



ACADEMIA DE LAS CIENCIAS
Y LAS ARTES MILITARES

Comunicaciones académicas

Drones comerciales y guerra electrónica

Un ámbito tecnológico de innovación permanente

Félix Pérez Martínez

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

26 de marzo de 2025

Aunque ya es habitual utilizar la denominación de dron para cualquier tipo de vehículos aéreos no tripulados (en adelante UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*), en este documento denominaremos drones a los UAV comerciales y de pequeño tamaño, disponibles a precios accesibles y susceptibles de ser modificados para usos militares o terroristas, como el transporte de explosivos. La accesibilidad y relativa facilidad de producción de estos dispositivos ha facilitado su rápida adopción tanto por ejércitos regulares como por grupos terroristas en una variedad de actividades y misiones.

Hasta el momento, los equipos de guerra electrónica basados en la interferencia de las señales de control y navegación de los drones han demostrado su utilidad cuando se despliegan con la suficiente capilaridad. Sin embargo, se prevé que la próxima generación de drones opere de forma autónoma, empleando navegadores inerciales, técnicas de visión artificial e inteligencia artificial para la organización y ejecución de ataques. En este contexto, las armas de energía dirigida, y en particular las armas de radiofrecuencia, son una posible solución para contrarrestar

esta amenaza pues pueden operar de forma directiva y cubrir un área extensa. Su desarrollo constituye un desafío tecnológico que están abordando ya varios países.

Los drones en el campo de batalla

El nuevo papel de los drones en el campo de batalla es un ejemplo más de la dualidad inherente a muchas tecnologías empleadas en aplicaciones militares. Los UAV se están desarrollando desde hace muchos años para su utilización en actividades de defensa y seguridad. Sin embargo, solo cuando las tecnologías implicadas maduraron lo suficiente para poder emplearlas en ámbitos civiles, se han abierto nuevos usos y mercados que han conseguido, además de incrementar sus prestaciones, un radical abaratamiento de los procesos de fabricación, especialmente, en los drones de pequeño tamaño. Es un fenómeno relativamente reciente pero que rápida expansión solo retardada por las exigentes reglamentaciones asociadas a la operación de estos dispositivos en aplicaciones civiles.

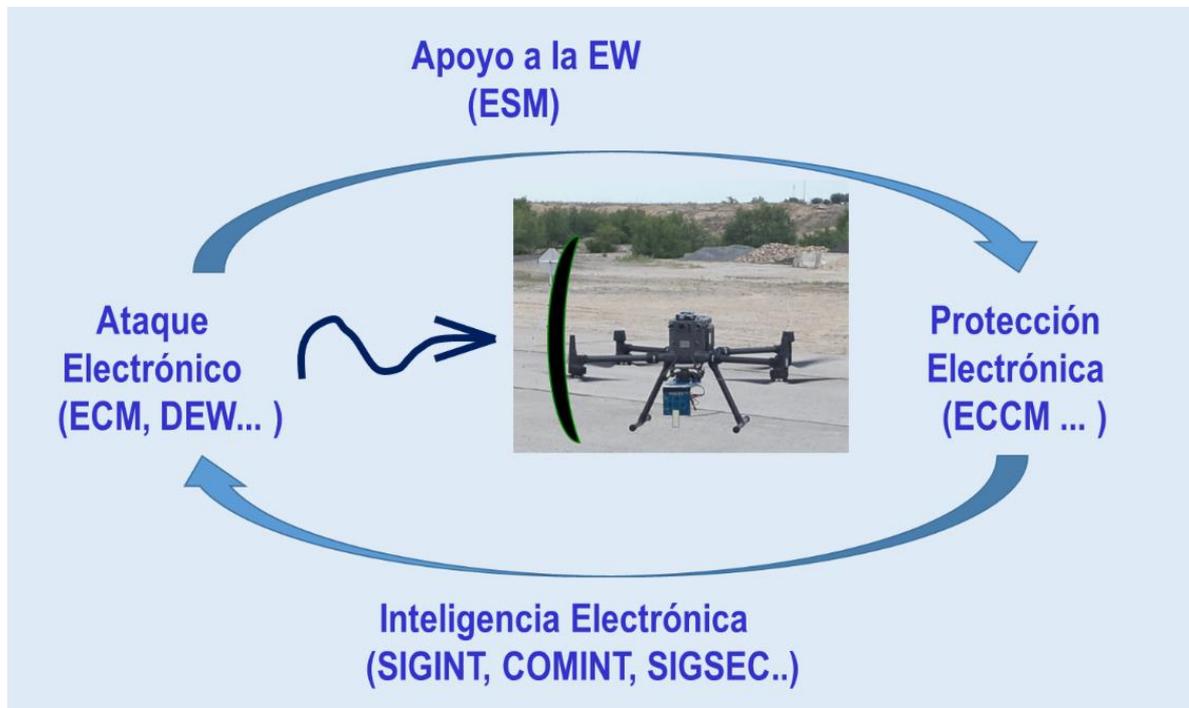
Obviamente estas restricciones no se tienen cuando se utilizan para realizar actos delictivos y atentados, ni existen en los campos de batalla, lo que explica que sea en los ámbitos de la seguridad y la defensa donde se están desarrollando las mayores innovaciones, en un momento en que la intensidad de los conflictos es tan elevada.

A medio y largo plazo, la amenaza será la presencia en el campo de batalla de enjambres de drones, volando autónomamente y coordinados entre sí, atacando a la vez posiciones y plataformas desde diferentes direcciones y con diversos artefactos explosivos. Se están diseñando y desarrollando sistemas antiaéreos para combatirlos, sistemas que requieren una extraordinaria precisión en la localización de los blancos y en el apuntamiento de las armas. Otra alternativa, en la que se tienen fundadas esperanzas, es neutralizarlos mediante acciones de guerra electrónica.

La guerra electrónica clásica y los drones

En la figura muestra las actividades implicadas en un combate electrónico sobre un dron: el ataque electrónico para neutralizarlo, la protección electrónica para defenderlo de los ataques y las actividades de obtención de datos para optimizar el ataque/protección, sean en un entorno táctico (medidas de apoyo electrónico) o en un entorno estratégico (inteligencia electrónica). Es una aproximación conceptual muy clásica pero que nos puede servir para analizar este enfrentamiento que, como se indica en la figura, se configura como un ciclo continuo: las innovaciones en el

ataque forzarán innovaciones en las técnicas de protección, éstas obligarán a nuevas innovaciones en el ataque y así sucesivamente. Unas innovaciones que en gran medida se basan en las tecnologías de la información y las comunicaciones (en adelante TIC), en rápida evolución en el ámbito civil.



Clasificación de las actividades de Guerra Electrónica

La primera pregunta es obvia: ¿qué elementos electrónicos incorpora un dron comercial que son susceptibles de ser atacado electrónicamente? Lo cierto es que muchos, entre otros los siguientes:

- **Enlaces de datos.** Con ellos se controla remotamente el dron, mediante el enlace ascendente, a partir de las lecturas de sus sensores de navegación transmitidas con el enlace descendente. Son los elementos más fáciles de interferir pues se pueden detectar las señales mediante receptores que barran el espectro electromagnético, localizarlas mediante radiogoniómetros, e interferirlas con antenas de alta ganancia.
- **Sistemas de comunicaciones.** Son empleados para transmitir las informaciones obtenidas por los sensores que incorpora su carga útil. En los drones comerciales típicamente es una cámara en el espectro visible. Se pueden interferir también con cierta facilidad y, aunque no se inutiliza al dron, si su operación cuando está siendo controlado con la información de la cámara.
- Los **controladores de vuelo, sensores y procesadores** con los que se configura el sistema de navegación, incluye componentes como un receptor GPS o radio-altímetros, susceptibles de interferidos y unidades inerciales y

microprocesadores susceptibles de ser afectados solo por señales de mucha energía.

- Otros componentes electrónicos incorporados en los drones son los **sistemas de alimentación eléctrica, los controladores de la velocidad de los motores y de los actuadores...**, su ataque electrónico también requiere señales de mucha energía.

La utilización de drones comerciales, modificados para darles más autonomía y dotarles de nuevas capacidades (como el transporte y disparo de munición), comenzó el primer día de la invasión rusa de Ucrania. De hecho, ya se habían utilizado en el conflicto previo del Dombás. Lo que sorprendió es la rapidez con que se desplegaron, el papel de los «nuevos soldados» (expertos en la construcción, modificación y manejo de drones), así como la eficacia de sus acciones. A partir de ese momento, ambos bandos están constantemente innovando y adaptando su tecnología y tácticas de drones. Solo en el mes de marzo de 2025, el jefe de las fuerzas armadas de Ucrania, Oleksandr Sirski, afirma haber atacado y destruido más de 77.000 objetivos rusos.

Por otro lado, los equipos de guerra electrónica rusos son muy sofisticados y seguro que tuvieron mucho que ver en la pérdida de más de 10.000 drones al mes durante el año 2023. Sus limitaciones iniciales estarían más en la falta de equipos para conseguir la capilaridad necesaria que en su eficacia frente a estos artefactos.

En efecto, parece ser que los equipos de guerra electrónica rusos consiguieron rápidamente interferir las señales de los sistemas de navegación por satélite (GPS, Galileo...) lo que impidió la navegación autónoma de los drones mediante trayectorias definidas. Como consecuencia, los drones deben de ser controlados remotamente mediante los enlaces de datos y, en su caso, disponer de un canal de video descendente para emplear la imagen de su cámara. Lo que les convierte en muy vulnerables a perturbaciones. Además, el operador puede ser localizado mediante radiogoniómetros.

Las bandas de trabajo de los drones comerciales, tanto integrados, como los que se pueden construir por piezas, son conocidas y por tanto fáciles de localizar y perturbar. Además, los drones de consumo, cuyo mercado se estima en unos 5200 millones de dólares, están programados para que bajen al suelo, cuando falla el enlace de control. Por eso nuestras fuerzas y cuerpos de seguridad del estado pueden utilizar sistemas muy simples y eficaces, en forma de rifle y manejado por una persona, para enfrentarse a los drones que por negligencia constituyen una amenaza para concentraciones de personas o infraestructuras críticas.

También los sistemas anti-dron basados en el uso de perturbadores, que se están desplegando en las diferentes fuerzas armadas, pueden ser muy eficaces ante amenazas intencionadas mucho más peligrosas pero que siguen empleando enlaces de radio para su operación. Obviamente, siempre que puedan ser detectados e identificados mediante radares y cámaras con suficiente antelación. Estos sistemas también incorporan receptores y radiogoniómetros como medidas de apoyo electrónico y, por supuesto, todos los datos que se conozcan del dron por inteligencia electrónica, permitirán optimizar la operación. En definitiva, acciones de guerra electrónica clásica.

El problema es que ahora reacciona la amenaza estableciendo nuevas medidas de protección electrónica. ¿Cuál es la más eficaz en el actual estado de cosas? No emitir ninguna onda electromagnética. Una reciente innovación, también sorprendente, consiste en controlar al dron exclusivamente con las imágenes de su cámara y llevar la señal al operador mediante una fibra óptica.

Se pueden cuestionar estas innovaciones, por ejemplo, por la pérdida de autonomía que significa el peso del carrete de la fibra óptica. En todo caso estamos ante una realidad. La siguiente generación de drones de uso civil y militar podrán no utilizar enlaces de radio y navegar autónomamente basándose en sistemas inerciales muy precisos, sistemas de visión artificial embarcados y algoritmos de inteligencia artificial. ¿Serán inmunes a las acciones de guerra electrónica?

La respuesta es no. El ataque electrónico se dirigirá contra el resto de componentes electrónicos que inevitablemente debe de llevar el dron, pero se requerirá mucha más energía proporcionada por lo que se conoce como armas de energía dirigida.

Armas de energía dirigida

Las Armas de Energía Dirigida (en adelante DEW, *Directed Energy Weapons*) permiten proyectar energía hacia un objetivo y dañarlo o destruirlo a distancia. Su ventaja frente a las armas convencionales ha sido reconocida desde hace tiempo, destacando por su capacidad de atacar a la velocidad de la luz, su alta precisión y la posibilidad de efectuar múltiples disparos casi instantáneos, sin necesidad de recarga entre ellos. Son de tres tipos:

- Microondas de Alta Potencia (en adelante HPM, *High Power Microwaves*). Si trabajan a una frecuencia inferior a 10 GHz no se ven afectadas por las condiciones atmosféricas, pero dada la longitud de onda utilizada es difícil concentrar la energía en un haz muy estrecho y se requieren grandes potencias y grandes antenas. Como contrapartida, pueden abatir varios blancos simultáneos si están dentro del haz. Actúan sobre los componentes electrónicos del objetivo sometiéndolos campos

electromagnéticos que superen los de ruptura de alguno de ellos para degradarlo o destruirlo.

- Láseres de Alta Potencia (en adelante HEL, *High Energy Laser*). Emplean fuentes coherentes en las bandas electroópticas, sus longitudes de onda de nanómetros permiten concentrar eficazmente la energía sobre el blanco. El haz es tan estrecho que requieren sistemas de apuntamiento muy precisos. Están muy afectados por las condiciones meteorológicas pues la atmosfera dispersa y absorbe parte de la energía y las turbulencias pueden desviar el haz. A diferencia de las HPM, actúan elevando la temperatura de los materiales y componentes electrónicos para degradarlos o destruirlos.

- Armas de haces de partículas (en adelante PBW, *Particle Beam Weapon*). emplean haces de partículas de alta energía, aceleradas mediante intensos campos electromagnéticos. Al impactar contra un objetivo, transfieren su energía cinética, alterando su estructura física. Poseen una notable capacidad de penetración, pudiendo atravesar materiales sólidos y blindajes, además de generar un calor intenso, ionizar átomos y romper enlaces químicos, lo que se traduce en daños extremadamente severos. No obstante, su eficacia se ve limitada por la dispersión del haz al interactuar con las moléculas del aire, lo que restringe su uso a condiciones meteorológicas óptimas. Además, requieren sistemas de puntería de altísima precisión.

Este tipo de armas se está desarrollando desde hace varias décadas, aunque lo cierto es que no se han desplegado en los campos de batalla, posiblemente su complejidad y coste las han hecho inviables. Lo que no significa que no se hayan y se estén haciendo esfuerzos para desarrollarlas. Por otro lado, siempre se pensaron para amenazas muy sofisticadas y para ser utilizadas con alcances de muchos kilómetros. Contexto muy diferente al actual donde las distancias de operación son mucho más cortas y se necesita desplegar muchos equipos para asegurar la capilaridad necesaria en una zona.

Los HEL y los PBW jugarán un papel esencial en el combate espacial, donde la falta de atmósfera elimina la principal de sus limitaciones. En mi opinión, y es discutible, su papel en el combate electrónico descrito en estos párrafos va a ser muy limitado, al menos a corto y medio plazo, tanto por sus problemas ante condiciones meteorológicas adversas, como por su complejidad y coste. Por el contrario, las HPM pueden jugar un importante papel en este contexto por operar con cortas distancia y por tanto con potencias más reducida. Además, presentan dos importantes ventajas: la facilidad de su apuntamiento, mucho más sencillo al ser el haz más ancho y, por la misma razón, su capacidad para combatir enjambres de drones.

Armas HPM

El desarrollo de dispositivos capaces de generar HPM para afectar a los sistemas electrónicos tiene casi 50 años. Fue en los años 60 del pasado siglo cuando se comprobaron los efectos sobre ellos del pulso electromagnético producido por una explosión nuclear atmosférica y se abrió la posibilidad de utilizar este tipo de señales para destruir los sistemas militares del enemigo. En los años noventa ya se habla abiertamente de la posibilidad de desarrollar bombas electromagnéticas, y armas HPM directivas, generalmente utilizando tubos electrónicos capaces de generar pulsos de gigawatios de potencia con ciclos de trabajo (porcentaje de duración de los pulsos respecto del periodo de repetición) muy pequeños.

En lo que va del siglo, la tecnología de microondas de alta potencia ha avanzado de forma notable. Se han mejorado tanto las fuentes que generan esta energía como los diseños de las antenas, con el propósito de hacer los sistemas más livianos, compactos y eficientes. Gracias a estos desarrollos, ahora es posible reducir considerablemente el tamaño de los equipos, lo que permite instalarlos en una mayor variedad de plataformas. Además, se ha logrado aumentar la potencia que pueden concentrar y ampliar el alcance de su acción. Otro avance importante es que estos sistemas pueden operar en distintas frecuencias, lo que les da la capacidad de actuar sobre una gama más amplia de objetivos.

Entre otros desarrollos cabe destacar, aunque no es adecuado para esta aplicación, el «Proyecto de Misil Contraelectrónico Avanzado de Microondas de Alta Potencia (CHAMP)», un misil de crucero lanzado desde el aire con capacidad de emitir pulsos de microondas de alta potencia que demostró su eficacia en octubre de 2012 al neutralizar con éxito un grupo de objetivos electrónicos durante una prueba.

Casi simultáneamente, se desarrollaron en otros países otros proyectos. Son conocidos los proyectos rusos NAGIRA (*Nanosecond Gigawatt Radar*), un radar utilizable como arma de energía dirigida desarrollado a lo largo de los años 90 capaz de generar pulso con potencias de pico de 500 MW utilizando un tubo electrónico BWO (*Backward Wave Oscillator*), y el RANET-E, diseñado para interferir y neutralizar equipos electrónicos enemigos, incluidos radares y misiles, trabajando en la banda X con pulsos de 500 MW y una duración de entre 10 y 20 nanosegundos, capaz de generar campos superiores a 1KV/m a decenas de kilómetros de distancia.

BAE Systems, en la primera década de este siglo y en colaboración con las fuerzas armadas suecas, desarrolló el sistema BOFORS HPM BLACKOUT, una DEW que opera en las bandas de frecuencia L y S y es capaz de generar pulsos del orden de los GW. Se monta sobre una plataforma móvil y utiliza un generador de Marx que alimenta a un oscilador de cátodo virtual (*Vircator*) para generar pulsos de

microondas que una vez radiados por una antena de bocina cónica pretenden atacar a los UAV.

Otros sistemas más recientes realizados por empresas americanas bajo contratos con el Departamento de Defensa de EE. UU. son los sistemas PHASER, y THOR (*Tactical High-Power Operational Responder*), ambos con el objetivo de combatir drones y enjambres de drones. Funcionan en banda S con alcances de algunos kilómetros.

En todos estos sistemas la fuente de energía se ha basado en el uso de haces electrónicos de muy alta potencia (tubos electrónicos muy sofisticados). Sin embargo, la tecnología de estado sólido ofrece mayor fiabilidad y eficiencia, además de ser más económica, compacta y consistente en su funcionamiento en comparación con los tubos electrónicos usados en los sistemas mencionados anteriormente. También simplifica el diseño de las fuentes de alimentación. No obstante, su uso requiere la integración de miles de dispositivos semiconductores para alcanzar la potencia necesaria, y hasta ahora, esta tecnología no había logrado niveles de potencia adecuados para su aplicación en la realización de HPM. Sin embargo, el combate electrónico contra drones comerciales supone una oportunidad para el empleo de semiconductores.

A diferencia de antes, en este enfrentamiento los alcances requeridos son mucho menores y, por, tanto, también son mucho más bajas las potencias requeridas. De hecho, ya hay un sistema comercial, fabricado por la empresa Epirus y denominado LEONIDAS. Un sistema montado en una plataforma móvil terrestre y diseñado para contrarrestar enjambres de drones. También existen versiones de pequeño tamaño para embarcar en UAV. En enero del 2023 el Ejército de EE. UU. concedió un contrato de 66,1 millones de dólares para la construcción de cuatro sistemas terrestres que se entregaron en mayo del 2024 para su evaluación.

LEONIDAS utiliza amplificadores de estado sólido basados en nitruro de galio (GaN), lo que le permite contar con un diseño compacto y una alta tasa de repetición de pulsos. Aunque sus especificaciones técnicas y operativas no han sido divulgadas oficialmente, el fabricante asegura:

[...] el sistema cuenta con agilidad de frecuencia y dispara rápidamente una ráfaga de formas de onda únicas para explotar las frecuencias específicas a las que los objetivos UAS son más vulnerables. Esto permite alcanzar distancias tácticamente relevantes para neutralizar enjambres, más allá del alcance de las armas ligeras [...].

Afirmación que permite estimar alcances de unos centenares de metros.

A modo de conclusión

Los drones comerciales de pequeño tamaño se han convertido en una de las amenazas más peligrosas en los actuales y futuros campos de batalla. Su limitado precio y fácil fabricación hace que, cuando van armados, dejen de ser plataformas para convertirse en una munición más. La necesidad de proteger las fuerzas, plataformas e infraestructuras de esta amenaza determinará el desarrollo de un nuevo tipo de guerra electrónica, a más corta distancia, donde las armas basadas en el empleo de haces electromagnéticos de alta intensidad pueden jugar un papel importante.

Los retos a superar son muchos, entre otros se requiere abaratar los costes para poder desplegarlos con suficiente capilaridad y superar la reacción de los propios drones que se construirán con nuevas protecciones... Quizá en pocos años veamos algo que hasta ahora estaba reservado a la ciencia ficción: armas electromagnéticas destruyendo artefactos. ■

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 - 2025