



ACADEMIA DE LAS CIENCIAS
Y LAS ARTES MILITARES

Comunicaciones académicas

Evolución tecnológica de los enjambres de drones en el ámbito de la Defensa

Gonzalo León Serrano

Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar
Academia de las Ciencias y las Artes Militares

26 de septiembre de 2024

Ámbito y relevancia de los sistemas no tripulados

El uso de «sistemas no tripulados», ya sean aéreos, marítimos o terrestres ha evolucionado muy rápidamente en la última década induciendo cambios disruptivos que aprovechan la incorporación de la inteligencia artificial para lograr un comportamiento autónomo muy superior al que tenían hace pocos años.

La «maduración de las tecnologías clave» integradas en su plataforma, el incremento de sus prestaciones, la variedad de cargas útiles disponibles, y la drástica reducción de costes ha permitido ampliar su uso en múltiples misiones y convertirles en un elemento clave tanto en mercados civiles como militares. Su potencial aplicación en misiones que tendrían un alto riesgo en el caso de utilizar pilotos humanos (p.ej. en zonas contaminadas o dañadas por desastres naturales, o en zonas de guerra) les ha convertido en sistema clave para la defensa, seguridad y protección civil.

Expresamente, su «uso en aplicaciones de defensa conlleva consecuencias geopolíticas crecientes dada la superioridad potencial» que puede lograrse con ellos, y ha forzado el posicionamiento de grandes potencias en su desarrollo y

adquisición. Empiezan a formar parte del arsenal habitual de los ejércitos de todos los países, y también del de actores armados no estatales.

Los drones, inicialmente surgidos en el dominio aéreo, se denominan como *Vehículo Aéreo no Tripulado* o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), *Aeronave tripulada por control remoto* o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). También se emplean vehículos no tripulados en el entorno marítimo (superficie y submarino) y en sistemas robotizados (vehículos terrestres no tripulados).

La presente Comunicación, a partir de la evolución tecnológica de drones individuales, se centra en la evolución tecnológica que permite a «varios drones aéreos cooperar de forma autónoma para el desarrollo de una misión actuando como un “*enjambre de drones*”» en aplicaciones de defensa, ya sea de forma aislada o junto a sistemas tripulados.



Enjambre de drones para un espectáculo de luces en Rusia. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:500_drones_launch_to_celebrate_the_60th_anniversary_of_the_1st_man%E2%80%99s_flight_to_space._The_Show_was_performed_by_Geoscan_Drone_Show.jpg

Evolución tecnológica de los drones aéreos

La creciente importancia de los drones está impulsada por dos grandes factores: 1) su creciente «uso en conflictos militares», transformando la relevancia de otros

sistemas de armas, y 2) la «integración de diversas tecnologías» en plataformas autónomas y en cargas útiles para alcanzar mayor inteligencia.

La evolución tecnológica de los drones ha aprovechado la miniaturización y reducción de costes derivada de la microelectrónica y sensores y, sobre todo, la incorporación de tecnologías de procesamiento de señal e inteligencia artificial. Su evolución se focaliza en cuatro áreas: 1) técnicas de navegación, 2) autonomía de vuelo, 3) diversificación de cargas útiles, y 4) inteligencia para la ejecución de la misión.

Los drones aéreos deben operar en un espacio tridimensional por lo que las «tecnologías de navegación» son fundamentales para que dron y el operador humano, en el caso de estar pilotado remotamente, conozcan su posición y establezcan la ruta a seguir para alcanzar su destino tomando las decisiones necesarias. Las tecnologías de navegación empleadas habitualmente están basadas en «sistemas de posicionamiento por satélite» utilizando la señal captada de diferentes constelaciones de satélites como el GPS de Estados Unidos, el Galileo de la UE, el GLONASS de Rusia o el BEIDOU de China.

En entornos militares se emplean otros enfoques menos inmunes a interferencias radioeléctricas que no dependan de las señales satelitales para determinar la ruta. Entre estos enfoques alternativos se encuentran los basados en la visión directa del entorno mediante la(s) cámara(s) del dron y su análisis en tiempo real comparando las imágenes con mapas cartográficos detallados precargados del terreno.

A la mejora de la navegación se suma la necesidad de incrementar la «autonomía operativa» (p.ej. en tiempo de vuelo, en distancia para la misión, en altitud, en velocidad), apoyada por la reducción del peso conseguida por mejoras en materiales, en la aerodinámica, en la propulsión, o en los sistemas de energía; todo ello junto al uso masivo de la microelectrónica.

Los drones incorporan múltiples tipos de «cargas útiles» en función del tipo de misión a realizar: sensores y actuadores físicos, sistemas de captura de imagen (p.ej. cámaras visibles o de infrarrojos), radares, etc., y, en el caso de drones militares para misiones de ataque, uno o varios sistemas de armas incluyendo como tal el empleo de la energía cinética en misiones suicidas contra un objetivo.

Pero, en mi opinión, el cambio disruptivo más relevante es el «uso creciente de la inteligencia artificial» para el análisis del entorno del dron y el procesamiento en tiempo real de datos recibidos desde múltiples sensores.

Un elemento clave aparejado con esta evolución tecnológica que explica su rápida difusión es la «reducción de costes». El precio de un dron fluctúa desde unos centenares de euros para un pequeño dron pilotado remotamente para una misión de observación a baja altura y corta distancia hasta las decenas de millones de euros de los grandes drones aéreos militares. Drones de solo unos centenares de euros ya se emplean en misiones de observación.

El interés en «disponer de drones militares» ha promovido que muchos países inicien desarrollos o aceleren su adquisición de sistemas de drones desde otros países; decisiones condicionadas por posicionamientos geopolíticos y, además, por las decisiones que adoptan los países con los que compiten.

A diferencia del desarrollo de aviones tripulados de quinta o sexta generación, no solo las grandes potencias sino también potencias medias como son Turquía e Irán se han convertido en proveedores destacados, y muchos otros países, en usuarios de estos sistemas. A esto se añade el liderazgo de China en drones civiles de bajo coste que han servido de base para su adaptación o rediseño como drones militares baratos por varios países como ocurre en Ucrania.

Ahora, el desarrollo tecnológico permite avanzar un paso más con la aparición de «sistemas de enjambres de drones» lo que, a su vez, plantea nuevos retos tecnológicos, tácticos y geopolíticos. A ello dedico el resto de la Comunicación.

Evolución de los enjambres de drones

Origen y tipos

La evolución tecnológica de los drones individuales junto con su drástico abaratamiento ha permitido crear configuraciones de múltiples drones (desde decenas a miles de drones) «dotados de un comportamiento cooperativo», denominadas habitualmente «enjambres de drones».

El término *enjambre* procede de la naturaleza en la que múltiples especies de insectos, aves, peces y otros animales actúan de forma coordinada para conseguir mejor sus objetivos. Un ejemplo común de enjambre es el comportamiento de bandadas de aves o bancos de peces. Un número elevado de «estorninos» (véase figura 1) siguen reglas simples para mantenerse en formación e incrementar su supervivencia colectiva frente a depredadores o facilitar las migraciones grupales.

La «inteligencia de un enjambre» se refiere a los comportamientos colectivos emergentes que surgen de la coordinación descentralizada entre organismos vivos. Cuando cada miembro del enjambre sigue individualmente un conjunto de reglas

locales, la acción combinada de estos miembros crea comportamientos grupales complejos e «inteligentes».

En el caso de drones artificiales el comportamiento de enjambre resulta del movimiento colectivo de un gran número de entidades autopropulsadas orientadas a conseguir un determinado fin. El término de «inteligencia de enjambre» (*swarm intelligence*) se refiere a la forma en la que coordinan sus acciones para la ejecución de aplicaciones multitarea. Para ello se emplean técnicas específicas de comunicación, coordinación y colaboración. El término de *enjambre* se emplea impropiamente en conflictos militares actuales como «ataques simultáneos sobre un objetivo con (muchos) drones individuales», pero no existe un «comportamiento de enjambre» si no cooperan entre ellos para coordinar sus acciones.



Figura 1. Bandada de estorninos. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bandada_de_estorninos_en_Burgos_2.JPG

Las «aplicaciones potenciales de los enjambres de drones» son muy numerosas. Se pueden citar en agricultura, vigilancia medioambiental, búsqueda y rescate, recreativos y defensa. En la figura de la imagen inicial se puede ver el caso de un enjambre de 500 drones en «espectáculos de luces» para celebrar el 60 aniversario del primer vuelo del hombre al espacio.

Dado que los drones pueden tener varios tamaños se habla de enjambres de mini, micro y nano drones con diferentes retos técnicos y operativos. Centenares de enjambres de drones de centímetros y de bajo coste mimetizando insectos pueden

capturar datos del entorno y videos para «inspeccionar entornos peligrosos», como zonas contaminadas, incendios forestales o rescates en entornos complejos.

Enjambres de drones militares se han empezado a emplear para reconocimiento, vigilancia y operaciones ofensivas. Su capacidad para trabajar cooperativamente proporciona una ventaja significativa al permitir una mejor identificación de objetivos y recopilación de datos. Como ejemplo, pequeños drones pueden volar dentro de edificios determinando su posición y evitando obstáculos de forma autónoma o guiados por un operador. Su uso en enjambres tiene el mismo efecto; el reto reside en el desarrollo de algoritmos que permitan la coordinación del enjambre con la información recibida de sensores.

Todas las grandes potencias están trabajando en el «desarrollo de enjambres de drones con fines militares» (figura 2). Sin embargo, su estado real de operatividad y prestaciones es difícil de determinar con fuentes abiertas.



Figura 2. Enjambre de drones. Fuente: Creative Commons: <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/3804141/manada-lobos-enjambres-drones-eeuu-busca-cambiar-guerra>

Evolución tecnológica de los enjambres de drones

Pueden establecerse dos enfoques básicos de coordinación de enjambres de menor a mayor complejidad:

- Centralizado. No existe comunicación entre los drones. Todas las interacciones se realizan con el operador que recibe información de los drones individuales, éste decide y envía órdenes a cada uno de ellos.
- Descentralizado. Una vez que los operadores humanos hayan proporcionado las órdenes al enjambre (o a unidades específicas del enjambre) y el software de control haya determinado cómo se distribuirán las órdenes entre los miembros, el enjambre tiene que coordinar su comportamiento y acción colectiva para ejecutar las tareas asignadas. Pueden diferenciarse dos tipos de enfoques descentralizados:
 - *Descentralizado semi autónomo*. El operador humano se comunica con un dron (*líder*) para la recepción y transmisión de datos y órdenes, y este dron se comunica con el resto de los miembros del enjambre (*seguidores*).
 - *Descentralizado totalmente autónomo*. Sin operador humano, cada dron intercambia información con todos o con algunos de los drones cercanos para decidir los siguientes movimientos y acciones. Sus algoritmos de IA siguen comportamientos para los que han sido previamente entrenados y de los que aprenden.

Un problema clave es la «prevención de colisiones». Si la distancia entre los drones de un enjambre es muy pequeña cualquier problema en un dron puede provocar la colisión con algunos cercanos. El «algoritmo de prevención de colisiones más empleado» se basa en el modelo *Líder-Seguidor*, en el que el dron *líder* determina la dirección y la velocidad del movimiento de todo el grupo, mientras que los *seguidores* ajustan su posición según las indicaciones del líder.

Varias áreas de actividad concentran el esfuerzo alrededor del desarrollo tecnológico de los sistemas de drones:

- 1) «Mejora de la inteligencia de enjambre», para incrementar la resiliencia de la misión frente a pérdidas de drones del enjambre mediante algoritmos de reasignación dinámica automática de tareas en los drones restantes.
- 2) «Escalado de los algoritmos de control» a sistemas de enjambres formados por centenares o miles de drones.
- 3) «Enjambres híbridos» en los que drones aéreos, marítimos y terrestres conformando enjambres interactúan junto a sistemas tripulados complementando sus capacidades.

- 4) «Desarrollo de sistemas antidrones de bajo coste adaptados a enjambres». Entre ellos las armas laser que permiten, en condiciones meteorológicas adecuadas, destruir o dejar inoperativos un número elevado de drones a bajo coste.

Relevancia de los enjambres de drones

Relevancia geopolítica

Con la madurez tecnológica alcanzada, suficiente para el desarrollo de enjambres de drones, inicialmente dotados de inteligencia de enjambre muy limitada como ocurre actualmente, nos encontramos en un punto de no retorno en el que no creo factible detener su desarrollo.

Actualmente, la mayor parte de los países están adquiriendo «sistemas de drones armados individuales», pero es solo cuestión de (poco) tiempo antes de que los ejércitos de varios países avanzados y quizás los de algunas otras potencias medias puedan desplegar enjambres de drones autónomos equipados con algoritmos que les permitan comunicarse y elegir conjuntamente maniobras de combate novedosas e impredecibles. Al menos once países han anunciado programas de desarrollo de enjambres de aviones no tripulados, e Israel los utiliza desde 2021.

España también dispondrá de enjambres de drones formados por un número pequeño de unidades. El Ministerio de Defensa español ha licitado la adquisición de un pequeño enjambre para 2025. El sistema de enjambre de drones adquirido está compuesto por 4 vehículos aéreos no tripulados, incluyendo tres plataformas «multicóptero» y una plataforma de ala fija con capacidad de despegue y aterrizaje vertical junto a una estación de control terrestre móvil. El enjambre adjudicado a la empresa española *Swarming Technology & Solutions* se integrará en el Cetedex (INTA).

Se ha señalado que la competencia existente para desplegar enjambres de drones militares autónomos podría «alimentar la carrera armamentista mundial entre grandes potencias». De hecho, Estados Unidos y China ya invierten intensamente en investigación y desarrollo de enjambres de drones militares, experimentando con ellos en los conflictos militares actuales.

Ucrania se ha convertido en un banco de pruebas para ataques con enjambres de drones en gran número y reducido tamaño porque dificultan su rastreo o destrucción por sistemas de defensa antiaérea pensados contra drones individuales. Tanto Rusia como Ucrania utilizan docenas de drones relativamente

pequeños que operan a la vez, probablemente pilotados remotamente, aunque con «escasa inteligencia de enjambre».

Podría pensarse que la profusión del uso de drones en el campo de batalla alterará drásticamente el carácter de la guerra. De hecho, en Ucrania ha generado un campo de batalla más «transparente» obligando a las tropas de ambos bandos a dispersarse y ocultarse, dificultado las maniobras y los ataques. Sin embargo, hasta ahora el impacto ha sido más evolutivo que revolucionario.

Un aspecto que transforma el campo de batalla es el uso de drones en «combinación con otros sistemas de armas conectados». La experiencia de Ucrania indica que la eficacia de los drones es mayor cuando operan junto a unidades de artillería que han convertido proyectiles comunes en armas de precisión aprovechando la información recibida de los drones.

En resumen, aunque los enjambres de drones apenas están hoy operativos y su tecnología es inmadura, la posibilidad de disponer a corto plazo de enjambres militares operativos es muy real. Como resultado, la comunidad internacional desea abordar la forma en la que deberían utilizarse de manera responsable, legal y segura en futuros conflictos.

Impacto ético y social

Más allá del ámbito militar, los drones forman parte del debate político y social. Para muchos ciudadanos los drones empleados en tareas de vigilancia en tiempos de paz (no armados) son vistos como «sistemas intrusivos», cuya misión y beneficios no están aceptados colectivamente; es una nueva versión del síndrome del «gran hermano», no muy distinto del que se genera viendo miles de cámaras instaladas en las calles.

Por el contrario, para las entidades públicas los drones son vistos como componentes tecnológicos aceptables para incrementar el nivel de seguridad colectiva. Es un ejemplo claro de la «necesidad de consenso y regulación» en el ámbito civil.

En despliegue masivo de drones armados en conflictos militares también tiene consecuencias relevantes entre los combatientes. Una de las estudiadas es el aumento de la «sensación de miedo», al no poder discernir si son sistemas propios o del enemigo ni de qué tipo. Suponer que tienen *inteligencia* aviva el «miedo de localización», que puede implicar un posterior ataque directo (dron armado) o indirecto (dron de vigilancia que «avisa» de la posición del objetivo identificado a un sistema convencional).

En el caso de enjambres de drones el problema del «miedo a la localización» se multiplica. Escondarse en un edificio ante centenares de drones entrando por puertas y ventanas no es sencillo y bastaría con que uno de ellos detectara al objetivo para que se produjera un ataque posterior. Igualmente, el ataque sobre trincheras con enjambres de drones pequeños y rápidos, algunos de ellos letales, actuando por indicación de otros de vigilancia del mismo enjambre alterará las técnicas de defensa y los sistemas contra enjambres de drones.

Desde el punto de vista ético, debe tenerse en cuenta que conocer si un enjambre de drones puede tomar «decisiones de forma autónoma sobre la vida o la muerte es inobservable», excepto para el operador del enjambre. Un dron tiene el mismo aspecto si se controla a distancia con un operador decidiendo el objetivo, o si es el dron quién tiene la capacidad de identificar objetivos de forma autónoma y atacarlos de forma independiente.

Debemos aceptar que el «uso militar de enjambres de drones armados será creciente». El paso hacia combates entre enjambres de drones autónomos está todavía en el ámbito de la ciencia-ficción, pero no sé por cuanto tiempo. ¿Dispondremos en el futuro de tecnologías que permitan que múltiples enjambres de drones autónomos aéreos, navales o terrestres, se coordinen y cooperen entre sí de forma inteligente para alcanzar su misión y combatir con otros enjambres enemigos?

Supondrá abordar nuevos riesgos tecnológicos, geopolíticos y éticos para todos los países que requeriría lograr urgentes consensos en el marco de «regulación internacional de las armas letales». No parece un camino sencillo. ■

Nota: Las ideas y opiniones contenidas en este documento son de responsabilidad del autor, sin que reflejen, necesariamente, el pensamiento de la Academia de las Ciencias y las Artes Militares.

© Academia de las Ciencias y las Artes Militares - 2024