciprocidad, el enjambre evolucione y se adapte corporativamente como una única entidad.

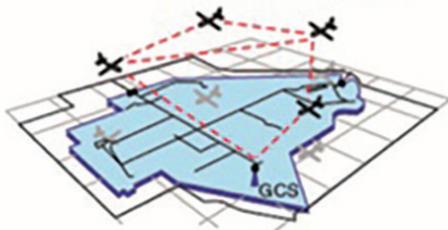
Para que una plataforma aérea autónoma en su vuelo se necesitan al menos tres elementos: un piloto automático avanzado, un controlador responsable de evitar colisiones, capacidad de seguimiento del terreno y vuelo en forma-



Programa Honeycomb.



Enlaces satelitales



Redes de mallas

ción, y por último un dispositivo de discriminación entre el piloto automático y el controlador.

Básicamente se barajan dos líneas diferentes para alcanzar un nivel de cooperación mínimo. Por un lado, RPAs, especializados de varios tipos que trabajan conjuntamente en la resolución de tareas complejas haciendo uso de sensores de altas prestaciones, o RPAs idénticos y baratos que serán menos versátiles y funcionales que los primeros.

Los modelos de comportamiento de enjambre se pueden clasificar en:

- Modelo maestro y subordinados.

- Modelo de trabajo en equipo.
- Modelo de variables de consenso.
- Modelo de agentes inteligentes.
- Modelo de campos computacionales (Co-fields).

El modelo maestro/subordinados consiste en un RPA master de mayor tamaño, controlado por una GCS, que a su vez está interconectado con un enjambre de pequeños RPAs dotados de cierta capacidad autónoma, y en comunicación con la GCS y el master. La pérdida de un RPA subordinado no es crítica asumiendo su rol cualquier otro, no así el vehículo maestro que permanece a salvo en zona segura.

Trabajo en equipo es un modelo tradicional que no presenta aún un comportamiento emergente como tal. Estos RPAs podrán ser iguales o diferentes, serán configurables cambiando la carga de pago, autónomos, se apoyan unos a otros colaborativamente, aunque de una forma muy preliminar, y la función de cada uno de ellos puede ser asumida por otro RPA.

En el modelo de variables de consenso, cada RPA posee internamente la información mínima para coordinarse con el resto del enjambre. Esta información, denominada variable de consenso, se actualiza por comparación con los valores que envían los otros RPAs, no siendo necesario conectarse en tiempos prefijados debido a la propia naturaleza de los algoritmos.

El modelo de agentes inteligentes se basa en que cada RPA está dotado de un cierto raciocinio y puede tomar decisiones autónomas. Admite aeronaves de distintos tipos en su composición.

Finalmente, el modelo más avanzado hasta la fecha es el de campos computacionales. Basado en el comportamiento de un enjambre de insectos, estos combinan sus capacidades en función del entorno mostrando la primera conducta realmente colectiva a partir de la combinación de las acciones de los individuos. No obstante, aún no existe un patrón completo, aunque se han desarrollado soluciones parciales, siendo la más relevante la de campos computacionales Co-fields, donde su nombre se debe a que el entorno se sintetiza mediante estos campos.

CONCLUSIONES

Actualmente ya existen análisis y experimentos que demuestran que, en misiones concretas, un enjambre de RPAs de bajo coste equipado con sensores no muy sofisticados obtiene mejores resultados que los alcanzados con un RPA de gran tamaño, coste y sensores de altas prestaciones. Así, aunque las aeronaves remotamente tripuladas suponen una importante ventaja al poder realizar misiones peligrosas sin riesgo para la tripulación, el valor económico de estos vehículos se ha ido incrementando paulatinamente acercándose al de las plataformas tripuladas, haciéndose necesario disponer de aparatos baratos para situaciones de alto nivel de amenaza. De esta forma, ambos tipos de RPAs deberán coexistir en el futuro escenario aéreo, reservando aquellas zonas de intensidad con alta probabilidad de derribo a los enjambres económicos.

Dentro de una perspectiva, parece claro que una visión de la futura estrategia aérea deberá integrar aviones tripulados remotos y no remotos operando conjuntamente en pos de un objetivo común; sin embargo, la inclusión de los enjambres en esta estrategia junto con los grandes RPAs solo podrá alcanzar todo su potencial cuando las capacidades autónomas y cooperativas alcancen su madurez.

Varias líneas de investigación deben aún abrirse y formalizarse en el laboratorio antes de pasar al plano operativo, estimándose que los enjambres no formaran parte de los arsenales de las Fuerzas Armadas antes del 2030. •



Modelo maestro y subordinados.