



Sistemas aéreos remotamente tripulados en aplicaciones militares. Una revisión

| Fecha de recibido: 18 de julio 2022 | Fecha de aprobado: 26 de septiembre 2022 |

| Reception date: July 18, 2022 | Approval date: September 26, 2022 |

| Data de recebimento: 18 de julho de 2022 | Data de aprovação: 26 de setembro de 2022 |

Richard Humberto Cáceres León

<https://orcid.org/0000-0002-0244-1980>

richard.caceres@fac.mil.co

Doctorado en Física

Docente e investigador – Fuerza Aérea Colombiana, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación en Electrónica y Tecnologías para la Defensa

PhD in Physics

Teacher and researcher – Colombian Air Force, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

Electronics and Defense Technologies Research Group

Doutorado em Física

Professor e pesquisador – Força Aérea Colombiana, Colômbia

Função do pesquisador: teórica e escrita

Grupo de Pesquisa em Eletrônica e Tecnologias de Defesa

Ignacio Alfonso Alvarado Ortega

<https://orcid.org/0000-0001-9076-6648>

ignacio.alvarado@fac.mil.co

Químico

Docente e investigador – Fuerza Aérea Colombiana, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación en Electrónica y Tecnologías para la Defensa

Chemist

Teacher and researcher – Colombian Air Force, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

Electronics and Defense Technologies Research Group

Químico

Professor e pesquisador – Força Aérea Colombiana, Colômbia

Função do pesquisador: teórica e escrita

Grupo de Pesquisa em Eletrônica e Tecnologias de Defesa

Cómo citar este artículo: Cáceres León, R. H. y Alvarado Ortega, I. A. (2023). Sistemas aéreos remotamente tripulados en aplicaciones militares. Una revisión. *Ciencia y Poder Aéreo*, 18(2), 75-93. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.792>



Sistemas aéreos remotamente tripulados en aplicaciones militares. Una revisión*

Resumen: Los sistemas de aeronaves remotamente tripulados de ala rotatoria en el ámbito militar se han convertido en aeronaves con aplicación táctica en el reconocimiento y la vigilancia de gran utilidad, factor que ha promovido incrementos en la investigación y el desarrollo de estos sistemas desde 2012 hasta la actualidad. Una búsqueda bibliográfica en Scopus permitió identificar 1166 documentos, que fueron tratados mediante el *software* vosViewer, organizando la información en conceptos básicos y clasificación, sistemas de los RPAS y sus aplicaciones militares. El estudio permitió evidenciar que Estados Unidos ha liderado la investigación en el área, que podría estar relacionada con las implicaciones de la tecnología en el desarrollo de múltiples conflictos armados, y que las Fuerzas Aéreas en cada país han sido los principales patrocinadores o investigadores en el desarrollo de esta tecnología.

Palabras clave: ala rotatoria; componentes RPAS; fuerza aérea; operaciones militares; RPAS.

Remotely manned aerial systems in military applications. A review**

Abstract: The rotary wing remotely piloted aircraft systems in the military field have become aircraft with tactical application in reconnaissance and surveillance of great utility, a factor that has promoted increases in research and development of these systems from 2012 to the present. A bibliographic search in Scopus allowed identifying 1166 documents, which were treated using vosViewer software, organizing the information in basic concepts and classification, RPAS systems and their military applications. The study showed that the United States has led research in the area, which could be related to the implications of the technology in the development of multiple armed conflicts, and that the Air Forces in each country have been the main sponsors or researchers in the development of this technology.

Keywords: Rotary wing; RPAS components; air force; military operations; RPAS.

Sistemas aéreos remotamente tripulados em aplicações militares. Uma análise***

Resumo: Os sistemas de aeronaves remotamente pilotadas de asa rotativa no campo militar tornaram-se aeronaves com aplicação táctica em reconhecimento e vigilância de grande utilidade, fator que promoveu o aumento da pesquisa e do desenvolvimento desses sistemas de 2012 até o presente. Uma pesquisa bibliográfica no Scopus identificou 1166 documentos, que foram processados com o *software* vosViewer, organizando as informações em conceitos básicos e classificação, sistemas RPAS e suas aplicações militares. O estudo mostrou que os Estados Unidos lideraram as pesquisas na área, o que pode estar relacionado às implicações da tecnologia no desenvolvimento de múltiplos conflitos armados, e que as Forças Aéreas de cada país foram as principais patrocinadoras ou pesquisadoras no desenvolvimento dessa tecnologia.

Palavras-chave: asa rotativa; componentes de RPAS; força aérea; operações militares; RPAS.

* Artículo de revisión, elaborado en el marco del proyecto de investigación “Mejora de las capacidades operacionales de sistemas aéreos no tripulados tipo cuadricóptero para la Fuerza Aérea Colombiana”, vinculado al grupo de investigación en Electrónica y Tecnologías para la Defensa, adscrito al Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica de la Fuerza Aérea Colombiana

** Review article, prepared within the framework of the research project “Improvement of the operational capabilities of quadcopter-type unmanned aerial systems for the Colombian Air Force”, linked to the Electronics and Technologies for Defense research group, attached to the Aeronautical Innovation Technological Center of the Colombian Air Force.

*** Artigo de revisão, elaborado no âmbito do projeto de pesquisa “Improving the operational capabilities of quadcopter-type unmanned aerial systems for the Colombian Air Force”, vinculado ao grupo de pesquisa Electronics and Defence Technologies, ligado ao Centro de Tecnologia de Inovação Aero-náutica da Força Aérea Colombiana.

Introducción

Los nuevos desarrollos tecnológicos adelantados en la industria militar están enfocados hacia la creciente necesidad de optimizar tiempo, recursos, personal y, especialmente, salvaguardar vidas en el teatro de operaciones mediante la implementación de ventajas tecnológicas que se transforman en oportunidades operacionales significativas y facilitan el cumplimiento de la misión de las Fuerzas Militares a escala global (Altice et al., 2022; Collins, 2018; Galloy, 2022).

Una tecnología relativamente reciente y cuyas aplicaciones se han ampliado en las actividades militares son los Sistemas de Aeronaves Remotamente Tripuladas (RPAS, Remotely Piloted Aircraft Systems). Estos han venido transformando la planeación y ejecución de las operaciones militares de seguridad, vigilancia o reconocimiento no solo por el hecho de contar con una aeronave controlada desde tierra por tripulaciones que pueden ser fácilmente reemplazadas, sino también por la actualización de armamento, estrategias, tecnología, formas de defender la integridad territorial y brindar seguridad a la población civil (Hernández, 2009), aunado al interés en la seguridad de las operaciones, un factor crucial que permite mitigar la pérdida de recursos y aumentar la eficiencia operacional (Almeida, 2006; Sizza, 2014).

Una consulta bibliográfica a través de Scopus permite observar que las investigaciones en RPAS se han pronunciado desde 2012 hasta la actualidad, con un especial y creciente interés por las aplicaciones militares. A su vez, han sido financiadas principalmente por entidades de carácter militar, como la Fuerza Aérea de cada país e incluso en el marco de los programas de apoyo a la investigación de la Comisión Europea, cuyo propósito es proveer los medios que permitan la deshumanización y reducción de los efectos de la guerra en la población civil y militar (Moreno-Licona, 2012).

Por su parte, los RPAS pueden ser clasificados en sistemas de ala fija, de ala rotatoria y de conformación mixta, aunque sus características permiten una diversidad de aplicaciones en cuanto a vigilancia aérea e incluso entrega de armamento (Caño, 30 de septiembre de 2011). En el caso de los RPAS de ala rotatoria, su

reciente inmersión en las operaciones militares aéreas ha favorecido sustancialmente el desarrollo, la actividad y la planeación militar, así como la sofisticación y deshumanización del teatro de operaciones (Moreno-Licona, 2012). Esto último es debido a su autonomía en vuelo, ergonomía y reducido tamaño, que permite su inmersión desapercibida en espacios hostiles, así como un reconocimiento detallado y de alta precisión de objetivos militares específicos (Farrow, 2016).

El presente artículo de revisión busca esbozar una concepción fundamental de los RPAS en el ámbito militar, haciendo especial énfasis en los RPAS de ala rotatoria que, gracias a sus características, se han convertido en aeronaves con aplicación táctica en el reconocimiento y la vigilancia, así como en la recolección de información de alto valor en tiempos de operación reducidos. Los documentos encontrados en el área de RPAS fueron tratados mediante el *software* vosviewer y clasificados en tres temas de interés, que son abordados en esta revisión.

En primer lugar, se trata de algunos conceptos básicos referentes a la reglamentación y clasificación de los RPAS, aunque en cada caso y de manera general se hacen algunas acotaciones de las actividades o aeronaves que han sido adquiridas por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), en busca de contrastar el estado de la tecnología a nivel nacional en cuanto a los desarrollos y las aplicaciones a escala mundial. En segundo lugar, se describen los sistemas que son requeridos para conformar un RPAS de ala rotatoria, así como algunos trabajos referentes al diseño de: 1) sistema estructural, 2) sistema electromecánico y 3) sistema de control, que han sido los principales puntos de investigación y desarrollo reportados. Por último, se describen algunas aplicaciones recientes de los RPAS en conflictos armados y la incidencia que han tenido en el desarrollo y la planeación de las operaciones militares.

Método

Para la elaboración del presente artículo de revisión, se realizó una búsqueda detallada a través de

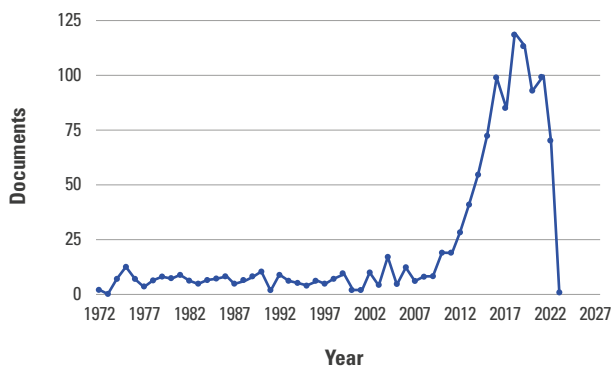


Figura 3. Relación entre la cantidad de artículos científicos publicados y el año

Fuente: tomado de Scopus.

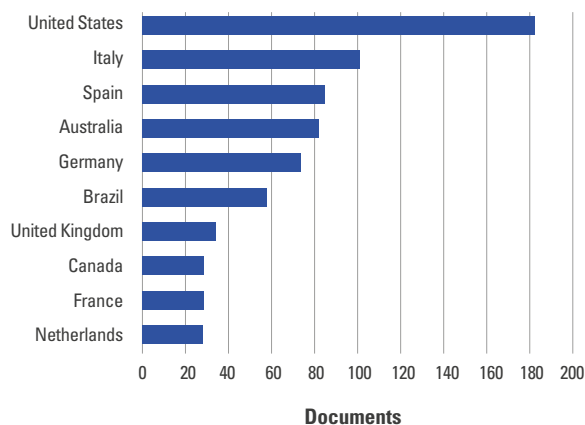


Figura 4. Relación de artículos publicados en el área de RPAS con el país de origen

Fuente: tomado de Scopus.

La amplia variedad de investigaciones sobre RPAS ha permitido que las aplicaciones de estas aeronaves sean múltiples y de amplia versatilidad; además, dependen de su clasificación, y en especial, de la reglamentación establecida que permite su funcionamiento controlado. Así pues, desde las primeras aplicaciones militares de los sistemas aéreos no tripulados en la entrega de explosivos por parte de los austriacos en 1849, entendido como el uso de un prototipo que resultó más ligero que el aire, hasta el papel crucial y estratégico que han desempeñado los RPAS en conflictos bélicos actuales (Angevine *et al.*, 2019), se ha permitido el desarrollo tecnológico de estos dispositivos favoreciendo su aplicación en áreas como: recolección de

información, reconocimiento de territorio, topografía, búsqueda y rescate, video aéreo, seguridad, vigilancia y aplicaciones agrícolas. Además, posee capacidad de manipulación remota, fácil despliegue, y costos y tiempos de operación reducidos, factores que permiten mantener la integridad del operador y aumentan la eficiencia de las actividades (Addati y Pérez, 2014; Stehr, 2015; Zhu *et al.*, 2018).

Partiendo de las amplias aplicaciones de los RPAS en diferentes áreas, la Organización de Aviación Civil Internacional (Oaci) reglamentó este tipo de aeronaves a través de la Circular 328 de 2015; y con base en esta normativa, la Aerocivil, mediante el apéndice 13 del Reglamento Aeronáutico de Colombia n.º 91 (RAC 91), estableció los lineamientos, los límites y la clasificación para este tipo de aeronaves (Ávila-Herrera, 2017; Hernández-Narváez, 2022). En la tabla 1, se relacionan el peso máximo al despegue (MTOW-Maximum Takeoff Weight) y el tipo de regulación para cada clase de aeronave, así:

Tabla 1. Clasificación RPAS según el RAC 91

Clase	MTOW	Regulación
Clase A	250 g -25 Kg	Abierta
Clase B	25 -150 Kg	Regulada
Clase C	>150 kg	Certificado

Fuente: elaboración propia.

En este caso, además del peso y la clasificación de las aeronaves, la normativa indica las limitaciones a tener en cuenta para cada clase de aeronave. En general, las operaciones no pueden efectuarse sobre el público o en reuniones de personas, solo se pueden realizar en horario diurno, no se debe operar en un radio inferior a 9 km de un aeródromo y no se puede transportar ningún elemento empleando estas aeronaves. Sin embargo, dichas regulaciones no aplican en su totalidad para las actividades y aplicaciones militares.

De tal manera, la FAC, a través de la Autoridad Aeronáutica de Aviación de Estado (AAAE), en la Circular 003 de 2021, estableció una clasificación y unos límites para los RPA, como se presenta en la tabla 2.

Tabla 2.
Clasificación AAAE-FAC

Clase AAAE	MTOW	Radio misión (km)	Velocidad máx. (kt)
Clase I-A	200 g - 7 kg	15	40
Clase I-B	7 kg - 15 kg	25	50

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2, es posible evidenciar que la clasificación se realiza en torno al MTOW y a las capacidades particulares de los RPAS. Así mismo, la normativa específica que los RPAS deben poseer registro, matrícula y póliza para poder realizar operaciones. Además, establece los requisitos mínimos para la selección, la instrucción y el entrenamiento de operadores y pilotos de RPAS. Esta reglamentación ha favorecido enormemente el control y la aeronavegabilidad de los RPAS en ámbitos civiles y militares, reduciendo los riesgos operacionales con aeronaves tripuladas, así como la seguridad en el interior de las bases o unidades militares.

1.2. Clasificación de los sistemas aéreos no tripulados

Los RPAS pueden ser clasificados de acuerdo con su peso, aplicación y estructura. Para el caso de la estructura, es posible clasificarlos en: ala fija, ala rotatoria y conformación mixta.

1.2.1. Sistemas de aeronaves remotamente tripuladas de ala fija

Un RPAS de ala fija es una aeronave cuya principal fuente de sustentación son sus superficies alares y posee un sistema de propulsión o despegue que le ofrece la potencia para navegar en la atmósfera (Isorna *et al.*, 2020). Estos RPAS son construidos por lo general en materiales poliméricos o espumas y la mayoría tienen una cámara en posición fija de forma horizontal, que favorece su aplicación en cartografía y toma de imágenes en amplias extensiones de territorio (Fernández y Gutiérrez, 2016).

A escala global y en el marco de conflictos armados, los RPAS más empleados han sido aeronaves como

el Raven, cuyo reducido tamaño (envergadura de 90 cm) y su versatilidad permiten su operación para el reconocimiento de zonas de geografía montañosa; y su capacidad para aterrizar en espacios reducidos lo convierte en una herramienta de mucha utilidad en el teatro de operaciones. Una segunda aeronave es el Global Hawk, que posee una envergadura de 40 m, autonomía aproximada de 22 000 km y una velocidad de más de 500 km/h, empleado especialmente para actividades de vigilancia y reconocimiento (Fulghum, 2002; Caño, 30 de septiembre de 2011).

Una tercera aeronave es el MQ 1 Predator, la cual se empleó por primera vez para realizar actividades de inteligencia y entrega de armamento en los conflictos del Medio Oriente en febrero de 2002. Posee una capacidad de 300 kg de carga útil de combustible y armamento, alcanzando velocidades de 400 km/h y autonomías de hasta veinticuatro horas de vuelo (Acosta *et al.*, 2020). Junto con el MQ 9 Reaper, una aeronave de 20 m de envergadura, velocidad de 370 km/h y una autonomía de casi 2000 km, se convirtieron rápidamente en aeronaves empleadas para ejecutar ataques a objetivos identificados, con reducidos efectos colaterales gracias a su equipamiento con sensores infrarrojo y láser (Calderón, 4 de enero de 2020).

Por su parte, la FAC opera RPAS de ala fija como Scan Eagle (Páez, 2020), Hermes 450, Hermes 900 (Cadauid, 2018); y más recientemente, el FVR-90 Airframe. Los RPAS ScanEagle llegaron a Colombia en 2006 mediante una donación de Estados Unidos; y su primer logro importante se realizó en julio de 2007, dado que gracias a la información recolectada por esta aeronave se ejecutó una operación militar de bombardeo en la zona de Aguablanca, Caquetá (García, 23 de diciembre de 2011); fue la primera operación conjunta realizada mediante la coordinación de aeronaves tripuladas y no tripuladas en Colombia. Esta aeronave tiene una envergadura de 3,1 m, un alcance de 100 km, autonomía de más de veinte horas de vuelo y puede alcanzar velocidades cercanas a los 140 km/h; además, está equipada con cámaras de alta potencia y sensibilidad que permite obtener información detallada de un objetivo desde distintas perspectivas (Goyné, 2019; Reineman *et al.*, 2016).

La FAC adquirió los RPAS de tipo Hermes en 2013 y fueron asignados al Comando Aéreo de Combate N.º 2, con lo que se convirtieron en un referente regional del uso de RPAS en el desarrollo del conflicto, que contrarresta la influencia de la actividad de los grupos ilícitos en la Orinoquia colombiana (Jaimes y Cárdenas, 2019). El Hermes 450 es una aeronave con una envergadura de 10,5 m, capacidad de carga útil de máximo 150 kg, alcanza velocidades de hasta 150 km/h y una autonomía cercana a las veinte horas (Ortega, 2015); y el Hermes 900 es una aeronave que puede alcanzar velocidades de hasta 220 km/h, posee una envergadura 15 m y una capacidad de carga útil de hasta 300 kg. Ambas aeronaves le han otorgado una capacidad distintiva a la FAC para la ejecución de actividades y operaciones de reconocimiento e inteligencia aérea (Cadavid, 2018).

Aunque los RPAS de ala fija ofrecen una capacidad operacional para el desarrollo de las operaciones militares, estas aeronaves poseen elevados tiempos de alistamiento, en conjunto con los costos atribuidos a la adquisición y el mantenimiento. Un caso específico es el de los sistemas Hermes 450 y 900 asignados al Comando Aéreo de Combate N.º 2, en los que se han evidenciado inconvenientes respecto a la transferencia tecnológica por parte de la casa fabricante para la instrucción y el entrenamiento de nuevos pilotos, factores que afectan la logística y operatividad de esta aeronave en la Orinoquia colombiana (Jaimes y Cárdenas, 2019).

1.2.2. *Sistemas de aeronaves remotamente tripuladas de ala rotatoria*

Los RPAS de ala rotatoria son aeronaves cuya principal fuente de sustentación está dada por la acción de hélices o propelas, que a su vez, y acorde a la capacidad de los motores, ofrecen el empuje necesario para navegar por la atmósfera, así como la velocidad en el desplazamiento o la capacidad de carga útil (Kardasz *et al.*, 2016; Serrano *et al.*, 2022). Estas aeronaves son clasificadas de acuerdo con el número y la disposición de las propelas, que van desde helicópteros con una propela y un rotor de cola, hasta modelos más complejos tipo cuadricóptero, hexacóptero y octacóptero con cuatro,

seis y ocho rotores, respectivamente. La cantidad de motores depende de las aplicaciones que se pretendan para la aeronave, y a mayor cantidad de motores, el control del vehículo es más complejo, pero aumenta su estabilidad y resistencia a fallas. Aunque la forma más común de los RPAS multirrotor son los cuadricópteros (cuatro hélices), debido a la compensación de fuerzas dada por acción de los cuatro motores (Calabrini *et al.*, 2015).

Los primeros prototipos de estas aeronaves aparecieron en 1907, cuando los hermanos Breguet lograron el primer vuelo vertical a motor en un cuadricóptero, conformado por cuatro tubos de acero, cada uno acoplado a un rotor de cuatro palas de estilo biplano, de modo que cada rotor tenía ocho superficies de elevación (Leishman, 2006). Este primer prototipo necesitaba un piloto y cuatro personas que se ubicaban en cada brazo del cuadricóptero para equilibrar la máquina (Nicol, 2008). En 1920, el ingeniero francés Étienne Oehmichen construyó un sistema aéreo multirrotor, que constaba de cuatro rotores de dos palas y ocho pequeñas propelas, empleadas para la estabilidad lateral de la aeronave y para dar empuje y direccionalidad (Leishman, 2006). En 1956, Convertawings creó el Modelo A Quadrotor, el primer diseño de un cuadricóptero con la capacidad de mantener el vuelo estacionario y lateral, empleando únicamente cuatro rotores. Desde entonces, con base en este diseño, se han dado múltiples avances en cuanto a su estructura, tamaño y fabricación (Nicol, 2008).

Estas aeronaves ofrecen una ventaja para las aplicaciones militares, puesto que tienen autonomías de vuelo aproximadas a los 30 min acorde con la eficiencia y densidad energética de la fuente de poder; además, pueden girar sobre su propio eje en distancias relativamente cortas, lo cual permite su aplicación en actividades de reconocimiento, inteligencia aérea o infiltración en zonas de difícil acceso (Zhu *et al.*, 2018). La FAC ha adquirido estas aeronaves de la casa fabricante DJI, que tienen elevadas prestaciones en relación con el costo-beneficio y que han sido asignadas a los diferentes grupos de seguridad de las unidades militares aéreas con el propósito de hacer, principalmente, vigilancia y reconocimiento aéreo.

En el marco de estas aplicaciones, la investigación y el desarrollo de los RPAS de ala rotatoria está en auge a escala global, por lo que la FAC, dentro de su sistema de ciencia, tecnología e innovación, ha adjudicado importantes recursos al Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica (Cetia). Este es un espacio orientado al apoyo en infraestructura, equipos e insumos para el desarrollo de los proyectos de investigación adscritos al grupo de investigación en Electrónica y Tecnologías para la Defensa (TESDA), que ha encaminado sus actividades de investigación en torno al diseño y la fabricación de sistemas aéreos remotamente tripulados de ala rotatoria con capacidades misionales autónomas, que permitan en un futuro ofrecer una capacidad distintiva en la ejecución de las operaciones militares aéreas. Además, la FAC cuenta con la Escuela Básica de Aeronaves Remotamente Tripuladas (EBART) del Comando Aéreo de Combate N.º 3, que han sido pioneros en la capacitación y formación de personal en actividades de pilotaje de RPAS de ala rotatoria con aplicaciones militares.

2. Sistemas RPAS

El desarrollo de sistemas de aeronaves remotamente tripuladas ha estado orientado a tres sistemas, así: 1) sistema estructural, 2) sistema electromecánico y 3) sistema de control, que son descritos en detalle a continuación.

2.1. Sistema estructural

Este sistema se apoya en el diseño asistido por computadora y hace referencia a las hélices y a la conformación del fuselaje del RPA, que es el encargado de dar soporte y estabilidad a la aeronave; además, dependiendo del material de elaboración puede tener aplicaciones diversas según su peso (Addati y Pérez, 2014). Las hélices están compuestas por un cubo al que van acopladas las palas, que al ser sometidas a un sistema en rotación, tras interactuar con un medio fluido, generan una fuerza de sustentación y una trayectoria helicoidal, esto es, la combinación de un movimiento de rotación en torno a un eje dado con un movimiento de

traslación sobre el mismo eje (movimiento rototraslatorio), que lleva al desplazamiento de la aeronave. De esta manera, al espacio recorrido en una revolución o giro completo de la hélice se le denomina paso efectivo (López, 2012; García y Tarazona, 2006).

Las hélices también se someten a una fuerza de arrastre o resistencia que se opone al movimiento y reduce la velocidad, así cada pala contribuye a la potencia y a la fuerza ejercida por el motor para la rotación de la hélice (torque). Se pueden emplear hélices de dos y tres palas, según las necesidades del RPA; las hélices de dos palas ofrecen fuerza, mientras que las hélices de tres palas ofrecen velocidad y maniobrabilidad a la aeronave (Kabierschke, 2004).

Los RPAS de ala rotatoria multirrotores, acorde a la disposición y relación de las hélices, pueden dar lugar a diferentes diseños para la estructura o *frame*, como se presenta en la figura 5. Para los cuadricópteros, dos de las propelas deben girar en sentido horario y dos en sentido antihorario, acción que genera una fuerza de empuje que provee sustentación y contrarresta el torque, impidiendo que la aeronave se mueva en círculos (Addati y Pérez, 2014).

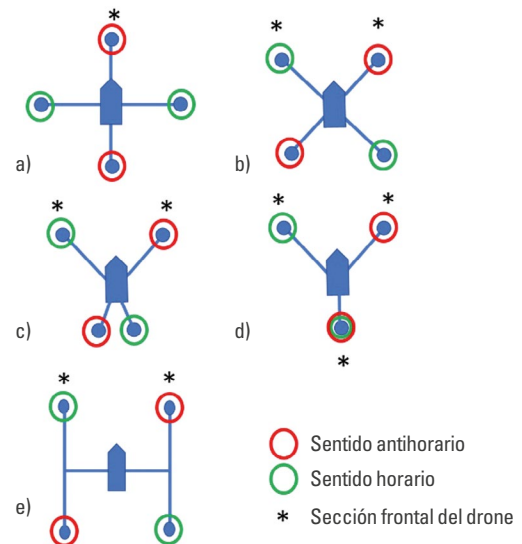


Figura 5. Conformación del *frame*, el cual puede ser de tipo a) +; b) X; c) V; d) Y; e) H

Fuente: adaptado de Kardasz *et al.* (2016).

En este caso, las hélices que ejercen el control de la aeronave son señalizadas con un asterisco (*). Para la figura 5d) conformación en Y, el eje puede ser conducido por los dos ejes principales, como el caso de las conformaciones en X, o puede ser controlado por un único eje, como el caso de la figura 5a). Adicionalmente, la figura 5 presenta los ejes de rotación para cada uno de los ejes de movimiento en las diferentes conformaciones, en los que es posible evidenciar el giro en sentido horario y antihorario de los rotores.

Alrededor del sistema estructural se han desarrollado múltiples investigaciones que buscan determinar métodos eficientes y económicos para el diseño y la fabricación del fuselaje de los RPAS. Bright *et al.* (2021) reportaron el diseño y la fabricación del *frame* para un RPA y un estudio comparativo con aeronaves comerciales; esta investigación enfatiza la exploración del diseño del marco del dron utilizando la herramienta Generative Design en Autodesk. Los resultados de la simulación, como la tensión-deformación estática, la frecuencia modal y el desplazamiento del cuadricóptero fabricado se compararon con el marco de un dron DJI Flame Wheel F450. Se encontró que la técnica de Generative Design permite la obtención de estructuras con mejores características, como resistencia a la fractura, y con desplazamiento mínimo en comparación con el marco del dron F450 de DJI de diseño tradicional (Bright *et al.*, 2021).

Así mismo, Nvss *et al.* (2022) presentaron una investigación sobre la reducción del peso del marco mientras se cumple con los requisitos de integridad estructural, a través de la optimización de la topología, la consolidación de piezas y el diseño para la fabricación aditiva (DFAM), con el fin de obtener un marco como una estructura de monocasco. Para su fabricación, se emplearon filamentos fusionados (FFF) y se evaluaron las características estructurales, vibratorias y de fatiga. En este trabajo, se encontró un desempeño superior en operatividad y resistencia frente a los diseños comerciales, siendo una excelente herramienta para el diseño preciso, aerodinámico y eficiente (Nvss *et al.*, 2022).

Por su parte, el Cetia plantea una metodología para el diseño y la fabricación de los fuselajes para

RPAS, con base en tres herramientas: 1) diseño 3D, 2) manufactura aditiva y 3) ingeniería inversa. Para el desarrollo de esta metodología, el Cetia ejecuta un proceso secuencial para obtener los diseños conceptuales, preliminares y detallados de las piezas y los prototipos, mediante el empleo de diferentes *softwares* de diseño, procesamiento y simulación de piezas de altas prestaciones y características, a saber: Solidworks, Ansys, Design X, Catia, SolidEdge, Altium y Abaqus.

Así mismo, se desarrolla un proceso de ingeniería previo, verificando y validando cada uno de los diseños para la fabricación de los prototipos mediante manufactura aditiva, un proceso importante que se puede desarrollar en corto tiempo, con un gasto mínimo de recursos, y obtener desarrollos eficientes y contundentes. Para lo anterior, se cuenta con diferentes impresoras de manufactura aditiva (*3D printing*) que permiten ofrecer múltiples soluciones según el requerimiento planteado. Estas son: Markforged Mark Two (impresora de alta calidad con refuerzo en materiales compuestos); ProtoLab (impresora de altas prestaciones para prototipado rápido en materiales como ABS, PLA, TPU, etc.); SnapMaker 3en1 (impresora de tamaño pequeño con capacidad de realizar tres procesos: impresión, corte láser y mecanizado); y Mcor Iris (impresora de prototipado en papel). Una tercera herramienta es la ingeniería inversa, que complementa los procesos anteriores, se compone de un escáner 3D industrial de alta precisión y su respectivo *software* de posprocesamiento, que permite reducir los tiempos de diseño y la obtención de prototipos funcionales con alto grado de detalle.

2.2. Sistema electromecánico

Un sistema electromecánico es todo aquel que posee la capacidad para convertir un flujo de energía eléctrica en energía mecánica, o también puede ser descrito como aquel sistema mecánico cuyo funcionamiento requiere electricidad; es el caso específico de los motores como principal fuente de propulsión y sustentación de los RPAS de ala rotatoria. Los motores eléctricos están constituidos por dos elementos: 1) un estator y 2) un rotor (Nüesch *et al.*, 2014). Cuando se habla del

estator, se hace referencia a la sección del motor que no gira, conformada por imanes que inducen polos magnéticos y un embobinado de cobre por donde circula la corriente eléctrica; mientras el rotor es la parte interna del motor que gira a gran velocidad, se apoya en cojinetes de rozamiento (denominados baleros) y siempre se mantiene un espacio constante rotor-estator (denominado entrehierros). El movimiento del rotor es estrictamente dependiente del número de puntos magnéticos (imanes) que tenga el estator (Tiseira *et al.*, 2022; Xie *et al.*, 2022)

El funcionamiento de estos motores eléctricos se da mediante el paso de un flujo de corriente eléctrica, que va a través de un material conductor (por lo general, un embobinado de cobre), y tras la interacción con los imanes del estator, lleva a la formación de campos y polos magnéticos. Posteriormente, por acción de polos opuestos se induce al movimiento del rotor (eje interno), en sentido contrario a la bobina o imán externo (estator), dando lugar al movimiento de rotación de las hélices (Calcabrini *et al.*, 2015; Eqbal *et al.*, 2021; Fernández y Gutiérrez, 2016; Lobo *et al.*, 2021)

Los RPAS de tipo multirrotor, en general, emplean motores tipo Brushless, de modo que el cambio de la polaridad no está dado por acción de las escobillas, sino que son eléctricamente conmutados por interruptores. Esto ofrece algunas ventajas técnicas y de funcionamiento, como la reducción de fricción, ruido y temperatura, que se ven reflejadas en una relación peso-potencia superior a la utilizada por los motores con escobillas y en una eficiencia energética mayor al 80%; además, son alimentados por una fuente de corriente continua (Calcabrini *et al.*, 2015; Fernández y Gutiérrez, 2016).

La elección de los motores para los VANT se debe realizar teniendo en cuenta la relación empuje/peso, eficiencia, consumo energético, el kv y los usos que tendrá la aeronave. El valor de kv hace referencia a la constante de velocidad por unidad de voltaje o también puede definirse como el aumento de RPM del motor cuando la tensión sube un voltio. De tal manera, los motores con un kv pequeño son motores con un menor consumo energético y están recomendados para mover hélices de grandes dimensiones; por el contrario,

los motores de kv alto emplean un mayor amperaje, son indicados para mover hélices pequeñas y se emplean en aeronaves con altos requerimientos de velocidad (Villaseñor, 2016).

Aunque el kv ofrece un valor cercano a las características operacionales del motor, se trata de un valor teórico calculado en laboratorio sin tener en consideración el peso o los entornos reales a los que se verá sometido; resulta necesario tener un parámetro adicional para la elección del motor, como el tamaño (Norhisam *et al.*, 2010). Los motores eléctricos pueden clasificarse acorde a su tamaño, que normalmente se indica con cuatro dígitos AABB, donde AA es el diámetro del estator y BB es la altura del estator, ambos valores medidos en milímetros. Al incrementar las magnitudes del estator en altura o diámetro, aumenta el volumen del motor, los imanes y el embobinado que lleva a un incremento en el empuje del motor (Park *et al.*, 2015).

En la tabla 3, se relacionan las especificaciones técnicas de funcionamiento de cuatro motores comerciales de diferentes tamaños. La selección del tamaño de los motores se hizo teniendo en cuenta el tamaño de la hélice más grande sugerida para el motor, el empuje máximo generado y la batería, en busca de evidenciar los cambios de las especificaciones técnicas a los que llevan variaciones en las magnitudes de diámetro y altura del estator. En todos los casos, se tuvo en cuenta la casa fabricante EMAX^R, valiéndose de la amplia información técnica que ofrece de sus motores y su posición en el mercado (tabla 3).

Tabla 3.
Especificaciones técnicas de motores acorde a su tamaño

	Tamaño	kv	Hélice	Empuje (g)	Batería
a	5210	190	18*5,5	3460	6S
b	4008	380	15*5,5	1550	6S
c	3515	650	10*3,8	1200	5S
d	2808	660	10*4,5	950	4S

Fuente: elaboración propia.

La tabla 3 evidencia la relación directamente proporcional del tamaño del motor y el empuje máximo que puede ejercer, así como la relación inversamente

proporcional entre el kv y el tamaño de la hélice. En las filas a y b de la tabla 3, se puede observar que, aunque la fuente de alimentación para ambos casos es una batería 6S, algunos parámetros como el empuje y el tamaño de la hélice tienen una amplia diferencia en cuanto a magnitudes. En el caso de las filas c y d, aunque el kv y el tamaño de la hélice es semejante, el empuje resultante es diferente y se relaciona con el tamaño del motor.

Como se evidencia en la tabla 3, existe una relación estrecha entre la fuente de alimentación (batería) y el funcionamiento adecuado del motor. Las fuentes de poder utilizadas en los RPAS son muy variadas, pero se deben tener en cuenta, así como el tiempo en el que pueden ser empleadas sin generar residuos o efectos adversos en el entorno. Las baterías, en este caso, han tomado un papel fundamental frente al almacenamiento y el uso de la energía, desde su producción a escala por Sony en 1991 (Kazimierski, 2018). Estas pueden estar constituidas por componentes como: plomo-ácido, níquel-cadmio, zinc-bromo, sodio-azufre, iones litio y vanadio (Da Silva Lima *et al.*, 2021). Además, su uso resulta ventajoso en relación con su capacidad energética y tiempo de vida útil, frente a herramientas que son dependientes de la disponibilidad de otros recursos, que algunas veces son de especificidad geográfica, factor que no es conveniente para la producción descentralizada de energía (Ibrahim *et al.*, 2008).

A su vez, la ergonomía de las baterías ha permitido el desarrollo de múltiples tecnologías de tamaño reducido. Es el caso de las baterías basadas en el ion litio, uno de los átomos más livianos del sistema periódico y cuyas propiedades como baja electronegatividad y electroafinidad le permiten una movilidad del electrón en su capa más externa, que favorece los procesos de óxido-reducción durante la carga y descarga de la batería ofreciéndole un alto valor electroquímico (Evarts, 2015). Aunque el ion litio posee un potencial de reducción y una capacidad energética menores a las de su forma metálica, ofrece mayor estabilidad térmica y más ciclos de recarga (Parker *et al.*, 2017). Así mismo, estas baterías poseen alta eficiencia energética, efectos de memoria bajos y densidad de energía

adecuada para sistemas de almacenamiento de energía con mayor capacidad, y para sistemas y dispositivos eléctricos y electrónicos (Dos Reis *et al.*, 2021).

En el área de las baterías de ion litio, uno de los avances relativamente recientes son las celdas de litio-polímero (en adelante, LiPo). Estas baterías son empaquetadas de forma laminar y en tamaño incluso menor a las de las baterías de ion Li⁺ convencional. La diferencia en este tipo de baterías está en el tipo de electrolito presente en la celda electroquímica; para el caso de las baterías LiPo, este electrolito puede ser un material poroso o un gel conductor, siendo este último el más acogido y disminuyendo el riesgo de derrame. Aunque el costo de producción y manufactura de las baterías LiPo es más elevado que el de las baterías convencionales, son flexibles y ofrecen una mayor capacidad de descarga, factor que se refleja en una mayor capacidad operativa del RPAS (Venkatasetty y Jeong, 2002).

Las baterías LiPo no resultan ventajosas frente a la cantidad de ciclos de recarga a los que se pueden exponer. Una batería con manejo adecuado puede permitir hasta 300 ciclos de recarga, y un manejo inapropiado conduce a un tiempo de vida incluso menor de 50 ciclos; mientras que las celdas de ion Li⁺ pueden ofrecer hasta 1000 ciclos de recarga. De tal manera, el manejo en los ciclos de carga y descarga de las celdas LiPo es minucioso, debido a que el voltaje de ruptura del gel empleado como electrolito está muy cercano al voltaje de carga total de la batería, así que una sobrecarga o fluctuaciones en la energía conllevan daños irreversibles en los componentes de las celdas de la batería. Bajo esta premisa, las baterías de LiPo que manejan varias celdas electroquímicas requieren un control electrónico en su carga que impida el estrés o la sobrecarga en alguna de las celdas (Moore y Schneider, 2001). Esto último aunado a su inestabilidad, envejecimiento y potencial peligro a explotar en caso de que los electrodos se toquen.

2.3. Sistema de control

Este sistema está constituido especialmente por una controladora de vuelo, un controlador electrónico de

velocidad (ESC-Electronic Speed Controller) y los sensores. La controladora de vuelo posee un algoritmo de control para operar basado en la información que recibe de los sensores, como la brújula, el magnetómetro y el giróscopo, que se encuentran presentes en la Unidad de Medida Inercial (IMU-Inertial Measurement Unit). La IMU es un dispositivo electrónico que detecta la tasa de aceleración, la velocidad angular y los cambios del campo magnético, utilizando una combinación de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro (Sigalos *et al.*, 2019).

Adicionalmente, la controladora de vuelo recibe las señales del centro de control o ejecuta los comandos para rutas programadas, enviando la información al ESC para el comando del movimiento de los motores, y compensar y equilibrar el sistema. El ESC es el encargado de controlar la velocidad y la dirección del motor variando constantemente el flujo eléctrico proveniente de la batería, efecto que permite acelerar y desacelerar los motores y ejecutar los movimientos del RPA como *pitch*, *roll* y *yaw* (Garijo *et al.*, 2009; Hejduk, 2015), definidos como:

- **Pitch** (cabeceo): es un movimiento del RPAS que consiste en la inclinación del frente de la aeronave, ya sea hacia arriba o hacia abajo, y en conjunto con el empuje de los motores permite el desplazamiento de la aeronave hacia adelante o hacia atrás.
- **Roll** (alabeo): este movimiento consiste en la rotación de la aeronave sobre su eje longitudinal, facilitando el movimiento izquierda-derecha.
- **Yaw** (guiñada): movimiento de rotación sobre el eje vertical y el centro de gravedad de la aeronave.

Aunque la controladora de vuelo y el controlador electrónico de velocidad cumplen un papel fundamental en el funcionamiento del RPA, se deben tener en cuenta los sensores con los que está equipada la aeronave. Entre los principales sensores se tienen:

Acelerómetro. Este sensor permite una medición precisa de la aceleración del RPAS cuando se llevan a cabo movimientos de la aeronave en cualquier

dirección sobre un eje específico. Un inconveniente de este sensor es que estima la aceleración de manera general, es decir, involucra en esta medida el valor de la gravedad (Pozo, 2010).

- **Giroscopio.** Es un dispositivo empleado en la navegación inercial, encargado de medir la variación del ángulo de movimiento de la aeronave en función del tiempo, mientras la aeronave se encuentra sometida a una velocidad angular o en rotación. Su uso en los RPAS consiste en la medición de los ángulos para ejecutar los movimientos de *pitch*, *roll* y *yaw* (Pozo, 2010).
- **Magnetómetro.** Provee una señal eléctrica que es proporcional al vector del campo geomagnético, lo cual permite la orientación de la aeronave en sentido de los puntos cardinales y es semejante a la acción de la brújula.
- **Barómetro.** Permite determinar la altura a la que se encuentra la aeronave respecto a la superficie, con base en la relación de proporcionalidad inversa entre las variables de altura y presión atmosférica (Esposito *et al.*, 2021).

A su vez, los RPA utilizan un tipo especial de sensores para realizar la navegación y garantizar un vuelo seguro, a saber, los sensores de proximidad que permiten detectar la presencia de un objeto a cierta distancia y se basan en un emisor que genera una señal y el tiempo que tarda en reflejarse en una superficie (Bernad, 2019). Existen distintos tipos que van desde cámaras hasta sistemas electromagnéticos, y los más utilizados son:

- **Sensor infrarrojo:** El funcionamiento de este sensor se basa principalmente en la emisión de un haz de luz con longitud de onda en la región infrarroja, que al chocar con una superficie se ve reflejada y es detectada por el sensor. Este tipo de sensores tiene desventajas como la distancia, los límites de detección y la sensibilidad en entornos iluminados, factores que limitan el tiempo de reacción frente a una posible colisión (Bernad, 2019).

- **Sensor Lidar:** (Light Detection and Ranging). Estos sensores están basados en la teledetección por láser, operan emitiendo una radiación laser sobre una superficie, y mediante un receptor se estima el tiempo que tarda el láser en reflejarse sobre la superficie y volver a su fuente, tiempo que permite identificar la proximidad con objetos que puedan interponerse en el trayecto del RPAS (Thakur, 2016).

Algunos trabajos reportados en la literatura evidencian la importancia de los sistemas de sensores de un RPAS, especialmente en la prevención de desastres o en procedimientos de mitigación, preparación, respuesta y recuperación, tal como: evaluación de vulnerabilidades y modelización de riesgos; supervisión de sistemas de barrera, desviación y retención; detección de peligros; suministro de datos de referencia, búsqueda y rescate; evacuación; evaluación rápida de daños e infraestructura crítica; evaluación de daños en profundidad; recuperación de infraestructura; recuperación de vivienda, y seguimiento ambiental (Kucharczyk y Hugenholtz, 2021). Adicionalmente, los autores reportan que cerca del 70% de las aeronaves utilizadas en estos procedimientos son sistemas multirrotor con autonomía de vuelo cercana a los 30 min y equipadas con cámaras comerciales RGB (Red Green Blue) (Gonçalves *et al.*, 2022).

Así mismo, el uso combinado de los sensores que equipan el RPAS da lugar a un sistema de detección y posicionamiento altamente eficiente. Deilamsalehy y Havens (2016) reportaron un procedimiento para la determinación de posición y orientación para una plataforma en movimiento en un entorno tridimensional (3D), mediante la fusión de sensores múltiples para una estimación precisa y para compensar las deficiencias individuales de los sensores. Se emplearon sensores con la capacidad de localización 3D a fin de estimar la posición completa de un vehículo aéreo no tripulado, y se emplearon datos de detección de luz 2D tipo Lidar, que es capaz de estimar una posición en un plano 2D, y junto con los datos de la cámara y los sensores de inercia, permite determinar una posición tridimensional bastante precisa (Deilamsalehy y Havens, 2016).

3. Aplicaciones militares de los RPAS

A escala global, Estados Unidos ha sido pionero en el uso de RPAS en conflictos bélicos, como en la denominada “guerra contra el terrorismo”, patrocinada por el gobierno de George Bush desde 2001 y demás implicaciones que han surgido alrededor de este conflicto (Batiz, 2014).

De acuerdo con Scopus, las investigaciones relacionadas con las aplicaciones de RPAS en entornos militares han tenido su mayor actividad en el periodo 2014-2017. Esto podría estar relacionado, para el caso de Estados Unidos, con la ampliación de la actividad militar a otras zonas de conflicto como Pakistán, Afganistán, Somalia, Libia y Yemen en las conocidas “guerras sucias”. Diferentes autores han reportado que en dichos países para 2012 se habían eliminado cerca del 70% de los líderes de Al Qaeda empleando ataques con RPAS y para 2015 habían sido ejecutados cerca de 500 ataques con RPAS, con 4000 bajas enemigas (Batiz, 2014; Tello, 2018).

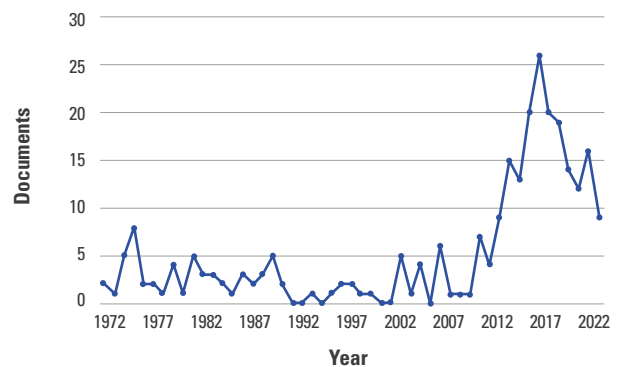


Figura 6. Relación de los documentos publicados por año para aplicaciones de RPAS en actividades militares

Fuente: tomado de Scopus

De tal manera, la inclusión de RPAS ha permitido modificar el planeamiento y el desarrollo de las operaciones militares, especialmente en el área de la estrategia, tomando nuevas acciones para controlar la actividad del enemigo; incluso, se ha reportado que desde 2004 Estados Unidos no contempla el desarrollo de operaciones militares sin el empleo de RPAS (Jaimes y Cárdenas, 2019). Un caso puntual es la situación de

Pakistán, donde se ha evidenciado que la inclusión de RPAS en los procedimientos militares favorece la ejecución de una estrategia que involucra la ruptura y la destrucción del sistema organizacional del enemigo (Bergen y Tiedemann, 2011; Johnston y Sarbahi, 2016). La ruptura como primer mecanismo de ataque es la interrupción de las actividades del enemigo, posibilitando la reducción de la capacidad operacional y el control de un territorio, mediante la selección de objetivos y la ejecución de ataques precisos de letalidad reducida (Aslam, 2011; Johnston y Sarbahi, 2016). La destrucción como segundo mecanismo hace referencia al ataque a figuras de autoridad y liderazgo dentro de la organización, lo cual la deteriora, debido a que una transición de mando en el interior de estas organizaciones resulta compleja, especialmente porque son violentas, clandestinas y carecen de legitimidad (Price, 2012).

Un caso reciente de las aplicaciones de RPAS en operaciones militares es el conflicto entre Ucrania y Rusia, que ha sido denominado la ‘primera guerra mundial con tecnología’ y en el que los sistemas aéreos remotamente tripulados han demostrado una capacidad determinante para la reducción de bajas de los integrantes de las diferentes instituciones militares y para la optimización de los equipos, aeronaves, vehículos, personal y armamento (Collins, 2018). En este conflicto, se ha destacado la capacidad para equipar a los RPAS con sensores de alta sensibilidad y una estructura sólida en las telecomunicaciones, articulando múltiples fuentes de información con un sistema de selección y eliminación de objetivos en tiempo real de operación (Angevine *et al.*, 2019).

En Latinoamérica, las implicaciones de los RPAS en las operaciones han estado relacionadas con actividades de reconocimiento, seguridad, búsqueda y salvamento de personal, pero se espera su aplicación en actividades operativas de mayor exigencia como la entrega de armamento, especialmente por el incremento en las importaciones de estas aeronaves y las crecientes iniciativas de fabricación de RPAS abordadas por diferentes países latinoamericanos (Ortega, 2015).

En general, los RPAS a escala global, regional y nacional han apoyado el desarrollo de conflictos bélicos

mitigando sustancialmente la pérdida de vidas humanas y encaminando a la civilización en una nueva forma de hacer la guerra. Pero, aunque es una tecnología que tiene diversidad de aplicaciones, aún se requiere el desarrollo de capacidades y autonomías superiores, motivo por el cual los países invierten recursos importantes en la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías con aplicaciones en los diferentes teatros de operaciones, que en últimas pretenden alcanzar de manera veloz la deshumanización de la guerra.

Conclusiones

La búsqueda bibliográfica en Scopus evidenció la gran cantidad de investigaciones realizadas en el área de los sistemas aéreos remotamente tripulados. Se identificó a Estados Unidos, Italia y España como los países con mayor aporte en el desarrollo y la investigación en temas relacionados a RPAS; además de una creciente productividad en la investigación de aplicaciones militares, tema en el cual los mayores aportes fueron realizados por Estados Unidos y con patrocinio de entidades militares como la Fuerza Aérea en cada país.

El análisis de los datos mediante el *software* viewer permitió identificar tres puntos de interés para abordar la investigación de los sistemas aéreos remotamente tripulados, que son: 1) la clasificación y las regulaciones; 2) los sistemas que confirman un RPAS; y 3) las aplicaciones, que en este caso se orientaron con especial interés al entorno militar y las ventajas que ofrecen en el desarrollo de operaciones militares.

Se logró evidenciar: i) el efecto sinérgico del sistema estructural, el sistema electromecánico y el sistema de control, ii) la relación de proporcionalidad entre el tamaño del motor y el empuje máximo ejercido, y iii) la proporcionalidad inversa del kv del motor y el tamaño de la hélice, parámetros que son claves al momento de optimizar los tiempos de autonomía o alcance de los RPAS en el marco de nuevos proyectos de investigación y desarrollo.

Por último, los RPAS han sido partícipes del desarrollo de operaciones militares en el marco de conflictos

de distinta índole, poniendo en evidencia muchas de las ventajas de optimización de recursos y operación al destacar su desempeño, capacidades y versatilidad de aplicaciones. Esta realidad ha favorecido la tecnificación del teatro de operaciones, la ejecución de ataques certeros y precisos, y, sobre todo, la protección del personal civil y militar que se ve inmerso en los conflictos.

Referencias

- Acosta, H., Fuentes, A., Herrera, E. y Márquez, A. (2020). RPAs, aeronaves pilotadas a distancia para contribuir a la investigación de delitos y accidentes. *Semilla Científica*, 1(1), 488-502. <https://repositorio.umecit.edu.pa/bitstream/handle/001/4740/Revista-Semilla-Cient%C3%ADfica-489-503%20-%20copia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Addati, G. A. y Pérez Lance, G. (2014). *Introducción a los UAV, drones o VANT de uso civil* [en línea]. Documentos de Trabajo, Universidad del Cema. <https://ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/551.pdf>
- Almeida, A. (2006). Perspectivas de la seguridad aérea en el siglo XXI. *Ciencia y Poder Aéreo*, 1(1), 22-24. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.94>
- Altice, F. L., Bromberg, D. J., Dvoriak, S., Meteliuk, A., Pykalo, I., Azbel, L., Islam, Z. y Madden, L. M. (2022). Extending a Lifeline to People with HIV and Opioid Use Disorder During the War in Ukraine. *The Lancet Public Health*, 7(5), e482-e484. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(22\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(22)00083-4)
- Angevine, R., Warden, J. K., Keller, R., & Frye, C. (2019). *Learning Lessons from the Ukraine Conflict* [en línea]. Institute for Defense Analyses. <https://nsiteam.com/learning-lessons-from-the-ukraine-conflict/>
- Aslam, M. W. (2011). A Critical Evaluation of American Drone Strikes in Pakistan: Legality, Legitimacy and Prudence. *Critical Studies on Terrorism*, 4(3), 313-329. <https://doi.org/10.1080/17539153.2011.623397>
- Ávila-Herrera, C. C. (2017). Drones vs. aeronáutica civil: licencias para pilotos y su procedimiento. *Novum Jus: Revista Especializada en Sociología Jurídica y Política*, 11(2), 135-165. <https://novumjus.ucatolica.edu.co/article/view/1518>
- Batiz, R. M. (2014). *Drones: la muerte por control remoto*. Ediciones Akal.
- Bergen, P. y Tiedemann, K. (2011). Washington's Phantom War: The Effects of the US Drone Programs in Pakistan. *Foreign Affairs*, 90(4), 12-18. <https://www.jstor.org/stable/23039602>
- Bernad Catalá, J. X. (2019). *Diseño y fabricación de dron con sistema de seguridad anticolidión mejorado*. Universitat Politècnica de València.
- Bright, J., Suryaprakash, R., Akash, S. y Giridharan, A. (2021). *Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1012/1/012019>
- Cadavid, E. S. (2018). Los Hermes 900 y 450 de la Fuerza Aérea Colombiana. *Tecnología Militar*, 40(1), 58-59.
- Calabrini, A., Carrano, J. I., Ubeira, J. I. y Venturo, N. (2015). *Controladora electrónica para multirrotores* (tesis de grado, Instituto Tecnológico de Buenos Aires).
- Calderón, Y. (2020, 4 de enero). Así es el MQ-9 Reaper, el supuesto dron con el que EE.UU. atacó a Soleimani. *La FM*. <https://www.lafm.com.co/internacional/asi-es-el-mq-9-reaper-el-supuesto-dron-con-el-que-eeuu-ataco-soleimani>
- Caño, A. (2021). La guerra teledirigida de EE.UU. *El País*. https://elpais.com/internacional/2011/09/30/actualidad/1317401034_480630.html
- Collins, L. (2018). A New Eastern Front: *What the US Army Must Learn from the War in Ukraine* [en línea]. Association of the United States Army. <https://www.ousa.org/articles/new-eastern-front-what-us-army-must-learn-war-ukraine>
- Da Silva Lima, L., Quartier, M., Buchmayr, A., Sanjuan-Delmás, D., Laget, H., Corbisier, D., Mertens, J. y Dewulf, J. (2021). Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries and Vanadium Redox Flow Batteries-Based Renewable Energy Storage Systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101286>
- Deilamsalehy, H. y Havens, T. C. (2016). *Sensor fused three-dimensional localization using IMU, camera and LiDAR* [ponencia]. 2016 IEEE SENSORS. Octubre 30-Noviembre 3 de 2016. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808523>
- Dos Reis, G., Strange, C., Yadav, M. y Li, S. (2021). Lithium-Ion Battery Data and Where to Find It. *Energy and AI*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100081>
- Eqbal, M., Fernando, N., Marino, M. y Wild, G. (2021). Development of a Turbo Electric Distribution System for Remotely Piloted Aircraft Systems. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 13. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1209>

- Esposito, M., Crimaldi, M., Cirillo, V., Sarghini, F. y Maggio, A. (2021). Drone and Sensor Technology for Sustainable Weed Management: A Review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 1-11. <https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-021-00217-8>
- Evarts, E. C. (2015). Lithium Batteries: To the Limits of Lithium. *Nature*, 526(7575), S93-S95. <https://www.nature.com/articles/526S93a#:~:text=Researchers%20are%20developing%20a%20type,powerful%20microcomputer%20in%20your%20pocket.>
- Farrow, A. (2016). La guerra con drones como instrumento militar de la estrategia antiterrorista [en línea]. *Air & Space Power Journal*. https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ_Spanish/Journals/Volume-28_Issue-4/2016_4_02_farrow_s.pdf
- Fernández Lozano, J. y Gutiérrez Alonso, G. (2016). Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29(1), 89-105. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6806890>
- Fulghum, D. A. (2002). Global Hawk uavs to Remain Unarmed. *Aviation Week & Space Technology*, 156(15), 20-20.
- Gallo, T. (2022). *Arming Ukraine, Understanding the Benefits and Risks of Arms Transfers* [en línea]. Policy Paper CIFE, (127). https://www.cife.eu/Ressources/FCK/files/publications/policy%20paper/2022/CIFE_PP_Gallo_Arming%20Ukraine%20Understanding%20the%20Benefits%20and%20Risks%20of%20Arms%20Transfers.pdf
- García, R. (2011, 23 de diciembre). *Aeronaves no tripuladas en Colombia: el ScanEagle* [en línea]. Infomil. <https://www.webinfomil.com/2011/12/aeronaves-no-tripuladas-en-colombia-el.html?m=1>
- Garijo Verdejo, D., López Pérez, J. I. y Pérez Estrada, I. (2009). *ssi: Control de un vehículo aéreo no tripulado* [en línea]. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/9477/1/documentacion.pdf>
- Gonçalves, R. M., Holanda, T. F., Queiroz, H. A. A., Sousa, P. H. G. O. y Pereira, P. S. (2022). Exploring RPAS Potentiality Using a RGB Camera to Understand Short Term Variation on Sandy Beaches. *CATENA*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105949>
- Goyne, R. (2019). Technology Scaneagle: Australia's Eye in the Sky over Afghanistan. *Sabretache*, 60(3), 63-123. <https://search.informit.org/doi/10.3316/INFORMIT.719536522457576>
- Hejduk, M. (2015). *The Use of Unmanned Aerial Vehicles-Drones Supply Courier*. University of Wrocław.
- Hernández, C. S. (2009). Las nuevas doctrinas militares, el espionaje militar aéreo y la tecnología en la guerra (2001-2008): de Hanoi a Bagdad II. *Nómadas: Critical Journal of Social and Juridical Sciences*, (21), 41-68 <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4732006>
- Hernández-Narváez, L. D. (2022). *Regulación jurídica de los drones: caso colombiano* (tesis de grado, Universidad Santo Tomás). Repositorio institucional Usta. <http://hdl.handle.net/11634/42887>
- Ibrahim, H., Ilinca, A. y Perron, J. (2008). Energy Storage Systems — Characteristics and Comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221-1250. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.023>
- Isorna Llerena, F., Fernández Barranco, A., Bogeat, J. A., Segura, F. y Andújar, J. M. (2020). Converting a Fixed-Wing Internal Combustion Engine RPAS into an Electric Lithium-Ion Battery-Driven RPAS. *Applied Sciences*, 10(5). <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/5/1573>
- Jaimes Grimaldos, S. D. y Cárdenas Lancheros, E. A. (2019). *Analizar la tecnología de realidad aumentada (RA) y virtual (RV) en la instrucción de pilotos en sistema no tripulados del Comando Aéreo de Combate n.º 2 de Apiay Villavicencio* (tesis de especialización, Universidad Nacional Abierta y a Distancia). Repositorio institucional Unad. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/34472>
- Johnston, P. B. y Sarbahi, A. K. (2016). The Impact of US Drone Strikes on Terrorism in Pakistan. *International Studies Quarterly*, 60(2), 203-219.
- Kabierschke Colonia, M. (2004). Caracterización y diseño de hélices y rotores con alta velocidad de punta.
- Kardasz, P., Doskocz, J., Hejduk, M., Wiejkut, P. y Zarzycki, H. (2016). Drones and Possibilities of their Using. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 6(3), 1-7.
- Kazimierski, M. A. (2018). Almacenamiento energético frente al inminente paradigma renovable: el rol de las baterías ion-litio y las perspectivas sudamericanas. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*(23), 108-132.
- Kucharczyk, M. y Hugenholtz, C. H. (2021). Remote Sensing of Natural Hazard-Related Disasters with Small Drones: Global Trends, Biases, and Research Opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112577. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112577>
- Leishman, G. J. (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge University Press.

- Lobo, D., Patel, D., Morainville, J., Shekhar, P. y Abichandani, P. (2021). Preparing Students for Drone Careers Using Active Learning Instruction. *IEEE Access*, 9, 126216-126230. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110578>
- López Crespo, J. (2012). *Módulo 17 Hélices*. Ediciones Paraninfo.
- Moore, S. W. y Schneider, P. J. (2001). *A Review of Cell Equalization Methods for Lithium-Ion and Lithium-Polymer Battery Systems*. SAE Technical Paper 2001-01-0959. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0959>
- Moreno-Licon, D. C. (2012). El derecho internacional frente a la deshumanización de la guerra en el conflicto armado interno en Colombia (tesis de grado, Universidad CES). Repositorio institucional Universidad CES. <http://hdl.handle.net/10946/1924>
- Nicol, C. E., Macnab, C. J. B. y Ramírez Serrano, A. (2008). *A Robust Adaptive Neural Network Control for a Quadrotor Helicopter* [ponencia]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Mayo 4-7 de 2008. Niagara Falls, Canadá. <http://doi.org/10.1109/CCECE.2008.4564736>.
- Norhisam, M., Nazifah, A., Aris, I., Wakiwaka, H. y Nirei, M. (2010). *Effect of Magnet Size on Torque Characteristic of Three Phase Permanent Magnet Brushless DC Motor* [ponencia]. IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). Diciembre 13-14 de 2010. Kuala Lumpur, Malaysia. <http://doi.org/10.1109/SCORED.2010.5704019>
- Nüesch, T., Elbert, P., Flankl, M., Onder, C. y Guzzella, L. (2014). Convex Optimization for the Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Considering Engine Start and Gearshift Costs. *Energies*, 7(2), 834-856. <https://doi.org/10.3390/en7020834>
- Nvss, S., Esakki, B., Yang, L.-J., Udayagiri, C. y Vepa, K. S. (2022). Design and Development of Unibody Quadcopter Structure Using Optimization and Additive Manufacturing Techniques. *Designs*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/designs6010008>
- Ortega Sánchez, J. A. (2015). *Estudio de la prospectiva tecnológica y análisis de patentes para identificar las necesidades específicas del sector civil de los sistemas aéreos no tripulados*. Quetzal Aeroespacial. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/209412/35-0432_Complemento_del_programa_integral_aeroespacial_para_incrementar_la_competitividad_Parte_1.pdf
- Páez López, G. A. (2020). Herramienta de entrenamiento basada en funcionamiento neuropsicológico y fisiológico en operadores de Aeronaves Remotamente Tripuladas Scan Eagle de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 15(1), 39-52. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.658>
- Park, Y.-U., Cho, J.-H. y Kim, D.-K. (2015). Cogging Torque Reduction of Single-Phase Brushless DC Motor with a Tapered Air-Gap using Optimizing Notch Size and Position. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 4455-4463. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2453131>
- Parker, J. F., Chervin, C. N., Pala, I. R., Machler, M., Burz, M. F., Long, J. W. y Rolison, D. R. (2017). Rechargeable Nickel – 3D Zinc Batteries: An Energy-Dense, Safer Alternative to Lithium-Ion. *Science*, 356(6336), 415-418. <https://doi.org/10.1126/science.aak9>
- Pozo Espín, D. F. (2010). *Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro y giroscopio* (tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional). Repositorio institucional EPN. https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9877&shelfbrowse_itemnumber=10256
- Price, B. C. (2012). Targeting Top Terrorists: How Leadership Decapitation Contributes to Counterterrorism. *International Security*, 36(4), 9-46. <https://www.jstor.org/stable/41428119>
- García Ramírez, A. y Tarazona Caro, S. *Rediseño de ingeniería de una hélice de paso variable para un aerodeslizador ruso* (tesis de grado, Universidad de San Buenaventura). Repositorio institucional USB. <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/36633.pdf>
- Reineman, B. D., Lenain, L. y Melville, W. K. (2016). The Use of Ship-Launched Fixed-Wing UAVs for Measuring the Marine Atmospheric Boundary Layer and Ocean Surface Processes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(9), 2029-2052. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0019.1>
- Romero Huertas, J. C. (2019). *Determinación de los valores de arrastre y sustentación de las superficies alares de un dron de ala fija* (tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional). Repositorio institucional EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1794>
- Serrano, J. R., García-Cuevas, L. M., Bares, P. y Varela, P. (2022). Propeller Position Effects over the Pressure and Friction Coefficients over the Wing of an UAV with Distributed Electric Propulsion: A Proper Orthogonal Decomposition Analysis. *Drones*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/drones6020038>
- Sigalos, A., Papoutsidakis, M., Chatzopoulos, A. y Piromalis, D. (2019). Design of a Flight Controller and Peripherals for a Quadcopter. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(5), 463-470. <http://doi.org/10.33564/ijeast.2019.v04i05.067>

- Sizza Moreno, J. F. (2014). Simuladores para entrenamientos en la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 9(1), 135-141. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.142>
- Stehr, N. J. (2015). Drones: The Newest Technology for Precision Agriculture. *Natural Sciences Education*, 44(1), 89-91. <https://doi.org/10.4195/nse2015.04.0772>
- Thakur, R. (2016). *Infrared Sensors for ADAS and Beyond – LiDAR/ Infrared Camera* [ponencia]. Conference TU Automotive - ADAS and Autonomous.
- Tello, A. P. (2018). Drones. *Relaciones Internacionales*, 27(55), 245-268. <https://doi.org/10.24215/23142766e050>
- Tiseira Izaguirre, A. O., García-Cuevas González, L. M., Quintero Igeño, P. y Varela Martínez, P. (2022). Series-Hybridisation, Distributed Electric Propulsion and Boundary Layer Ingestion in Long-endurance, Small Remotely Piloted Aircraft: Fuel Consumption Improvements. *Aerospace Science and Technology*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107227>
- Venkatasetty, H. V. y Jeong, Y. U. (2002). *Recent Advances in Lithium-Ion and Lithium-Polymer Batteries* [ponencia]. Annual Battery Conference on Applications and Advances. Enero 18 de 2022. Long Beach, Canadá. <http://doi.org/10.1109/BCAA.2002.986391>
- Villaseñor, E. B. (2016). Cálculo de variables de control PID para drones cuadcopter. *Reaxion*, 3(1). http://reaxion.utleon.edu.mx/Art_Calculo_de_variables_de_control_PID_para_Drones_Cuadcopter.html
- Xie, Y., He, S., Savvaris, A., Tsourdos, A., Zhang, D. y Xie, A. (2022). Convexification in Energy Optimization of a Hybrid Electric Propulsion System for Aerial Vehicles. *Aerospace Science and Technology*, 123. <http://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107509>
- Zhu, P., Wen, L., Bian, X., Ling, H. y Hu, Q. (2018). Vision Meets Drones: A Challenge. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.07437>